



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

先进的结构损伤 检测理论与应用

**Advanced Structural Damage Detection: from
Theory to Engineering Applications**

Tadeusz Stepinski

[波]

Tadeusz Uhl 主编

Wieslaw Staszewski

丁克勤 林树青 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于本书

本书全面回顾了各种监测技术的最新进展及其在结构健康监测 (SHM) 中的应用, 全书共分10章: 第1章引论, 第2章介绍弹性波在平面结构中传播的数值模拟方法, 第3章介绍在裂纹形态不确定和系统变化时, SHM系统辅助探测概率模型(MAPOD)的应用, 第4章提供了非线性声学应用于SHM的当前状况, 第5章讨论用于产生和传感表面波和兰姆波的压电传感器, 第6章给出了机电阻抗 (EMI)方法, 第7章回顾了采用传感器阵列选取兰姆波聚焦的方法, 第8章介绍了模态滤波器的理论和应用, 重点关注它们在SHM系统中应用前景, 第9章讨论了在无损评价 (NDE) 和结构健康监测 (SHM) 中使用热成像技术的不同方式, 第10章介绍了基于视觉的监测系统。



国际电气工程先进技术译丛

先进的结构损伤检测理论与应用

Advanced Structural Damage Detection:
from Theory to Engineering Applications

Tadeusz Stepinski
[波] Tadeusz Uhl 主编
Wieslaw Staszewski
丁克勤 林树青 等译



机械工业出版社

本书全面回顾了各种监测技术的最新进展及其在结构健康监测 (SHM) 中的应用。本书强调基本概念、基本原理和典型应用, 并侧重理论方法研究与工程应用的有机结合, 内容涉及弹性波数值模拟、非线性声学、探测概率模型、压电传感技术、模态滤波技术、热成像技术以及基于视觉的监测技术等诸多学科, 充分体现了损伤探测和 SHM 的技术前沿。全书共分 10 章: 第 1 章引论, 第 2 章介绍弹性波在平面结构中传播的数值模拟方法, 第 3 章介绍 SHM 系统辅助探测概率模型的应用, 第 4 章提供了非线性声学在 SHM 中应用的状况, 第 5 章讨论用于产生和传感表面波和兰姆波的压电传感器, 第 6 章给出了机电阻抗 (EMI) 方法, 第 7 章回顾了采用传感器阵列选取兰姆波聚焦的方法, 第 8 章介绍了模态滤波器的理论 and 应用, 第 9 章讨论了在无损评价 (NDE) 和 SHM 中使用热成像技术的不同方式, 第 10 章介绍了基于视觉的监测系统。本书收集了近年来 SHM、损伤探测以及压电传感技术等方面的最新研究成果, 并包括大量相关示例, 内容新颖, 图表清晰, 实用性强。

本书可供从事无损检测、SHM 以及相关传感技术研究的科研人员、工程技术人员使用, 也可供机械和土木工程等领域的本科生和研究生参考。

译者序

结构健康监测 (SHM) 是工程领域中一种跨学科的、创新性的方法,也是近些年来国内外学者和相关从业者十分关注的热点问题,其利用嵌入或粘接到结构上的不同类型传感器,对结构完整性和性能进行监测,而不影响结构本身,也不损害其运行。随着大型工程结构和装备的性能退化和超期服役,如何实时监测结构损伤,动态掌握其健康状态,及时发现并消除安全隐患,避免重特大事故发生,是当前学术界和工程界亟待解决的重大课题。

本书全面回顾了各种监测技术的最新进展及其在结构健康监测 (SHM) 中的应用,内容新颖,图表清晰,实用性强。全书共分 10 章:第 1 章引论,第 2 章介绍弹性波在平面结构中传播的数值模拟方法,第 3 章介绍在裂纹形态不确定和系统变化时,SHM 系统辅助探测概率模型 (MAPOD) 的应用,第 4 章提供了非线性声学应用于 SHM 的当前状况,第 5 章讨论用于产生和传感表面波和兰姆波的压电传感器,第 6 章给出了机电阻抗 (EMI) 方法,第 7 章回顾了采用传感器阵列选取兰姆波聚焦的方法,第 8 章介绍了模态滤波器的理论和应用,重点关注它们在 SHM 系统中应用前景,第 9 章讨论了在无损评价 (NDE) 和结构健康监测 (SHM) 中使用热成像技术的不同方式,第 10 章介绍了基于视觉的监测系统。

本书翻译工作的分工如下:丁克勤研究员负责前言、目录、第 1~4 章、第 8 章、第 9 章;赵娜负责第 5 章;乔松负责第 6 章;李伯华负责第 7 章;陈光负责第 10 章。丁克勤研究员的博士后、研究生陈力、何亚莹、李昕阳、巩建华等分别参加了第 2 章、第 4 章、第 8 章、第 9 章的翻译工作。另外,俞跃参加了第 9 章的部分翻译和校核工作。陶芳泽和丁科负责译稿中的插图和表格的整理工作。林树青研究员负责全书的统一和协调,并对全书进行了最后的校核。

本书的翻译工作得到了机械工业出版社电工电子分社张俊红副社长的大力支持和热情鼓励,在此表示诚挚的感谢!

由于时间仓促和知识的局限性,书中难免有不当和疏忽之处,敬请广大读者不吝赐教。

原 书 前 言

结构健康监测 (SHM) 是工程领域中一种跨学科的、创新性的方法,该方法对结构安全、完整性和性能进行监测,而不影响结构本身,也不损害其运行。SHM 利用嵌入或粘接到结构上的不同类型传感器,来探测损伤的存在、定位、严重程度和结果。

通过采用远程感知和智能材料,SHM 技术集成无损评价 (NDE) 技术构建智能自监测结构,其特征是可靠性增加,寿命延长。SHM 主要应用于性能要求高的系统,传统的现场评估手段成本高、难度大甚至无法实施。

本书由本领域的技术专家编写。通过研读本书,学生、工程师和其他感兴趣的技术人员将会全面了解各种监测技术的最新进展及其在 SHM 中的应用。本书对主要 SHM 技术进行了全面回顾,有利于本领域的深入研究与发展。本书不仅提供了一系列 SHM 技术的理论、原理和可行性研究结果,还提供了一些新颖的数据处理算法,并在实际应用中进行了验证。

本书报告了 MONIT 项目研究成果,该项目由 AGH 科技大学 (AGH-UST) 组织实施,得到了欧洲区域发展基金的支持。本书由 AGH 科技大学 (AGH-UST) 机器人与机电一体化系本领域研究人员编写,共包括 10 章内容。

第 1 章引论,简要概述了 SHM 的思想,解释了其与传统的 NDE 技术的关系,并通过 NDE 和状态监测 (CM) 的内容阐述了 SHM 的跨学科特性。本章还讨论了结构损伤和结构损伤探测方面,概述了 SHM 程序的主要层次,给出了采用整体和局部 SHM 方法的 SHM 系统的结构,最后讨论了 SHM 系统设计过程的相关问题。

第 2 章介绍弹性波在平面结构中传播的数值模拟方法,简要概述了弹性波传播的数值方法,既有理论背景又有实践方面。这些方法包括:有限元方法 (隐式和显式)、谱单元法、有限体积法和有限差分法。本章重点介绍了局部交互模拟法 (Local Interaction Simulation Approach, LISA),它属于有限差分法。近些年来,由于基于图形处理单元 (GPU)

快速演化技术, LISA 被重新发现具有吸引力。文中给出了由 GPU 实现 AGH 科技大学 (AGH - UST) 开发的 LISA, 并采用基准模型案例对其性能进行了说明。

第 3 章介绍在裂纹形态不确定和系统变化时, SHM 系统辅助探测概率模型 (MAPOD) 的应用, 通过采用传感器阵列监测平面结构的数值模拟来研究 SHM 系统相关问题。系统监测可靠性通过采用三维模型进行评估, 模型包括兰姆波在类平板结构传播与不同形态裂纹引起的散射。第 2 章已经介绍了通过采用并行处理技术来对计算机模型进行处理, 这大大加快了模拟时间。本章考虑的裂纹形态指裂纹的位置、方向和大小的变化。

第 4 章提供了非线性声学应用于 SHM 的当前状况。本章首先对含有损伤的弹性材料与非线性有关的物理机制的文献进行了全面综述。考虑了不同的应力 - 应变特征, 详细地给出了接触声学非线性和非线性共振等两个特定现象的影响。文中对不同幅值和频率的两个波被引入到一个损伤结构中将产生混频的原理进行了解释。本章主要部分回顾了损伤探测方法及其应用于金属及玻璃、有机玻璃、混凝土和岩石等复合结构。

第 5 章讨论用于产生和传感表面波和兰姆波的压电传感器。在对传感器设计进行简单回顾后, 本章重点介绍压电复合材料制成的传感器。文中给出了一种新颖的基于宏观纤维复合材料 (MFC) 的压电传感器。与常用的、传统的带电极 MFC 传感器不同, 文中展示的传感器提供了与特定波长相匹配的稀疏交叉指型电极。文中给出了由 MFC 基板制作的交叉指型传感器 (IDT) 的两种不同设计, 并与带密集电极的传统 MFC 传感器进行了数值模拟和实验测试结果比较, 对传统的 MFC 传感器和粘贴到一个铝板的 IDT 使用激光扫描振动计进行实验。

第 6 章给出了机电阻抗 (EMI) 方法, 在提供了理论背景后, 介绍了用于损伤探测的测量装置和信号处理算法, 采用梁和板等简单机械结构的数值模拟结果对 EMI 方法进行了说明。文中还给出了在实验室条件下铝板和管道等简单结构的实验结果。最后, 文中给出了在两架飞机结构 (在主起落架和铆接机身面板中的螺栓接头) 上开展 EMI 测量的结果, 并对 EMI 用于 SHM 的可行性进行了讨论。

第 7 章回顾了采用传感器阵列选取兰姆波聚焦的方法。在简要介绍相控阵场后, 本章讨论了基于延迟叠加 (DAS) 操作的传统波束形成技

术。首先,基于采用点状传感器和自由发散介质的简化模型的仿真结果,根据空间分辨率对二维(2D)阵列拓扑的几个例子进行比较。文中第二部分提出了一种新的波束形成技术,它是对 DORT(时反算子分解的法语缩写)法的一个扩展,其中连续小波变换(CWT)被用于非平稳快照的时频表示(TFR)。文中证实了所提出的技术可应用于铝板中的兰姆波自聚焦,不管是线性还是二维星形阵列。这表明采用提出的方法获得时反算子分解能分离铝板中点状散射,并且允许兰姆波聚集在板中出现的大量单个损伤中。

第8章介绍了模态滤波器的理论和应用,重点关注它们在 SHM 系统中的应用潜力。模态滤波器可以成功地用于大型工程结构的总体监测。机械系统的结构变化(如由于裂纹导致刚度下降)导致模态滤波器的输出值出现峰值。这些峰值由不完全模态滤波产生,不完全模态滤波是由于系统的局部结构变化引起的,基于模态滤波器的 SHM 系统理论上对温度或湿度等环境变化不敏感(总体结构变化不会引起模态滤波精度的下降)。文中提供了该技术的许多实际应用情况,包括对成熟的 SHM 系统的描述,以及全面的仿真、实验和操作试验结果。文中还验证了模态滤波器可以创建一个有价值的、计算量低的损伤探测指示器。此外,采用这个概念的 SHM 系统容易实现自动化。

第9章讨论了在 NDE 和 SHM 中使用热成像技术的不同方式。首先,本章介绍了热成像技术分类取决于带内部激励的主动式红外热像仪,包括振动热成像(VT),并全面概述了包括热成像相机和激励源的测量设备。其次,本章介绍了采用显式有限元对热机械耦合现象进行数值模拟的结果。文中给出了 AGH-UST 开发的 VT 测量系统的硬件和软件组成,并通过在实验室开展复合材料和金属样品的实验对系统进行说明。文中还给出了测量参数对热响应影响的研究结果。最后,本章给出了在一个军用飞机机身和翼板上进行测量的报告,并对与实地测量相关的具体项目进行了讨论。

第10章介绍了基于视觉的监测系统。本章首先回顾了基于视觉的测量方法的研究背景和相关工作,指出了系统在市场上的可用性,并讨论了其优缺点;接着重点论述了这种方法的主要步骤,如相机标定、尺度系数计算算法以及使用对应映射的图像矫正等;然后给出了采用成熟的程序工具和建筑物的可视化模型对这种方法进行仿真测试的结果的报告,并给出了推荐算法的不确定性增长的数值调查结果,并对其进行了

讨论，损伤探测概率也一并被考虑；另外，还对在实验室里开展的测试工作进行了报告，测试过程采用一个由钢结构组成的装置、两个高分辨率数码单反（SLR）相机和单点加载；并且文中还对基于视觉的测量方法与使用其他接触和非接触测量技术的结果进行了比较；最后，对在土木工程建设中使用的方法进行了评估。

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 引论 1

1.1 引言 1

1.2 结构损伤和结构损伤探测 1

1.3 SHM 作为 NDT 的深化 3

1.4 SHM 的跨学科性质 4

1.5 SHM 系统的结构 7

1.5.1 局部 SHM 方法 8

1.5.2 整体 SHM 方法 8

1.6 与 SHM 系统设计有关的方面 10

1.6.1 设计原则 11

参考文献 12

第 2 章 弹性波传播的数值模拟 14

2.1 引言 14

2.2 建模方法 15

2.2.1 有限差分法 15

2.2.2 有限元法 16

2.2.3 谱单元法 17

2.2.4 边界元法 19

2.2.5 有限体积法 20

2.2.6 其他数值方法 21

2.2.7 时间离散化 23

2.3 混合和多尺度建模 25

2.4 局部交互仿真方法 (LISA) 29

2.4.1 GPU 实现 31

2.4.2 进一步发展的基于 GPU 的
LISA 软件包 33

2.4.3 cuLISA3D 解算器的性能 33

2.5 耦合方案 35

2.6 损伤模型 41

2.7 波传播的吸收边界条件 42

2.8 结论 44

参考文献 45

第 3 章 结构健康监测中的辅助探测

概率模型 51

3.1 引言 51

3.2 探测概率 52

3.3 POD 的理论方面 53

3.3.1 击中/脱靶分析 53

3.3.2 信号响应分析 55

3.3.3 置信区间 56

3.3.4 误报率 57

3.4 从 POD 到 MAPOD 57

3.5 SHM 的 POD 58

3.6 考虑缺陷几何不确定性的 SHM
系统的 MAPOD 59

3.6.1 SHM 系统 59

3.6.2 仿真框架 60

3.6.3 可靠性评估 60

3.7 结论 63

参考文献 63

第 4 章 非线性声学 66

4.1 引言 66

4.2 理论背景 67

4.2.1 接触声学的非线性 69

4.2.2 非线性共振 71

4.2.3 混频 72

4.3 损伤探测方法和应用 77

4.3.1 损伤探测非线性声学 78

4.4 结论	93	6.5.1 板结构试验	140
参考文献	94	6.5.2 管道截面的状态监测	144
第5章 导波压电复合材料		6.5.3 讨论	146
传感器	97	6.6 飞机结构应用验证	147
5.1 引言	97	6.6.1 主起落架舱螺栓联接的	
5.2 导波压电传感器	98	监测	147
5.2.1 压电元件	98	6.6.2 铆接机身面板监测	152
5.2.2 基于压电复合材料的		6.6.3 讨论	154
传感器	98	6.7 结论	154
5.2.3 交叉指型传感器	101	参考文献	155
5.3 基于 MFC 的新型 IDT-DS	105	第7章 导波波束的形成	157
5.4 兰姆波生成压电复合材料		7.1 引言	157
传感器	107	7.2 理论	158
5.4.1 数值模拟	107	7.2.1 合成孔径成像	158
5.4.2 实验验证	109	7.2.2 有效孔径概念	162
5.4.3 数值模拟与实验结果	109	7.2.3 成像方案	164
5.4.4 讨论	116	7.2.4 自聚焦阵列	166
5.5 IDT-DS4 的兰姆波传感特性	117	7.3 数值结果	168
5.5.1 数值模拟	117	7.3.1 有效孔径实例	168
5.5.2 实验验证	119	7.3.2 星形阵列成像	170
5.6 结论	121	7.3.3 DORT-CWT 方法的数值	
附录	121	验证	174
参考文献	122	7.4 实验结果	176
第6章 机电阻抗方法	125	7.4.1 实验装置	176
6.1 引言	125	7.4.2 传感阵列的实验评估	176
6.2 理论背景	126	7.4.3 有效孔径的实验评估	178
6.2.1 机电阻抗的定义	126	7.4.4 使用合成孔径的损伤成像	179
6.2.2 测量技术	127	7.4.5 DORT-CWT 方法的实验	
6.2.3 损伤探测算法	129	验证	179
6.3 数值模拟	129	7.4.6 基于自聚焦发射阵列的损伤	
6.3.1 基于有限元的机电阻抗建模		成像	182
方法	130	7.5 讨论	183
6.3.2 不确定性和敏感性分析	134	7.6 结论	184
6.3.3 讨论	137	参考文献	185
6.4 先进 SHM 系统	138	第8章 模态滤波技术	187
6.5 实验室测试	140	8.1 引言	187

8.2 当前发展状况	188	参考文献	240
8.3 方法的制定	192	第 10 章 基于视觉的监测系统	242
8.4 方法的数值验证	195	10.1 引言	242
8.4.1 用于模拟的模型	195	10.2 当前发展现状	243
8.4.2 测试程序	196	10.3 数字图像相关法的挠度 测量	244
8.4.3 分析的结果	197	10.4 图像配准和平面矫正	247
8.4.4 基于模型的探测概率	200	10.5 自动特征检测和匹配	249
8.5 基于模态过滤的监测系统	202	10.5.1 基于挠度变形的损伤检测 和定位	250
8.5.1 主要假设	202	10.6 软件工具开发	252
8.5.2 测量诊断装置	203	10.7 方法的数值研究	253
8.5.3 模态分析和模态过滤 软件	204	10.7.1 视觉测量系统的数值 模型	253
8.6 实验室测试	206	10.7.2 方法的不确定性研究	253
8.6.1 测试程序	206	10.7.3 基于概率模型的损伤 探测	260
8.6.2 实验结果	207	10.8 方法的实验室研究	263
8.6.3 探测分析的概率	212	10.8.1 实验室设置方法的 测试	264
8.7 操作测试	214	10.8.2 实验室研究方法的探测 概率	264
8.8 结论	217	10.8.3 开发方法的精度研究	270
参考文献	218	10.9 方法的关键研究和评价	272
第 9 章 振动红外热成像法	219	10.9.1 电车高架桥挠度监测	272
9.1 引言	219	10.10 结论	275
9.2 热成像无损检测技术现状	219	参考文献	275
9.3 振动热成像检测系统的发展	227		
9.4 虚拟测试	230		
9.5 实验室测试	235		
9.6 现场测量	237		
9.7 概要和结论	239		

第 1 章 引 论

1.1 引言

为了确保结构的完整性和安全性，人们普遍认为工程结构的维护是很重要的，尤其对土木工程结构和运输设备。例如，对航空结构定期开展检测，对于飞机机身可能产生的疲劳裂纹进行监测。

对于损伤探测，已经发展了各种不同的无损检测与评价（NDT/E）方法。超声检测、涡流检测被广泛用于裂纹检测，就是很好的、成熟的例子。NDT/E 技术往往局限于单点检测，当大面积需要被监测时就必须采用扫描手段。

近些年来，已发展了一系列新的损伤探测技术和传感技术。这些技术方法可对大型结构实施全面的在线监测，属于结构健康监测（SHM）领域。它们有能力实现对损伤连续监测，包括应用新的传感器。通常采用先进传感器的损伤监测系统，均涉及一个新设计理念。执行器、传感器和信号处理单元被集成在监测系统中，推进了该领域的发展。

结构健康监测（SHM）常在一个结构内集成传感器、执行器、可能的智能材料、数据传输和计算能力，其目的是及时探测、定位、评估和预测现在或将来导致结构功能故障的损伤（Adams, 2007；Balageas 等，2006），一个典型的结构健康监测（SHM）系统是与结构全面的、在线的损伤识别相关的，这样的系统通常应用于航空航天（Staszewski 等，2004）和土木工程（Wenzel, 2005）中。

尽管 SHM 系统利用 NDT/E 方法作为工具，但 SHM 系统和 NDT/E 操作原理有许多不同。NDT/E 技术通常应用于离线和局部结构的损伤检测，而 SHM 方法通常能够对整体结构在其运行过程中实施实时监测。SHM 是结构诊断的一个连续的步骤，从历史上看，结构诊断是从采用状态监测（CM）系统对结构损伤探测发展过来的。CM 系统有能力对损伤进行探测，但需以对结构运行过程进行全面评估为基础。SHM 有望进一步对损伤演化进行早期探测，在理想的情况下，能够在结构损伤真实发生之前预测损伤将发生（Inman 等，2005）。

1.2 结构损伤和结构损伤探测

在机械结构中，损伤术语包含许多不同的内涵，在结构健康监测领域中，损伤可以直观地理解为缺陷或失效，它损害工程结构的功能和工作条件。当采用系统分

析时，可以给损伤一个更精确的定义。通过输入激励和输出可测信号，结构可以被当作一个系统。在这种背景下，损伤可以被视为一种额外的激励，导致能量流动和转换，引起输出信号的变化。因此，损伤探测是一个逆问题，通过测量输出信号来探测损伤。损伤也可以被视为对材料属性和/或结构物理参数的一个改变。由于材料沉积和塑性或者疲劳和腐蚀等原因，材料属性和参数发生变化。在这种背景下损伤探测是一个识别问题。为评估结构损伤，常需提取材料属性和物理参数。

在过去的几十年里，已经发展了许多不同的损伤探测方法。这些方法可以分为基于模型和基于信号的方法。基于振动的方法探测损伤，通常采用从物理模型得到的物理参数和/或模态参数。当监测载荷以获得结构有用信息时，模型也是基础。基于信号的方法依赖于各种类型的直接测量值，如噪声、振动、超声或温度。

基于模型和基于信号的两种方法均需信号处理技术。前者需要建立合理的模型，并分析模型中与损伤相关的参数变化；后者需要提取特征值，并建立这些特征值与可能损伤之间的关系。

基于信号的方法大多数依赖于结构状态与信号特性或症状之间的关系。由于工程结构的复杂性、设计的复杂性和先进材料的使用，结构状态与症状关系常常不易分析。因此，需采用不同的信号处理方法来进行分析，包括特征和先进的特征分析。前者基于简单的特征进行分析，如统计谱矩或物理/模态参数；后者应用多维特性（如向量、矩阵、图像等），如光谱、信号瞬时特征或时间 - 频率分布。

在这种背景下，损伤探测可当作模式识别的问题。模式识别需要特征选择程序进行训练，通常基于统计、句法或神经网络方法。这一领域的许多最近研究成果是以信号处理（Staszewski 和 Worden, 2009）和机器学习（Worden 等, 2011）新发展为基础的。很明显，这些发展是实施任何 SHM 系统所必要的。

损伤探测构成整体损伤识别问题的主要目标。SHM 系统的任务可以当作一个过程，由五个方面的活动组成，形成了五个重要单元或级别，如图 1.1 所示（Balageas 等, 2006；Cempel, 1991；Rytter, 1993）。

五个级别分别为 I、损伤探测；II、损伤定位；III、损伤大小的评估；IV、剩余寿命预测；V、具有自评价、自愈或控制能力的智能结构。在这种情况下，探测能够给出损伤可能存在的定性表示，定位能够给出损伤可能存在的位置信息，评估能够通过所提供的损伤类型和大小的信息估计其严重性，最后预测能够估计结构的剩余寿命和预测可能的故障或失效。前 3 个级别（即探测、定位、评估）主要与系统辨识、建模和信号处理方面有关。预测级别属于疲劳分析、断裂力学、

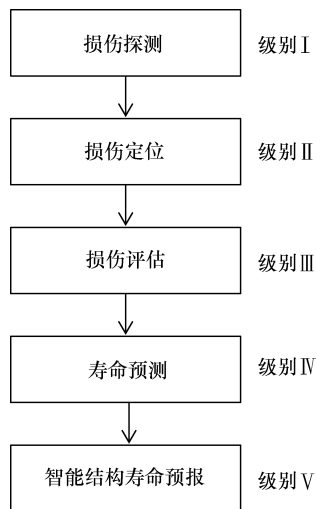


图 1.1 SHM 程序的主要级别

设计评估、可靠性和统计分析的领域。在许多实验室，这个级别被广泛探索研究，但目前没有商业上可用的解决方案。所有这些级别需要各种数据元、信号和/或信息处理。

1.3 SHM 作为 NDT 的深化

在许多工程领域，损伤探测/监测、NDT/E 和 SHM 往往被误解为同义词和可能具有相同的含义。结构的损伤、健康和监测可以使用各种定义来描述。一般来说，健康是结构在整个寿命周期内工作/执行和保持结构完整性的能力，而监测是诊断和预测的过程，损伤则是一种材料、结构或功能失效。同时，在这种情况下，结构完整性是工程组件和结构的安全性和失效的边界条件。在飞机维护中，损伤探测和直接的积累损伤监测为载荷监测提供了一种替代方法。

SHM 新进展既与现有技术、新设备和传感器技术的改进有关，也与新的监测原理有关。可以用三个例子说明。首先，声发射（AE）是一种行之有效的无损检测技术，用于损伤识别已有多年。然而，当与监测结构集成在一起的光纤传感器被使用时，AE（被动的无损检测方法）也可以与基于兰姆波损伤探测相结合（主动的无损检测方法）。其次，兰姆波第一次用于 NDT/E 可追溯到 19 世纪 50 年代，虽然智能传感器（如压电陶瓷、聚合物、圆盘、油漆、纤维）在 19 世纪 90 年代初期被引入时，才产生真正的 SHM 方法。第三，很多新的损伤探测方法最近被提出，这些方法是基于非线性声学的非经典方法，具有良好的损伤探测灵敏度。

无损检测（NDT）技术往往局限于单点测量，在需要对结构进行大面积监测时，就需要扫描。最近几年，产生了一系列新的损伤检测技术和传感技术。SHM 方法允许对大型结构进行整体在线监测，同时也提供损伤定位。这些方法应用新的传感器能够实现对损伤连续监测。采用智能传感技术的损伤监测系统体现了一种新的设计理念，将执行器、传感器和信号处理单元直接集成在一起。在过去 20 ~ 30 年，这个领域已开展了大量研究工作。

通常，交替使用 SHM、损伤探测/监测和 NDT 来评价结构运行状态。然而正如上面所讨论的，只有 SHM 定义了整个过程，包括 5 个重要的识别单元（或级别）。正如 Adams（2007）准确指出的，SHM 与 NDT 的区别在于全面在线实施各种损伤探测技术，这些技术需要定期空间测量（或观察）。在线实施过程比传统的无损检测技术需要更先进的信号处理手段，以实现可靠的损伤探测。

无损检测（NDT）涉及将已知的被测输入信号与一个已知的模型进行比较——它不需要损坏物理系统。在损伤已经被定位后，无损检测通常以离线方式在当地进行，或周期性的，以改进结构性能。如果结构损伤位置已知，无损检测技术主要被用来表征损伤和评估其严重性。

1.4 SHM 的跨学科性质

SHM 是一个跨学科的研究领域，集成了材料科学、力学、电子学和计算机科学这些基本科学，并与结构及其生命周期密切相关。图 1.2 说明了这一点。

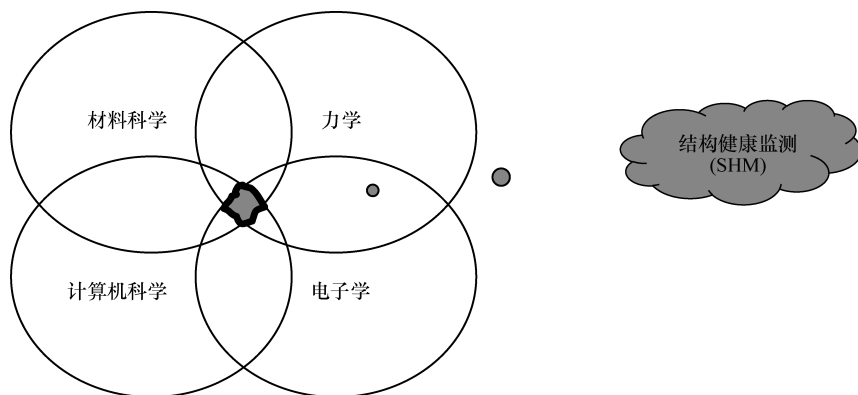


图 1.2 SHM 的跨学科性质

SHM 方法实现损伤探测需要 3 个要素。它们是：①被监测结构和可能的损伤场景方面的知识；②可以用于损伤探测的传感器和仪表，它们被用来获取信号/数据；③用于提取可能损伤和整体结构完整性信息的相关分析。这 3 个要素的所有建模、数值模拟和信号处理是重要的活动。

SHM 的跨学科性质需要在设计、制造和运行中有一个专用的方法，因此，SHM 系统大多安装在新结构上，很少安装在运行很长一段时间的旧结构上。将 SHM 安装在运行历史未知的结构上探测损伤是非常困难的，因为这种情况下对损伤正确评估的概率远低于新结构。

一个 SHM 系统设计取决于可能发生的损伤类型、用于设计的材料类型和用于损伤探测的物理现象。一个 SHM 系统设计的复杂性取决于材料损伤的局部性质，它们最有可能发生在评估的结构上，它们通常可能不会显著影响在运行过程中测量的结构响应，例如它的低频振动谱。

从损伤结构难以获得 SHM 数据的另一个因素，是在运行期间不易到达特定部件。因此，常常需要应用分析程序和仿真工具对局部结构行为进行深入研究，这些分析程序和工具广泛用于理解受损结构行为和相关信号的特征。由于 SHM 系统成本相对较高，因此必须非常仔细地进行设计和优化，要充分考虑系统性能影响最小化、硬件成本最小化（例如传感器和执行器的数量）、损伤探测和评估准确性最大化。

如今，在 SHM 系统的设计中，多物理和多尺度仿真是极有价值的工具。设计过程包括几个步骤，最具有挑战性的是：①选择一个对损伤非常敏感、易于探测的现

象, ②定义具有自动验证能力的所需的传感系统, ③选择数据采集和处理架构, ④定义特征提取和信息减少程序, ⑤制定和实施损伤探测程序, ⑥损伤定位和它的大小评估。

对于任何结构, 如何解决所有这些设计和实现的问题没有通用规则。设计方法都是针对一个给定的结构、所采用的材料和适用于健康监测的物理现象。SHM 技术有助于实现更好的运营安全, 对降低维护 and 操作成本具有经济价值, 因为它可以长时间预测可能发生的损伤, 因此, 使操作人员有足够的时间来计划主动服务和维护操作。

有几个学科是与 SHM 非常密切相关的: CM——状态监测 (Inman 等, 2005); NDT/E——无损检测/评价 (Staszewski 等, 2004); SPC——统计过程控制 (Inman 等, 2005); DP——损伤预测 (Inman 等, 2005); MP——维护计划 (Pietrzyk 和 Uhl, 2005), 例如 RCM (以可靠性为中心的维护)。

CM (状态监测) 在很多方面与 SHM 非常相似, 但在实际使用中, 它更多应用于旋转和往复机械。CM 方法的主要特点是, 损伤类型和位置基本上是明确的, 可能损伤的数量是有限的, 包含损伤特征的数据库是可以得到的, 环境条件对测量结果的影响是很轻微的, 通过使用 CM 获得经济效益是良好的。与 SHM 方法相比, CM 的一个突出优点是, 使用 CM 能产生的经济效益, 在全球范围内有许多旋转机械监测标准。

另一方面, SHM 也有不足: 损伤定位不清晰; 由于被监测的结构难以接近, 给测量带来诸多困难; 损伤类型往往难以识别; 环境条件对测量结果影响显著; SHM 系统的成本相对较高, 所以它们常常应用在关键结构上。

CM 系统仅依赖于在运行时对结构响应的测量, 不需要采用专用的执行器来激励或触发。图 1.3 按照硬件与结构集成关系, 给出了 CM、NDT 和 SHM 系统之间的差别。

可以看出, NDT 和 SHM 系统的主要区别在硬件架构上。在 SHM 系统中, 传感器和执行器被集成到 (或结合) 结构中, 而 NDT 是一个外部系统, 它与传感器和执行器是独立的 (见图 1.3c)。SHM 和 NDT 系统与其他工具集成的示意图如图 1.4 所示。

NDT/E 和 SHM 的主要区别是它们的工作方式, NDT/E 的工作方式是离线的, 而 SHM 的工作方式是在线的, 这使得 SHM 的复杂程度远远超过 NDT/E 的应用。

统计过程控制 (SPC) 的目标与 SHM 相似, 但 SPC 系统的最终目标不仅是探测结构损伤, 而且是对过程进行诊断——它们使用多种传感器对过程参数的变化进行监测。过程参数因结构失效而发生变化, 在这方面 SHM 和 SPC 是可比的。

损伤预测 (DP) 是用来预测运行结构的剩余寿命, 在运行中, 它们的性能仍将高于给定的阈值。DP 系统充分利用损伤的大小和位置以及运行载荷的有关知识。剩余寿命预测是基于一个预测模型, 该模型从所采用的监测系统获得信息 (该系统

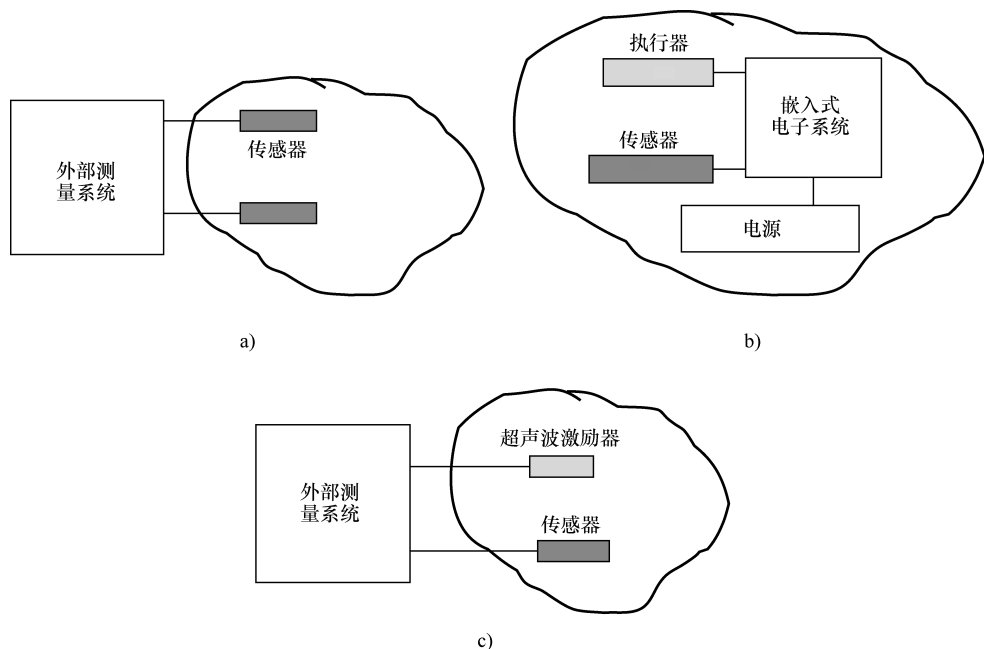


图 1.3 典型的示意图

a) CM 系统 b) SHM 系统 c) NDT 系统

监测结构运行过程中的循环载荷), 以及过去、当前的环境条件和预期的载荷水平。

若考虑材料水平, 结构破坏是非常复杂的物理现象。目前的 DP 系统仅仅能给出一个非常粗略的剩余寿命预测估算值, 未来包括分子动力学的多尺度模拟 (Packo 和 Uhl, 2011) 方法可以有助于解决这个问题。第 2 章涉及现代数值模拟方法的最近成果。

图 1.5 概略地显示在 DP 中不同类型监测系统之间的相互作用 (Far-rar 等, 2005)。最普遍的是 MP 系统, 它定义了必须要完成的要求和任务, 以获得、恢复和维护结构全寿命内的运行能力。

MP 系统从安装的 SHM 系统获取数据, 并帮助分析历史数据, 以探究引起结构性能损失的原因。这种方法在损伤发生前提供预防性服务。在这个领域中已有几种

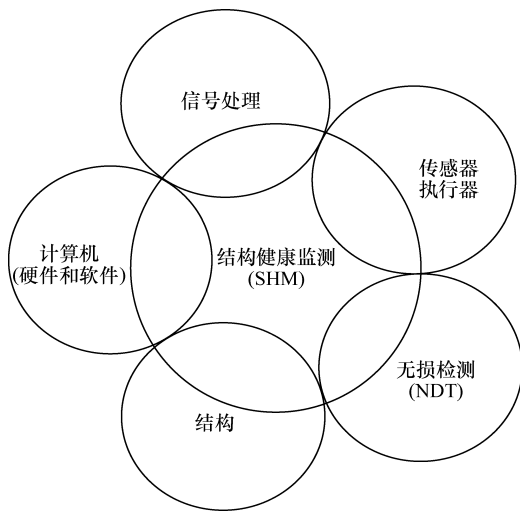


图 1.4 SHM 系统的主要构成

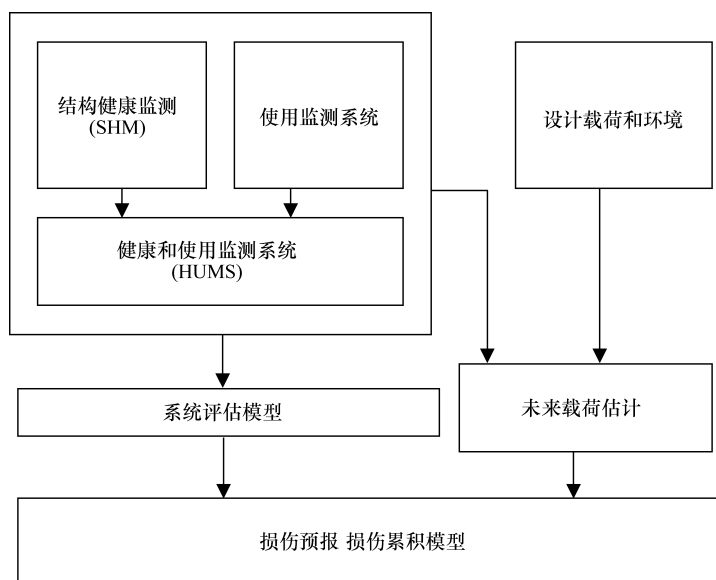


图 1.5 一个典型的损伤预测程序示意图（来源于 Inman D, Farrar C, Lopes V and Steffen J. Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems, ©2005 John Wiley and Sons Ltd.）

方法，对机械结构来说，最实用的是 RCM，它有助于减少维护成本和降低结构失效的风险（Pietrzyk 和 Uhl, 2005）。

1.5 SHM 系统的结构

一个典型的 SHM 系统主要包括硬件和软件两个部分。硬件部分包括传感器、可选的执行器、执行信号调节和采集的单元、通信以及电力供应。这些组件自主工作，经常是被嵌入结构中。通信和供电问题是这种类型结构常遇到的问题，要求硬件组件尽可能的微型化。电力供应问题可以通过能量采集单元来解决，这也是目前许多研究项目的重点。

已经可行的技术案例可以在 Priya 和 Inman（2010）文献中看到。SHM 硬件微型化的一个可行解决方案是为 SHM 设计和制造 MEMS 芯片，其中包括传感器、执行器、通信单元和处理器等（Staszewski 等，2004）。在 SHM 系统中，无线通信是一种最常用的数据传输类型，有专门的解决方案；但是一些商业上可用的方案，如 ZigBee 或无线射频识别（RFID）也可以被应用（Dargie 和 Poellabauer, 2010；Lynch 和 Loh, 2006；Uhl 等，2007）。

软件部分包含信号处理、信号融合、硬件控制、结构健康监测与剩余寿命预测等基本程序。更先进的系统也包含一些与结构健康管理有关的程序。

1.5.1 局部 SHM 方法

现代 SHM 方法可以分为两大类：整体方法（Adams 和 Farrar, 2002; Doebling 等, 1996; Uhl, 204）和局部方法（Grimberg 等, 2001; Maldague, 2007; Raghavan 和 Cesnik, 2007）。局部方法通过测量一定激励下的结构响应，实现对传感器周围一个小的区域进行监测。超声波（Raghavan 和 Cesnik, 2007）、涡流（Grimberg 等, 2001）、热场（Maldague, 2007; Uhl 等, 2008）和声发射（Pao, 1978）常用于局部 SHM 方法。常用于 SHM 系统设计的方法有导波（GW; Raghavan 和 Cesnik, 2007）以及那些基于光纤光栅传感器（应变、温度测量和超声波传感）（Betz, 2003）、振动红外热成像（Uhl 等, 2008）和机电阻抗（Bhalla 和 Soh, 2004; Park 等, 2003）的方法。先进的振动红外热成像和机电阻抗方法将分别将在第 9 章和第 6 章中阐述。

还有许多其他的方法，可以划分为局部 SHM 方法（Chung, 2001），但这些方法大多应用于更具体的问题。依靠超声波在固体中传播特性的传统 NDT 方法，可以与不同的信号处理方法和损伤成像技术结合使用。

然而，在 SHM 中，波是由永久安装在结构中的执行器产生的。响应通过一个内置压电传感器测量。有许多不同的技术用于激励和传感 GW。第 5 章给出了由宏观纤维复合材料（MFC）制成的一个内置压电传感器的最近结果。

在类薄板结构中，弹性波以兰姆波的形式传播，采用这种类型 GW 的方法是最常被推荐的局部 SHM 方法之一。基于 GW 技术可用于金属和复合结构。一般来说，基于 GW 的局部方法需要密集的传感器网络（提供分布在空间的大量测点），这将产生大量数据，必须对这些数据进行处理才能探测、定位和评估结构损伤。安装这种传感器网络，其费用通常比总体方法高得多。使用二维（2D）相控阵列形成电子波束，以代替密集的传感器网络，这种方法已作为一个可行的解决方案被提出，第 7 章将对其进行详细的阐述。

基于 GW 的局部方法有许多优点，最重要的是它们不需要拆卸监控结构部件。此外，由于 GW 的波长与损伤尺寸处于同一个范围，它们对小的损伤非常敏感。然而，它们也有一个重要的缺点：它们需要采用密集的传感器网络或复杂的相控阵列，需要靠近潜在的损伤，这意味着掌握损伤位置（热点区）的知识是很重要的。因此，当需要对关键结构的早期损伤进行探测时，局部方法是可以应用的，并且 SHM 系统的高成本也是可以接受的。

1.5.2 整体 SHM 方法

要是在结构运行过程中引起结构的总体运动，就要采用整体方法（Adams, 2007; Balageas 等, 2006）。基于振动的方法属于这类。整体方法基于下列事实：局部损伤，例如局部刚度降低对结构整体行为在时间和空间上产生影响。

与局部方法相比,整体方法有许多优点:通过使用一般的传感器网络,它们就可以监测整个结构,传感器不必接近损伤,只需掌握有限的关键位置的知识就够了。显然,整体方法也有缺点,如自然激励的振动的波长约等于结构或组件的尺寸,所以它们对相对小的损伤有较低的灵敏度(特别是对低频振动模式)。

尽管整体方法只能粗略估计损伤位置和大小,但是它们可以成功地用于损伤探测。最常用的整体方法是基于振动的方法(Balageas等,2006)。低频振动用于诊断已有多年(Inman等,2005;Wenzel,2005)。材料缺陷、结构失效或几何缺陷对结构振动响应的影响是众所周知的。结构振动和结构损伤之间的关系在对结构健康进行评估时常被采用。

在整体方法中可以区分两种类型的方法:基于信号的方法(Inman等,2005)和基于模型的方法(Natke和Cempel,2000)。基于信号的方法利用了任意激励后结构响应和可能损伤之间的关系。现在,在频率、时间和时域/频域中的信号特征是最受欢迎的。这个方法常用于旋转和往复机械的损伤探测和诊断,但定位和损伤评估还需要其他信息。

基于模型的方法通过使用许多不同类型的模型,以及模型参数和特定损伤之间的关系来对结构损伤进行探测和定位。该方法背后的思想如图1.6所示(Uhl,2004)。

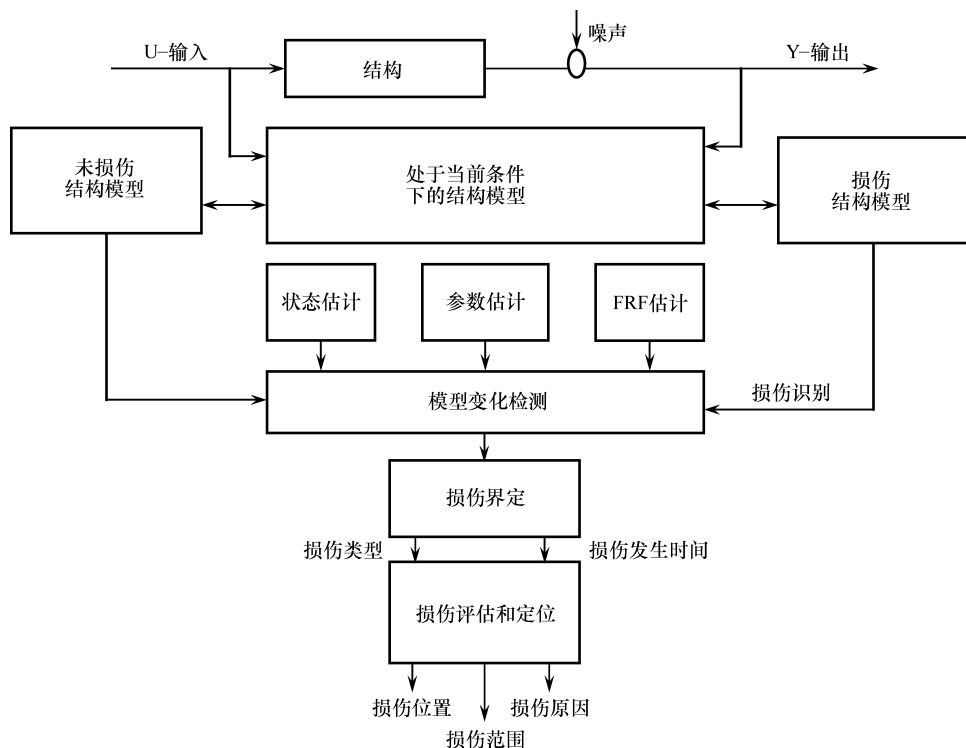


图 1.6 基于模型的整体 SHM 方法示意图

比较未损伤结构和损伤结构的模型参数或输出,发现其差异(残余)与给定损伤有关,这些有助于对损伤定位。在 SHM 中,最常用的模型是一个模态模型,通过一定外部激励(或运行引起的振动激励)下结构多点响应的测量,它可以对结构进行真正的识别。

模态方法通过探测固有频率的变化、阻尼的增加或者振动模式形状的变化来监测整个结构。选取的特征应该对损伤敏感。基于模态模型的技术可以分为以下几类(Uhl, 2004): 基于模态参数摄动(固有频率、模态阻尼)的方法,基于频率响应函数(刚度和柔度)变化探测的方法,基于模式形状分析的方法,基于模式能量探测的方法,基于有限元(FE)模型更新的方法。

基于模式形状分析的方法,如应变能分析方法或模式曲率分析方法,常被优先考虑。尽管事实上所需要的 SHM 系统,比基于固有频率和模态阻尼的 SHM 系统更复杂。

基于整体模型的 SHM 程序既不要求密集的传感器网络,也不要求传感器位于损伤附近。但是,与局部方法比较,这些方法对损伤不敏感,而且空间分辨率较低。它们的灵敏度和空间分辨率,可以用一个能说明结构动态性能变化的计算模型来改善。

基于整体模型的方法主要用于民用建筑的结构健康监测。有几个问题限制了这些方法的应用,首先是由于布线复杂导致监测系统成本高。第二个是环境条件对结构动态特性的影响较大,这意味着与结构严重损伤的影响相比,环境影响有时可能会占主导。第一个问题可以用基于无线传感器的监测系统来解决(Uhl 等, 2007),第二个问题通过基于模态滤波器的特殊环境滤波来解决(Mendrok 和 Uhl (2008), 以及第 8 章)。

由于整体方法对局部损伤不太敏感,所以在实际应用中,它们仅用于损伤探测。

1.6 与 SHM 系统设计有关的方面

监测工程结构可能损伤的整个过程取决于结构设计概念。这个可以用飞机设计来说明。当前飞机结构的设计原则是基于安全-寿命的概念。首先确定能代表典型操作条件下的载荷谱。这需要大量的数据,它们与任务配置文件、质量分布和许多其他参数相关。然后,使用载荷谱和断裂力学来对结构组件的疲劳寿命进行评估,其中伴随着一系列材料、试件、元件、子组件和组件的疲劳试验,最后是主要机体的疲劳试验(MAFT)。

实际上,设计输入数据的分散性(如未知参数、载荷条件的改变、材料属性的变化、生产质量、运行过程中人的错误或结构修改)是很重要的。因此,各种安全因素被强加在结构上以保证结构安全疲劳寿命。即使没有失效发生,结构也需

要按一定飞行小时和后来的退役来设计。

对老化飞机使用寿命的估计更加困难。事实上,安全-寿命设计概念(见图1.7)保证结构安全,但设计过度。要是经济性和性能进行分析,这是不可取的。经历多种载荷的非关键结构组件常常采用失效-安全概念进行设计。即使这些组件产生损伤,结构完整性也不会面临危险,这是由于在灾难性事故发生之前,损伤已被假定可以探测出来。这就需要定期对组件的损伤进行探测。

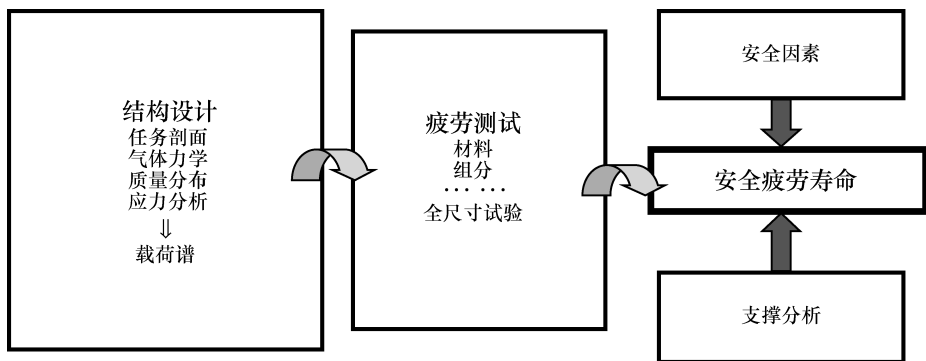


图 1.7 安全-寿命飞机设计概念

正是由于监测技术能对损伤进行可靠探测、定位、严重性估计和损伤预测,导致损伤容限的设计概念产生。按照这种设计概念,对可以探测到的损伤进行监测能保证飞机的安全寿命。虽然重要的检验工作是必需的,但这个概念可以使得结构更轻、性能更好。事实上,在安全-寿命设计概念中,预防裂纹萌生并不能阻止灾难性的失效。因此维护和检查飞机的结构是很重要的,无论采用何种设计概念。更重要的是要注意到,在航空工程中,材料疲劳对结构设计有非常重大的作用。在航空中引入的安全-寿命和失效-安全设计概念,已广泛应用于许多其他工程领域中。

1.6.1 设计原则

由于成本、高度责任和系统设计的跨学科性质,SHM 系统的设计需要专门的程序和工具,SHM 系统设计程序包括下列步骤:

- 1) 确定应探测的损伤类型。
- 2) 选择对损伤比较敏感的物理现象。
- 3) 定义监测方法——算法(探测、定位和损伤尺寸评估)。
- 4) 方法的模拟研究(虚拟原型)。
- 5) 方法的实验室验证(物理原型)。
- 6) 系统性能的测试[探测概率(POD)]。
- 7) SHM 系统的实现。
- 8) 系统的运行测试。

9) 系统的安装和操作。

详细描述结构、环境条件、可预期的载荷范围以及可能的损伤,对选择用于结构监测的合适的物理现象是必要的。对于一个特定的结构和运行条件,所选择的物理现象必须是可量化的,但它的正常运行操作不能被干扰。首选的是这种现象可以被环境激励,但在其他情况下,一个特殊的驱动系统应该被设计来激励结构。由于有限的电源,激励水平应尽可能的低。在为正确的损伤探测结果确定算法时,需要考虑所需的计算能力和测量数据的容量。由于有限的电源供应和有限的嵌入式计算机内存,尤其是在设计时嵌入一个无线 SHM 系统,最小的计算能力和所需测量数据最小化是非常重要的。

设计程序的下一步是通过模拟验证制定的解决方案,这就需要建立监测结构、损伤场景、传感器和执行器的模型。模拟的目标是创建工具,它能够测试方法的正确性和选择一个测量系统,测量系统能使结构响应测量的灵敏度与监测的损伤相匹配。结构响应对损伤精度的灵敏度分析是一个基本的工具,它有助于设计一个监测系统。通过使用模型及其模拟,探测概率(POD)也可以被测试(Mendrok 和 Uhl, 2008)。对于一个所选择的 SHM 系统,探测概率(POD)应该尽可能高,其目的是考虑到制定的方法在设计给定结构的 SHM 时是有用的。但由于不能定位损伤和固定传感器的位置,所以基于模型的 POD 评估可能是一个困难的任务[Gallina 等(2011),以及第3章]。

一种更精确的 POD 测定可以通过实验室试验实现。在这样的一个试验中,损伤通过一个损伤位置和尺寸均已知的样品来定义,一个健康结构的特征也众所周知。实验室试验应该能证实正确损伤探测的敏感性和概率水平。

下一步是实现 SHM 系统设计,它需要符合相关的标准要求,这些标准取决于应用领域。例如,航空标准完全不同于那些土木工程必须遵守的标准,主要的原因是在这两个领域 SHM 系统的设计完全不同。

由于可扩展性的需求,SHM 的模块化在实现阶段是一个重要特征。在随后的阶段,SHM 系统被安装在一个真实结构上,需要操作试验来确认系统设计的正确性。

SHM 系统进一步发展需要损伤探测、定位和评价新的自动算法,新的状态诊断方法和算法,以及关键结构的自我诊断和自我修复的发展。

参考文献

- Adams D 2007 *Health Monitoring of Structural Materials and Components*. John Wiley & Sons, Ltd.
 Adams D and Farrar C 2002 Identifying linear and nonlinear damage using frequency domain ARX models. *Structural Health Monitoring* **1**, 185–201.
 Balageas J, Fritzen C and Guemes A (eds) 2006 *Structural Health Monitoring Systems*. ISTE.
 Betz D 2003 Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg grating. *Smart Materials and Structures* **12**(1), 122–128.
 Bhalla S and Soh C 2004 Structural health monitoring by piezo-impedance transducers. *ASCE Journal of Aerospace Engineering* **35**, 154–165.

- Cempel C 1991 *Vibroacoustic Condition Monitoring*. Ellis Horwood.
- Chung D 2001 Structural health monitoring by electrical resistance measurements. *Smart Materials and Structures* **10**, 624–636.
- Dargie W and Poellabauer C (eds) 2010 *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Doebbling S, Farrar C, Prime M and Daniel W 1996 Damage identification and health monitoring of mechanical systems from changes of their vibration characteristics a literature review. Technical report, LA-13070 MS.
- Farrar CR, Lieven NAJ and Bement M 2005 An introduction to prognosis. In *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Gallina A, Packo, PP, Ambrozinski L, Uhl T and Staszewski WJ 2011 Model assisted probability of detection evaluation of a health monitoring system by using CUDA technology. *Proceedings of IWSHM 2011* (ed. Chan FK), Stanford University.
- Grimberg R, Premel D, Savin A, Le Bihan Y and Placko D 2001 Eddy current holography evaluation of delamination in carbon epoxy composites. *Insight* **34**, 260–264.
- Inman D, Farrar C, Lopes V and Steffen J (eds) 2005 *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. John Wiley & Sons.
- Lynch J and Loh K 2006 A summary review of wireless sensors and sensor networks for SHM. *The Shock and Vibration Digest* **38**(2), 91–128.
- Maldague X 2007 *Nondestructive Testing of Materials Using Infrared Thermography*. Springer.
- Mendrok K and Uhl T 2008 Modal filtration for damage detection and localization. *Structural Health Monitoring 2008: Proceedings of the Fourth European Workshop*. Kraków, Poland.
- Natke G and Cempel C 2000 *Model Based Diagnostics*. Springer.
- Packo P and Uhl T 2011 Multiscale approach to structure damage modelling. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* **49**, 243–264.
- Pao Y 1978 Theory of acoustic emission. *Elastic Waves and Non-destructive Testing of Materials* **29**, 107.
- Park G, Sohn H, Farrar CR and Inman DJ 2003 Overview of piezoelectric impedance based health monitoring and path forward. *The Shock and Vibration Digest* **35**, 451–463.
- Pietrzyk, A and Uhl T 2005 Use of RCM methodology for railway equipment maintenance optimization. *Archives of Transport* **49**(1), 6583.
- Priya S and Inman D (eds) 2010 *Energy Harvesting Technologies*. Springer.
- Raghavan A and Cesnik CES 2007 Review of guided waves structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest* **39**, 91–114.
- Rytter A 1993 *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. PhD thesis, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
- Staszewski WJ, Boller C and Tomlinson GR (eds) 2004 *Structural Health Monitoring Systems of Aerospace Structures*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Staszewski W and Worden K 2009 Signal processing for damage detection. In *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 415–421.
- Uhl T 2004 The use and challenge of modal analysis in diagnostics. *Diagnostyka* **30**, 151–160.
- Uhl T, Hanc A, Tworkowski K and Sekiewicz L 2007 Wireless sensor network based bridge monitoring system. *Key Engineering Materials* **347**, 499–504.
- Uhl T, Szwedo M and Bednars J 2008 Application of active thermography for SHM of mechanical structures. *Structural Health Monitoring 2008: Proceedings of the Fourth European Workshop*. Kraków, Poland.
- Wenzel H (ed.) 2005 *Ambient Vibration Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Worden K, Staszewski WJ and Hensman JJ 2011 Natural computing for mechanical systems research: A tutorial overview. *Mechanical Systems and Signal Processing* **25**(1), 4–111.

第 2 章 弹性波传播的数值模拟

2.1 引言

现在的健康监测系统采用多种物理现象来进行损伤检测和定位。近年来，弹性波检测方法因为其检测能力和无损特性而受到广泛的关注，尤其是超声波的使用，例如兰姆波（Boller 等，2009；Staszewski 等，2004）就被用在工程结构维护过程中的损伤检测中。Raghavan 和 Cesnik（2007），Staszewski（2004），以及 Su 和 Ye（2009）等的文章对兰姆波应用于不同结构构件和材料的损伤检测进行了广泛的介绍。尽管前人已经投入了大量的研究精力，但是兰姆波的实际工程应用还是很局限的，这主要是因为兰姆波在传播过程中的复杂性所造成的，例如，多模态的特性，弥散性，边界可能出现的反射，以及其他结构特征，这些结构特征可能会导致即使不考虑缺陷带来的分散性都非常难分析的波场。因此，目前急需寻找能够帮助理解这些现象的方法。

数值模拟方法能够在不考虑结构特征的情况下，对驱使波相互作用的机理提供一些线索，因此经常被用来预测可能的波场。这就使得数值模拟被应用于 SHM 和 NDT/NDE 系统的设计、实际操作和改进中，并成为优化这一系统特征的一种方法，作为这一系统的一部分来实现损伤的检测和定位。在检测系统的设计阶段，数值模拟方法可以帮助调整设置、选择最优的传感器位置、检查系统对不同损伤类型的响应。这一过程都可以用计算机来完成，减少了实际试验的样品数以及实际的实验数量，最大限度地降低了检测系统设计所需的时间。而在实际运行阶段，数值模拟可以作为系统的一部分提供一个计算机给出的作为基准线的结果，或者应用于为了解决鉴定问题而进行的反向试验中。还有，对于一个检测系统，计算机给出的测试结论会改善它的性能以及检测能力。

在对一个结构的检测过程中，数值模拟主要负责从尽可能多的方面来支持 SHM 系统。从 SHM 系统最基本的功能——损伤检测开始，人们在研究波的传播时对数值方法的需求越来越多。

首先，如果一个体系在开始阶段的目标定位为检测损伤，它就很有可能会使用到高频波。这是因为只有当障碍物的尺寸和波长在一个量级的情况下波形才会受到显著的影响。尽管衰减会增加，但是模拟时仍旧会采用短波长的波，因为短波长意味着高的空间分辨率；其次，因为金属以及复合材料对应的很高的波速，所以模拟时就必须使用很高的时间分辨率的模型。这两个必要条件为模拟方法设定了很严格

的限制条件, 直接导致数值模型的大规模化和计算时间的延长。

SHM 以及 NDT/NDE 系统模拟方面最重要的一点就是, 有了损伤之后波相互之间的作用。根据结构构件材料的不同, 可以考虑不同的损伤类型。金属结构中典型的损伤类型包括疲劳裂纹、孔洞 (例如锻造中产生的)、加工过程中产生的折痕、高度变形的区域 (剪切带局部化区域)、退化区域、腐蚀等。因为小范围塑性效应、裂纹面的界面摩擦、热弹性效应等 (Buehler, 2008; Klepka 等, 2011), 裂纹会导致高度非线性的波响应。另一方面, 复合材料中最常出现的损伤类型是分层、脱粘、折叠、纤维/基底/纤维基底界面的破坏、由于环境因素导致的材料性质的退化、结构性质的温度依赖等。一个可靠的损伤模型对 SHM 系统成功实现模拟过程非常重要。

一般认为, 损伤发生之后波的相互作用是两种阻抗严重不匹配的介质相互作用从而加剧了体系的非线性效应。这就需要设置一种特殊的边界条件和一个非常精确的模拟方法, 否则结构对损伤的响应就不能被准确考虑, 这样的模拟方法也就是不可信的。

要模拟这样复杂的现象和损伤发生之后波的相互作用就需要尽可能开发现有检测系统的潜能。这就需要非常成熟的建模技巧, 我们将在下节中进行阐述。

2.2 建模方法

本节我们回顾一下健康监测体系中用来模拟波的传播现象的数值方法, 主要介绍了建模的思想和一些必要的数学背景知识。因为我们的重点在力学体系的时间演化这一部分, 所以还对时间积分方法进行了简要的介绍。

2.2.1 有限差分法

有限差分法 (FDM) 是模拟波的传播时最常用的方法之一。Courant、Friedrichs 和 Lewy 在 20 世纪 30 年代提出了这个方法的思想 (Courant 等, 1928)。在二战期间及后续的时间里随着计算方法的发展, FDM 也得到了进一步的发展。时间相关问题的重大进展由 Crank 和 Nicolson (1947), Lax 和 Wendroff (Lax, 1961; Lax 和 Wendroff, 1960) 以及 Newmark (1959) 通过建立时间积分方法和稳定性条件而获得。Collatz (1966, 1986) 对理论的系统化研究作出了重要贡献。从那以后, 该方法还被广泛地应用于地球物理学科的研究中 (Abramovici 和 Alterman, 1965; Alford 等, 1974; Alterman 和 Karal, 1968; Twizell, 1979)。

有限差分法 (FDM) 是一种通过用有限差分代替求导来解决微分方程的方法。因此在这一过程中, 原始的微分方程就被转换成一组代数方程。可以用来解决时间和空间求导问题的差分方程有很多种 (Strikwerda, 2004), 推导出差分算子最基本的关系式是 Taylor 方程:

$$f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{2!}f''(x) + \cdots + \frac{h^n}{n!}f^{(n)}(x) \quad (2.1)$$

式 (2.1) 把点 $x+h$ 处未知量 $f(x+h)$ 和点 x 的已知函数的导数以及差分距离 h 联系起来。

式 (2.1) 截取到 n 项, 这就产生了一个阶段误差, 而且, 假设函数值是已知的话, 那这个式子就可以被用来估计函数导数的值。最简单的截取形式, 就是对式 (2.1) 只截取其中的两项, 这就得到了所谓的前向差分和后向差分 (Woolfson 和 Pert, 1999):

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad \text{或者} \quad f'(x) = \frac{f(x) - f(x-h)}{h} \quad (2.2)$$

式 (2.1) 也可以结合不同的差分点来得到不同的有限差分形式 (Strikwerda, 2004; Woolfson 和 Pert, 1999)。

值得注意的是, 通过式 (2.1) 得到的形式可以被用来实现时间和空间的离散化处理。

一旦一个给定的微分方程被转化成一个有限差分代数方程, 这就意味着是通过特定步长 Δt 、 Δx 对其进行了时间和空间的离散化处理。这样的离散化过程会产生时间上的离散步和区域上被划分成小的单元或叫胞元。在 FDM 中, 我们通常假设所考虑区域是由边长不同的立方体胞元构成的。但是, 因为所应用的问题不同, 通常因为方便而采用立方体胞元, 这就意味着给定问题的控制方程仅是由它在网格节点的离散形式来确定的。

这样处理离散化的方法在面对有曲率的问题时就会导致一个常见的“阶梯”问题。常规网格的一个明显的缺点就是, 我们所感兴趣的所有区域都是由相同尺寸的单元所覆盖, 不能做到在需要细化的区域 (例如拐角、狭长区域等) 细化网格, 而在其他地方采用粗化的网格。

另一方面, FDM 所形成的这些相对简单的代数方程可以用并行计算方式快速有效地进行处理。而且, 因为网格常规化, 以及每个网格节点的方程形式都一样, 计算时间将会大大减少。

2.2.2 有限元法

有限元方法 (FEM) 是一种假设解的形式已知, 通过使用单元来解决微分方程的方法。通过使用单元, 划分网格来离散结构。尽管有限元方法发展最迅猛的时候是 20 世纪 40 年代及之后, 但是有限元方法思想最早在 19 世纪就提出来了。Kirsch (1868) 提出用一组已知解形式的几何形式来代替连续体的一般解答。

有限元方法有多种形式, 其中最主要的两种方法是①变分法; ②加权残差法 (Bathe, 1996; Segerlind, 1984; Zienkiewicz 和 Taylor, 2000)。这两种方法都为力学系统的解答提供了解决途径。

变分法是利用泛函（一种积分形式）通过稳定性条件来寻找平衡，对于力学系统来说，机械能可能会是泛函的形式，那么稳定性条件对应的就是体系能量最低的情况。因此，只要知道系统的机械能，就可能找到平衡位置。这就为分析机械系统提供了一种多样化且通用的途径。

加权残差的方法是直接用微分的形式来解决一个给定的问题。用一个试验解答来替换微分方程的真实解答时会产生一个误差，称之为残差。在这种情况下，改变试验解答及评估残差就会帮助我们找到最接近微分方程真实解的解答。当然，最小可能残差（极限情况下为零），对应的就是最佳解答。此外，加权残差和整合结果可以帮助我们改善寻求解答的过程，在解答域内增加更多的限制条件。因为存在不同的残差加权方法，所以我们要予以区分各种不同类型的加权残差法（Bathe, 1996）：

- 1) 配点法（Collocation method）。
- 2) 子域法（Subdomain method）。
- 3) 伽辽金法（Galerkin's method）。
- 4) 最小二乘法（Least squares method）。

有限元法适用于任意形状域的问题。因为实际情况并没有限制节点的位置（除了考虑准确性），所以“阶梯”问题是可以合理划分网格和网格细化来消除的。因为有限元法不仅可以模拟力学问题，还同样适用于热、电和磁场等领域的研究，这就使得它更具吸引力，同时，有限元法作为商业以及免费的软件，也非常受欢迎。

有限元法的缺点是计算时间长，特别是当需要高时空分辨率的时候，比如计算高频波的情况。这是因为为了提高计算精度，必须采用很小的单元尺寸和时间步长的关系。

2.2.3 谱单元法

谱单元法（SEM）这个名字被用来指代两个已知的数值方法，第一个是 Beskos 命名的（Narayanan 和 Beskos, 1978），第二个是 Patera 命名的（Patera, 1984）。这两种方法经常被搞混。后者是指光谱 - 空间的方法。在有关这个问题上的第一部分工作中，Patera（1984）提出了一个标准有限元方法的亚参数方法。这就意味着高阶多项式被用于场变量近似，而低阶多项式被用于几何描述。他引入了含有 Gauss - Lobatto - Legendre 积分规则的高阶 Lagrange 插入。这样就得到了一个精确的对角质量矩阵，这个矩阵需要高效的显式时间积分方法来解决。因此，Patera 提出的方法可以被认为是一种高阶的有限元方法。它最初被用来计算流体动力学（Korczak 和 Patera, 1985；Patera, 1984），但很快就被用于其他领域的计算，如地震波传播（Komatitsch 和 Tromp, 1999；Komatitsch 等, 2005）。

Beskos 的谱单元法（SEM）（Narayanan 和 Beskos, 1978）实际上是在频域范

围内的有限元法。它综合了有限元法、动态刚度法 (DSM) 和谱分析方法 (SAM) 的一些特点。因为用于波传播的有限元法前文已经提到, 下面仅对动态刚度法 (DSM) 和谱分析方法 (SAM) 给出细节。

2.2.3.1 动态刚度法

动态刚度法 (DSM) 中一个关键的概念就是系统刚度矩阵的具体形式。这可以看作是传统有限元方法中质量、阻尼和刚度矩阵的组合。动态刚度矩阵是频率相关的, 分析中的每个频率都有一个各自的动态刚度矩阵。构建这一矩阵的基本想法是利用精确的动态形函数。因为这些函数是随着频率不断变化的, 所以在传统的有限元方法中遇到的很多问题就没有了, 例如对高频波成分的网格细化问题。首先根据控制微分方程的解答来建立形函数, 然后将形函数转化为频域的形式, 形函数直接受给定问题的解析解答控制。这一方法的更细节的描述见 Banerjee (1997)、Gopalakrishnan 等 (2008) 和 Lee (2009)。

2.2.3.2 谱分析方法

解决时间相关的问题主要有两种方法。第一种方法是在时域内直接使用积分法来分析。第二种方法是将系统分解为一系列的频率分量, 在频域内解决问题, 而且, 如果有必要的话, 再将解答转换到时域。这一过程中的转换方法有很多种, 如拉普拉斯变换、傅里叶变换和小波变换 (Gopalakrishnan 等, 2008)。傅里叶变换因其可用于快速强大的数值工具而成为使用最广泛的方法, 例如快速傅里叶变换 (FFT)。被分析的系统因此变成一组系统, 每一个频率对应一个。对这种类型的分析方法的介绍见 Gopalakrishnan 等 (2008) 和 Lee (2009)。

2.2.3.3 谱单元法

谱单元法 (SEM) 结合上述几种方法的关键优点。首先, 将系统转化到了频域。因此, 我们必须面对一系列的“静态”系统 (频率在此可能被认为是一个参数)。其次, 为每个频率构建一个动态形函数。这些形函数直接由控制方程得到, 这也就意味着这些函数是精确的 (和控制方程一样的精确度) (Banerjee, 1997)。精确解有一对分量分别代表反射波和入射波。这对认为的边界条件是特别重要的, 因为在这一水平上形成的人为边界条件是独立地影响着每一个部分的, 例如初始条件。这就构成了一个依赖频率的动态刚度矩阵。再之后, 在频域内获得解答, 进一步将解答进行时间-频率逆变换 (如快速傅里叶逆变换) 并得到时域的解答。在图 2.1 中给出了这一部分工作的流程及过程中使用到的数值工具。

谱单元法 (SEM) 比传统有限元法优越的地方在于:

- 1) 具有精确形式的形函数带来的高精度。
- 2) 由于一个元素为域内的一块区域提供了非常准确的解答, 因此使得系统自由度 (DOF) 数量最少。
- 3) 相对较低的计算成本 (对提供的解)。
- 4) 因为是在频域操作, 对频率相关的问题有效。

- 5) 吸收边界条件易建立。
- 6) 无锁定的方法。
- 7) 系统转换函数的显式可用性。

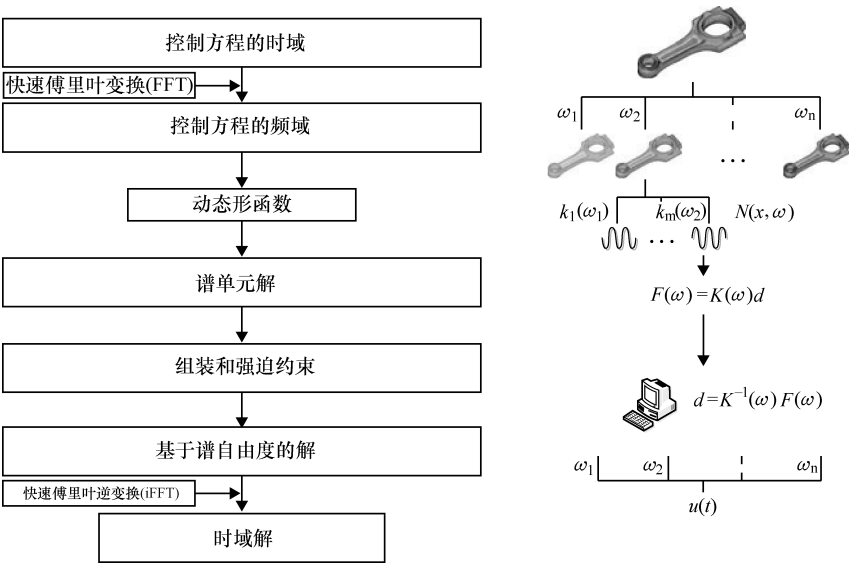


图 2.1 谱单元法的工作流程。主要思想是傅里叶变换和动态形函数

尽管有上述优势，谱单元法也有严重的缺陷，这就限制了其应用于某些特定类型的问题。其中最主要的几点如下：

- 1) 只有相对简单的系统才能得到确切的形函数（对多维系统来说这通常会带来很大的问题）。可以使用近似方法来解决，但是这就会降低解答的精度。
- 2) 该方法不能直接用于时变、非线性系统。
- 3) 解答涉及时间 - 频率逆转换，这就可能导致数值问题（如逆拉普拉斯变换）和解的恶化。

2.2.4 边界元法

边界元法（BEM）来自于解析和数值的组合（Becker, 1992）。BEM 起源于一个微分方程。随后通过假设在无限区域内一个集中力（Kelvin 问题）及其他对域内其他点的作用，这样来确定方程的基本解答。这个解析解一经发现，就为域内其他点的位移（或者拉力）提供了解答。这一基本解答是与边界元法的另一个组成 Betti 定理相联系的。Betti 定理（互换功定理）指出，在一个平衡的物体中，如果有两个应力 - 应变状态，第一组的应力对第二组的位移所做的功等于第二组的应力对第一组的位移所做的功。定理的基本形式可以用一个方程来表达，方程中包含表

面项（表面力）和内部项（体积力）。随后，基本解被用来代替方程的已知部分（选定的一组表面力和位移），得到物体内部的位移方程，称为 Somigliana 恒等式（Becker, 1992）或边界积分方程（BIE）。Somigliana 在 1886 年提出了关联边界上位移和表面力的第一个积分方程（Becker, 1992）。从那时直到 20 世纪 60 年代，数值方法快速发展时，边界元法（BEM）却基本没有进展。随后，Jaswon（1963）和 Symm（1963），以及后来的 Rizzo（1967）和 Cruse（1969）的工作，提出了我们今天所熟知的边界元法的基本原理。因为在早期的工作中，一些表面积分是解析得到的，因此这些被称为半直接方法。随后，这一理论被扩展到完全使用数值方法来解决积分问题。总结来说，控制微分方程的基本解答为计算一点处力的作用对域内其他点的影响提供了一种方法。不管几何形状如何，这一解答对于一个给定的微分方程是有效的。通过使用 Betti 定理，人们可以把已知的解（基本解）与手头的问题联系在一起。

如果边界上的位移和力以及基本解答是已知的，那么边界积分方程（BIE）就能够计算域内部的位移。只有对边界来说离散化才是必须的，并且是通过使用标准表面有限元网格来离散的。因为边界积分方程（BIE）涉及边界上的积分，所以可以使用标准的高斯积分方法。

边界元法（BEM）为解决工程问题提供了一个强大的工具。考虑到以下几点，针对特定的积累问题，它是优于其他数值方法的：

- 1) 模型定义容易，只在表面划分、存储和处理网格。
- 2) 由于使用精确的解析解，可以得到域内高的分辨率。
- 3) 由于只涉及表面，与其他方法相比，自由度少。
- 4) 对其他方法（有限元法）发展的许多数值方法，可直接用在边界元法（BEM）中。

但是，边界元法（BEM）也有它自身的缺点，例如：

- 1) 对非线性问题来说，内部必须建模，这就失去了边界元法（BEM）的主要优势。
- 2) 由于平板状结构的体积/表面的比值较低，边界元法（BEM）无效。
- 3) 边界元法（BEM）的公式是非对称和完全填满的矩阵。

2.2.5 有限体积法

有限体积法（FVM）是利用控制方程的综合形式，即通过在控制体积上的综合处理，从微分方程直接获得其积分形式，因此，称为有限体积法。因为积分是在整个体积上，而且控制方程中含有散度，因此利用高斯散度定理将这些散度转换成表面上的积分。这里假设物理量是定义在网格节点上，而不是直接在控制体积的表面。因此，必要的物理量需要以节点变量的形式来表示。这里采用了标准有限差分（FD）近似。这样就可以及时追踪控制体积中的那些综合量（平均数量）。由于有

有限差分 (FD) 公式在这里的直接应用, 有限体积法 (FVM) 也可以被视为有限差分法 (FDM) 应用到微分方程的一个特定形式 (LeVeque, 2002)。如上文所述, 有限体积法 (FVM) 要面对的是体积平均, 而不是节点值。这就很容易满足守恒定律。有限体积法 (FVM) 推导和实现的细节可以在 LeVeque (2002) 以及 Versteeg 和 Malalasekera (2007) 中找到。

有限体积法 (FVM) 已经被用来发展弹性动态有限集成技术 (EFIT) (Fellinger 等, 1995; Langenberg 和 Marklein, 2005; Marklein, 2002), 这一技术被广泛地用于弹性波传播的研究 (Rudd 等, 2007; Schubert 和 Marklein, 2002; Schubert 等, 1998)。

在 EFIT 中, 柯西运动方程和变形速率方程被通过高斯散度定理转化为一个积分形式, 然后体系被离散成一系列的单元和网格。在特定单元表面和网格节点计算应力和速度分量, 这样就得到了交错双重网格模型 (Fellinger 等, 1995)。然后将方程在时间和空间上整合起来。这其中对时间微分是采用标准中心差分算子。

尽管 EFIT 已经被广泛用于波传播的模型研究, 但是它还有一些不可忽视的缺陷。首先, 正如其他的 FDM 那样, 它不需要对不连续性进行显式处理。因此, 是用不同材料性质的网格单元来代表缺陷。由于空间离散化是基于交错网格的概念, 那么场变量 (例如压力和速度的分量) 就是在空间的不同位置进行处理, 这就会带来这样一个问题: 在建立合适的边界条件时, 位移值和应力自由边界条件不能在一点同时得到满足。

2.2.6 其他数值方法

控制微分方程还可以用许多其他的数值方法来解。此外, 结构的各类问题可以在低尺度下通过离散而不是连续的方法来解决。虽然不能直接适用于宏观问题, 但 these 方法尤其适用于损伤的建模, 这是基于 SHM 系统测试仿真不可避免的一部分。

除了在前面部分详细描述的方法以外的其他方法可以在连续介质力学框架内使用。数值方法发展最迅速的领域之一就是所谓的无网格数值方法 (Li 和 Liu, 2007)。顾名思义, 分析中并没有描述域的结构化网格。相反, 只使用节点 (粒子) 来构造空间近似。这就消除了经典的基于网格的方法中遇到的困难, 因为基于网格的方法是与损伤萌生和扩展相关的。

尽管近似是基于节点变量的, 但是值得注意的是, 控制方程描述的仍旧是连续介质力学问题。有许多可用的无网格方法, 这些方法可以根据问题的形式分类 (属于微分方程的弱形式还是强形式):

强形式方法

- 1) 光滑粒子流体动力学 (SPH) (Li 和 Liu, 2007)。
- 2) 涡方法 (Bernard, 1995)。
- 3) 无网格有限差分法 (Liszka 和 Orkisz, 1980)。

弱形式方法

- 1) 扩散单元法 (Breitkopf 等, 2000)。
- 2) 无单元伽辽金法 (Belytschko 等, 1996)。
- 3) 重构核粒子法 (Chen 等, 1996)。
- 4) h-p 云方法 (Duarte 和 Oden, 1996)。
- 5) 单位分解法 (Babuska 和 Melenk, 1996)。
- 6) 无网格局部彼得罗夫-伽辽金法 (Atluri 和 Zhu, 1998)。
- 7) 有限点法 (Onate 等, 1996)。
- 8) 有限球体法 (De 和 Bathe, 2000)。
- 9) 无网格法 (Yagawa 和 Yamada, 1996)。
- 10) 移动粒子有限元法 (Hao 等, 2002)。
- 11) 自然单元法 (Sukummar 等, 1998)。
- 12) 复制核单元法 (Liu 等, 2004)。

详细描述以上每种方法超出了本书的范围。更多细节可以在 Belytschko 等 (1996), Fish (2009), Li 和 Liu (2007), Li 等 (2001) 和 Lucy (1977) 中找到。然而值得一提的是, 无网格近似背后的基本思想 (也是其他基于连续介质方法的基本思想) 就是所谓的单位分解 (Babuska 和 Melenk, 1996)。

单位分解法要求插值函数具有这样一个性质, 即在单元内的任何点, 它们的贡献之和等于一。这也是有限元法中形函数和其他插值方案的性质。这种方法需要建立一个插值方法来将给定的函数分解为一组插值参数。无网格近似是由一组相互之间无任何拓扑联系的节点构造而成。因此, 插值函数的构造是不断变化的, 而且是基于当前节点周围情况来构造的。

尽管无网格方法在解决大变形问题时特别有利 (Chen 等, 1998), 它也已经成功地被用于波传播的分析中 (Gao 等, 2007; Moosavi 等, 2011; Shobeyri 和 Afshar, 2012)。

还有一些粒子方法被用来解决离散问题。前面已经提到, 在处理多尺度模型时, 离散模型 (如原子论的模型) 是特别重要的。在系统的尺度减少时, 基于连续介质的材料模型就不适用了。也就是说, 物质不能被表示为一个连续体, 而是作为一组决定体系响应的原子 (或分子)。在离散方法中, 虽然它们都是基于粒子的, 但我们仍假设参数的分布仅限于节点, 即在空间中没有数量的连续插值。相反, 粒子之间的相互作用被描述成其他形式的直接作用, 例如力场。离散方法广泛用于从太阳系, 到颗粒介质, 再到原子系统的一系列问题 (Allen 和 Tildesley, 1989; Rapaport, 2004)。分子动力学 (MD) 方法及其改进形式在这个领域起到了最突出的作用。要使用基于分子动力学 (MD) 的方法, 就必须定义粒子间的相互作用, 这可能是两个、三个或多个物体的交互作用。这些通常称为力场。体系的响应直接由控制方程的时间积分来追踪。牛顿定律是用来建立平衡条件的。考虑一

组粒子 i ，质量 m_i ，势能 Π (描述第 i 个粒子与其他粒子之间的相互作用)，可以写出系统的一组方程：

$$m_i \frac{\delta^2 u_i}{\delta t^2} = -\nabla \Pi \quad (2.3)$$

之后，应用时间离散化方案可以计算出粒子 i 的位移 u_i 。值得注意的是，所考虑粒子的运动（可能）与所有其他粒子通过势能相关联。这就意味着分子动力学（MD）的工作量巨大。而由于 GPU 等强大的并行处理设备的发展，分子动力学（MD）模拟最近又重新受到重视。

在过去的几十年中，各种数值方法相结合，利用不同方法的优异功能，来提高各自的计算能力。这样就出现了所谓的混合和多尺度建模，对分析基本的自然现象以及它们对材料宏观尺度响应的影响提供了新的机会。上述模拟方法给损伤萌生和演化的模拟提供了新的可能性，扩展了数值模拟对 SHM 系统改善的潜在用途。混合和多尺度建模都将在 2.3 节重点介绍。

应该提到一个有趣的方法，它是来代替传统采用包括细胞自动机的弹性波方法（Kluska 等，2012；Leamy，2008）。它的主要思想是根据单元邻域状态来建立其自身状态。因此，就需要一系列的准则来定义可能的状态、转换条件和邻域。最常用的两种邻域是摩尔（Moore）域和冯·诺依曼（von Neumann）域。给定特定时间的邻域状态，人们可以通过一组转换规则，定义所要考虑单元的状态。这其中涉及的转换条件可以是任意的或有一定的数学关联的。

2.2.7 时间离散化

出现在任何动力学方程中的时间导数项，与惯性或速度相关。在离散化过程中这些项被视为与力相关的量，因此，就是寻求后续时间步的一系列“静态”解。因为过程对动力学至关重要，而且它对上述所有方法几乎是相同的，所以时间离散化是单独处理的。特定的程序适用于特定类型的问题，而且从数学公式的角度来看也各有优缺点。

时间相关问题的时间积分法可以分为两类，即直接积分法和模态叠加的方法。第一种方法是根据一个特定的数值方案在离散的时间步上来解方程；第二种方法将运动控制方程进行一个变换，将要解决的系统分解为一组简单的体系，这些简单的体系每个都可以在时间上进行积分。这样原始域上的解就可以通过逆变换得到。

对于要解决的结构问题，基于双曲的偏微分方程，控制方程的一般形式可以表达为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (2.4)$$

式中， M 是质量矩阵， C 是阻尼矩阵， K 是刚度矩阵， F 是一个外部施加载荷的向量， X 是位移向量，为了在时间上解决系统（2.4），控制方程必须对时间进行

积分。

2.2.7.1 直接积分法

在直接积分方案中，是通过在特定的时间点解系统的控制方程来追踪系统的时间历史的。因此，时间的导数需要用系统时间演化的近似形式来代替。这里就采用了有限差分的公式。尽管近似微分有很多的有限差分公式，但是实际只使用其中的一部分。这是因为用于时间微分的有限差分算子针对系统进行了额外的假设，这才提供了高效的解答。这也就是为解的精确性设置了条件的的时间积分方案。这其中有两种不同的方法：显式时间积分和隐式时间积分。

1. 显式时间积分

在显式时间积分方法中，为了给出下一个时间步 $t + \Delta t$ 的解答，控制方程式 (2.4) 在当前时间步 t 可以写成这样的形式：

$$\mathbf{M}^t \ddot{\mathbf{X}}^t + \mathbf{C}^t \dot{\mathbf{X}}^t + \mathbf{K}^t \mathbf{X}^t = \mathbf{F}^t \quad (2.5)$$

然后，引入时间导数的近似。最常用是中心差分方法，表示如下：

$$\ddot{\mathbf{X}}^t = \frac{1}{\Delta t^2} (\mathbf{X}^{t-\Delta t} - \mathbf{X}^t + \mathbf{X}^{t+\Delta t}) \quad \text{和} \quad \dot{\mathbf{X}}^t = \frac{1}{2\Delta t} (\mathbf{X}^{t+\Delta t} - \mathbf{X}^{t-\Delta t}) \quad (2.6)$$

把式 (2.6) 代入式 (2.5)，在 $t + \Delta t$ 的时刻计算 $\mathbf{X}$ ：

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{X}^{t+\Delta t} = \mathbf{F}^t - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{X}^t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} - \frac{1}{2\Delta t} \mathbf{C} \right) \mathbf{X}^{t-\Delta t} \quad (2.7)$$

在下列条件时，式 (2.7) 的解是非常有效的：

- 忽略阻尼矩阵。
- 使用集中质量矩阵公式。

之后，式 (2.7) 可以写成：

$$\mathbf{X}^{t+\Delta t} = 2\mathbf{X}^t - \mathbf{X}^{t-\Delta t} + \Delta t^2 \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{F}^t - \mathbf{K}^t \mathbf{X}^t) \quad (2.8)$$

显然，最耗费计算工作量的就是求矩阵 $\mathbf{M}$ 的逆。当质量矩阵 $\mathbf{M}$ 是集中矩阵时，它是纯粹的对角阵，那么它的逆是非常简单的：

$$\mathbf{M}^{-1} = \text{diag} \left(\frac{1}{m_i} \right) \quad (2.9)$$

这就意味着逆计算的解答是很容易计算的。解答的其余部分主要是简单的矩阵操作，可以非常快地处理。

显式方案的主要缺点是条件稳定性，即时间步 Δt 必须满足

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} \quad (2.10)$$

这意味着，要使这个方法的解答是稳定的，时间步长必须小于临界值。但是由于其计算的有效性，这个方法在解决波传播的问题时仍旧是被广泛采用的。因为采用的时间步必须很短，所以就必须解式 (2.8) 很多次。幸好质量矩阵是集中矩阵，避免了求逆运算，而且刚度矩阵也不用求逆，这才使得解式 (2.8) 还算比较迅速。

2. 隐式时间积分

与显式方法相反，隐式方法是先假设下一个时间步 $t + \Delta t$ 的平衡方程：

$$\mathbf{M}^{t+\Delta t} \ddot{\mathbf{X}}^{t+\Delta t} + \mathbf{C}^{t+\Delta t} \dot{\mathbf{X}}^{t+\Delta t} + \mathbf{K}^{t+\Delta t} \mathbf{X}^{t+\Delta t} = \mathbf{F}^{t+\Delta t} \quad (2.11)$$

根据对式 (2.11) 中时间微分近似所使用的公式，可以使用到下面这些方法：

- Houbolt 方法 (Houbolt, 1950)。
- Wilson 方法 (Wilson 等, 1973)。
- Newmark 方法 (Newmark, 1959)。

这些方法有一个共性，就是如果这些典型的参数是无条件稳定的，那么就需要比显式积分方法更大的时间步长。另一方面，隐式计算需要完整的矩阵求逆操作，因此要慢得多，对波传播的应用是不可取的。

2.2.7.2 模态叠加

直接积分方法，特别那些有条件地稳定方法，长时间的计算需要非常多的时间步。此外，对于显式方法来说，时间步是由模型中最小单元周期决定的，这就意味着即使存在一个非常小的单元，也可能极大地增加计算时间。这样看来计算费用就可能会很大。

在解答阶段为了尽可能地减少操作步骤，可以对控制方程 (2.4) 进行转化。下面的 (Bathe 1996) 位移矩阵 $\mathbf{X}$ 可以按下式进行转换：

$$\mathbf{X} = \Phi \mathbf{D} \quad (2.12)$$

式中， Φ 是列矩阵，为了计算忽略阻尼的系统 (2.4)，它被质量的特征向量规范化， $\mathbf{D}$ 是一个模态位移的向量。把式 (2.12) 代入式 (2.4) 后，我们得到：

$$\ddot{\mathbf{D}} + \Phi^T \mathbf{C} \Phi \dot{\mathbf{D}} + \Omega^2 \mathbf{D} = \Phi^T \mathbf{F} \quad (2.13)$$

式中， Ω 是包含对应特征向量矩阵 Φ 的特征值的对角矩阵。

如果分析中不考虑阻尼的话，系统 (2.13) 可以解耦为一组方程的形式：

$$\ddot{d}_i + \omega_i^2 d_i = f_i \quad (2.14)$$

式 (2.14) 表明，系统被分解为一组独立的方程，可以用任何一种直接积分方法来解答。按照模态位移的解答有这样一个特征使得它很有吸引力：每个方程都可以使用不同的时间步长值来单独进行积分。对于显式时间积分方法，关键的时间步取决于单元的周期，而这里时间步可以根据不同的模态 DOF 来进行调整。

2.3 混合和多尺度建模

在绝大多数的实际应用中，大家关心的是可观察到的现象，即那些结果可以解释的，或者影响大规模响应的，如波与微裂纹、晶界、夹杂等的相互作用，包括非线性摩擦或微塑性影响。另一方面来说，总体尺度上的材料性能本质上是由小尺度的现象引起的，即原子的相互作用。举例来说，就有聚合物复合材料老化过程或位

错运动和塑性 (Buehler, 2008; Mlyniec 和 Uhl, 2011)。

由于大分子系统的极端计算复杂性, 对结构或组件的总体研究虽然很理想化, 但是用离散化的原子模拟方法来做这个研究几乎是不可能的。因此, 最常用于总体分析的基于经典微分方程的建模方法, 对材料的行为进行很大的简化, 只考虑它的宏观响应。微分方程可以通过子模型来进行扩展, 子模型预测了系统的响应, 包括小尺度的影响, 提供了诸如本构关系或损伤演化规律等 (Lemaitre 和 Chaboche, 1994; Li 和 Liu, 2007; Tadmor 等, 1996)。在过去的近 20 年时间里, 这些被称为多尺度模型的模型, 已经引起越来越多的研究人员的兴趣 (Fish, 2009; Li 和 Liu, 2007)。

在多尺度建模中, 值得提到的是两种类型的方法, 即一致和分层两类 (Packo 和 Uhl, 2011)。第一种方法是将模型先分解成不同的尺度, 然后同时解决。第二种方法中, 信息传递是从最高尺度到最低尺度, 在最低尺度进行计算, 然后再将这写参数从最低尺度传递到最高尺度。

其他的模型类型主要是混合模型。尽管有些方法考虑的只有一个尺度, 但是仍旧被算作为一致多尺度方法组。那它们也就像在典型的并行多尺度方法中一样, 面临着一个“域连接”的问题。这里举一个例子, 在一个现在不断发展的非线性声学领域 (Klepka 等, 2011) 中, 两个时间尺度——高和低频激励, 与结构的缺陷相互作用, 产生了非线性的效应。

从技术的角度来看, 混合和多尺度模型结合了很多种不同的建模方法, 例如有有限元法 (FEM)、谱单元方法 (SEM)、有限体积法 (FDM)、有限体积法 (FVM)、分子动力学 (MD)、无网格等, 这些方法都是用于描述不同尺度材料行为的。在这些方法之间采用特殊的转换准则来管理模型之间的数据流, 同时也用这些转换准则来建立一种一致性的模拟方法。因此, 一个合理的多尺度模型由两个同等重要的部分组成: 模拟方法和耦合方案。虽然对一个特定问题选择一种模拟方法比较简单, 但是在建立耦合方案的时候应该要注意, 这个过程中就需要一个能够正确模拟所涉及物理现象的数学公式。

除了经典的连续介质模型, 多尺度建模通常需要离散 - 连续的耦合 (Aubertin 等, 2010; Karpov 等, 2006; Park 等, 2005; Xiao 和 Belytschko, 2004)。这就定义了一类新的问题, 即处理连续介质材料和分子尺度之间过渡的问题。这其中主要的难点在于应力 - 应变测量的解释, 这里的应力 - 应变是对空间任何一点基于分子尺度位移的 (Admal 和 Tadmor, 2010; Brancio 和 Srolovitz, 2009; Dommelen, 2001; Liu 和 Qiu, 2008; Zimmerman 等, 2004)。

连续体和连续体的耦合, 以及连续体和离散体的耦合问题, 可以从两个方面来考虑。首先, 从静态的角度来看, 情况相对简单。尺度耦合方案必须满足特定的条件, 但是对于给定的边界条件, 解答是建立在一个单独的时间点上的。这个问题已被研究人员成功解决了 (Burczynski 等, 2007; Mrozek 等, 2007)。

由于稳定性的问题,耦合算法在计算动力学问题时就像计算波传播的问题时一样会变得非常复杂。根据问题的尺度和所选取的离散化方法的不同,可能会出现各种不同的问题。对于动态耦合,必须考虑附加的惯性项。而且不同的子模型中时间离散也不一样,这就会造成额外的结果。在不同的子域以及尺度相关的问题采用不同的建模方法,可能导致一个模型中的动力学成分在另一个问题中没法处理。这样问题的一个典型的例子就是声子,在原子尺度可以给出声子的概念,但是在更大的尺度却给不出来(Karpov 等, 2006; Li 和 Liu, 2007)。因为波浪从小尺度界面到大尺度界面传播的过程中会被反射,这就会产生一个人为的模型响应,这就需人为地建立一个能够吸收这些波的边界条件(Karpov 等, 2006)。这类问题通常采用所谓的握手域来解决(Xiao 和 Belytschko, 2004)。

目前已经开发了各种多尺度模拟的数值方法。Belytschko (Xiao 和 Belytschko, 2004; Zhang 等, 2007), Hughes (Garikipati 和 Hughes, 2000), Liu (Karpov 等, 2006), Geers (Kouznetsova 等, 2004), Yip、Ulm 和 Pellenq (Pellenq 等, 2009; Yip, 2005) 是这一领域的领导者。在这一领域,已有大量的研究工作探讨了静态问题耦合理论,提出了很多利用离散的原子尺度计算和整体连续介质方法的算法(Buehler, 2008; Fish, 2009; Tadmor 等, 1996)。一个里程碑式的工作是宏观原子动力学(MAAD)(Abraham 等, 1998),它同时将经典的有限元方法与两种原子尺度的离散方法相耦合。这一方法继续发展,并考虑了连续介质域内的热自由度之后,就得到了粗晶的原子动力学(CGMD)(Broughton 等, 1999)。一个很好的例子就是用于弹性常数估算的 Cauchy – Born 准则。层次耦合的方法已经发展成为准连续方法(Tadmor 等, 1996)。

多尺度和混合建模方法的最终目标是在不增大计算量的情况下改善计算的解答。考虑到应用于基于 SHM 系统的弹性波的那些建模方法,可以通过增加了小尺度现象的多尺度模拟方法来改善现有的损伤模型。混合模型使得对传感器和与温度相关的系统两者之间有效的跨学科建模成为可能,而且通过每个方程的关键特点从而提高了建模方法的功能。

波传播模拟的主要挑战是计算速度和精度之间的平衡问题。提供相对较短的计算时间的模型(例如有限差分方法)在处理曲面几何问题时就会失效,除非减小网格划分的尺寸。但是,小的单元尺寸又会增大模型的规模、内存要求和计算时间。用于任意形状域的方法(如有限元法)为了得到解答需要很长的计算时间。因此,能够对带曲面边界的域进行有效模拟的混合方法,近年来吸引了研究人员很大的注意力(Asensio 等, 2007; Chavent 和 Roberts, 1989; Ducellier 和 Aochi 2009; Eizhong Dai 和 Nassar, 2000; Filoux 等, 2009; Galis 等, 2008; Karpov 等, 2006; Ma 等, 2004; Moczo 等, 1997; Monorchio 等, 2004; Rylander 和 Bondeson, 2000, 2002; Soares, 2011; Vachiratienchai 等, 2010; Venkatarayalu 等, 2004; Wolf 等, 2008; Wu 和 Itoh, 1997; Xiao 和 Belytschko, 2004; Zhu 等, 2011,

2012)。

考虑到耦合方案时，有下面几种情况（正负分别表示优点和缺点）：

- 界面耦合（通过一个共同的表面耦合）：
 - + 模拟域完全解耦。
 - 边界条件（BC）难以建立和实现。
 - 边界条件（BC）必须不断更新。
 - 边界条件（BC）必须完全符合界面的轮廓。
- 信号交换域（通过部分重叠区域耦合）：
 - + 可以定义边界条件（BC），独立的界面轮廓。
 - 控制方程应对重叠域（能量）做出解释。
- 重叠区域（通过完全重叠域的耦合）：
 - + 与边界条件（BC）方向没有问题。
 - 局部的模型变化。

界面耦合没有重叠的区域，因此模型中没有加倍的位移自由度。所以考虑到模型大小的时候它是最优的。但是它又要求耦合的边界必须是完全匹配的，也就是说边界耦合方案不仅要在边界适用，还要跟着边界的变化而变化。从这个角度来看，这又是一个很复杂的方法，因为界面的形状可能是非常复杂的，界面必须由两个被耦合的域来跟踪。就像前面提到的，当考虑动态耦合时，问题就会变得非常复杂。对应静态问题的类似解答可以在 Burczynski 等（2007）和 Mrozek 等（2007）中找到。

基于信号交换区的模型相对来说容易实现。这些模型通常弱化自身的模型属性来与域相匹配。它们可以很容易地被应用到不规则区域中，而且域的边界还可能是不同的形状。然而，一个重叠区域位移自由度会加倍，这就会降低计算效率。此外，为了使整个模型一致，重叠区还应该考虑系统的能量。在 Xiao 和 Belytschko（2004）中提出了基于握手方法的一个模型。

一个完全重叠的区域也可以作为一种耦合方案使用。在这种方法中，假设模型中某一区域的解可以分解为两个部分，每个部分与一个不同的数值模型相关联。除了这些模型外，还引进了附加的数值技术，用来消除在两个区域中都不能处理的问题。在这一领域中最著名的两个论文是 Chen 等（1996）和 Karpov 等（2006）给出的。

在上面提到的这些耦合方案中，一个共同的难点就是对于整个模型（域和耦合区域）本构行为的定义。解决这个问题可以从两个方面来考虑：理论和数值。

从理论的角度来看，区域应该被视为一个整体。这意味着不管采用的数值方法是什么，体系的每个点都要满足平衡方程。而且，即使对耦合区域，平衡也是必须满足的，而且还要和模型的其余部分一致，这在数值模型中有时是实现不了的。

用于分析给定物体的数值模型以及耦合方案应该使得物体中模拟域的过渡是无形的,就像在使用单一数值方法的标准建模方法中一样。因此,耦合方法的第一要求就是,它应该一致有效地链接不同的数值方法。这个非常重要的需求本应该有一个坚固的理论背景,即在耦合区域的特定点上能够满足平衡方程。另一个关键问题是,耦合方案必须是稳定的。有可能出现这样的情况,即尽管每个单独的数值方法是稳定的,但它们耦合之后却是不稳定的。这对条件稳定的方案尤其重要,因为它对任何引入的扰动都很敏感。两个显式数值方法连接的不太严格的后果是模型的总体稳定性判据比单独方法的标准更严格。

一个有效的耦合方法的要求如下:

- 提供一个与构成方法一致的平衡。
- 稳定性。
- 耦合模型的稳定性判据不降低效率。
- 由于耦合而额外添加的位移自由度数量最小。
- 严格的理论背景。
- 灵活性。

考虑混合方法的上述要求,人们已经开发了一个对 FE - FD 方法有效的和可靠的耦合方案。但是,在进行方法的描述之前,下面先简要概述下一个用于波传播建模的基于 FD 的方法,以及这个方法的实现。

2.4 局部交互仿真方法 (LISA)

考虑到分析时高时空分辨率的要求,在本章提出的各种数值方法中只有少数在模拟波传播时是有效的。其中最广为人知的是有限差分法 (FDM)。虽然它有一定的缺点,比如常规的网格导致“楼梯”的问题,但它支持高效的并行化。此外,在 Packo 等 (2012) 中介绍到,该算法已被重新审视,发现了很多标准有限差分法所没有的其他优势。下面介绍一下该算法及其推导过程。

局部交互仿真方法 (LISA) 是物理学中为了描述波在有剧烈阻抗变化的复杂介质中传播而提出来的一种方法 (Delsanto 等, 1992, 1994, 1997)。LISA 算法最初被设计成与连接机 (一个有成千上万并行处理器的超级计算机) 一起使用的,因此它非常适合并行处理。虽然下面的推导过程描述了二维算法,但对波在结构中传播开发的仿真框架需要完全三维 (3D) 的模拟。

LISA 可以用于在任意形状和复杂性的不均匀材料中波的传播。该方法在单元网格的基础上离散结构。假定材料属性在每个单元中为常数,但单元之间可能有所不同。时间行进采用标准的显式时间离散化。对于弹性、各向同性的同类介质,这个算法可以从动态弹性波动方程给出 (Harris, 2004):

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla W + \mu \nabla^2 W = \rho W_{,tt} \quad (2.15)$$

式中, λ 和 μ 是兰姆常数, ρ 是材料密度, W 是质点的位移向量。为简单起见, 这里介绍二维波传播情况。当忽略反平面剪切波时, 式 (2.15) 可以简化为

$$\rho w_{k,tt} = (\lambda + \mu) w_{l,jlk} + \mu w_{k,ll} \quad k=1,2; l=1,2 \quad (2.16)$$

式中, 逗号前的下标表示对该变量的微分。

常量 λ 和 μ 是材料的兰姆常数, 可表示为

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.17)$$

式中, E 是杨氏模量, ν 是泊松比。

上述方程可以改写成矩阵的形式:

$$AW_{,11} + BW_{,22} + CW_{,12} = \rho W_{,tt} \quad (2.18)$$

式中, 相关矩阵可以表示为

$$A = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & \lambda + \mu \\ \lambda + \mu & 0 \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

对于二维 LISA 波传播模拟, 结构被离散成细胞单元, 如图 2.2 所示。

考虑 A 、 B 、 C 、 D 和 F 是包含材料数据的矩阵, τ 是二维应力张量。四个单元格的连接定义了节点 P 。4 个单元格内的二次导数在 P 点需要趋同 P 点的共同值 Ω , 这就保证了, 如果在两个最初的时间 $t=0$ 和 $t=1$ 时单元格在 P 点位移连续, 那么对所有后续的时间, 它们仍将连续。有限差分格式是用来计算 P 点周围四个单元格的空问导数。这导致包含八个未知数量的四个方程, 因此需要找到剩下的四个方程。

根据应力张量 τ 在 P 点的连续性, 进一步使用有限差分公式给出了包含未知量的四个附加方程, 从而可以解出这些未知的空问一阶导数。

应用对时间求导的二阶准确中心差分公式, 给出了下面的显式公式, 由此可以计算下一个时间步长的位移分量:

$$u^{t+\Delta t} = 2u - u^{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta x^2} \left\{ \sigma_5 u_5 + \sigma_7 u_7 + \mu_6 u_6 + \mu_8 u_8 - 2(\sigma + \mu)u - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (-1)^k v_k v - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (-1)^k v_k v_k + \frac{1}{2} [(g_4 - g_1)v_5 + (g_1 - g_2)v_6 + (g_2 - g_3)v_7 + (g_3 - g_4)v_8] \right\} \quad (2.20)$$

$$v^{t+\Delta t} = 2v - v^{t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{\rho \Delta x^2} \left\{ \mu_5 v_5 + \sigma_6 v_6 + \mu_7 v_7 + \sigma_8 v_8 - 2(\sigma + \mu)v - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (-1)^k v_k u - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 (-1)^k v_k u_k - \frac{1}{2} [(g_4 - g_1)u_5 + (g_1 - g_2)u_6 + (g_2 - g_3)u_7 + (g_3 - g_4)u_8] \right\} \quad (2.21)$$

式中, $u = w_1$, $v = w_2$, Δx 是网格间距 (认为对于 x 和 y 方向是一样的), Δt 是时间步。

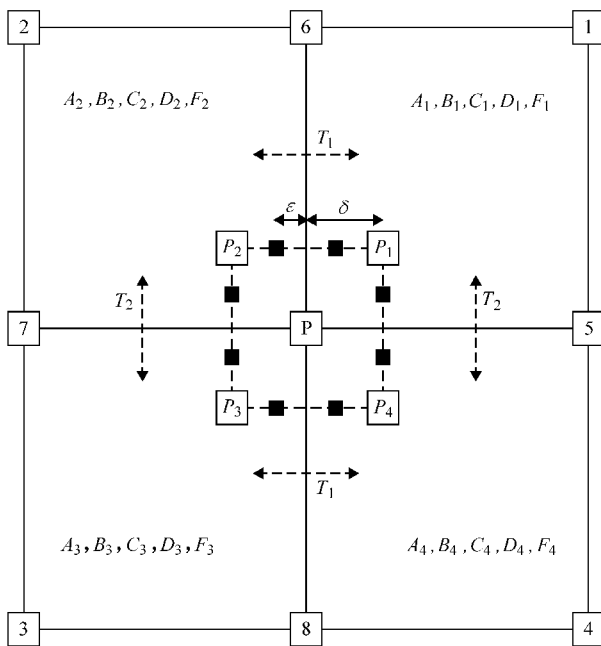


图 2.2 对二维情况下的四个 LISA 单元的交叉。每个单元有共同点 P , 因此, 平衡条件可以分别考虑和用应力连续性关系匹配

式 (2.20) 和式 (2.21) 是在二维 LISA 中主要的位移方程。更详细的推导可以在 Delsanto 等 (1994) 中找到。

需要注意的是, 当用于波传播时, LISA 算法的主要优势之一就是在模型中边界的局部交互性质。在界面网格节点采用尖锐界面模型 (SIM) 来平均物理性质, 这些界面网格节点代表了四个基本单元的相互交叉作用。换句话说, 单元被认为是不连续的, 只要位移和应力在界面网格节点处匹配。与典型的有限差分 (FD) 相比, 尖锐界面模型 (SIM) 仿真需要对不同的材料层的界面不连续性有一个更加明确的处理。经典的 FD 算法要求在界面处的材料参数是平滑的, 这完全取决于所使用的匹配方案, 因此, 它对于高阻抗失配的尖锐界面并不准确。相反, 对于复杂介质中的复杂边界波传播问题, SIM 方法就可以给出更精确的解答。该算法已成功用于损伤诊断的兰姆波传播的研究中 (Ambrozinski 等, 2010; Delsanto 等, 1994, 1997; Lee 和 Staszewski, 2003a, b, 2007a, b, c; Packo 等, 2011)。

2.4.1 GPU 实现

近年来图形处理器 (GPU) 的快速发展表明, 新的低成本显卡, 被称为 CUDA

(计算机统一设备体系结构)的一种结构,可以有效地用于数值模拟。CUDA 技术已经作为一种极其有效和准确的建模工具被用在医学、金融、地震学和计算机辅助设计中,如在 Krawezik 和 Poole (2009), Roberts 等 (2011), Seitchik 等 (2009) 和 Stone 等 (2007) 中所示。

几年前, Nvidia 公司就介绍了用在 GPU 中对图形加速的 CUDA 技术。现在 Nvidia 公司的 GPU, 广泛使用在高端台式计算机和笔记本电脑的显卡上, 它们有几个计算多处理器, 由几百个内核组成, 能够并行运行成千上万的轻量级线程。当与机载高带宽内存结合时, 这项技术可以极大地提高台式计算机 CPU 的性能和计算能力。根据 Nvidia 公司 2010 年公布的数据, 图 2.3 给出了 CUDA 的计算能力。数据显示, 现代图形卡的计算能力远远大于中央处理器 (CPU), 近期 GPU 的发展使得它们比 CPU 至少快 8 ~ 10 倍。

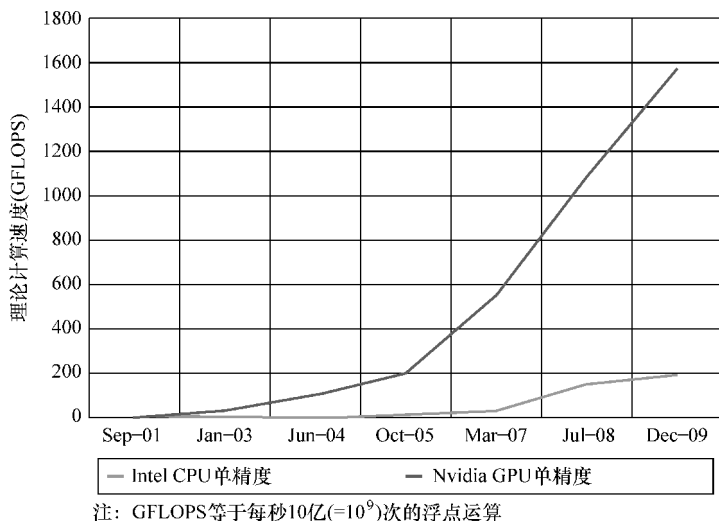


图 2.3 GPU 与 CPU 性能, CPU 和 GPU 的计算能力的比较

人们很快就意识到, 这种计算能力对科学难题的数值模拟将是非常有用的。当数值模拟的任务可以被分解成许多相对简单的子任务时, 由 Nvidia 公司开发的并行计算架构就可用于加速计算。事实上 CUDA 已被用于①医学相关应用的数值模拟中: 它被用来加快超声图像的后处理 (Techniscan); ②生物: 在伊利诺伊大学香槟分校 (纳米分子动力学), 用于在水中病毒行为的首次模拟; ③金融 (风险分析); ④地震学 (勘查矿产储备; 地震城市); ⑤工程: 它用于 CAD 应用程序的图形加速以及数值模拟的加速, 如有限元软件 (ANSYS), 矩阵求解 (Accelerware), 流体动力学 (Autodesk Moldflow) 以及其他 (Krawezik 和 Poole, 2009; Roberts 等, 2011; Seitchik 等, 2009; Stone 等, 2007)。

2.4.2 进一步发展的基于 GPU 的 LISA 软件包

LISA 算法已经用 GPU 实现了。如前所述, GPU 比 CPU 用更低的价格实现了更强的计算能力。而且, 一个标准的 GPU 配备了 400 多个核心和嵌入式快速记忆, 这使它非常适合并行计算。考虑到 LISA 算法以及在这个方法的推导过程中设置的条件, 它比 CPU 更适合的原因有以下几点:

- 迭代方程符合所谓的“轻量级线程”, 不需要一个单独的强大的处理器。
- 计算单位的直接集成和快速记忆使得它的计算极其高效。
- 方程已经从变量最少和内存消耗最小的角度进行了优化。
- 可以从其他基本量计算得到的变量是在方程中直接计算。这是因为 Nvidia 显卡对“乘法和添加”操作进行过优化处理。

本节的其余部分给出了已开发和使用框架的概述, 包括分析定义方案、分析管理和后处理功能。

这里的分析是通过文本文件来定义的, 文本文件包含模型的几何、材料特性、执行器、传感器、励磁信号和基本的模拟参数。因此, 我们就很容易通过直接改变输入文件或者外部程序来修改这个模型。同时为了支持分析的定义和结果的后处理, 还开发了辅助工具。首先, 模型的几何部分可以从标准的有限元网格读取, 因此就可以直接输入用于有限元计算的模型并用于结果的比较。此外, 开发出来的耦合过程可以准确和高效地模拟压电换能器和热机问题, 改善曲面边界。后处理工具需要非常有效的结果可视化过程。

我们可以通过交互式地使用一组 MATLAB[®] 或者一个可读取输入文件并生成结果的标准解算器来进行分析过程。因此, 仿真框架提供了一个灵活的解决方案, 这个方案是现成的或者说是可以针对不同的应用目的的一个核心解算器。有研究者还开发了一个专门的相控阵设计的解决方案 (Packo 等, 2010)。这个软件还集成了测量硬件, 这些硬件需要物理和数值实验之间结果的直接比较, 以及在测量中基于模拟设置的应用。图 2.4 给出了仿真框架的结构。

2.4.3 cuLISA3D 解算器的性能

这里所开发的解算器的性能优于这一算法的其他实现方式, 同样也优于其他应用到波传播问题的数值方法。在本节中我们给出了不同硬件平台上的结果。执行的代码优化是双重的。在第一步中创建原型的 MATLAB[®] 代码, 然后根据内存消耗和初步分析的计算速度来优化代码, 再然后, 基于 MATLAB[®] 代码, 在有 CUDA 的 GPU 上发展了一个 C++ 应用。观察一些变量之后, 根据内存消耗/计算速度做出最好的选择。本节中给出的结果是由最终版的代码所获得的, 这个最终版的代码中, 涉及的变量数量最低, “乘法和加法”操作的数量最大。这样, 控制方程中的一些参数是在 GPU 内部计算的。

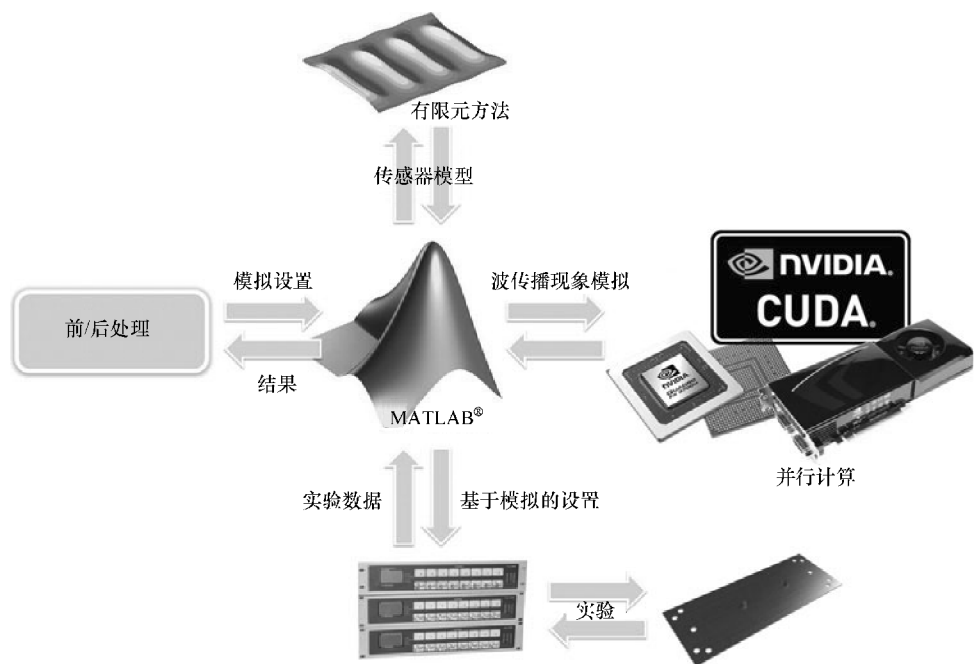


图 2.4 基于 LISA 方法的仿真框架的总体方案。通过耦合能模拟换能器的有限元解算器对 LISA 方法进行补充。系统集成测量硬件，能将实验和模拟结果进行比较，并且可以基于实验中的设置定义模拟

为了测试解算器的性能，我们使用各种不同的图形卡和标准 CPU 来计算一个简单的模型。其中对于 GPU，使用双精度和单精度模型；在所有的 CPU 实现中，给出了对双精度的结果。图 2.5 总结了所获得的加速因子。作为参考，使用了一个单线程的 CPU 结果。

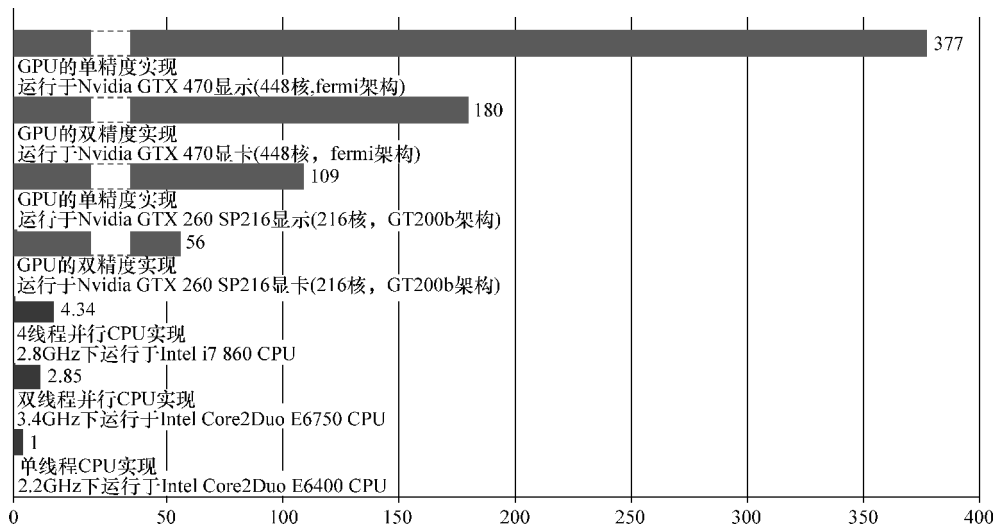


图 2.5 基于 GPU 的 LISA 解算器的性能——加速因子 (Bielak 等, 2010)

很明显可以看到，即使是最快的 CPU 和最慢的 GPU 计算时间的差异也很大。

随后，我们对各种不同模型尺寸进行了模拟并测得了它们每秒的平均时间步数量。结果在图 2.6 中给出，再次看到，基于 GPU 的计算是优于 CPU 的。值得注意的是，除了计算速度，GPU 还比 CPU 便宜得多，因此，模拟甚至可以在一个标准的个人计算机上进行。当前可用的 GPU 的加速因子是几百的量级。由于硬件体系结构的发展，未来这个加速因子会快速增大。软件体系结构是完全灵活的，并可以随硬件来调整。因此，多个 GPU 的计算可以用一个线性加速来进行。

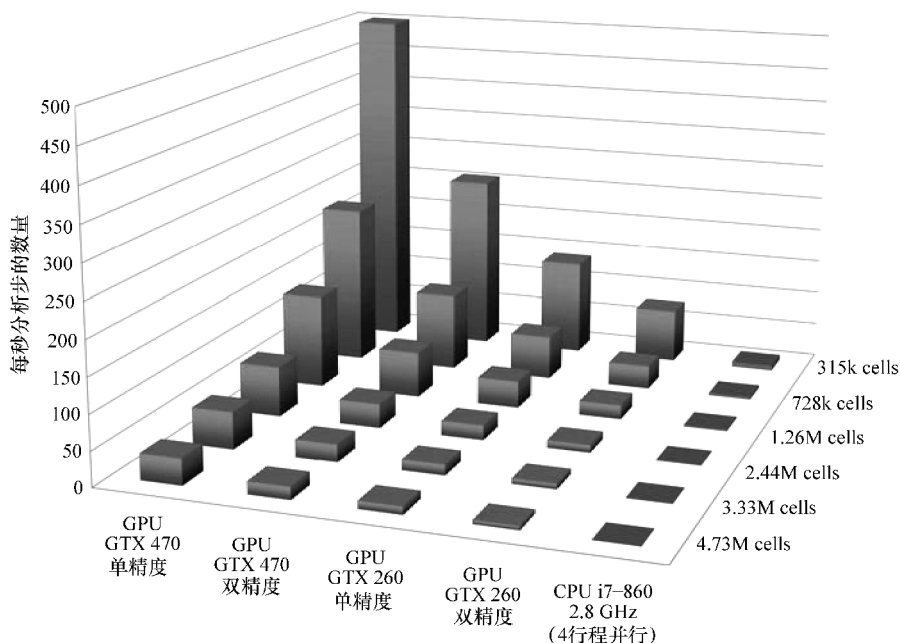


图 2.6 基于 GPU 的 LISA 解算器的性能，对各种模型大小的每秒分析步的数量和实现（Bielak 等，2010）

2.5 耦合方案

在 MONIT 项目中发展起来的基于 GPU 的 LISA 解算器，为波传播的建模提供了非常有效的方法。模拟过程可能用多个 GPU 工作站来执行，但是有近 20 亿个自由度组成的模型是在标准台式计算机上几分钟内就计算完成的。然而，基于常规网格方法的一般缺点，即“楼梯”问题，使得曲线形状域的解答恶化。因此，针对任意几何图形建模时，将开发方法的效率与有限元方法的灵活性和通用性相结合，提高了 SHM 系统虚拟测试的性能。这种混合方法可以高效、准确地模拟任意形状

结构中的波传播以及与缺陷的相互作用。由于在有限元中，可以很容易处理非线性影响，这样的混合方法也就能模拟缺陷对干扰的响应，例如微塑性、摩擦、热弹性效应等。

耦合不同数值方法的途径最明显的就是直接耦合。这需要建立两种方法一致的数学形式，并且通过直接集成矩阵来建立耦合条件。但是，数值方法往往是基于不同的理论，这就很难，甚至是不可能的，对两种方法建立一个一致的形式。此外，这种直接耦合通常找不到合理的物理解释。而且这还隐含地假定可以直接访问所有用于解的数值代码，但事实往往不是这样的，因为有各种各样的商业化 CAE，这是速度 - 优化，并有广泛的功能。基于耦合的直接方程通常不需要利用这些程序，因此是无效的。

在本节中提出的耦合方法利用了物体的基本平衡条件。当物体内每一个点力的总和为零时，物体在特定的时间点是平衡的（即动态平衡）。根据一般的控制平衡方程，这些力可能是内部应力、热膨胀、外部力或牵引力或惯性力。物体的等效平衡条件可以从能量的角度得到，即当势能的梯度相对广义坐标等于零时物体是平衡的。图 2.7 给出了物体的平衡条件。

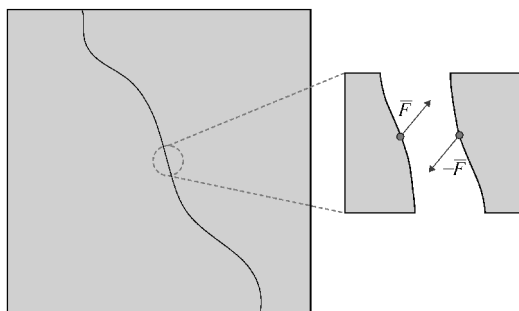


图 2.7 物体的平衡条件，在一个物体中虚构的界面和对域的每一部分力的平衡条件的一个特写

然而，从理论的角度，物体的力平衡必须根据协调性条件来修改。因此，界面上每一点都应该强加两个条件：

- 位移的协调性。
- 应力矢量的协调性。

在不同数值方法的混合分析时，执行上面的相容性条件并不容易。因此，下面的讨论仅限于 FE - FD 耦合的情况，即用一致的时间步和兼容网格的模型。但是它也很容易扩展到其他数值方法、网格和时间步行进方案之中。

实现上述条件有很多种方法。然而，为了耦合方案是可靠、灵活的，最重要的是，稳定的，我们就必须考虑一些限制条件。理论框架保证了方案的可靠性。灵活性就是指能够在不破坏解算器代码的情况下嵌入商业化 CAE 程序中的能力。因此，耦合过程要实现灵活性，就需要在核心解算器外部操作并使用 CAE 程序所使用的标准输入和输出。耦合方法最严格的限制条件是整个模型的稳定性。因为所开发的耦合方法涉及显式时间集成方法的耦合，这被认为是最困难的情况。这是因为显式方案只是条件稳定的。最后重要的一点是计算速度。有效的耦合方法不应该限制分析方法的计算性能。否则，整个混合模型就不会优于单独方法获得的解答。因此，

模型之间的数据传递量应该尽量减少,耦合程序应该有效地实现。

首先,在边界上位移必须匹配。这可以简单地在从一个领域到另一个领域的边界施加计算的位移。但是,这个工作可能是双重的,这取决于数据是从 FE 到 FD 传递或者反过来。因为对于 FD,要计算的量只有在内部网格点是可以得到的,即为了计算一个特定的网格点的位移就需要来自相邻网格点的数据,或应用特殊的边界条件来模拟材料边界的行为,很自然的选择就是使用 FE 作为“主要”的解答。这样就可以不用特殊的边界处理过程就能够得到边界节点的位移值。

对 FD 中边界节点构建人为的边界条件,还有一个结果:与普通网格点相比,待解方程的结构会发生严重变化。对于并行计算来说这非常不利,因为要处理不同的线程。前面已经提到, GPU 适合处理具有相同结构的线程,否则效率就会显著下降。因此,为了保持高效,应该避免这种方法。

通过直接约束实施边界位移匹配还有几个问题。因为一个边界点对两个域是等价的,这个点有一定的 FE 和 FD 相关的质量属性,所以必须考虑附加的惯性力。更重要的是,FE 解答中必须考虑 FD 域的弹性响应,因为 FD 域的激发是用有限元位移引起的,那么有限元控制方程中就会出现额外的自耦合项。对耦合方案的稳定性,这是特别重要的。

FD 域的弹性响应是与应力相关的耦合条件,如上述定义。对兼容的网格和一致的时间步的应力耦合可以被认为是边界节点处的弹性力匹配。对由于 FE 的激发而产生的 FD 模型的反作用力,可用 FD 刚度矩阵计算。混合模型中域之间数据流的总体想法如图 2.8 所示。

到目前为止,已经提供了上述一般耦合条件和计算的背景。在两种方法中位移都是显式可得的,而应力(或力)

是对域的边界计算出来的。这些量将用于执行耦合混合模型的平衡。混合模型详细的数据流是从直接耦合过程中推断的,假设两个数值方法都使用显式的时间积分技术。在弹性波的传播问题中,这是最常见的积分技术,但考虑到稳定性要求,它也是最具挑战性的。

一组方程直接耦合最直接的结果就是附加了刚度和质量矩阵。如在上面的讨论中,在兼容网格的情况下,组装过程以与标准的有限元网格完全相同的方式进行。图 2.9 给出了作为混合网格 FE 方法的 FE - FD 耦合。

很容易看出两个系统是如何耦合的。如果没有外力的作用,当对于一个给定的节点力为零时,系统是处于平衡的。对于任何时间步,必须持有以上条件。在分析

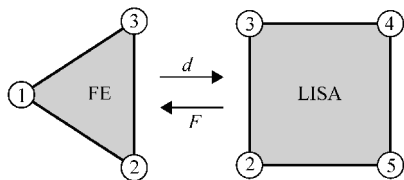


图 2.8 混合模型中域之间的数据流。因为在边界上是明确可用的,有限元位移(d)被当作主要的解。在有限元域上的 LISA 响应是对位移的反作用力(F)

图 2.9 中的一组耦合矩阵方程时，会出现以下三个不同的情况：LISA 域，有限元（FE）域和耦合 FE - LISA 域。对于前两个域，恢复了标准方程的形式。然而，对于耦合模型，要引入额外的耦合项。因此，不适用直接矩阵耦合，这里提出了可用于商业解算器的另一个过程。

考虑上面的限制条件，提出了如下耦合方法：

- 1) 位移从有限元模型计算得到。这意味着从位移的角度来看，有限元是“主”模型。从 FE 域计算的位移是自然计算的，因此不需要人工边界条件。
- 2) 从 FE 计算得到的位移为 LISA 模型提供了激励。在 FE 域边界应用了一组传感器。位移用有限元模型计算。因为 LISA 控制方程在没有任何修改的情况下是不能应用于边界节点的，这种方法可以使用标准的 FE 代码。这样可以确保位移的兼容性。
- 3) FE 域的位移施加到 LISA 模型中的一部分，并且确认刚度和质量矩阵是一致的之后，反作用力就计算得到了。

因为为了计算下一个时间步的解答，两个模型都必须建立平衡条件，所以必须注意合适的力 - 位移平衡计算。换句话说，为了用有限元法计算下一个时间步，模型必须是与 FE 域耦合的，而不是无牵引的边界条件。FE 对激励的响应情况也是类似的。否则模型之间的激励会导致非物理的反射和不稳定性，因为显式方案对任何的扰动都是非常敏感的。

一旦确定了耦合力，就应该跟踪数据流。一般假设用显式的过程解决了 FE 和 LISA 这两个方程。这是一个要求高的任务，因为显式方法只是有条件稳定的，对任何参数的变化都很敏感。

在 2.2.7 节中详细描述了显式的时间积分。然而，另一个困难是将两种不同的方法在时间上进行耦合并且保持时间行进过程中的一致性。换句话说，我们的目标就是通过同时（为了避免跨跃方案）在两个方法内获得解答的方式来耦合两个显式方法。因为显式的过程是基于当前时间步的控制方程的，要计算下一个时间步的反应只需要当前和以前的时间步骤。因此可以认为已知目前和以前时间的解，并满足边界条件。从 t 时间的控制方程推断出当前时间步的边界条件。

为了安排时间上的数据流，利用直接耦合类比。起点是无阻尼的动力学一般控制方程：

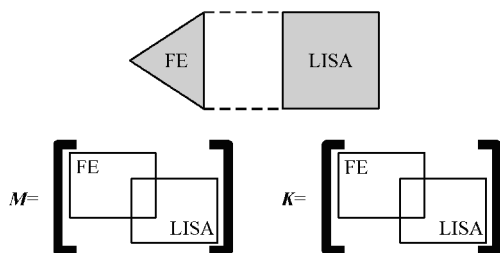


图 2.9 基于耦合方法的矩阵，对于混合格网有限元模型，矩阵按标准方式组合

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K} \mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (2.22)$$

式中, $\mathbf{M}$ 是总体 (混合) 质量矩阵, $\mathbf{K}$ 是总体刚度矩阵, $\mathbf{X}$ 是模型中所有自由度的位移向量, $\mathbf{F}$ 是外力向量。有限元位移自由度是包括耦合的边界节点的所有自由度。在显式时间积分方法中, 控制方程 (2.22) 可对当前的时间步 t 写为

$$\mathbf{M}^t \ddot{\mathbf{X}}^t + \mathbf{K}^t \mathbf{X}^t = \mathbf{F}^t \quad (2.23)$$

将总体混合矩阵分解, 代入式 (2.23), 将外部力分为 LISA 和 FE 有关的部分, 得到了混合模型的以下方程:

$$(\mathbf{M}^{FE,t} + \mathbf{M}^{LISA,t}) \ddot{\mathbf{X}}^t + (\mathbf{K}^{FE,t} + \mathbf{K}^{LISA,t}) \mathbf{X}^t = \mathbf{F}^{FE,t} + \mathbf{F}^{LIST,t} \quad (2.24)$$

式中, 总和表示装配过程。这里包含三个不同的模型域:

- 有限元 (FE) 域, 应用标准的有限元法。
- LISA 域, 应用标准的 LISA 法。
- 耦合的有限元 (FE) - LISA 域, 应用耦合的过程。

前两种情况我们进行了详细的讨论, 计算遵循标准的过程。对于一个完全耦合的区域, 质量和刚度矩阵可以分解为如图 2.10 所示。

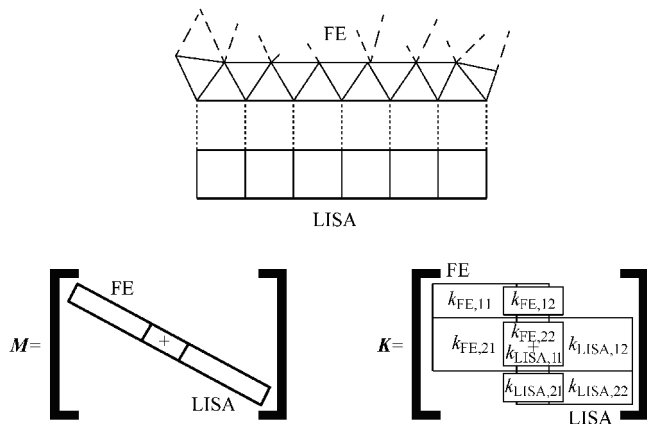


图 2.10 混合有限元——LISA 域耦合, 对于显式, 质量矩阵假定为集中的, 因此引入了一个单自由度的耦合相关的力。弹性效应的耦合力涉及三个力分量

假设边界节点是 FE 得到的, 外部力向量为零, 从式 (2.24) 和图 2.10, 可得:

$$\mathbf{M}^{LISA,t} \ddot{\mathbf{X}}^{FE,t} + \mathbf{M}^{FE,t} \ddot{\mathbf{X}}^{FE,t} + \mathbf{K}_{21}^{FE,t} \mathbf{X}^{FE,t} + \mathbf{K}_{22}^{FE,t} \mathbf{X}^{FE,t} + \mathbf{K}_{11}^{LISA,t} \mathbf{X}^{FE,t} + \mathbf{K}_{12}^{LIST,t} \mathbf{X}^{LISA,t} = 0 \quad (2.25)$$

式中

$$\mathbf{M}^{LISA,t} \ddot{\mathbf{X}}^{FE,t} = \mathbf{F}_{inertial}^{LISA,t} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{K}_{11}^{LISA,t} \mathbf{X}^{FE,t} + \mathbf{K}_{12}^{LISA,t} \mathbf{X}^{LISA,t} = \mathbf{F}_{elastic}^{LISA,t} \quad (2.27)$$

因此, 式 (2.24) 可写为

$$\mathbf{M}^{FE,t} \ddot{\mathbf{X}}^{FE,t} + \mathbf{K}_{21}^{FE,t} \mathbf{X}^{FE,t} + \mathbf{K}_{22}^{FE,t} \mathbf{X}^{FE,t} + \mathbf{F}_{inertial}^{LISA,t} + \mathbf{F}_{elastic}^{LISA,t} = 0 \quad (2.28)$$

在式 (2.28) 中的前三项恢复为标准有限元方法。唯一的区别是附加的耦合力 $\mathbf{F}_{inertial}^{LISA,t}$ 和 $\mathbf{F}_{elastic}^{LISA,t}$ ，这表示 LISA 域对应用的位移激励的响应。

在这里做一些评论：

- 由于在式 (2.28) 中耦合方程的结构，基于软件包的标准有限元可以用来解这个方程，唯一要做的改变就是耦合力 $\mathbf{F}_{inertial}^{LISA,t}$ 和 $\mathbf{F}_{elastic}^{LISA,t}$ 。

- 可以清楚地看到，项 $\mathbf{F}_{elastic}^{LISA,t}$ 由两个部分组成的，即 $\mathbf{K}_{11}^{LISA,t} \mathbf{X}^{FE,t}$ 和 $\mathbf{K}_{12}^{LISA,t} \mathbf{X}^{LISA,t}$ 。对于标准的公式，这将是由于限定位移而带来 LISA 单元的一个标准的力响应。然而，值得注意的是用于计算 LISA 响应的 $\mathbf{K}_{11}^{LISA,t} \mathbf{X}^{FE,t}$ 实际上是由有限元位移驱动的。因此，介绍了一种混合模型的有限元自响应部分。

- 上面这一点对于有限元模型的稳定性有严重影响，因为附加的 LISA 相关的成分增加了整个模型的刚度。

上面提出的过程给模型定义了耦合力的分量。它还提供了用于施加力的时间方案。分析开始时，假定没有使用特殊的开始过程。这意味着在计算 $t + \Delta t$ 时刻的系统响应时，前两个时间步的解答是已知的。在第一个分析步中是解有限元模型。这样，就需要 LISA 域内前一个时间步的反力信息。如果没有指定，使用零初始反力。在有限元位移计算后，执行 LISA 迭代。对于第一次迭代，需要从前一个 FE 时间步计算得到的位移。再次，零位移假定作为初始条件。在执行 FE 和 LISA 迭代之后， $t + \Delta t$ 时刻的解是已知的。这些解可作为输入用在下一次时间步计算之中。这样就可以使用相同的时间步长并在相同的时刻获得位移，以此来推进解答的一步步计算，在每一时刻都确保了耦合条件。时间步进方案如图 2.11 所示。

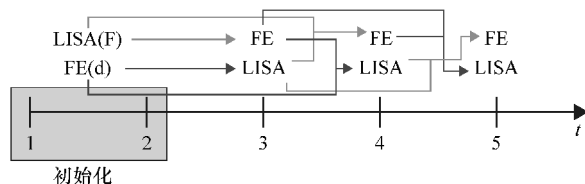


图 2.11 对于显式时间积分的推进方案，在初始化阶段后，模型同时在从有限元和 LISA 域解的基础上解，在前两个时间步中计算的

这个方法已经在 LISA 和商业有限元解算器之中成熟地实现了。就效率而言，该方法最小化了模型之间传输的数据量（即接口节点数乘以问题的维数）。LISA 域内力的计算可以使用 GPU，因为它只涉及一些对每个单元都是重复的简单操作。

该方法可能的应用覆盖了传统建模方法中的很多问题，如任意形状域的高效模拟。由于有限元解算器的功能，它可用于解决多物理量问题，诸如压电 - 电子 - 机械耦合、波与缺陷交互摩擦、热弹性效应和微塑性。多物理应用的例子如图 2.12

所示。

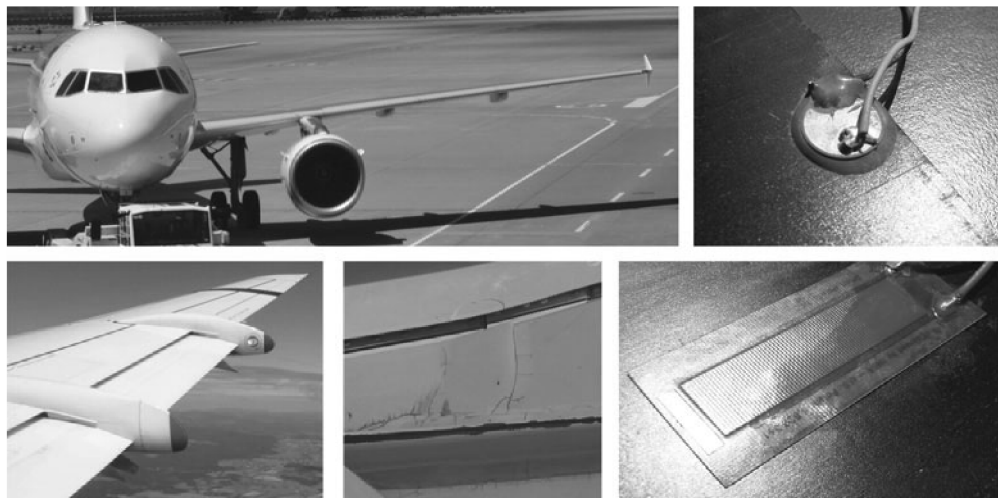


图 2.12 挑战弹性波传播的数值模拟——复杂的几何图形，多物理现象，如摩擦、微塑性、热弹性力学、压电 - 电子 - 机械耦合等

作为总结，下面列出了该方法的主要特点：

- 严密的理论背景。
- 耦合方法的灵活性。
- 普遍性。
- 效率。
- 两种方法时间行进时的一致性。
- 应用于商业程序的灵活性。

2.6 损伤模型

当我们把数值模拟当做一种手段来预测结构的性能和寿命，并提供一种模拟和改进 SHM 和 NDT/NDE 系统的方法时，可靠的损伤建模就变成了一个关键的问题。根据问题的不同，损伤建模方法可以分为近似多尺度建模方法（Packo 和 Uhl, 2011），以及单一和多尺度模型（中观、微观和纳米）。

在第一组中，通常有两种主要的方法，即理论的和唯象的。理论方法中，人们用断裂力学的框架来看待宏观裂纹的行为，考虑应力强度因子（Leski, 2007；Wnuk, 1990）或能量释放率（Wnuk, 1990；Xie 和 Biggers Jr, 2007），这两个都可以作为损伤指标。材料的退化或其他可能导致材料失去承载能力的现象都可造成结构的损伤。这种恶化通常与微尺度现象有关，在宏观尺度上一般由唯象的模型来

描述 (Just 和 Behrens, 2004)。对这种类型损伤更准确的处理是采用多尺度建模。在宏观模型组中, 可能还会提到内聚力方法 (Ural 等, 2009; Xie 和 Biggers Jr, 2006)。其本构行为由牵引与分离位移的关系来描述。因此, 损伤建模就变成了界面脱粘的不断演化过程, 直至最终界面分离。

多尺度损伤模型涉及微结构变化的评估以及对宏观尺度的影响 (Gurson, 1977; Krajcinovic, 1996; Needleman 和 Tvergaard, 1984)。在较低尺度 (中观、微观和纳米尺度) 模型的实现以及随后的尺度之间的数据流分析, 需要更精确的结果。

虽然在宏观尺度上有相当多唯象的模型, 但是这些模型几乎都没有严密的理论背景。Lemaitre (1996) 对微尺度和高一级提出了模型。在最低尺度 (分子和原子) 的结构进行损伤建模是一个新兴领域, 还没有发现完全可用的模型。

对于健康监测系统的仿真, 预测损伤的起始和传播是不可避免的。数值模拟可以给出结构可能的损伤区域、损伤类型和可能的损伤性状。这对系统的改进、可能造成的损伤性状以及损伤检测能力提供了有价值的信息。随后, 受损伤的结构接受一个虚拟的健康监控检查。然后, 根据损伤类型、大小和定位, 必须考虑各种影响波响应的因素。首先, 必须考虑来自缺陷的波散射。如果损伤是裂纹、分层、孔洞、夹杂物或材料的不连续, 那就可以通过直接改变材料属性来建模。然而, 由于考虑了强烈的不连续性, 损伤模型的准确性依赖于数值模型模拟波与高阻抗失配的接口界面相互作用的能力。因为绝大多数基于弹性波的检测系统依靠分析来自缺陷的反射, 因此这一部分必须准确地模拟。更重要的是, 在波传播和与损伤的相互作用过程中, 非线性效应可能会出现, 如裂缝表面上的摩擦, 温度相关的波场变化 (如不均匀场或在裂纹尖端的热弹性力学、塑性等)。这些可以用接触算法模拟 (Martowicz 等, 2012 年), 考虑温度场对材料性能影响的热力耦合分析, 基于应变计算的热弹性耦合 (Packo 等, 2010 年)、非线性材料模型等。要考虑这些现象, 特别是非线性效应, 就需要更大的计算资源。但是, 这些复杂结构的响应往往只局限于损伤区域, 损伤区域与结构的尺度相比较是很小的, 这样我们就可以用混合和多尺度方法有效地分析。

2.7 波传播的吸收边界条件

至少可以从两个观点来考虑吸收边界条件 (ABC) 的重要性, 即减少模型的大小和作为一个混合和多尺度方案的一部分。

结构中高频波传播的数值模拟是一个非常耗时的工作。因为波，特别是 GW，传播距离很长，而模型又要把结构的大部分甚至整个结构都包含在分析中。在数学上可以证明，波的衰减与距离波源 r 的关系是 $\left(r^{\frac{d-1}{2}}\right)^{-1}$ ，其中 d 代表尺寸。这意味着我们可能会从很远的地方获得这个波。

考虑小尺寸的单元，整个结构的离散化会产生非常大规模的模型。因此减小模型规模的方法就很重要。这可以通过删除域，从而得到从应用的角度来看重要的特定部分。简单地删除模型中的某一部分是无法实现的，因为这会引起波在新界面的反射以及响应的人为的扭曲。因此，吸收边界需要将模型扩展到无限域。类似的问题经常发生在混合和多尺度模型的过渡区。经常发生的是域内要表达的波长范围不同，导致反射和解准确性的下降。

吸收边界条件 (ABC) 可以通过许多不同的方式来实现，可以建立一个直接作用在界面的方程式，然后模仿域内已经被删除部分的力学行为；或者可以通过一个附加的边界层。在 ABC 的第一次尝试是基于黏性阻尼层的 (Lysmer 和 Kuhlemeyer, 1969)。在 (Clayton 和 Engquist, 1977; Reynolds, 1978) 中提出了另一种方法，这个方法是基于由单边波动方程推导出来的特殊边界条件。最近，多尺度模型中已有利用结构的周期性属性来构造吸收条件 (Karpov 等, 2006)。在 Berenger (1994) 提出的一种称为完美匹配层 (PML) 的方法中，物体被一个吸收层包围，这可以消除波在边界反射的情况，类似于黏性 ABC。PML 的优越性在于阻尼层更有效的阻尼特性。图 2.13 给出了 PML 算法的总体想法。

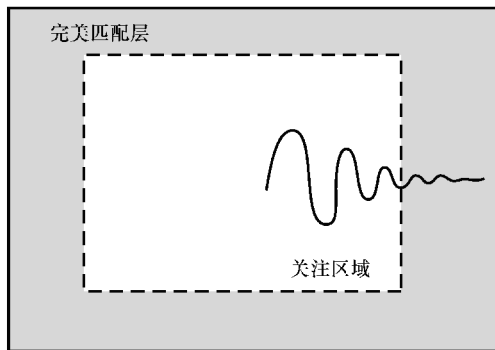


图 2.13 完全匹配层。物体被一个能吸收波的材料层所包围

吸收边界条件 (ABC) 的鲁棒性和有效性决定了它们对波传播问题的适用性。

基于数学公式的边界条件，虽然在额外的添加自由度到模型中更有效，但是它完全依赖于用于消除波的公式的准确性。因此，阻尼特性往往是角度和频率相关的，这样就会发生显著的反射。此外，在使用并行处理时，需要一个特殊的边界处理，这就降低了解的效率。

对于利用阻尼层的一个 ABC，截断模型由材料的人工层包围，这个人工层吸收了所有进入它的任何干扰。附加的材料层不大，否则，与完整的模型相比，解答就没用了。因此，我们的目标是以尽可能短的一层来吸收波。还应该注意的是由这

一层所提供的边界条件应该能够吸收任何干扰，也就是不管波的入射角和频率等。一旦吸收层内的控制方程和模型的其余部分是一样的，对处理单元是没有区别的，就可以计算 ABC 区域和实际的模型。

由于吸收层比其他边界条件有上述的种种优势，在基于 GPU 的 LISA 包中就是用了基于 PML 的阻尼区域。在阻尼层中，PML 方法是最有效和强大的。PML 方法比其他 ABC 的优势体现在以下几点：

- 在无阻尼区域的解答是不变的。
- 材料无反射（因为是同一种材料）（只有由于离散化而产生的数值反射）。
- 因为它是无反射的，在无阻尼域内不受影响（在向后的方向中无反射产生）。

获得问题解答的最主要的难点在于对修改后的控制方程建立一个可靠和稳定的数值解。LISA 方法的解答构建需要保持高效、内存消耗增量最小、高度有效的阻尼特性。即使对高阻尼特性失配情况，模型/ABC 界面的反射比例也是远低于 1% 的。

2.8 结论

前面的各节中所提到的各种数值方法都可以用于模拟系统的动力学过程，他们的有效性主要依赖于计算的工作量和计算的准确性之间的一个平衡。因此要评价每种方法是否适合用于波传播的模拟，就要给出它们在模拟过程中各自的优缺点。

结构中传播的弹性波具有很多的特性，这些特性给数值方法限定了一些特定的要求。首先，弹性波在固体中传播有纵向和横向两种模式，而且两种模式下的速度完全不同。对于像钢或铝这样的结构材料，纵波与横波的速度比大约是 2。因此，数值方法必须包含两个分量及其相互作用，并且尽可能得到相同的精度。其次，波与不同材料的任何界面都会相互作用，这可以被理解为材料层的一个界面，如在复合材料，或结构/空气界面，这种作用的一个例子就是，波会从裂纹或分层等的一个内部缺陷的外部边界处发生反射。对于外部边界和缺陷的情况，界面分开的是两种阻抗截然不同的介质，这对模拟方法是一个额外的挑战。

接下来，波在结构材料中传播的速度非常快。根据材料性质的不同波速可以达到 6000m/s 甚至更快。因此就需要很高的时间分辨率（即很小的时间步长）。最后，由于激发频率的量级在几十千赫到几百千赫，那么生成的弹性波相对来说就是比较短的。处理波长为毫米量级的波需要域内很高的空间离散

化,也就是需要很小的单元。粗略估计以及实际考虑之后的建议是每个波长为 8 ~ 20 个单元。

上述对模拟方法提出的要求实际上限定了相当严格的条件,这也就带来了严重的数值问题。但是,通过结合不同的建模方法,我们还是可以对弹性波传播的模拟建立一个非常有效的模拟框架。使用 GPU 进行计算能够使模拟加速几百倍。通过将基于 GPU 解算器的 LISA 和商用有限元包相耦合可以很大程度地提高建模能力,同时还保有很高的计算效率。

本书中给出的大部分波传播模拟的计算结果都是使用基于 GPU 开发的软件包得到的。

参考文献

- Abraham F, Brodbeck D, Rudge WE, Broughton JQ, Schneider D, Land B, Lifka D, Gerner J, Rosenkrantz M, Skovira J and Gao H 1998 Ab initio dynamics of rapid fracture. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* **6**, 639–670.
- Abramovici F and Alterman Z 1965 Computations pertaining to the problem of propagation of a seismic pulse in a layered solid. *Methods of Computational Physics Academic Press* **4**, 349–379.
- Admal NC and Tadmor EB 2010 A unified interpretation of stress in molecular systems. *Journal of Elasticity* **100** (1–2), 86.
- Alford RM, Kelly KR and Boore DM 1974 Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation. *Geophysics* **39**(6), 834–842.
- Allen P and Tildesley DJ 1989 *Computer Simulation of Liquids*. Oxford Science Publications, Clarendon Press.
- Alterman Z and Karal FC 1968 Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods. *Bulletin of the Seismological Society of America* **58**, 367–398.
- Ambrozinski L, Packo P, Stepinski T and Uhl T 2010 Ultrasonic guided waves based method for SHM simulations and an experimental test. *Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring*. Tokyo, Japan. <http://www.bridge.t.u-tokyo.ac.jp/WCSCM5/> (last accessed 7 January 2013).
- Ascensio M, Ayuso B and Sangalli G 2007 Coupling stabilized finite element methods with finite difference time integration for advection – diffusion – reaction problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **196**(3536), 3475–3491.
- Aturi SN and Zhu TL 1998 A new meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) approach to nonlinear problems in computer modeling and simulation. *Computer Modeling and Simulation in Engineering* **3**, 187–196.
- Aubertin P, Rethore J and de Borst R 2010 A coupled molecular dynamics and extended finite element method for dynamic crack propagation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **81**(1), 72–88.
- Babuska I and Melenk JM 1996 The partition of unity method. *International Journal of Numerical Methods in Engineering* **40**, 727–758.
- Banerjee JR 1997 Dynamic stiffness formulation for structural elements: A general approach. *Computers and Structures* **63**(1), 101–103.
- Bathe KJ 1996 *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.
- Becker AA 1992 *The Boundary Element Method in Engineering: A Complete Course*. McGraw-Hill.
- Belytschko T, Krongauz Y, Organ D, Fleming M and Krysl P 1996 Meshless methods: An overview and recent developments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **139**(14), 3–47.
- Berenger JP 1994 A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics* **114**, 185–200.
- Bernard PS 1995 A deterministic vortex sheet method for boundary layer flow. *Journal of Computational Physics* **117**(1), 132–145.
- Bielak T, Packo P, Uhl T and Barszcz T 2010 Performance analysis of the cuLISA3d solver. Technical report, AGH University of Science and Technology, EC Systems.

- Boller C, Chang F and Fujino Y 2009 *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Branicio PS and Srolovitz DJ 2009 Local stress calculation in simulations of multicomponent systems. *Journal of Computational Physics* **228**(22), 8467–8479.
- Breitkopf P, Touzot G and Villon P 2000 Double grid diffuse collocation method. *Computational Mechanics* **25**, 199–206.
- Broughton JQ, Abraham FF, Bernstein N and Kaxiras E 1999 Concurrent coupling of length scales: Methodology and application. *Physical Review B* **60**(4), 2391–2403.
- Buehler MJ 2008 *Atomistic Modeling of Materials Failure*. Springer.
- Burczynski T, Mrozek A and Kus W 2007 A computational continuum-discrete model of materials. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences* **55**, 85–89.
- Chavent G and Roberts J 1989 A unified physical presentation of mixed, mixed-hybrid finite elements and usual finite differences for the determination of velocities in waterflow problems. Research report RR-1107, INRIA.
- Chen SJ, Oliveira Lima Roque CM, Pan C and Button ST 1998 Analysis of metal forming process based on meshless method. *Journal of Materials Processing Technology* **80**(1), 642–646.
- Chen SJ, Pan C, Wu CT and Liu WK 1996 Reproducing kernel particle methods for large deformation analysis of nonlinear structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **139**(14), 195–227.
- Clayton R and Engquist B 1977 Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations. *Bulletin of the Seismological Society of America* **67**, 1529–1540.
- Collatz L 1966 *The Numerical Treatment of Differential Equations*. Springer-Verlag.
- Collatz L 1986 *Differential Equations: An Introduction with Applications*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Courant R, Friedrichs K and Lewy H 1928 Über die partiellen differenzengleichungen der mathematischen physik. *Mathematische Annalen* **100**, 32–74.
- Crank J and Nicolson P 1947 A practical method for numerical integration of solution of partial differential equations of heat-conduction type. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **43**, 5067.
- Cruse TA 1969 Numerical solutions in three dimensional elastostatics. *International Journal of Solids and Structures* **5**, 1259–1274.
- De S and Bathe KJ 2000 The method of finite spheres. *Computational Mechanics* **25**, 329–345.
- Delsanto P, Schechter R and Mignogna R 1997 Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials. III: The three-dimensional case. *Wave Motion* **26**(4), 329–339.
- Delsanto P, Schechter RS, Chaskelis HH, Mignogna RB and Kline R 1994 Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials. II: The two-dimensional case. *Wave Motion* **20**(4), 295–314.
- Delsanto P, Whitcombe T, Chaskelis H and Mignogna R 1992 Connection machine simulation of ultrasonic wave propagation in materials. I: The one-dimensional case. *Wave Motion* **16**(1), 65–80.
- Dommelen LV 2001 Physical interpretation of the virial stress. *The Royal Society* **317**(1988), 1–7.
- Duarte CA and Oden JT 1996 An *h-p* adaptive method using clouds. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **139**, 237–262.
- Ducellier A and Aochi H 2009 A coupled 2D finite-elements-finite-difference method for seismic wave propagation: Case of a semi-circular canyon. *9th International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Waves Propagation*. Paris, France. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/57/42/38/PDF/preprint.pdf>.
- Eizhong Dai W and Nassar R 2000 A hybrid finite element-finite difference method for solving three-dimensional heat transport equations in a double-layered thin film with microscale thickness. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* **38**(6), 573–588.
- Fellinger P, Marklein R, Langenberg KJ and Klaholz S 1995 Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT-elastodynamic finite integration technique. *Wave Motion* **21**(1), 47–66.
- Filoux E, Levassort F, Calle S, Certon D and Lethiecq M 2009 Single-element ultrasonic transducer modeling using a hybrid FD-PTSD method. *Ultrasonics* **49**(8), 611–614.
- Fish J (ed.) 2009 *Multiscale Methods: Bridging the Scales in Science and Engineering*. Oxford University Press.
- Galis M, Moczo P and Kristek J 2008 A 3-D hybrid finite-difference-finite-element viscoelastic modelling of seismic wave motion. *Geophysical Journal International* **175**(1), 153–184.
- Gao L, Liu K and Liu Y 2007 A meshless method for stress-wave propagation in anisotropic and cracked media. *International Journal of Engineering Science* **45**(28), 601–616.
- Garikipati K and Hughes TJR 2000 A variational multiscale approach to strain localization formulation for multidimensional problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **188**(13), 39–60.
- Gopalakrishnan S, Chakraborty A and Mahapatra DR 2008 *Spectral Finite Element Method*. Springer.

- Gurson AL 1977 Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth, 1. Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME* **99**(1), 2–15.
- Hao S, Park H and Liu W 2002 Moving particle finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **53**, 1937–1958.
- Harris JG 2004 *Linear Elastic Waves*. Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press.
- Houbolt JC 1950 A recurrence matrix solution for the dynamic response of elastic aircraft. *Journal of the Aeronautical Sciences* **17**, 540–550.
- Jaswon MA 1963 Integral equation methods in potential theory. I. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **275**(1360), 23–32.
- Just H and Behrens A 2004 Investigations on the use of damage indicating criteria in FE simulations of cold and semi-hot bulk forging operations. *ASME Conference Proceedings* **2004**(47020), 453–461.
- Karpov EG, Yu H, Park HS, Liu WK, Wang QJ and Qian D 2006 Multiscale boundary conditions in crystalline solids: Theory and application to nanoindentation. *International Journal of Solids and Structures* **43**(21), 6359–6379.
- Kirsch EG 1868 Die fundamentalgleichungen der theorie der elasticitt fester krper, hergeleitet aus der betrachtung eines systems von punkten, welche durch elastische streben verbunden sind. *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* **12**, 481–487, 553–570, 631–638.
- Klepka A, Jenal RB, Staszewski WJ and Uhl T 2011 Fatigue crack detection using nonlinear acoustics and laser vibrometry. *ICSV 18: 18th International Congress on Sound and Vibration*, p. 235.
- Kluska P, Staszewski WJ, Leamy MJ and Uhl T 2012 Lamb wave propagation modeling using cellular automata. *Structural Health Monitoring 2012: Proceedings of the Sixth European Workshop* **2**, 1446–1454.
- Komatitsch D and Tromp J 1999 Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation. *Geophysical Journal International* **139**(3), 806–822.
- Komatitsch D, Tsuboi S and Tromp J 2005 The spectral-element method in seismology. In *Seismic Earth: Array Analysis of Broadband Seismograms*. (eds Levander A and Nolet G), vol. 157 of *Geophysical Monograph*. American Geophysical Union, pp. 205–228.
- Korczak K and Patera A 1985 A spectral element method applied to unsteady flows at moderate Reynolds number. In *Ninth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics* (eds Soubbaramayer and Boujot J), vol. 218 of *Lecture Notes in Physics*. Springer, pp. 314–319.
- Kouznetsova V, Geers MGD and Brekelmans WAM 2004 Multi-scale second-order computational homogenization of multi-phase materials: a nested finite element solution strategy. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **193**(4851), 5525–5550.
- Krajcinovic D 1996 *Damage Mechanics*. North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics. Elsevier.
- Krawezik G and Poole G 2009 Accelerating the ANSYS direct sparse solver with GPUs. *Symposium on Application Accelerators in High Performance Computing, SAAHPC*.
- Langenberg KJ and Marklein R 2005 Transient elastic waves applied to nondestructive testing of transversely isotropic lossless materials: a coordinate-free approach. *Wave Motion* **41**(3), 247–261.
- Lax PD 1961 On the stability of difference approximations to solutions of hyperbolic equations with variable coefficients. *Communications on Pure and Applied Mathematics* **14**(3), 497–520.
- Lax PD and Wendroff B 1960 Systems of conservation laws. *Communications on Pure and Applied Mathematics* **13**, 217–237.
- Leamy MJ 2008 Application of cellular automata modeling to seismic elastodynamics. *International Journal of Solids and Structures* **45**(17), 4835–4849.
- Lee BC and Staszewski WJ 2003a Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. Wave propagation. *Smart Materials and Structures* **12**(5), 804.
- Lee BC and Staszewski WJ 2003b Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part II. Wave interactions with damage. *Smart Materials and Structures* **12**(5), 815.
- Lee BC and Staszewski WJ 2007a Lamb wave propagation modelling for damage detection: I. Two-dimensional analysis. *Smart Materials and Structures* **16**(2), 249.
- Lee BC and Staszewski WJ 2007b Lamb wave propagation modelling for damage detection: II. Damage monitoring strategy. *Smart Materials and Structures* **16**(2), 260.
- Lee BC and Staszewski WJ 2007c Sensor location studies for damage detection with Lamb waves. *Smart Materials and Structures* **16**(2), 399.
- Lee U 2009 *Spectral Element Method in Structural Dynamics*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Lemaitre J 1996 *A Course on Damage Mechanics*. Springer.

- Lemaitre J and Chaboche J 1994 *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press.
- Leski A 2007 Implementation of the virtual crack closure technique in engineering FE calculations. *Finite Elements in Analysis and Design* **43**(3), 261–268.
- LeVeque R 2002 *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge Texts in Applied Mathematics. Cambridge University Press.
- Li S and Liu WK 2007 *Meshfree Particle Methods*. Springer.
- Li S, Qian D, Liu W and Belytschko T 2001 A meshfree contact-detection algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **190**, 3271–3292.
- Liszka T and Orkisz J 1980 The finite difference method at arbitrary irregular grids and its application in applied mechanics. *Computers & Structures* **11**(12), 83–95.
- Liu B and Qiu X 2008 How to compute the atomic stress objectively? *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* **6**(5), 1081–1089.
- Liu WK, Han W, Lu H, Li S and Cao J 2004 Reproducing kernel element method. Part I: Theoretical formulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **193**, 933–951.
- Lucy LB 1977 A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, **82**, 1013–1024.
- Lysmer J and Kuhlemeyer RL 1969 Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division* **95**, 859–878.
- Ma S, Archuleta RJ and Liu P 2004 Hybrid modeling of elastic P-SV wave motion: A combined finite-element and staggered-grid finite-difference approach. *Bulletin of the Seismological Society of America* **94**, 1557–1563.
- Marklein R 2002 Ultrasonic wave and transducer modeling with the finite integration technique (FIT). *Ultrasonics, IEEE Symposium* **1**, 563–566.
- Martowicz A, Packo P, Staszewski WJ and Uhl T 2012 Modelling of nonlinear vibro-acoustic wave interaction in cracked aluminium plates using local interaction simulation approach. *Proceedings of 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012)*. University of Vienna, Austria.
- Mlyniec A and Uhl T 2011 Modelling and testing of ageing of short fibre reinforced polymer composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* **226**, 16–31.
- Moczko P, Bystricky E, Kristek J, Carcione JM and Bouchon M 1997 Hybrid modeling of P-SV seismic motion at inhomogeneous viscoelastic topographic structures. *Bulletin of the Seismological Society of America* **87**(5), 1305–1323.
- Monorchio A, Rubio Bretones A, Mittra R, Manara G and Gomez Martin R 2004 A hybrid time-domain technique that combines the finite element, finite difference and method of moment techniques to solve complex electromagnetic problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **52**, 2666–2674.
- Moosavi MR, Delfanian F, Khelil A and Rabczuk T 2011 Orthogonal meshless finite volume method in elastodynamics. *Thin-Walled Structures* **49**(9), 1171–1177.
- Mrozek A, Kus W and Burczynski T 2007 Application of the coupled boundary element method with atomic model in the static analysis. *Computer Methods in Materials Science* **7**, 284–288.
- Narayanan GV and Beskos DE 1978 Use of dynamic influence coefficients in forced vibration problems with the aid of fast Fourier transform. *Computers and Structures* **9**(2), 145–150.
- Needleman A and Tvergaard V 1984 An analysis of ductile rupture in notched bars. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **32**(6), 461–490.
- Newmark NM 1959 A method of computation for structural dynamics. *Journal of Engineering Mechanics* **85**, 67–94.
- Nvidia Corporation 2010 *NVIDIA CUDA C Programming Guide*.
- Onate E, Idelsohn S, Zienkiewicz OC, Taylor RL and Sacco C 1996 A stabilized finite point method for analysis of fluid mechanics problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **139**(14), 315–346.
- Packo P, Ambrozinski L and Uhl T 2011 Structure damage modelling for guided waves-based SHM systems testing *Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*. Kuala Lumpur, pp. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/ICMSAO.2011.5775618>.
- Packo P, Bielak T, Spencer AB, Staszewski WJ, Uhl T and Worden K 2012 Lamb wave propagation modelling and simulation using parallel processing architecture and graphical cards. *Smart Materials and Structures* **21**, 075001–1075001–13.
- Packo P and Uhl T 2011 Multiscale approach to structure damage modelling. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* **49**(1), 243–264.
- Packo P, Uhl T and Staszewski WJ 2010 Coupled thermo-mechanical simulations of Lamb waves propagation in structures with damage. *18th International Congress on Sound and Vibration*. Rio de Janeiro.

- Park HS, Karpov EG, Klein PA and Liu WK 2005 Three-dimensional bridging scale analysis of dynamic fracture. *Journal of Computational Physics* **207**(2), 588–609.
- Patera AT 1984 A spectral element method for fluid dynamics: Laminar flow in a channel expansion. *Journal of Computational Physics* **54**(3), 468–488.
- Pellenq RJM, Kushima A, Shahsavari R, van Vliet KJ, Buehler MJ, Yip S and Ulm FJ 2009 A realistic molecular model of cement hydrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 16102–16107.
- Raghavan A and Cesnik CES 2007 Review of guided-wave structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest* **39**(2), 91–114.
- Rapaport D 2004 *The Art of Molecular Dynamics Simulation*. Cambridge University Press.
- Reynolds AC 1978 Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems. *Geophysics* **43**(6), 1099–1110.
- Rizzo FJ 1967 An integral equation approach to boundary value problems of classical elastostatics. *Quarterly of Applied Mathematics* **25**, 83–95.
- Roberts M, Jeong WK, Vazquez-Reina A, Unger M, Bischof H, Lichtman J and Pfister H 2011 Neural process reconstruction from sparse user scribbles. *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI '11)*. Springer, pp. 621–628.
- Rudd KE, Leonard KR, Bingham JP and Hinders MK 2007 Simulation of guided waves in complex piping geometries using the elastodynamic finite integration technique. *The Journal of the Acoustical Society of America* **121**(3), 1449–1458.
- Rylander T and Bondeson A 2000 Stable FEM-FDTD hybrid method for Maxwells equations. *Computer Physics Communications* **125**, 7582.
- Rylander T and Bondeson A 2002 Application of stable FEM-FDTD hybrid to scattering problems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **50**, 141–144.
- Schubert F and Marklein R 2002 Numerical computation of ultrasonic wave propagation in concrete using the elastodynamic finite integration technique (EFIT). *Proceedings of the 2002 IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 799–804.
- Schubert F, Peiffer A, Kohler B and Sanderson T 1998 The elastodynamic finite integration technique for waves in cylindrical geometries. *The Journal of the Acoustical Society of America* **104**(5), 2604–2614.
- Segerlind LJ 1984 *Applied Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Seitchik A, Jurick D, Bridge A, Brietzke R, Beeney K, Codd J, Hoxha F, Pignol C and Kessler D 2009 The Tempest Project-addressing challenges in deepwater Gulf of Mexico depth imaging through geologic models and numerical simulation. *The Leading Edge* **28**(5), 546–553.
- Shobeiri G and Afshar MH 2012 Corrected discrete least-squares meshless method for simulating free surface flows. *Engineering Analysis with Boundary Elements* **36**(11), 1581–1594.
- Soares D 2011 Coupled numerical methods to analyze interacting acoustic-dynamic models by multidomain decomposition techniques. *Mathematical Problems in Engineering* **2011**, 1–28.
- Staszewski WJ 2004 Health monitoring using guided ultrasonic waves. In *Advances in Smart Technologies in Structural Engineering*. Computational Methods in Applied Sciences (eds Holnicki-Szulc J and Mota Soares CA). Springer, pp. 117–162.
- Staszewski WJ, Boller C and Tomlinson GR (eds) 2004 *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Stone JE, Phillips JC, Freddolino PL, Hardy DJ, Trabuco LG and Schulten K 2007 Accelerating molecular modeling applications with graphics processors. *Journal of Computational Chemistry* **28**(16), 2618–2640.
- Strikwerda J 2004 *Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations*, 2nd edn. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Su Z and Ye L 2009 *Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications*. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics. Springer.
- Sukumar N, Moran B and Belytschko T 1998 The natural element method in solid mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **43**, 839–887.
- Symm GT 1963 Integral equation methods in potential theory. II. *Proceedings of the Royal Society of London* **A275**, 3346.
- Tadmor EB, Ortiz M and Phillips R 1996 Quasicontinuum analysis of defects in solids. *Philosophical Magazine A* **73**(6), 1529–1563.
- Twizell EH 1979 An explicit difference method for the wave equation with extended stability range. *BIT Numerical Mathematics* **19**, 378–383.

- Ural A, Krishnan VR and Papoulia KD 2009 A cohesive zone model for fatigue crack growth allowing for crack retardation. *International Journal of Solids and Structures* **46**(1112), 2453–2462.
- Vachiriatienchai C, Boonchaisuk S and Siripunvaraporn W 2010 A hybrid finite difference/finite element method to incorporate topography for 2D direct current (DC) resistivity modeling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **183**(34), 426–434.
- Venkatarayalu NV, Beng GY and Li LW 2004 On the numerical errors in the 2-D FE/FDTD algorithm for different hybridization schemes. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* **4**, 168–170.
- Versteeg H and Malalasekera W 2007 *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited.
- Wilson EL, Farhoomand I and Bathe KJ 1973 Nonlinear dynamic analysis of complex structures. *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **1**, 241–252.
- Wnuk M 1990 *Nonlinear Fracture Mechanics*. Courses and lectures, International Centre for Mechanical Sciences. Springer-Verlag.
- Wolf S, Favreau P and Ionescu IR 2008 Hybrid unstructured FEM-FDM modeling of seismic wave propagation. application to dynamic faulting. http://sylvie.wolf.free.fr/WFI_preprint.pdf (last accessed 7 January 2013).
- Woolfson MM and Pert GJ 1999 *An Introduction to Computer Simulation*. Oxford University Press.
- Wu RB and Itoh T 1997 Hybrid finite-difference time-domain modeling of curved surfaces using tetrahedral edge elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **45**, 1302–1309.
- Xiao S and Belytschko T 2004 A bridging domain method for coupling continua with molecular dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **193**(1720), 1645–1669.
- Xie D and Biggers Jr SB 2006 Progressive crack growth analysis using interface element based on the virtual crack closure technique. *Finite Elements in Analysis and Design* **42**(11), 977–984.
- Xie D and Biggers Jr SB 2007 Calculation of transient strain energy release rates under impact loading based on the virtual crack closure technique. *International Journal of Impact Engineering* **34**(6), 1047–1060.
- Yagawa G and Yamada T 1996 Free mesh method: A new meshless finite element method. *Computational Mechanics* **18**, 383–386.
- Yip S 2005 *Handbook of Materials Modeling*. Springer.
- Zhang S, Zhu T and Belytschko T 2007 Atomistic and multiscale analyses of brittle fracture in crystal lattices. *Physical Review B* **76**, 094114.
- Zhu B, Chen J and Zhong W 2012 A hybrid finite-element/finite-difference method with implicit-explicit time stepping scheme for Maxwell's equations. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields* **25**(5–6), 607–620.
- Zhu B, Chen J, Zhong W and Liu QH 2011 A hybrid FETD-FDTD method with nonconforming meshes. *Communications in Computational Physics* **9**, 828–842.
- Zienkiewicz O and Taylor R 2000 *The Finite Element Method: Solid Mechanics*. Butterworth-Heinemann.
- Zimmerman JA, Webb III EB, Hoyt JJ, Jones RE, Klein PA and Bammann DJ 2004 Calculation of stress in atomistic simulation. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* **12**(4), S319–S332.

第3章 结构健康监测中的辅助探测概率模型

3.1 引言

结构健康监测 (SHM) 系统一般能够报告裂纹的存在 (探测问题)、位置、损伤的程度 (估计问题), 在非常成熟的情况下, 甚至能报告结构的剩余寿命 (预测问题)。统计工具和机器学习算法被广泛用于解决探测和估计问题 (Worden 和 Manson, 2007)。关于结构损伤的探测以及系统可靠性评估的问题, 工程师主要关注四个不同的概率 (Kabban 和 Derriso, 2011): ①当损伤不存在时, 系统探测到损伤的概率, 通常被称为误报率 (PFA); ②当损伤存在时, 系统探测到损伤的概率, 通常被称为探测概率 (POD); ③当损伤存在时, 系统未探测到损伤的概率; ④当损伤不存在时, 系统没有探测到损伤的概率。由于①和④可归为一个, ②和③可归为一个, 因此, 为了了解系统探测的可靠性, 通常只需要评估两个概率——POD 和 PFA。此外, PFA 和 POD 并不是相互独立的, 而是相关的, 通过定义系统阈值, 表明系统响应水平在阈值以上的结构被认为是损伤的。除了 POD 和 PFA, 也可以计算它们的逆条件概率。积极预测概率 (PPP) 指当系统显示没有损伤时, 定量损伤确实存在的概率; 消极预测概率 (NPP) 指当系统显示没有损伤时, 估计损伤不存在的概率。一旦给出损伤的可能性, 使用贝叶斯 (Bayes) 规则, 这些概率可以从 POD 和 PFA 来估计。在实际中, 损伤的可能性一般是未知的, 难以用期望的精度来计算。因此, 通常可以跳过 PPP 和 NPP, 只计算 POD 和 PFA。然而, 评估 POD 和 PFA 不是一个微不足道的问题。引入 POD 技术是为了研究无损评价 (NDE) 的可靠性。在 POD 方法背后的所有统计程序被用来分析实际结构的实验数据。然而, 在 SHM 系统中, 经验研究不足以产生可靠的 POD 测量结果。事实上, 自从传感器被永久安装在主机结构上, 整个 SHM - 结构系统是独一无二的, 并且不能在足够的精度内复制, 这是由于固有的不确定性是与安装在主机结构的 SHM 系统相关的。因此, 仅仅基于经验数据开展可靠性评估, 所需的实验测试数量将是非常大的, 在实践中是不可行的。为了支持 POD 分析, 需引入计算机模型。计算机模型模拟复杂的物理现象, 可以用更快的数值计算替代昂贵的实验测试。从 SHM 可靠性评估的标准程序角度来看, 在文献中被称为辅助探测概率模型 (MA-POD) 的这种方法, 证明是有前途的。

在这种背景下, 本章重点强调增强的计算机建模技术的优势, 计算机建模可以

采用大规模并行处理。现代计算单元配备了大量的处理器，可以用来非常有效地处理数据，能加速数值分析。因此，用于探测概率（POD）分析所需数据的大量迭代可以用一个标准桌面电脑短时间实现。采用一种成熟的方法模拟波传播，这种方法已应用于超声 SHM 中。第 2 章给出了结构中弹性波传播模型技术和成熟求解器的详细讨论结果。

本章的结构如下：3.2 节给出 POD 方法的一个简要的回顾；3.3 节侧重于 POD 的理论方面和方法实现的相关问题；3.4 节介绍 MAPOD 技术；3.5 节介绍将 MAPOD 扩展到 SHM 系统；3.6 节介绍基于 GPU 并行处理的增强 MAPOD 技术。

3.2 探测概率

作为确定结构完整性的一种方式，损伤容限判定准则促进了统计工具的发展，这些统计工具用于评价 NDE 检测技术与系统的 POD。美国国家航空航天局（NASA）航天飞机计划于 1969 年开始的第一项工作就是确定各种无损检测（NDT）方法（Georgiou, 2006）可能漏过的最大缺陷。NASA 介绍的方法很快被美国空军（USAF）采纳，美国空军在 19 世纪 70 年代初发布了一种简单的方法（Pettit 和 Hoepfner, 1972），其中 POD 通过对将试验中所探测到的确定尺寸的裂纹数量与所有相同尺寸的裂纹数量总数相除得到。在 19 世纪 70 年代中期，Yee 等（1976）提出了二项分布法来计算 POD 估计值的置信限。这些方法很简单，在确定不同裂纹尺寸的 POD 值时，没有复杂的统计，缩减了大量试验。自从这些开拓性工作后，随后多年开展了广泛的研究活动和实验项目。研究人员通过对实验数据分析，揭示了在很多试验情况下结构损伤水平与 NDE 系统响应的一般规律。基于这些观察，Berens 和 Hovey（1981）引入了 POD 概率模型，仅仅作为裂纹尺寸的函数。所提出的模型如下：

- Lockheed（洛克希德）。
- Probit（正规偏差值）。
- 对数 Probit。
- 对数不等式（线性标尺）。
- 对数不等式（对数标尺）。
- 反正弦。

对一组有用的数据拟合模型，可以看出对数不等式和对数概率（通常也称为对数正态）模型比较吻合。目前，两种概率模型广泛用于 POD 评价。实验研究（Berens 和 Hovey, 1983）证明概率模型的精度比以前的二项方法高。然而，迄今为止，所有提到的研究均为击中/脱靶分析。这意味着 NDE 系统响应是一个离散的

信号, 仅仅表示裂纹是否存在。POD 评价的未来发展是进行信号响应分析, 这里 NDE 系统响应是连续的。信号响应分析代表了一种改进的击中/脱靶分析, 在某种意义上, 从数据信号传递了更多的信息。因此, 一个比较小的实验有望实现一个可靠的 POD 评估。最近, Generazio (2011) 基于原始的二项式方法提出了一种增强的非参数统计方法。这种方法试图克服参数方法固有的陷阱, 给 POD 函数增加一个函数形式。全面回顾 POD 到 NDT 的历史发展和现有应用的参考文献可以在 Wall 等 (2009) 以及 Matzkanin 和 Yolken (2001) 文献中找到。

3.3 POD 的理论方面

正如 3.2 节中已经介绍的, POD 分析可分为击中/脱靶或信号响应分析。下面两个章节阐述这两种方法的基本理论和分析方法。

3.3.1 击中/脱靶分析

在击中/脱靶方法中, 来自检验的信号是一个二进制值 0/1, 表示在对结构进行测试时, 系统未能探测到裂纹为 0, 成功探测到裂纹为 1。假设一个关于 POD 与裂纹尺寸的概率模型, 就可以给出从离散结果到一个连续 POD 曲线的途径, 通常用 a 表示。在这种情况下, 通常采用一个对数偏差或对数正态模型。在对数偏差中, 探测概率 $P(a)$ 模型为

$$P(a) = \frac{\exp(\alpha + \beta a)}{1 + \exp(\alpha + \beta a)} \quad (3.1)$$

用 α 与 β 参数估计控制 POD 曲线。对式 (3.1) 的两边取自然对数得到如下的线性关系:

$$Y(a) = \alpha + \beta X(a) \quad (3.2)$$

式中

$$Y(a) = \frac{p(a)}{1 - p(a)}, \quad X(a) = \ln(a) \quad (3.3)$$

通过实验数据计算系数 α 和 β , 以建立 POD 曲线。通常, 采用范围区间方法 (RIM) 和最大似然估计 (MLE) 两种方法。Forsyth 和 Fahr (1998) 给出了击中/脱靶分析对数偏差模型的范围区间方法 (RIM) 和最大似然估计 (MLE)。

当采用对数正态概率模型, POD 用下式描述:

$$P(a) = 1 - Q(z) \quad (3.4)$$

式中, $Q(z)$ 是标准的正态残存函数

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-0.5z^2} dz \quad (3.5)$$

z 是与裂纹尺寸相关的标准正态变量

$$z = \frac{\ln(a) - \mu}{\sigma} \quad (3.6)$$

在式 (3.6) 中, 参数 μ 和 σ 称为位置和尺度参数, 它们与对数偏差模型中的 α 和 β 起相似的作用。位置与刻度参数可以通过极大似然估计计算。在这种情况下, 对该方法的叙述超出了本书的范围, 可以在 Forsyth 和 Fahr (1998) 中找到。这里, 需要强调的是, 范围区间方法 (RIM) 是一个强大的算法, 但精度差, 极大似然估计 (MLE) 更准确, 但需要一个优化步骤。此外, 采用最大似然估计 (MLE) 进行的优化通常是一种局部优化。这需要一个起始点, 与总体最优不远, 否则, 程序会陷入局部最小。因此, 范围区间方法 (RIM) 和最大似然估计 (MLE) 的特征可导致一个强大的和准确的参数估计程序。程序如下:

- α 和 β 由 RIM 计算。
- RIM 估计值是 MLE 局部优化方法的初始值。Nelder 和 Mead (1965) 的简单算法可以用于此目的。
- 可以从 α 和 β 得到 μ 和 σ 的初始估计, α 和 β 是由一个对数正态 POD 曲线产生的, 这个 POD 曲线与优化过程的对数偏差 POD 曲线相似。
- 得到的 μ 和 σ 值是最大似然估计 (MLE) 局部优化的初始值。

图 3.1 给出了排列方法应用于一组随机生成的数据的一个示例。

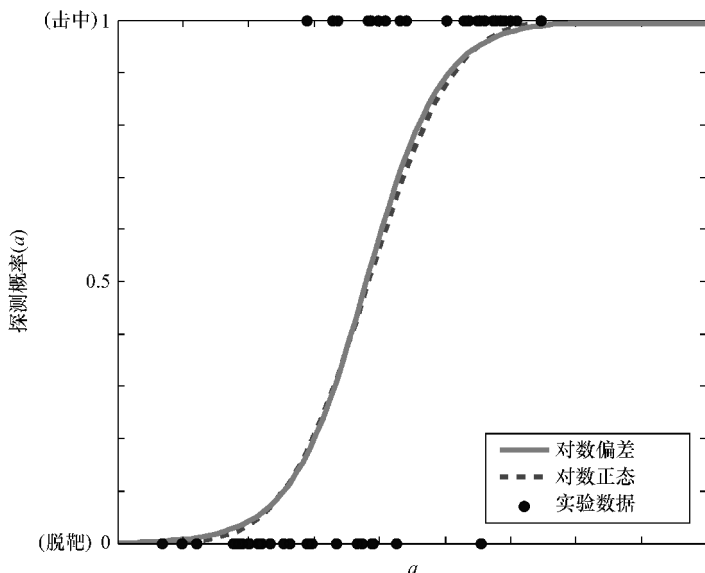


图 3.1 对数偏差和对数正态概率模型的击中/脱靶分析示例

3.3.2 信号响应分析

在信号响应方法中, 来自系统的结果是用 $\hat{a}$ 表示的一个连续信号。 $\hat{a}$ 通常与裂纹尺寸 a 密切相关。实验结果表明, $\log(a) - \log(\hat{a})$ 一般是线性相关的。可以写成下列线性关系:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (3.7)$$

式中, $y = \log(\hat{a})$, $x = \log(a)$ 和 ε 是随机误差。式 (3.7) 是系数为 β_0 和 β_1 的一个线性函数, 系数可以通过普通的最小二乘法 (OLS) 来计算。然而, OLS 需要随机误差是独立和均匀分布的。此外, 为计算 POD, 也要求 ε 服从正态分布。通常, 这些特性要进行验证, 至少部分地验证, 在任何情况下总是能被检查。如果它们是完全错误的, 就要尝试使用一个不同的概率模型, 例如, 3.2 节列出的诸多模型中的一个。这里假定 ε 是独立同分布, 其均值和标准偏差分别为零和 δ , $y(x)$ 的线性回归性能也是一个正态随机变量, 其均值和标准偏差分别为 $\bar{y}(x) = \beta_0 + \beta_1 x$ 和 δ 。

由于噪声影响, 甚至在结构未损坏的情况下, 系统可能会给出一个不同于零的信号, 有必要确定一个阈值 $\hat{a}_{th}$, 建立损伤和未损伤之间的边界。因此, 只要 $\hat{a} > \hat{a}_{th}$ 存在, 也就是 $y > y_{th}$, 就可以认为结构中存在裂纹。 $\hat{a}_{th}$ 的选择是信号响应方法的一个关键点, 它通常是在 PFA 的基础上确定。这个问题将在 3.3.4 节中进行详细的解释。一旦阈值指定, 尺寸为 a 的裂纹的 POD 可以用 x 和 y 来表示:

$$POD(x) = S \int_{y_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\frac{[y - (\beta_0 + \beta_1 x)]^2}{2\delta^2}} dy \quad (3.8)$$

引入标准正态变量 z :

$$z = \frac{y - (\beta_0 + \beta_1 x)}{\delta} \quad (3.9)$$

并代入式 (3.8), 可得到

$$POD(x) = \int_{z_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (3.10)$$

式中

$$z_{th} = \frac{y_{th} - (\beta_0 + \beta_1 x)}{\delta} \quad (3.11)$$

经过几次简单的变换 (Petrin 等, 1993), 式 (3.10) 可写为

$$POD(x) = 1 - Q\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (3.12)$$

式中, Q 为标准的正常残存函数

$$Q(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^{\infty} e^{-0.5v^2} dv \quad (3.13)$$

μ 和 σ 定义为

$$\mu = \frac{y_{th} - \beta_0}{\beta_1} \quad \text{和} \quad \sigma = \frac{\delta}{\beta_1} \quad (3.14)$$

因此，在响应信号分析中，POD 曲线是由两个参数 μ 和 σ 控制。或者，等价地由三个相互依赖的参数 β_1 、 β_2 和 δ 控制。在信号响应分析的情况下，POD 的解析表达式是简单的。参考图 3.2，裂纹尺寸为 x' 的 POD 是由高斯曲线积分表示的，其均值为 $y(x')$ 和标准偏差为 δ ，并且其极限为 y_{th} 和 $+\infty$ 。评价 POD 最直接的方法是 OLS 法。然而，在删失数据存在时，使用 OLS 存在问题。正如在击中/脱靶分析中，最大似然估计为参数估计提供一种强有力的方法。然而，如上所述，为了它的优化，极大似然估计需要一个好的起始点。在这种情况下，不删去数据，初步进行 OLS 导向性分析是比较方便的，使用 μ 和 σ 计算值作为最大似然估计优化的初始值。详细了解如何在响应信号分析应用最大似然估计 (MLE)，参见 Petrin 等 (1993)。

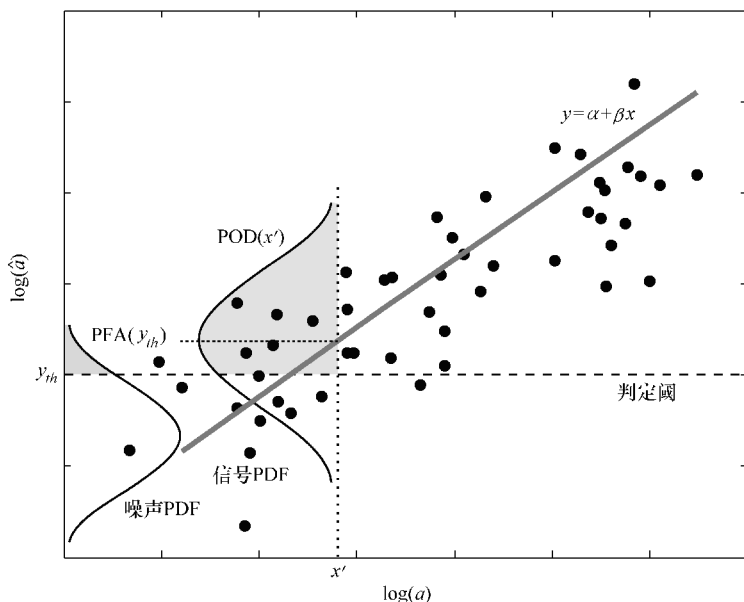


图 3.2 信号响应分析 POD 图示

3.3.3 置信区间

文献中已经提出了在 POD 上设置置信限的几种方法：Wald 法、似然比法

(LRM) 以及 Harding 和 Hugo (2003) 提出的快速代数方法。Wald 法和 LRM 法两者利用最大似然估计者 Cheng 和 Iles (1983, 1988) 的渐近正常行为, 并对于大样本给出类似的结果。然而, Wald 方法认为当样本数量有限时, 低估了置信限。Petrin 等 (1993) 以及 Meeker 和 Escobar (1995) 提供了如何构建 POD 置信限的详细解释。例如, 在 Harding 和 Hugo (2003) 以及 Annis 和 Knopp (2007) 文献中, 对方法进行了比较分析。在这种背景下, 更为重要的是要指出置信限取决于用来计算它们的程序, 而不是可用的实验数据的属性 (Generazio, 2011)。置信限通常与 POD 曲线一起绘制, 以突出特定缺陷尺寸 $a_{u/v}$ 的范围。这个 $a_{u/v}$ 值代表了系统能探测出的最小裂纹尺寸, 探测概率为 u 和置信度为 v 。例如, 对于航空应用, $a_{90/95}$ 是令人感兴趣的。置信限, 特别是 $a_{u/v}$ 统计量, 被 NDT 从业人员当作系统能力的一个有效度量方法, 因此, 对认证是有用的。

3.3.4 误报率

误报率 (PFA) 表示未损坏样品被系统当作损伤样品的比例。从分析上说, PFA 量值是测量噪声概率密度函数积分。如果噪声分布是高斯分布, 那么 PFA 由下式给出:

$$PFA = \int_{y_{th}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_n} e^{-\frac{(y-\bar{y}_n)^2}{2\delta_n^2}} dy \quad (3.15)$$

式中, $\bar{y}_n$ 是噪声均值, δ_n 是噪声标准偏差。根据 PFA 的定义, $\bar{y}_n$ 和 δ_n 通过测试未损坏结构来计算, 或者通过从可用的测量损伤物品提取信息 (MIL-HDBK-1823A 2009)。从式 (3.15) 很明显看出, 选择一个大的 y_{th} 将有利于减少 PFA。另一方面, 是重回式 (3.8), 这种选择将 POD 曲线移向更高的 a 和 $a_{u/v}$ (对固定 u 和 v) 值, 这不是想要的效果。为了做出对 y_{th} 明智的选择, 在相同的图上绘制出 $a_{u/v}(y_{th})$ 和 PFA (y_{th})。这允许一个人对阈值进行选择, 其是在 PFA 和 $a_{u/v}$ 之间最好的折中。图 3.2 给出了在信号响应分析中对 PFA 的一个图形化描述。

3.4 从 POD 到 MAPOD

众所周知, 对 POD 从业者来说, POD 评估需要大型实验项目。文献中指出, 可靠的击中/脱靶分析应该从至少 60 个不同裂纹尺寸中收集测量值。对一个信号响应分析, 利用扩展信息的优势, 所推荐的裂纹长度最小数量约为 30。此外, 对相同裂纹尺寸, 也应该开展重复测试, 其目的是考虑到现有的人为不确定性因素、作业条件和其他参数, 这些可能随测试改变而改变。因此, 在很多情形下, 由于有限的时间和预算, 所需的实验工作太多了。为了回避这个问题, 已经提出了 MAPOD 方法。在 MAPOD 方法中, 建立计算机模型来代替真实实验, 其目的是减轻实验负担, 加快 POD 分析。Martinez 和 Bahr (1984) 第一个提出了 MAPOD 应用, 其中数

值模型被用来代替真正的无损探伤检查,实验噪声被添加到数值信号中。这种方法的优势很明显,很快就引起不同研究小组的注意(例如爱荷华州立大学、美国空军实验室、NASA、英国国家无损检测中心、斯坦福大学结构和复合材料实验室)。特别要强调的是 MAPOD 工作组,它促进了对模型辅助 POD 方法不断了解、发展和实施。

现在,Thompson 等(2009)主要兴趣是两种不同的 MAPOD 方法:传递函数方法和完整模型辅助方法。Harding 等(2007)提出,在前一种方法中,以物理为基础的方法被用来将通过一个特定检查过程计算出的 POD 曲线转移到与不同检验参数(如测试结构的不同材料、不同的缺陷类型)的另一个实例。后一种方法采用以物理为基础的模型直接传播一组检验参数的不确定性。最后,数值信号可能进一步与试验噪声结合,说明了其余参数可变性在以物理为基础的模型中未被考虑。可以找到 MAPOD 应用于 NDE 的例子,例如,Knopp 等(2007)应用于涡流测量,Harding 等(2009)应用于超声测量。

3.5 SHM 的 POD

随着 SHM 系统的出现,研究人员好奇最初为 NDE 开发 POD 方法,怎么也能用于 SHM 系统。事实上,SHM 系统显示出与经典无损检测(NDT)系统的差异。首先,相对于 NDE,SHM 系统是永久安装在结构上的,可开展重复测量。相反,NDE 的重复性一般较差,主要是由于人的因素,即受检验人员的影响。另一方面,对于 NDE 系统,其传感器和硬件一般在使用之前校准。对于 SHM 系统这是不可能的,其传感器受到老化的影响,使 SHM 性能和 POD 测量具有时间相关性。因此,在对 NDE 可靠性评估时,应获取的主要不确定类型包括:人为因素、传感器/结构接触界面的变化、裂纹形态和结构局部性质;而对于 SHM,主要是环境条件、结构老化影响、传感器和损伤形态。更重要的是,由于 SHM 系统安装过程中传感器和结构的几何/机械性能不是完全可重复的,主机结构/SHM 系统的配对也是不可重复的。这意味着被测量的 SHM 特性严格与测试系统连在一起,不能应用到另一个结构/SHM 系统配对中,这是由于上述不确定性明显影响系统功能。所有这些因素使 SHM 系统可靠性评估比 NDE 更多。目前,尽管人们普遍认为仅仅基于实验测试评估 POD 是不可行的,但仍然没有标准程序解决这个问题。最近,Mueller 等(2011)和 Aldrin 等(2010)都提出 SHM 可靠性评估草案,两者都应用了计算机模型。因此,开发能准确模拟 SHM 测量中重要物理现象的计算机模型变成一项基础性的工作。不幸的是,精确的计算机模型一般需要求助大型的计算机能力。这个事实限制了 MAPOD 方法的应用。Aldrin 等(2010)指出两种不同的方法可以减轻抽样工作。第一种方法是构建增强型统计模型,包括依赖很多其他因素,除 Hoppe(2010)最初提出的裂纹长度外。这可以让我们更好地了解检验参数/SHM 系统性

能的关系,因此,有助于减少实验/数值的负担。第二种方法采用高效的不确定性量化程序,如多项式混沌方法(Xiu, 2010)。相对传统的抽样方法,显著减少所需的样本数量。Aldrin 等(2011, 2012)说明了草案的应用。

接下来的第三个方向是利用并行计算技术大大加快 MAPOD 计算。并行计算可以极大地减少仿真时间,并与增强的统计模型和采样技术集成在一起,产生了一种实际的 MAPOD 方法。然而,获得强大的计算单元,如集群,仍然是有限的,由于硬件和空间需求相关的成本问题。最近,图形卡已经成功地用于科学计算,参见 Packo 和 Uhl (2011) 以及 Packo 等(2012)文献。由于具有高速的机载内存的大量计算单元的集成,这些单元比标准 CPU 提供更大的计算能力,而且价格低得多。因此,使用一个标准计算机,在很短的时间内开展大量模拟是可能的,这也是评估 POD 特征的一个关键问题。

下一节中将介绍一种基于超声波的 SHM 系统的完整模型 MAPOD 方法。

3.6 考虑缺陷几何不确定性的 SHM 系统的 MAPOD

毫无疑问,开展 POD 评价须准备大量的样品和装配 SHM 系统,这既耗时又昂贵。一种基于模型的方法可以减少这些因素。MAPOD 技术已被用于 SHM 系统的可靠性研究。所提出的基于 GPU 方法的性能已通过计算速度和结果质量得到验证。作为最具影响的因素,裂纹形态的可变性已被调查研究。虚拟框架由一个薄的矩形板和粘贴在其一个边缘上的一组阵列传感器组成。传感器是基于相控阵技术的 SHM 系统的一部分。由于在现实情况中,裂纹与传感器阵列并不总是有相同的方向和位置,SHM 系统对这种可变性的可靠性已经过测试。

3.6.1 SHM 系统

MAPOD 方法被用于分析监测类平板状结构的 SHM 系统。该系统基于通过采用一个标准延迟和合成(DAS)的波束形成器形成的兰姆波。对该技术和二维阵列设计的全面研究在第7章中叙述。

然而,在所提出的方法中,一种简单情况是均匀线性阵列(ULA)换能器在单一发射机中,多个接收器(STMR)设置被检查。为了避免模棱两可的损伤定位,考虑将阵列放在被评价板的边缘。一个传感器被用作发射器和接收器,而其余的都仅作为传感器。由发射器产生的波在结构中传播,在碰到一个裂纹时被反射,返回的波被传感器阵列捕获。然后,这些记录的信号由传感器说明。首先,Liu 和 Yuan (2010)提出了一个线性映射算法,用于去除色散的影响。其次,信号被延迟和合成。当假定的入射角等于损伤反射回波到达的方向(DOA)时,所有传感器信号被合成,结果降低连续传感器的噪声。通过成像技术进行损伤探测和定位在第7章描述。系统输出被定义为在检查区域呈

现的最强烈的像素值。

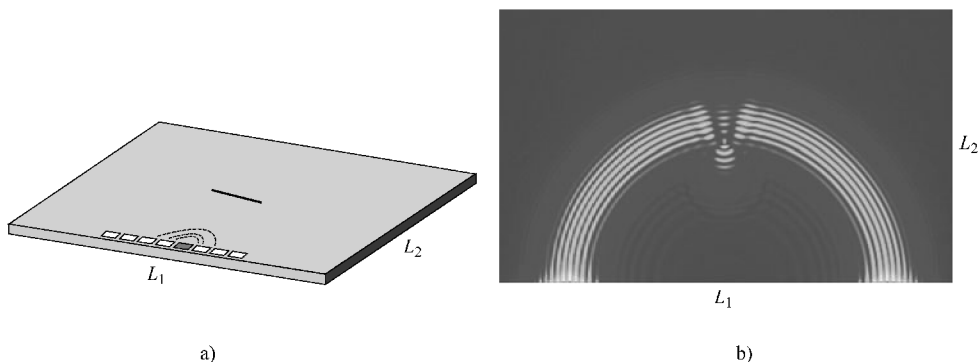


图 3.3

a) 模拟模型的原理图 b) cuLISA3D 求解器生成的位移场

3.6.2 仿真框架

对于所考虑的 SHM 系统，有必要探讨高频波的传播，也就是在弹性板结构中的兰姆波，因此对高空间和时间分辨率有要求。第 2 章详细描述的 cuLISA3D 软件可用于这个研究，能满足这些需求。与其他模拟方法相比，减少了仿真时间，提高了空间和时间分辨率。这些特点在 MAPOD 评估中特别有用。在计算中 0.5mm 的尺寸大小和 $0.05\mu\text{s}$ 的时间步被采用。对于 10000 时间步，相当于 $500\mu\text{s}$ 的一个分析，计算时间约为 4min。图 3.3b 给出了 cuLISA3D 求解器计算的压电驱动器产生的位移场快照。

3.6.3 可靠性评估

模拟的 SHM 系统由 8 个传感器、间隔 5mm 距离的均匀线性阵列 (ULA) 组成。线性阵列是一个 $500\text{mm} \times 300\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的矩形铝板边缘的局部。图 3.3a 是表示虚拟系统的一个示意图。接收传感器显示为白色小矩形，而发射器是一个小阴影矩形。发射器是用来激发频率为 100kHz 、3 周期的正弦，与汉宁 (Hanning) 窗一起调制。在激励频率下，增强 A_0 模式的波长为 12mm 。

数值实验是对 120 个不同裂纹形态的重复实验。缺陷都是直的，但是，长度、位置和方向是不同的。所考虑的裂纹尺寸都在 $3 \sim 15\text{mm}$ 间距内。裂纹尺寸范围的选择是给定波长能检测出来的期望的最小缺陷。裂纹中点的位置是在 $10\text{mm} \times 6\text{mm}$ 长方形板中间随机选择，这是为了模拟裂纹位置的变化。由于结构的基本信息通常假定为已知的，因此裂纹对传感器线的方向也是已知的，随机角在 $\pm 4^\circ$ 间隔内。

波的传播在 cuLISA3D 软件中进行模拟。数值模拟的输出是每个裂纹形状面外位移的时间信号。然后,一个经验性的 15dB 高斯白噪声被添加到记录的传感器信号上,其目的是为了考虑原位因素,可能产生对测量误差的测量。3.6.1 节介绍的损伤成像算法应用于所有的 120 条裂纹形态获得的信号。在图 3.4a~d,分别可以看到 3.01mm、5.71mm、8.66mm 和 14.62mm 裂纹长度的典型损伤图像。在图 3.4a 和 b 可以观察到无损伤症状的区域,这并不奇怪,因为裂纹的大小小于波长的一半。然而,在图 3.4c 和 d 中可以观察有更高对比度区域的损伤图像。此外,可以看出,损伤越大,在损伤相关领域的像素值越高。

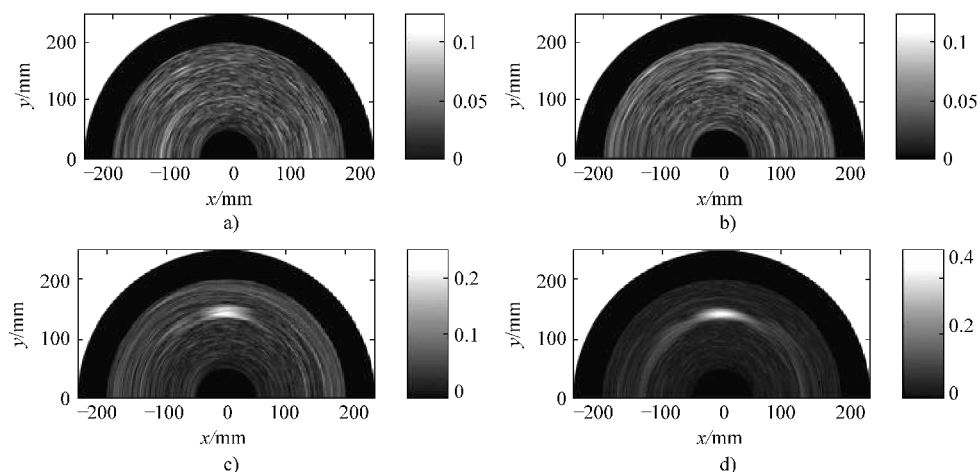


图 3.4 对应裂纹长度的成像结果

a) 3.01mm b) 5.71mm c) 8.66mm d) 14.62mm

所有 120 条缺陷分析产生的数据用于构建 POD 曲线统计分析中。由于 SHM 系统提供了一种连续信号,因此进行了信号响应分析,如 3.3 节中所描述的。图 3.5a 显示了所生成的 $a - \hat{a}$ 散点图。这里可以看到,除了低裂纹尺寸的点集, a 是与 $\hat{a}$ 线性相关的。因此,线性模型 $y = \beta_0 + \beta_1 x$ 是合理。在这种情况下,对于决策阈值的一种不错选择可从散点图中明显看出。事实上,假设 $a_{th} = y_{th} = 0.14$,审查不显示线性相关的所有数据。尽管如此, $y_{th} = 0.14$ 的 PFA 被计算。因此,为优化系统的性能,POD 分析对阈值水平提供了一个额外的指导。

由于没有对未损坏的板进行实验模拟,因此,噪声概率密度和 PFA 只能按照 MIL-HDBK-1823A (2009) 给定的程序通过数据进行评估。若只考虑 $a < 5$ 的信号值,显示 $a - \hat{a}$ 没有相关性,高斯噪声分布被建立和测试。图 3.6 中呈现的正态图,验证了假定的噪声概率模型是适当的。假定确定的阈值 PFA ($y_{th} = 0.14$) = 1%,通过信号响应分析获得的 POD 曲线如图 3.6 所示,其 95% 低置信限通过似然比法计算获得。 $a_{90/95}$ 结果是 7.07mm,符合波与缺陷相互作用的理论分析,它也限

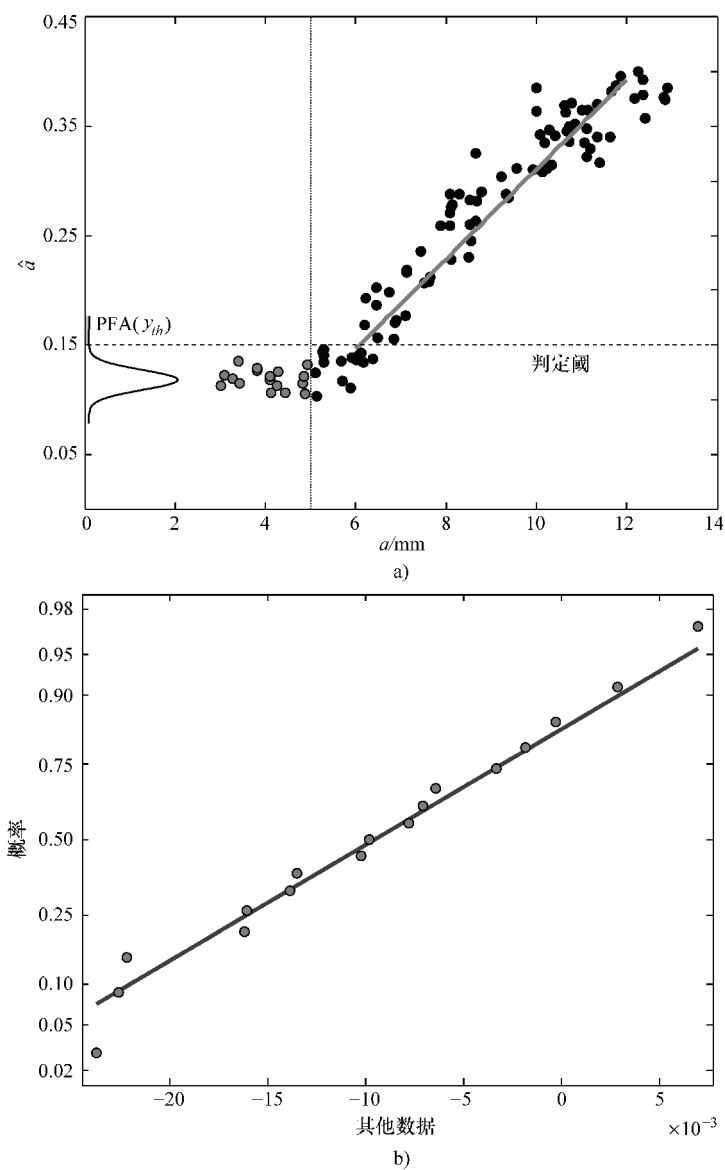


图 3.5

a) 信号响应分析 $a - \hat{a}$ 散点图和裂纹尺寸 $a > 5$ 的数据线性拟合 b) 裂纹尺寸 $a < b$ 的其余数据的正态图

制了系统对大于半波长裂纹尺寸的检测能力。因此，对于分析中使用的 12mm 波长，其结果一致性较好。

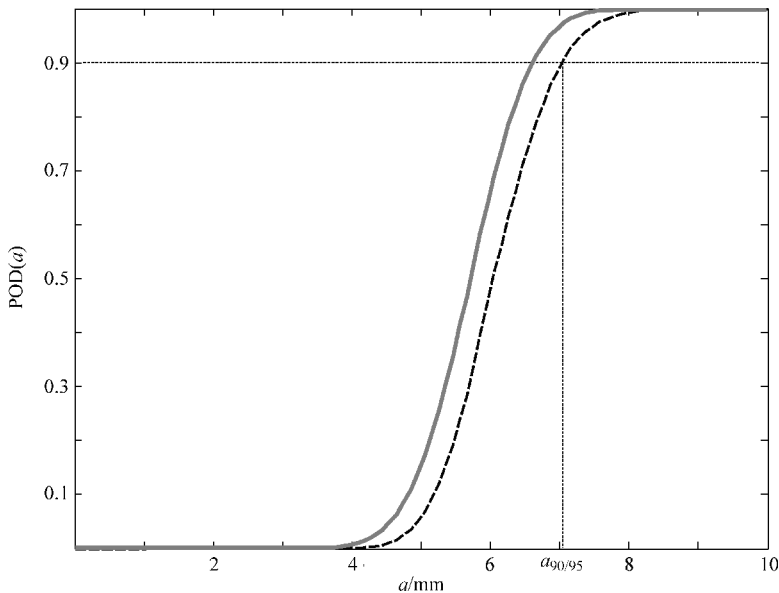


图 3.6 从模拟数据信号反应分析获得的 POD 曲线，虚线表示 95% 低置信界限

3.7 结论

SHM 系统 POD 特性计算对其可靠性评估特别重要，可以作为认证的第一步。已经证明，通过指导损伤探测阈值的选择，有助于对系统性能优化。然而，为获得可靠的结果，所需的实验数量是巨大的。为便于在评估中使用，试样必须被刻伤，因此需要制作大量的样品。此外，由于受环境和人为因素影响，这样的实验活动也是非常耗时的，常常需要重复进行，这使得传统的 POD 评估方法是昂贵的。通过采用可靠的数值模型和大规模并行处理技术，物理实验可通过虚拟的方法进行。各种各样的环境和人为因素可以在数值模拟中考虑。由于 GPU 的利用，显著加快了模拟速度，而且虚拟实验的数量可以增加。此外，基于 GPU 的方法被采用时不需要特殊的硬件需求，因此，对广大的工程人员是有用的。对基于弹性波的 SHM 系统，所开发的 cuLISA3D 仿真框架已被证明是可靠和高效的。

参考文献

- Aldrin JC, Medina EA, Lindgren EA, Buynak C, Steffes G and Derriso M 2010 Model-assisted probabilistic reliability assessment for structural health monitoring systems. *AIP Conference Proceedings* **1211**(1), 1965–1972.
- Aldrin JC, Medina EA, Lindgren EA, Buynak CF and Knopp JS 2011 Case studies for model-assisted probabilistic reliability assessment for structural health monitoring systems. *AIP Conference Proceedings* **1335**(1), 1589–1596.

- Aldrin JC, Sabbagh HA, Murphy RK, Sabbagh EH, Knopp JS, Lindgren EA and Cherry MR 2012 Demonstration of model-assisted probability of detection evaluation methodology for eddy current nondestructive evaluation. *AIP Conference Proceedings* **1430**(1), 1733–1740.
- Annis C and Knopp J 2007 Comparing the effectiveness of a90/95 calculations. *AIP Conference Proceedings* **894**(1), 1767–1774.
- Berens A and Hovey P 1981 Evaluation of nde reliability characterization. Technical report, University of Dayton Research Institute.
- Berens AP and Hovey PW 1983 *Statistical Methods for Estimating Crack Detection Probabilities*, Probabilistic Fracture Mechanics and Fatigue Methods: Applications for Structural Design and Maintenance, ASTM STP 798 (eds Bloom JM and Ekvall JC), American Society for Testing and Materials, pp. 79–94.
- Cheng RCH and Iles TC 1983 Confidence bands for cumulative distribution functions of continuous random variables. *Technometrics* **25**(1), 77–86.
- Cheng RCH and Iles TC 1988 One-sided confidence bands for cumulative distribution functions. *Technometrics* **30**(2), 155–159.
- Forsyth S and Fahr A 1998 *An Evaluation of Probability of Detection Statistics*, RTO AVT Workshop on ‘Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions’. Brussels, Belgium.
- Generazio E 2011 Binomial test method for determining probability of detection capability of fracture critical applications. Technical report, NASA.
- Georgiou G 2006 Probability of detection (POD) curves. Technical report, Jacobi Consulting Limited.
- Harding C, Hugo G and Bowles S 2007 Model-assisted probability of detection validation of automated ultrasonic scanning for crack detection at fastener holes. *Proceedings of the 10th Joint FAA/DoD/NASA Conference on Aging Aircraft*. Palm Springs, California, USA.
- Harding CA and Hugo GR 2003 Statistical analysis of probability of detection hit/miss data for small data sets. *AIP Conference Proceedings* **657**(1), 1838–1845.
- Harding CA, Hugo GR and Bowles SJ 2009 Application of model-assisted POD using a transfer function approach. *AIP Conference Proceedings* **1096**(1), 1792–1799.
- Hoppe WC 2010 A parametric study of eddy current response for probability of detection estimation. *AIP Conference Proceedings* **1211**(1), 1895–1902.
- Kabban C and Derriso M 2011 Certification in structural health monitoring systems. *Proceedings of the Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, USA, pp. 2429–2436.
- Knopp JS, Aldrin JC, Lindgren E and Annis C 2007 Investigation of a model-assisted approach to probability of detection evaluation. *AIP Conference Proceedings* **894**(1), 1775–1782.
- Liu L and Yuan FG 2010 A linear mapping technique for dispersion removal of Lamb waves. *Structural Health Monitoring* **9**, 75–86.
- Martinez J and Bahr A 1984 Statistical detection model for eddy current systems. *Review of Progress in QNDE* **3A**, 499–510.
- Matzkanin G and Yolken H 2001 *Probability of Detection (POD) for Nondestructive Evaluation (NDE)*. Texas Research Institute/Austin, Incorporated.
- Meeker WQ and Escobar LA 1995 Teaching about approximate confidence regions based on maximum likelihood estimation. *The American Statistician* **49**(1), 48–53.
- MIL-HDBK-1823A 2009 Nondestructive evaluation system reliability assessment. Technical report, US Department of Defense.
- Mueller I, Janapati V, Banerjee S, Lonkar K, Roy S and Chang F 2011 On the performance quantification of active sensing SHM systems using model assisted POD methods. *Proceedings of the Eighth International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, USA, pp. 2417–2428.
- Nelder JA and Mead R 1965 A simplex method for function minimization. *The Computer Journal* **7**(4), 308–313.
- Packo P, Bielak T, Spencer AB, Staszewski WJ, Uhl T and Worden K 2012 Lamb wave propagation modelling and simulation using parallel processing architecture and graphical cards. *Smart Materials and Structures* **21**, 075001–1075001–13.
- Packo P and Uhl T 2011 Elastic wave propagation simulation system based on parallel processing architecture *19th international conference on Computer Methods in Mechanics*. Warsaw, Poland.
- Petrin C, Annis C and Vukelich S 1993 A recommended methodology for quantifying NDE/NDI based on aircraft engine experience. Agard lecture series 190. National Atlantic Treaty Organization.
- Pettit D and Hoepfner D 1972 Fatigue flaw growth and NDT evaluation for preventing through cracks in spacecraft tankage structures. Technical report CR NAS 9-11722 LR 25387, NASA.
- Thompson RB, Lindgren E, Swindell P, Brasche L, W. W and Forsyth D 2009 Recent advances in model-assisted

- probability of detection *4th European-American Workshop on Reliability of NDE*. Berlin, Germany.
- Wall M, Burch SF and Lilley J 2009 Review of models and simulators for NDT reliability (POD). *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* **51**(11), 612–619.
- Worden K and Manson G 2007 The application fo machine learning to structural healt monitoring. *Philosophical Transactions of The Royal Society A* **365**, 515–537.
- Xiu 2010 *Numerical Methods for Stochastic Computations. A Spectral Method Approach*. Princeton University Press.
- Yee B, Chang F, Couchman J, Lemon G and Packman P 1976 Assessment of NDE reliability data. Technical report, NASA.

第 4 章 非线性声学

4.1 引言

应用于 SHM 和 NDT 技术的超声方法可以分成两组。第一组包括基于线性声学原理的方法。作为声波与损伤相互作用的结果，产生了声能的反射、传播、吸收或者波形转换等现象（Kessler 等，2002；Kundu，2003；Raghvan，2007；Rizzo 等，2009；Staszewski，2004；Wilcox 等，2007）。第二组包括基于非线性声学现象的方法。非线性声学现象可以关联各种原子晶格缺陷（固有的或者材料的非线性）和/或界面的非对称热弹性行为（如裂纹、接触、摩擦的表面等）。19 世纪 60 年代初人们就开始研究前一组，它以固有或者材料的全局非线性而著名（Bateman 等，1961；Breazeale 和 Ford，1965），并且将它用于探测材料缺陷（例如材料中的微裂纹；Jhang 和 Kim，1999；Nagy，1994）。后者是局部非线性，近 15 年来，其理论和应用研究引起了很多兴趣。在较高、次高和超谐波产生（Buck 和 Morris，1978；Morris 等，1979；Solodov 等，2004），混频（Bruneau 和 Potel，2009）和移位（Haller 和 Hedberg，2006），基于低频振动的声波调制（Aymerich 等，2010；Klepka 等，2012a；Meo 和 Zumpano，2005；Staszewski 和 Parsons，2006；Van Den Abeele 等，2000b），慢动力学效应（Bentahar 等，2009；Guyer 等，1998）或混响（Van Den Abeele 等，2002）等形式中，上述提到的现象可以产生非线性效应。

尽管已经做了大量研究努力，但是对与这些非线性相关的物理机理的了解很少。表 4.1 总结了这一领域前人工作成果和主要理论模型的重大发展。留下的问题仍旧是为什么材料受到非线性影响的敏感性程度大于线性响应。

表 4.1 固体中裂纹诱发的非线性机理

原子尺度 $10^{-10} \sim 10^{-6}$	• 固有弹性非线性归因于原子间力的非简谐振动（Nazarov，1988） • 热弹性耦合增强局部的无摩擦和无滞后耗散（局部应力集中和增强的温度梯度）（Landau 和 Lifshitz，1986；Zaitsev 等，2002a，b） • 缺陷的滞后或者纯弹性（无耗散和无滞后）的非线性产生缺陷弹性中的局部变化（共源共栅原理）（Nazarov 等，2002） • 在缺陷位置（微裂纹和微接触）非线性弹性急剧增加；明显的应变集中归因于原子间的力被破坏（Van Den Abeele 等，2000b） • 应力 - 应变的迟滞；振幅取决于耗散（Meo 等，2008） • 摩擦力、附着力的迟滞现象（Pecorari，2004） • 在裂纹表面和附着力迟滞间的粘滑摩擦（Woolfries，1998）
------------------------------	--

(续)

介观尺度 10^{-4}	• 裂纹诱发非线性 (弹性模量的变化), Hertzian 型非线性 (裂纹表面之间的接触) (Kim 等, 2003; Ostrovsky 和 Johnson, 2001; Solodov, 1998) • 高兼容的弹性, 包含来自线性模型的任意弱偏差 (流变学模型) (Zaitsev 和 Sas, 2000) • 局部刚度减小导致自然频率偏移 (Muller 等, 2005; Van Den Abeele 等, 2000a) • 双线性刚度 (开闭裂纹) (Friswell 和 Penny, 2002; Zaitsev 和 Sas, 2000)
宏观尺度 10^{-2}	• 破裂机理 (Belyaeva 等, 1997; Moussatov 等, 2003) • 由于阻抗失配的波调制 (由于开闭裂纹的不连续) (Duffour 等, 2006; Kim 和 Rokhlin, 2002)

针对这些问题, 存在两大主要的难点。第一类难点是已提出的非线性机理的多种多样。不同的机理能证明相类似非线性影响, 反之亦然。举例来说, 摩擦的、滞后的或者热弹性机理可以用作能量耗散的模型。反过来, 滞后包括弹性和耗散, 可以是线性的, 也可以是非线性的。第二类难点是各种实验证据——与这些非线性机理有关——已经受到关注。如果有可能的话, 通常很难分开所有涉及的机理。同样还需注意到非线性的产生可能不仅源自裂纹, 而且还源自其他无损伤的有关影响, 比如在结构节点或者边界分子的摩擦力, 过载, 联系传感器和监控表面的材料, 电子仪表测量链。不过, 非线性声学对疲劳裂纹检测是非常有吸引力的。因此, 从物理角度理解相关的非线性机理是很重要的, 有助于检测的实现和实际工程的应用。

4.2 理论背景

描述非线性声学的基本方程是一个非线性运动方程, 可写成以下形式:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (4.1)$$

式中, ρ 为平衡态时介质的密度, t 为时间, u 为位移, σ 为应力, x 为传播的距离。该方程的非线性结果来自两个因素:

1) 应力 σ 和应变 ε 的关系是非线性的 (物理非线性)。一般关系式如下:

$$\sigma = \int K(\varepsilon; \dot{\varepsilon}) d\varepsilon \quad (4.2)$$

式中, 参数 K 包含描述经典和非经典非线性内容。比如, 一种介质的参数 K 包含了一种形式经典一阶和二阶非线性与非经典滞后非线性, 可以写成:

$$K(\varepsilon; \dot{\varepsilon}) = K_0 \{ 1 - \beta \varepsilon - \delta \varepsilon^2 - \alpha [\Delta \varepsilon + \varepsilon(t) \text{sign}(\dot{\varepsilon})] \} \quad (4.3)$$

式中, K_0 为线性模量, $\Delta \varepsilon$ 为局部应变幅, $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ 为应变率, β 和 δ 为经典非线性扰动参数。对于式 (4.3) 的滞后项

若 $\dot{\varepsilon} > 0$, 则 $\text{sign}(\dot{\varepsilon}) = 1$; 若 $\dot{\varepsilon} < 0$, 则 $\text{sign}(\dot{\varepsilon}) = -1$ (4.4)
并且, α 为滞后系数。

2) 应变和纵波的位移梯度关系由以下式子给出:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \quad (4.5)$$

这种非线性叫做运动学上或者几何学上的非线性, 对于剪切平面波, 它不会出现。

由此得出: 材料应变 ε 同时取决于应力 σ 和应变率的符号。引用应力 - 应变特征的例子包括了滞后行为, 当然这是理想的状态。这意味着在每一次加载 - 卸载循环, 材料在同一点会恢复到同样的状态。事实上, 这种特点会受到比如循环蠕变和循环硬化影响而改变。滞后模型也由很多要素组成, 这包括部分依赖于应变率信号, 部分不依赖它。依赖应变率信号 ($\dot{\varepsilon}$) 的部分描述了在应变 - 应力平面的循环。这个术语是滞后非线性耗散的原因。在声学领域耗散的能量是积极的, 并且它等同于滞后回线的比表面积。不依赖应变率信号的部分是滞后回线方向的原因。许多研究报告指出对于微观不均匀介质, 可以观察到不同类型的非线性耗散机理 (除了滞后非线性有关的耗散机理)。

众所周知, 结构中的声波传播会引起额外的吸收或者透明其他的波 (Nazarov, 1988; Zaitsev 等, 2002a)。尽管没有清楚地解释这种现象, 但是把它归咎于介质中迟缓的过程。通常来说, 系统的物理参数与外部激发有关系 (达到所给平衡状态与某种延迟的激励有关)。这会引起结构中的记忆效应, 并且意味着系统参数取决于外部激励和其历史的值。这暗示了应力 σ 依赖于应变 ε , 额外的参数与结构内部自由度有关。在声波的情况下, 迟缓时间增加会引起谐振曲线的变化 (Bruneau 和 Potel, 2009)。

在颗粒状介质中, 不同类型的非线性对非线性声学产生了主要的贡献。这种非线性来自于 Hertz 型接触 (Landau 和 Lifshitz, 1986; Meo 等, 2008; Nazarov 等, 2002; Zaitsev 等, 2002b)。这种非线性起因于表面之间的接触。在荷载状态下, 接触的刚性发生改变 (接触表面的改变)。值得注意的是存在其他的原因改变应力 - 应变特征, 其包括了振幅级或加载 - 卸载速率, 这将会导致温度波动。

胡克定律 (4.3) 的非线性形式在结构受到纯谐波激励后其信号响应发生变形。因此, 在信号响应中会产生附加的成分。这些组分的数目和它们的特征取决于非线性的类型。图 4.1 表现的例子是在线性系统下, 应力 - 应变的关系和结构受谐波激励的应变谱, 以及二次、三次非线性和滞后的系统。在结构中产生以下提到的现象归因于材料的不完整和损伤; 对于损伤的结构, 非线性的比例明显变得更高。损伤导致非线性现象可以划分为数个群组, 但是它们中的所有部分能够同时为系统的整体非线性特征做出贡献。损伤导致基本非线性效应将会在下面给出。

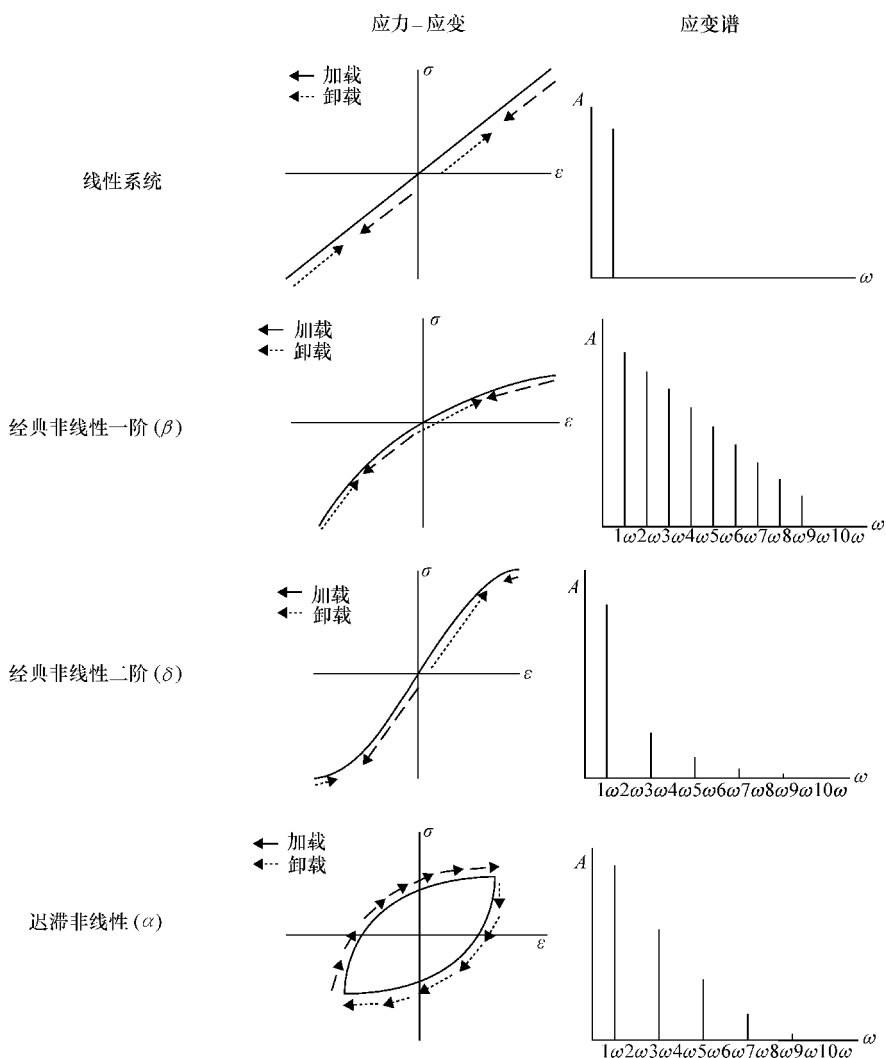


图 4.1 应力-应变特征的例子

4.2.1 接触声学的非线性

接触声学的非线性 (CAN) 是由损坏界面间的机械作用造成的非线性效应。两种由损伤引起的非线性振动机理值得关注。

第一种是破裂，其表示为机械二极管效应。这是因为损伤结构应力-应变特征的不对称性，其会导致材料受压阶段的刚度比受拉伸的大。破裂机理近似于以下式子 (Pecorari 和 Solodov, 2006; Woolfries, 1998):

$$\sigma = K \left[1 - H(\varepsilon) \frac{\Delta K}{K} \right] \varepsilon \quad (4.6)$$

式中, $H(\varepsilon)$ 是单位阶跃函数, $\Delta K = K - (d\sigma/d\varepsilon)$ (当 $\varepsilon > 0$ 时)。由谐波声学波引起的双模接触会引起材料刚度和波变形的脉冲调制 (见图 4.2d)。调制函数直接与纵向声波频率有关。因此, 响应函数的频谱将会包括声波基频的谐波 (奇次和偶次), 正弦函数调制这些谐波的振幅。图 4.2 举例表现的是线性 (完整的) 结构和非线性 (损伤的) 结构的应力 - 应变特征和波变形。

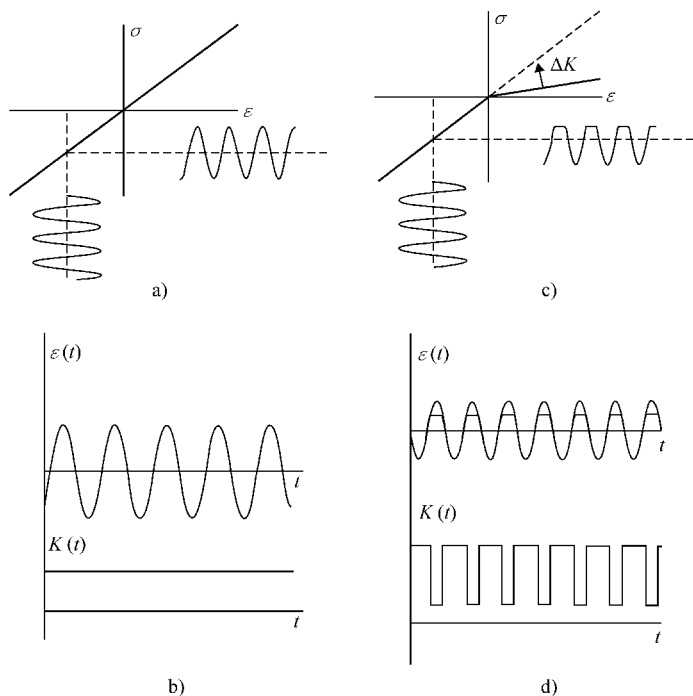


图 4.2 对完整结构 (a, b) 和损伤结构 (c, d) 的刚度调制和波的形成

第二种是非线性机理, 其引起结构刚度特征的改变。这种改变与剪切声波和损伤的相互作用有关。在这种情况下, 损伤界面由摩擦力产生力学联系。如果剪切波的振幅很低, 在相邻粗糙区域间的微滑动中取代损伤的界面。这种效应是与运动的方向无关的, 而引起刚度特性变化两次 (对称非线性)。在这种情况下, 在系统响应频谱中只有产生奇次谐波。当声波的振幅增加足够大时, 接触的静摩擦力会受到破坏, 然后在停滞与滑动模型中裂纹表面彼此相互开始滑移。首先这意味着, 受到附着力耦合的表面微凸体弹性变形, 然后塑性变形 (滑动) (Solodov, 1998)。这会引起在静摩擦力和动摩擦力间的循环变化, 使得应变 - 应力特征转化为滞后特征 (Awrejcewicz 和 Olejnik, 2005; Pecorari 和 Solodov, 2006; Woolfries, 1998)。如在微滑动模式的情况下, 在每次加载时该变化不依赖位移方向并两次改变刚度, 以致只有奇次谐波的产生。图 4.3 表现了微滑动模型和滞后与滑移模型的应力 - 应变特征。关于在动态系统中的摩擦力不同类型的更多细节可以参见 Ostrovsky 和 Johnson (2001)。

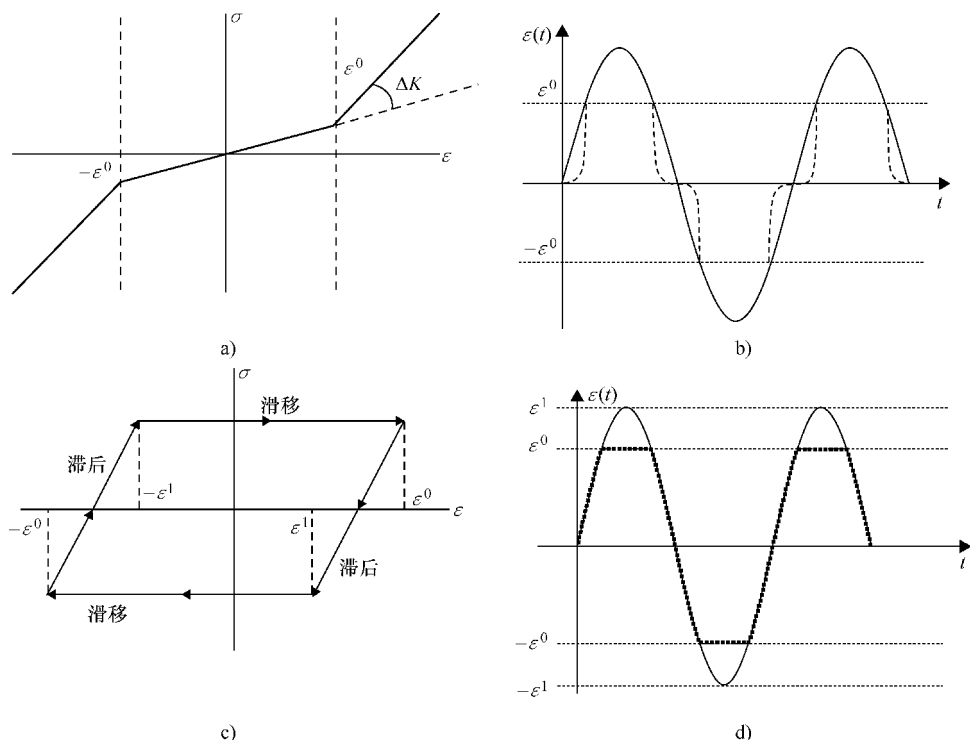


图 4.3 微滑动模型 (a, b) 和滞后与滑移模型 (c, d) 的应力-应变特征和波的变形

4.2.2 非线性共振

除了以上提到的现象, 还有引起损伤结构非线性行为的其他机理。其中一种就是非线性共振, 它是由于裂纹的开闭而产生的现象。为了理解这种现象, 假设裂纹由包括质量 m_i 和刚度 k_i 在内的一系列振子构成 (裂纹界面的非理想表面)。所给振子的自然频率 ω_0 由质量 (损伤区域中材料的质量) 和刚度决定。把问题简化后, 所给振子的运动方程可以写成如下的公式:

$$\ddot{x} + \omega_0 x = f(t) + F(x) \quad (4.7)$$

式中, x 为位移, $f(t) = f_0 \cos(\omega_0 t)$ 是关于频率 ω_0 的激励函数, $F(x) \approx \cos(\omega_1 t - \omega_0 t)$ 是非线性相互作用力。假设 $\omega_1 - \omega_0 \approx 0$, 频率 $\omega_0 = \omega_1/2$ 时的共振是预期的 (一阶分谐波)。当采用多倍的 ω_0 时, 高阶分谐波会出现。当假设损伤为不同自然频率的一系列谐振器时, 那么分谐波产生的问题变得更加复杂。在这种情形下, 围绕分谐波会产生一对共振频率 (Woolfries, 1998)。图 4.4 显示的是系统响应频谱的例子, 由于 CAN 效应, 应力-应变特征不对称以及损伤不完整界面使得其展现更高的谐波。由于裂纹尖端间的附着力, 有人已经关注了类似的效应 (Kim 等, 2003)。

另一种引起损伤结构的非线性共振现象是应力-应变关系之间的滞后 (上文已经讨论)。除以上提到的效应之外, 该现象也会引起损伤结构中声波传播速率的变化 (减小) (Bruneau 和 Potel, 2009)。波速的减小会造成谐振频率和声波振幅的比例改变。

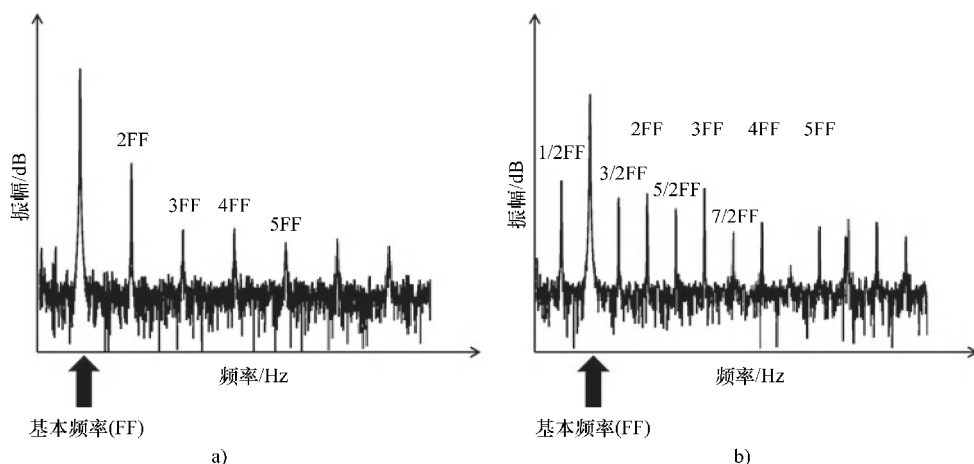


图 4.4 频谱举例：CAN 效应——刚度特征不对称 (a) 和损伤的不完整界面 (b)

4.2.3 混频

谐波产生的过程是混频的特例，这里假设损伤结构引入单频率波。对于不同振幅和频率的两条声波，这两条声波和损伤之间相互影响导致不同的效应。假设引入损伤结构的激励信号是双组分的线性组合，如下描述：

$$u(t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) \quad (4.8)$$

式中， A_1 和 A_2 是特定组分的振幅， ω_1 和 ω_2 是它们的频率，但是 $\omega_1 \gg \omega_2$ 。因此，式 (4.8) 的解由 ω_1 和 ω_2 的高次谐波和频率 ω_1 边带产生的混合条件组成。边带的阶不依赖非线性的类型。比如，对于“经典”二次非线性系统来说，一阶边带 $\omega_1 \pm \omega_2$ 有振幅与 $\beta A_1 A_2$ 成正比；对于三次非线性系统来说，二阶边带 $\omega_1 \pm 2\omega_2$ 有振幅与 $C(A_1)^2 A_2$ 成正比，其中 C 由 β 和 δ 决定。就古典理论而言，用振动中的裂纹开闭运动来解释声波的调制，这个过程见图 4.5a。图 4.5b、c 是在未损伤 (b) 和损伤 (c) 复合板的非线性声学测试中获取的信号响应。由于信号调制，结构响应的频谱包含了额外的组分（边带）。图 4.6 是在振-声调制测试中获取的信号响应频谱。边带的振幅主要取决于调制强度，反过来这取决于刚度改变。因此，调制强度因子 R 定义为

$$R = \frac{(A_{L1} + A_{R1}) + (A_{L2} + A_{R2}) + \cdots + (A_{Ln} + A_{Rn})}{A_0} \quad (4.9)$$

式中， $A_{L1} \dots A_{Ln}$ 和 $A_{R1} \dots A_{Rn}$ 分别是分布式左边带和右边带的振幅， A_0 是高频声波的振幅。调制比与损伤区域尺寸有关。在很多研究报告中，把参数 R 作为损伤指标 (Aymerich 等, 2010; Friswell 和 Penny, 2002; Muller 等, 2005; Van Den Abeele 等, 2000b)。

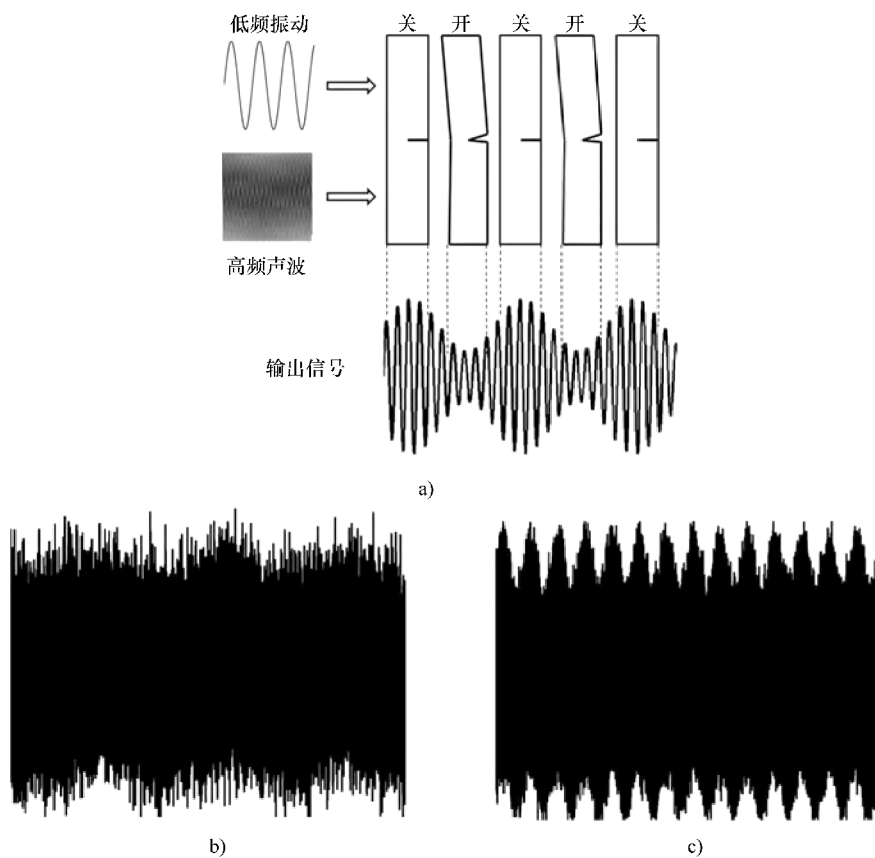


图 4.5 裂纹结构中信号调制的经典解释 (a)，完整结构 (b) 和损伤结构 (c) 的信号响应

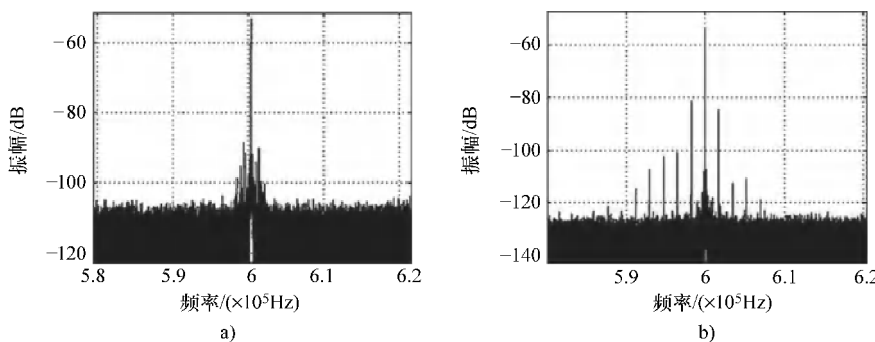


图 4.6 非线性测试的超声波响应功率谱
a) 未损伤板 b) 损伤板

除了“经典”机理导致的调制，还存在其他机理导致的调制，其需考虑不同现象，比如卢森堡 - 高尔基 (Luxembourg - Gorky, L - G) 效应。起初，1933 年在

荷兰，人们观察这种现象是为了无线电波研究。调制传递使强大的卢森堡电台发送无线电信号，从而让人们听到荷兰无线电广播。在高尔基也观察到类似的效应，人们收听到莫斯科电台发送的强烈信号。在弹性介质中也发现了这种效应（Zaitsev 等，2002a, b）。

调制传递的机理完全不同于经典非线性效应。经典振 - 声调制与应力 - 应变特征的弹性部分有关，而 L - G 效应与非弹性部分有关。L - G 交叉调制的原理见图 4.7。频率为 ω_1 （载体）的高频声波由频率为 ω_M （ $\omega_1 \gg \omega_M$ ）的低频信号调制。因此，“脉动”声波产生了。这种声波连同频率为 ω_2 的探测波一起同时传送到结构中。如果结构中存在裂纹，新的信号组分会在频率为 $\omega_1 \pm \omega_M$ 和 $\omega_1 \pm 2\omega_M$ 的信号响应频谱中产生。这意味着调制传递从脉动声波到探测波中产生。

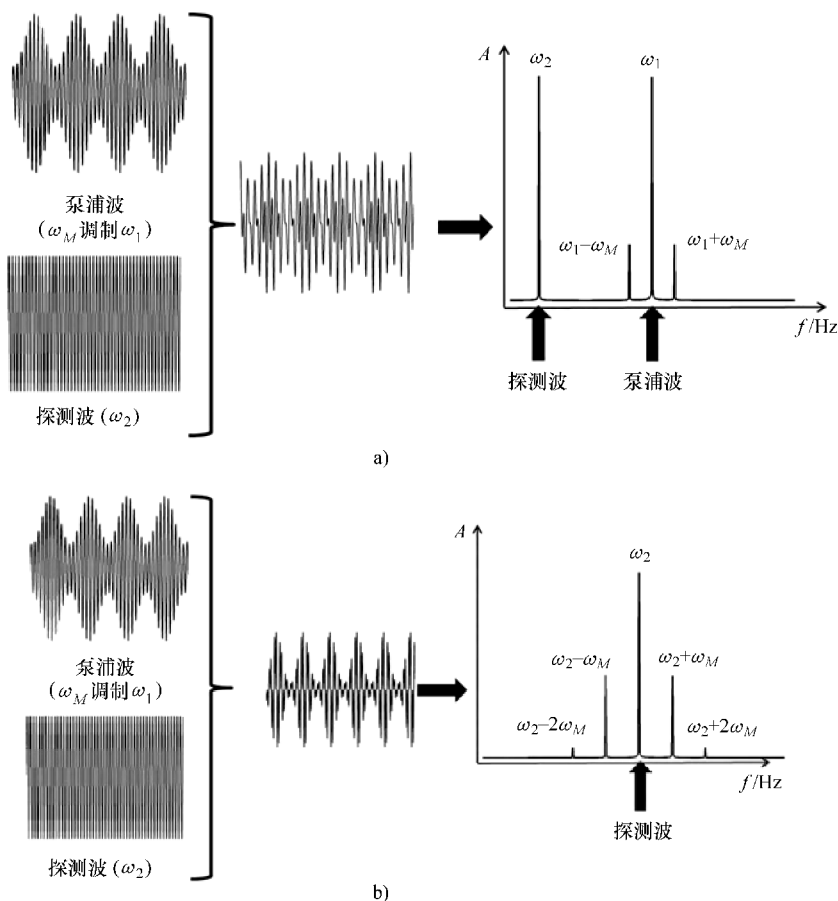


图 4.7 卢森堡 - 高尔基 (L - G) 效应原理
a) 损伤结构 b) 未损伤结构

调制传递现象能用在较小应变情况下应变场和辅助场间非线性耦合来解释,该较小应变水平不足以打开裂纹,但是能足够扰乱裂纹表面。基于应变场和温度场的非线性耦合的机理在 Moussatov 等 (2003) 中提出,并认为与 L - G 效应对应 (Duffour 等, 2006)。

提出与波散射和温度有关的两种理论是用来解释这种非线性耦合机理的 (Kim 和 Rokhlin, 2002): ①弹性波产生了来自进一步弹性波散射的温度干扰; ②温度承载了产生它的弹性波方面并传递这些到散射波。这会同时造成交叉调制效应和依赖于声波衰减的振幅 (应变水平)。

Klepka 等 (2012a) 用实验方法证明了不必张开裂纹来调制信号。但是当裂纹是张开时,调制强度会得到加强。应该指出,出现这些现象是由于低频激励的特定值,与结构的模型形状一致。图 4.8 和图 4.9a 是依赖耦合应变 - 温度场和 L - G 效应的振 - 声调制的实验结果。图 4.9b 是在振 - 声调制测试中围绕损伤区域的温度场。

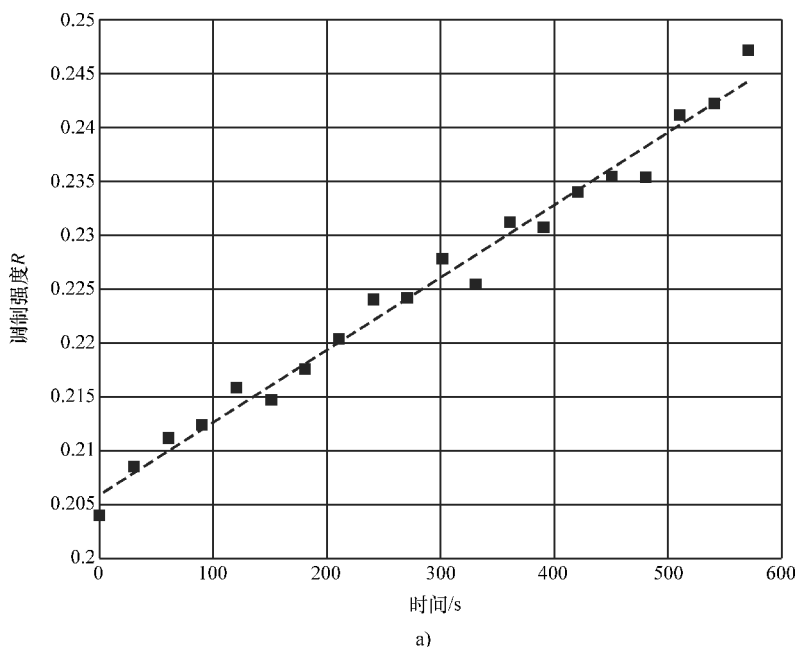


图 4.8 依赖耦合应变 - 温度场的振 - 声调制的实验结果 (来源于 Klepka A., Staszewski WJ., Jenal R., Szewdo M., Uhl T., and Iwaniec J. 2012a. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro - acoustic wave modulations. Structural Health Monitoring 25, 197 - 211, © 2012 Sage Publications)

a) 调制强度与时间

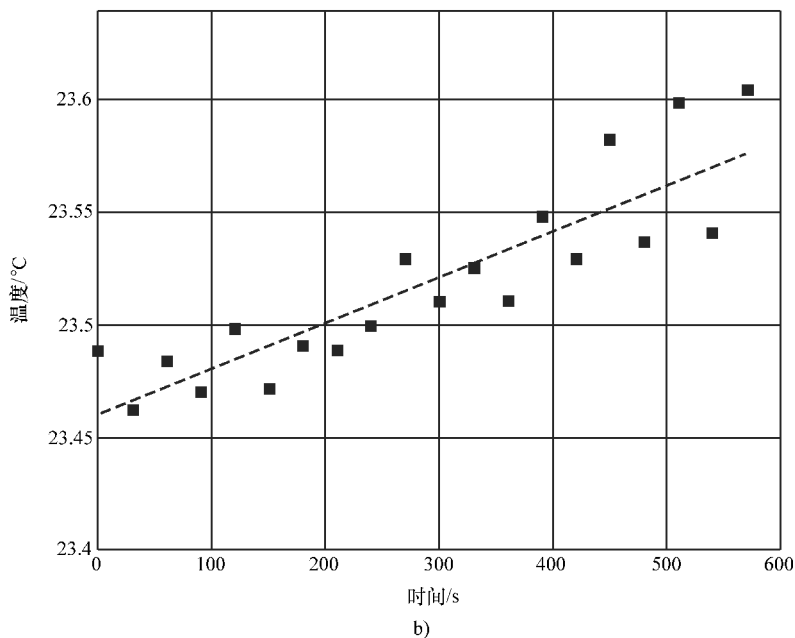


图 4.8 依赖耦合应变 - 温度场的振 - 声调制的实验结果 (来源于 Klepka A. , Staszewski WJ. , Jenal R. , Szwedo M. , Uhl T. , and Iwaniec J. 2012a. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro - acoustic wave modulations. Structural Health Monitoring 25, 197 - 211, © 2012 Sage Publications) (续)
b) 温度和时间

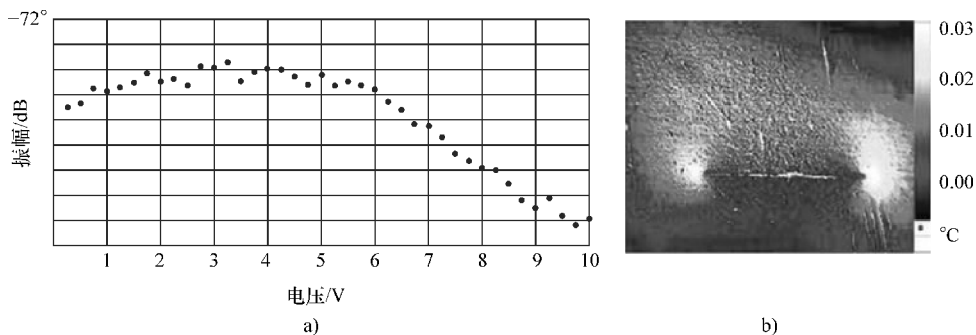


图 4.9 (来源于 Klepka A. , Staszewski WJ. , Jenal R. , Szwedo M. , Uhl T. , and Iwaniec J. 2012a. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro - acoustic wave modulations. Structural Health Monitoring 25, 197 - 211, © 2012 Sage Publications)

- a) 显示高频 (HF) 振幅衰减的弹性波 L - G 效应的实验结果
b) 振 - 声调制测试中温度场的红外线热成像仪图像

4.3 损伤探测方法和应用

过去的数十年,不同的检测疲劳裂纹的方法得到了很大的发展。其中包括经典的并得到确认的 NDT/E 方法,比如超声波检测、声发射检测、涡流检测、射线探伤、磁粉检测和渗透技术,以及基于超声导波、比较真空监测、微波技术等新技术,这些检测技术的讨论详见 Boller 等 (2009) 和 Staszewski 等 (2004)。基于超声波和超声导波的经典方法结合波的传播利用了线性效应。波反射和波散射用来分析定位损伤位置和评价其损伤的严重程度。

近年来,基于超声波的非线性损伤探测方法越来越引起人们的兴趣。在最初期阶段这些方法对结构损伤的敏感性较高。非线性声学对接触型损伤探测有特殊的吸引力,比如疲劳裂纹。基于非线性声学方法的一个极为重要的优点是这些现象不会在完整结构中出现 (或极少出现),损伤引起产生结构非线性行为的机理瞬间激活。另一个优点是基于非线性声学方法的敏感性,其能在最初期检测缺陷。与线性方法相比,声波的波长和损伤的尺寸大小没有边界。表 4.2 是非线性声学方法的适用范围。

现存的基于非线性声学的损伤探测方法可以分成两大类。第一大类包括基于声-弹性现象,谐波振荡和混频经典的方法。这些方法已经广为人知,产生结构非线性行为的非线性机理受到明确定义。然而,在非线性声学的经典方法中仍有揭示非经典非线性效应的研究 (Klepka 等, 2012a)。第二大类包括“现代”(非经典)方法,相比经典方法,其是基于不同的现象。表 4.3 是在不同材料中检测缺陷的不同非线性机理的使用举例。

表 4.2 非线性声学方法应用范围

晶格缺陷	微观结构	微观缺陷	宏观缺陷
空位	空洞	微裂纹	裂纹
位错	晶界缺陷	微孔	杂质
吉尼尔-普雷斯顿区间隙原子	腐蚀坑	分层	

表 4.3 用于损伤探测的不同非线性机理的举例

技术	应用范围	参考文献
二次谐波分析, 第二、三阶声-弹性系数	钢铁、钛、铝等	Cantrell 和 Yost (1994), Staszewski 和 Parsons (2006), Boller 等 (2009) 和 Klepka 等 (2010)
非线性共振	聚苯乙烯、玻璃纤维增强聚合物、玻璃、钢管	Nagy (1998), Buck (1990), Ostrovsky 和 Johnson (2001), Solodov (2010)

(续)

技术	应用范围	参考文献
振 - 声调制	复合结构、玻璃、手性结构、铝、钢铁	Van Den Abeele 等 (2000a, b), Duffour 等 (2006), Aymerich 等 (2010), Klepka 等 (2012a, b)
卢森堡 - 高尔基 (Luxembourg - Gorky) 效应	颗粒材料、玻璃、铝	Zaitsev 和 Sas (2000), Zaitsev 等 (2002a, b), Aymerich 和 Staszewski (2010a)
分谐波和自调制	聚苯乙烯、复合材料	Solodov 等 (2004), Pecorari (2004), Awrejcewicz 和 Olejnik (2005)
实时振幅和频率	铝	Donskoy 等 (2001), Hu 等 (2010)

以前对非线性声学的研究证明了实际中观察到的非线性现象不但归因于结构损伤而且还归因于材料行为、边界行为和测试仪器等。当进行非线性声学试验时，控制所有这些不良效应是很重要的。激励、传感方法以及其设置与激励频率的选择需慎重，以便获得很好的检测灵敏性。很多方法都可以用来激励所监测的结构，包括扬声器 (Ballada 等, 2004)，振荡器 (Aymerich 等, 2010; Klepka 等, 2012a)，捶打 (Ballada 等, 2004)，激光器 (Kolomenskii 等, 2003) 和压电陶瓷传感器 (Staszewski 和 Parsons, 2006)。测量技术以加速计、激光器为例的设备作为基础。

基于非接触的光/激光测量技术对非线性声学应用有特殊的吸引力。多年来，低频激光扫描振动计用于进行振动分析和模态分析。较新的应用包括了高频超声波测量。3D 扫描激光振动计提供了使平面外和平面内测量相结合的方法。许多 3D 配置已经广为报道，实现商业化并用于弹性波传播测量方法。

在非线性声学试验中，结构激励方法的问题也是必不可少的。选择合适的激励源和它的位置，以及提供合适的应变级别来揭示非线性机理，这对非线性声学试验是必要的。

本章简要概述损伤诊断的非线性声学的应用。其中一些工作在波兰国家科学中心提出的研究项目 N N501158640 中进行。

4.3.1 损伤探测非线性声学

本节介绍用于损伤探测的非线性效应的方法应用。通过运用不同非线性声学技术，对金属结构、复合材料、岩石和混凝土、玻璃、树脂玻璃和许多其他材料的缺陷检测成为可能。

4.3.1.1 金属结构

金属结构广泛用于实际工程中的很多分支产业，这包括了民用基础设施、航空工业和汽车工业。由于对金属结构循环加载，疲劳损伤是主要失效原因。材料中的疲劳是一种局部损伤，其具有渐进性和永久性。即使加载的力比材料的静态屈服应力还小，这类损伤也会产生。该损伤很危险，会导致灾难性后果。

对于金属结构，一种用于损伤探测的非线性声学方法以频混现象为基础（详见 1.5 节）。其中一种是基于振 - 声调制。通过高频声波和低频（模态的）激励，该方法以结构的实时激励为基础，在铝板中用于探测疲劳损伤 [见 Klepka 等，(2012a)]。在试验的第一阶段，建立数值模型以便达到对裂纹边缘扩展（CED）分析的目的。然后为非线性声学测试选择自然频率（与损伤的不同动态行为有关）。已选模型形状和疲劳裂纹样本详见图 4.10。

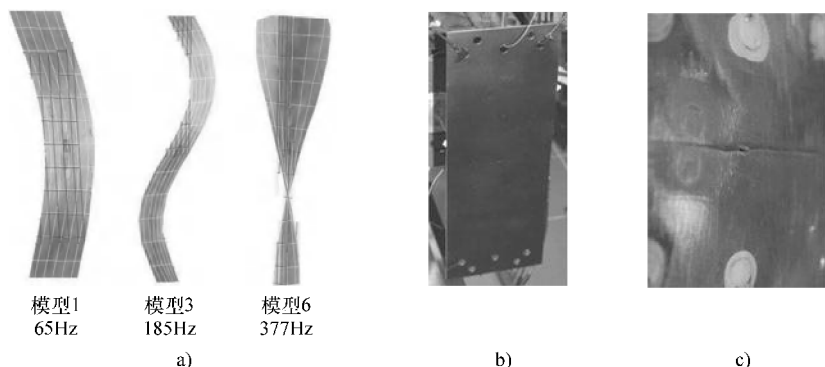


图 4.10 （来源于 Klepka A. , Staszewski WJ. , Jenal R. , Szwedo M. , Uhl T. , and Iwaniec J. 2012a. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro - acoustic wave modulations. Structural Health Monitoring 25, 197 - 211, © 2012 Sage Publications）
a) 已选模型形状 b) 作为研究的样本 c) 疲劳裂纹

在不同的振幅级别下，平板同时受到模态激励（低频激励）。得到调制响应并使用傅里叶分析得到功率谱。图 4.11a 给出的是 6V 低频激励振幅的功率谱的例子。图 4.11b 给出的是三种不同振 - 声模型和低频激励的不同振幅级别的调制强度的参数。相比第一级（裂纹模型 I）振动模式激励的结果，第三级（裂纹模型 III）和第六级（裂纹模型 II）振动模式激励的 R 值是分散的。该结果表明了随着预期的激励水平，调制强度通常会增加。但是，在第三级振动模式激励情况下 R 有最大值，而最大应变等级会诱导平板的第一级振动模式激励。应该重点强调的是，观察开闭行为只是为了后者的激励。这说明了裂纹的开闭行为不是振 - 声调制的主要诱因。图 4.12 给出了比较二次谐波和三次谐波的振幅与采用三种不同振动模式激励的振 - 声非线性测试的基本低频谐波振幅。

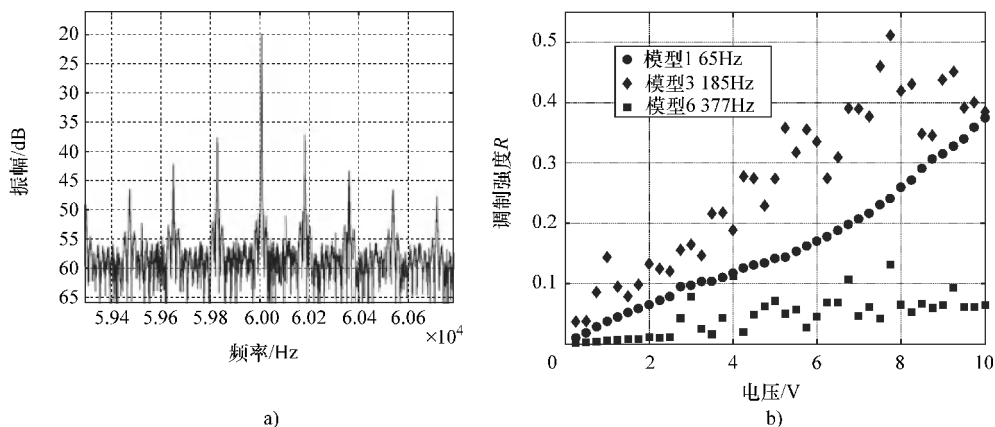


图 4.11 (来源于 Klepka A., Staszewski WJ., Jenal R., Szewdo M., Uhl T., and Iwaniec J. 2012a. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations. Structural Health Monitoring 25, 197–211, © 2012 Sage Publications)

a) 解释振-声调制的功率谱 b) 不同级别的低频激励的调制强度

本章中介绍谐波和边带的分析论证了一种可能存在的双重非线性机理，其用作分析大裂纹和低频激励水平。为了所有三次振动模式分型，可以观察某些经典非线性弹性的证据（一阶扰动归因于二次二阶谐波、三阶三次谐波、二次二阶边带依赖和线性一阶边带依赖）。当平板受到三阶振动模式的激励，在产生的谐波（二次三阶谐波）和边带（线性二阶边带依赖）的模型中可以观察某些滞后行为的证据。

谐波和边带的模式很显然地会受到开裂纹影响，并且经典扰动非线性可能与裂纹有关的弹性行为相关。然而，分析结果清晰地表明了当分析非线性调制的时候这种机理不占主导。首先，当裂纹总是闭合的时候，在第三级和第六级振动模式激励条件下能观察到很强的调制边带规律。其次，尽管第三级振动模式下的应变级别比第一级振动模式下的小得多，调制的最大强度在第三级振动模式下可以获得。第三级振动模式表明了滞后弹性的一些证据。

再一次实验揭示了温度改变和振-声调制的可能联系。有裂纹的铝板受到恒定振幅、低频率振动和 600s 的高频率超声波信号的激励。值得注意的是，使用激励水平，裂纹并没有打开。然后在裂纹附近测量温度，同时振-声响应可以捕获到，用来估计调制的强度（ R 参数）。图 4.13 显示了结果。此外，当平板受到第三级模式激励时其温度没有改变，但是分别用第一级和第六级振动模式激励时，其温度分别增加大约 0.12°C （见图 4.13a）和 0.05°C 。同时，调制强度（见图 4.13b）增加了 20%，这只是在第一级振动模式激励条件下会产生。

对于温度分析有三个主要结论。第一，只在第一级振动模式下发现了温度和振-声调制的联系。这是因为应变水平不能开闭裂纹，但是足够扰乱裂纹表面。有趣的是，这种模式表明了非经典振幅衰减（L-G 效应）的一些证据。第二，在第

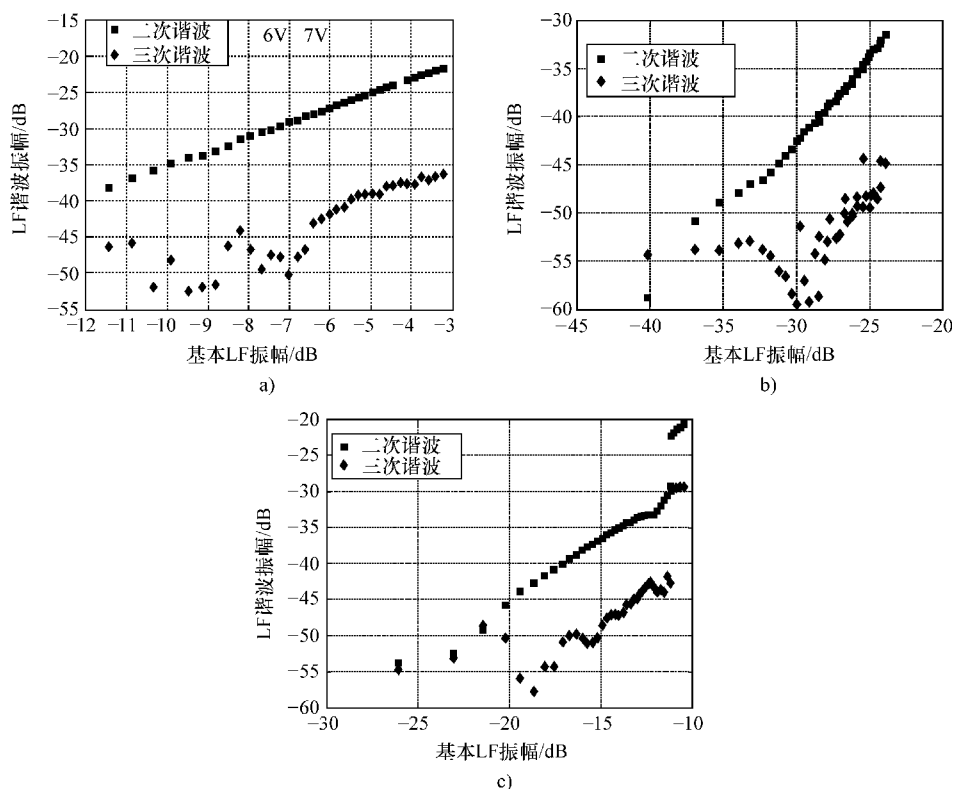


图 4.12 分析调制边带振幅（垂直虚线表明裂纹张开面积）（来源于 Klepka A., Staszewski WJ., Jenal R., Szwedo M., Uhl T., and Iwaniec J. 2012a. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro – acoustic wave modulations. Structural Health Monitoring 25, 197 – 211, © 2012 Sage Publications）

a) 第一振动模式 b) 第三振动模式 c) 第六振动模式

三级振动模式激励（裂纹模型Ⅲ – 撕裂）条件下无热产生（温度改变）。该模式下产生了最大强度调制和滞后行为的强有力的证据。第三，在第六级振动模式激励下有些热产生（可能因为摩擦）。该模式下产生了调制强度的最小级别。但是，温度的改变并没有在振 – 声调制中产生任何变化。

调制参数的强度通常用来作为损伤指数。在 Haron 和 Adams（2008）中研究细长梁样本是为了检测疲劳裂纹。使用模态冲击锤和压电式转换器分别通过宽带脉冲和高频声波激励该结构。对不同损伤尺寸大小的样本进行实验，并计算它们中的每一个强度调制系数。图 4.14 是进行测试的结果。

在论文中提出的一个非常重要的问题是进行非线性声学实验。该作者具体分析了测量仪器、边界条件和环境条件的可变性的影响。非线性声学也用于 SHM。在 Riviere 等（2010）中，非线性声学共振技术用于检测螺纹接口的扭矩变化。该方法基于与非线性滞后行为相关的非线性参数的辨识。这些参数是共振频率（非线

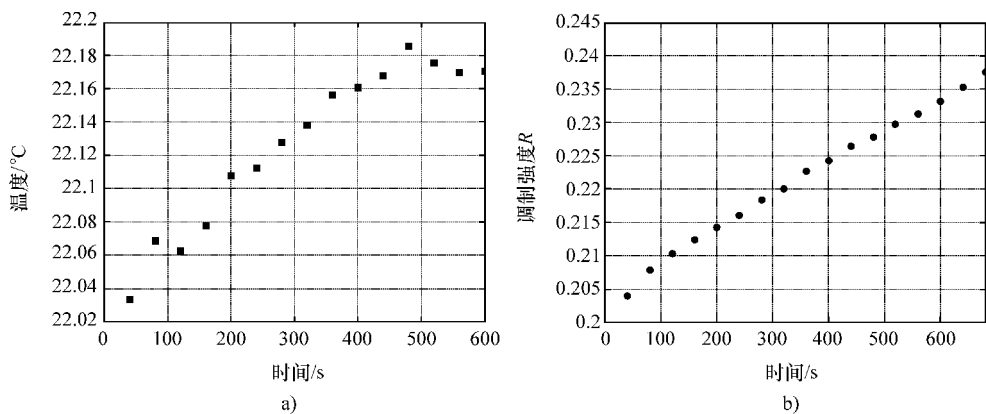


图 4.13 依赖应变场和温度场耦合的振-声调制的实验数据结果 (Klepka 等, 2012b)

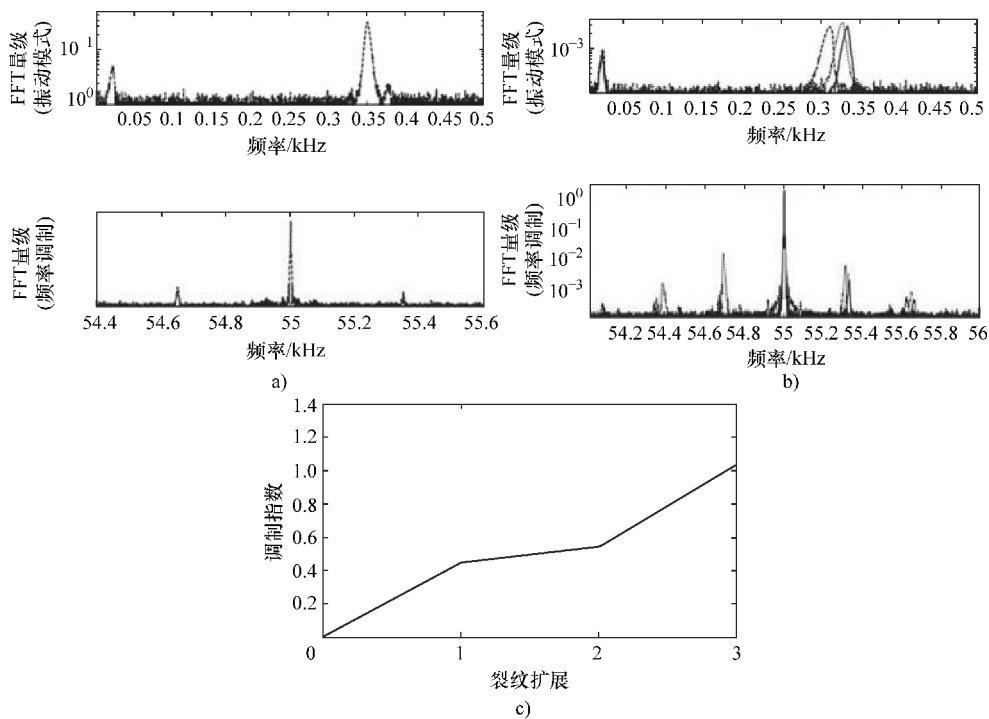


图 4.14 (来源于 Haron M. and Adams DE. 2008. Implementation of nonlinear acoustic techniques for crack detection in a slender beam specimen. Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008. Edited by Kundu T, 69350P-69350P-12, © 2008 SPIE)

a) 不同裂纹大小的未受损样本的声响应谱 b) 不同裂纹大小的受损样本的声响应谱
c) 调制指数与裂纹大小关系图

性弹性参数) 和衰减变化 (非线性耗散参数) 的原因。结果见图 4.15a。

该分析 (见图 4.15b) 清楚地表明了对于检测扭矩变化, 非线性弹性参数比线性弹性参数更为敏感。进一步分析表明, 与经典二阶非线性 (三次的) 和非经典滞后非线性相关的不同类型的非线性是同时存在的。

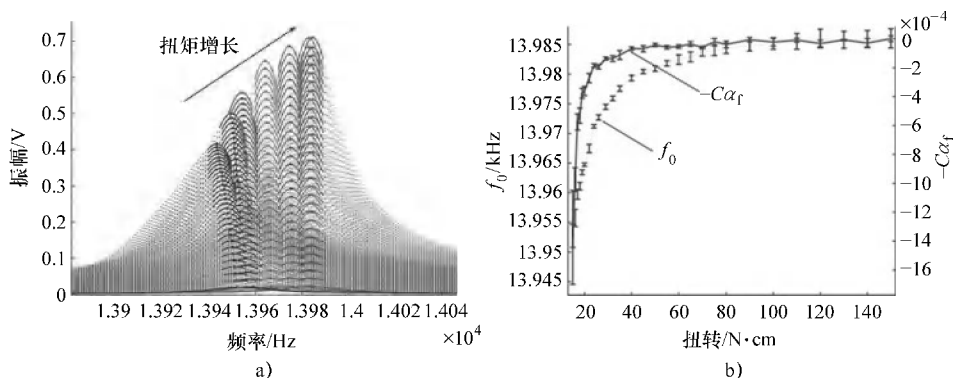


图 4.15 (来源于 Riviere J., Renaud G., Hauptert S., Talmant M., Laugier P. and Johnson P. Nonlinear acoustic resonances to probe a threaded interface. Journal of Applied Physics 107, © 2010 American Institute of Physics)

a) 不同激励振幅和不同扭矩的系统响应频谱 b) 线性和非线性弹性参数发展与扭矩关系图

4.3.1.2 复合材料

SHM 中一个重要的领域是监测复合材料结构。近十几年探测复合材料结构中不同类型损伤的不同方法得以发展。其中包括经典的、已确立的 NDT/E 方法, 如振动分析 (Gherlone 等, 2005), 声发射 (AE) (Scholey 等, 2006), X 射线照相术 (Staszewski 等, 2004), 热电和错位散斑干涉法 (Staszewski 等, 2004), 涡流 (Gros, 1995), 振动 (超声) 检测法 (Pieczonka 等, 2011), GW 技术 (Ambrozinski 等, 2012) 与 A 和 C 扫描超声波检测技术 (Cantwell 和 Morton, 1992; Pearson 等, 2011)。基于超声波和超声导波的经典方法使用与波传播有关的线性效应。这些方法适用于与波长相比的大型损伤, 在这种情形下比如反射和散射可以用于损伤探测。近些年来, 人们对探测损伤的非线性方法的兴趣越来越浓厚 (Farrar 等, 2007; Iwaniec, 2011)。目前进行的研究清晰地指出了这些方法更为敏感并且能够在早期探测损伤。

在用于复合材料的损伤探测的非线性方法中, 先前描述的振-声调制方法得到应用。在 Klepka 等 (2012b) 中, 该方法用于检测由低速冲击引起的复合手性面板中的缺陷。

研究进行了一些已知级别的能量冲击。在每次冲击测试后, 复合板受到与已选模型一致的三次不同低频率激励的振-声调制实验。调制强度参数用作损伤指数。通过 Polytec 扫描振动计获得响应信号。图 4.16 是实验装置和不同冲击能量级别的响应信号频谱举例。

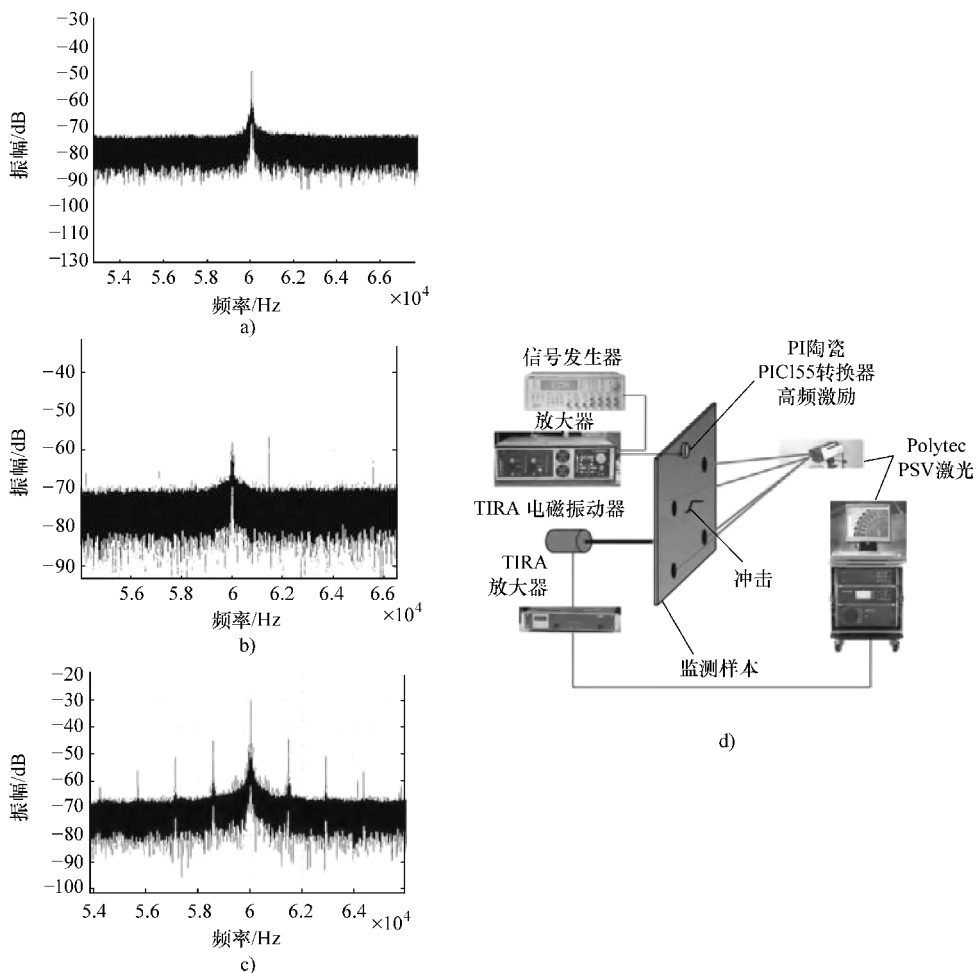


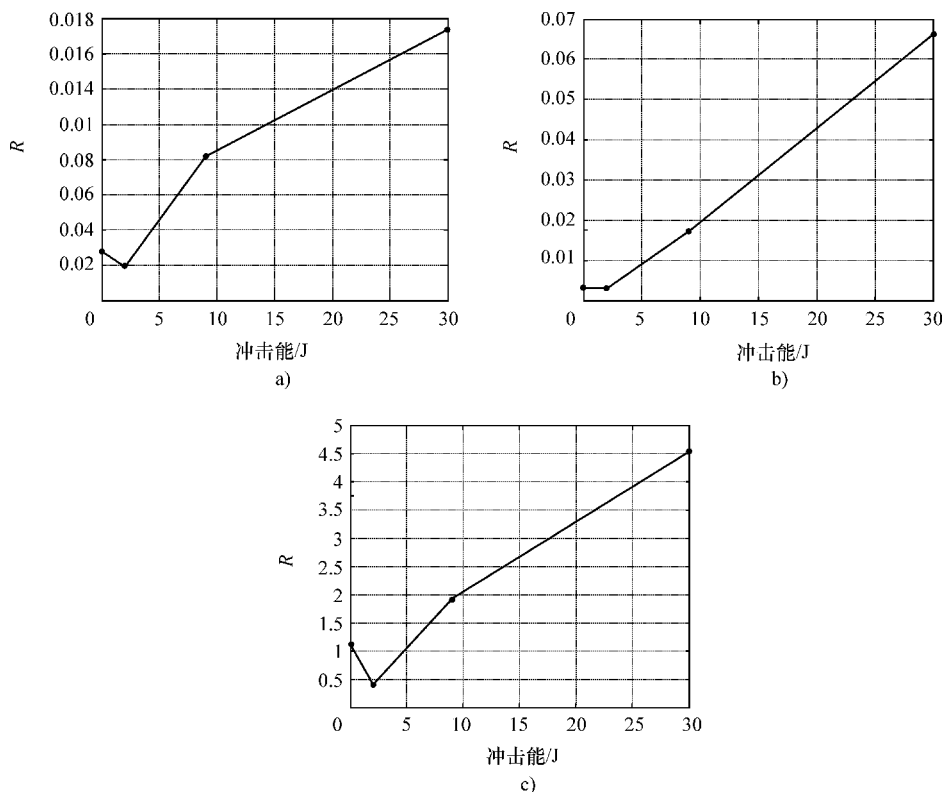
图 4.16 第一级振动模式激励 (1430Hz) 声响应的功率谱

a) 未损伤平板 b) 第一次 9J 冲击后的损伤平板 c) 第二次 30J 冲击后的损伤平板
d) 非线性声学测试的实验步骤

如以上描述, 用载波频率和第一次调制边带分析调制强度。生成参数 R 计算所有的损伤严重度。该结果如图 4.17 所示。虽然受到初始非损伤 2J 冲击后调制强度变小, 但是所有分析模型受到 9J 冲击和特别是 30J 冲击后, 参数 R 显著增加。这表明了当进行非线性声学测试时, 损伤严重度评估是可能实现的。

类似地还有对不用复合材料结果的测试。复合板由碳/环氧树脂 (Seal HS160/REM) 单向预浸料层组成。层压板的叠层顺序为 [03/903]。平均层压板厚度为 2mm。平板在高压釜中固化, 其中最大温度值为 160°C , 最大压力值为 $6\text{bar}^{\ominus}$ 。对

$\ominus$ 1bar = 10^5 Pa。——译者注

图 4.17 调制强度 R 与冲击能量关系图的分析

a) 模型 1 b) 模型 2 c) 模型 3

样本进行超声波 C 扫描, 测试评估层板的质量和排除任何可能出现的制造缺陷。采用仪表式的落锤测试机器来进行冲击测试。这种实验装置与用于手性面板的装置相似。调制参数的强度用以上描述的高频声波和第一次调制边带来计算。同时对损伤和未损伤的平板进行分析。图 4.18 是参数 R 与低频激励的振幅的关系图。

对于低水平的激励, 观测到损伤样本和未损伤样本的调制强度参数值非常小。在激励水平超过 70V 后, 损伤平板的参数 R 显著增加。就作者观点看来, 这可能是因为由低频激励增加引起的损伤动态行为改变。这种现象的一种可能性解释是应力-应变特征从线性到双线性的变化。其使得材料在受压阶段的刚度比在受拉阶段的大, 以至于脉冲式刚度调制和波的变形。这种解释得到了模拟结果的证实。对于已分析的模型, 贡献来自于动态损伤的闭-开作用影响最大, 并且引起刚度特征的改变。图 4.19 是二次和三次谐波的振幅随 467Hz 基谐波振幅变化的曲线。

对于损伤平板 (经典一阶非线性), 人们观察到二次振幅 (斜率近似于 2) 依赖二次谐波, 而对于未损伤样本的振幅值是分散的。三次谐波振幅值分散直到低频振幅激励达到 -70dB。这与 70V 低频激励近似一致, 在这种水平下调制强度开始

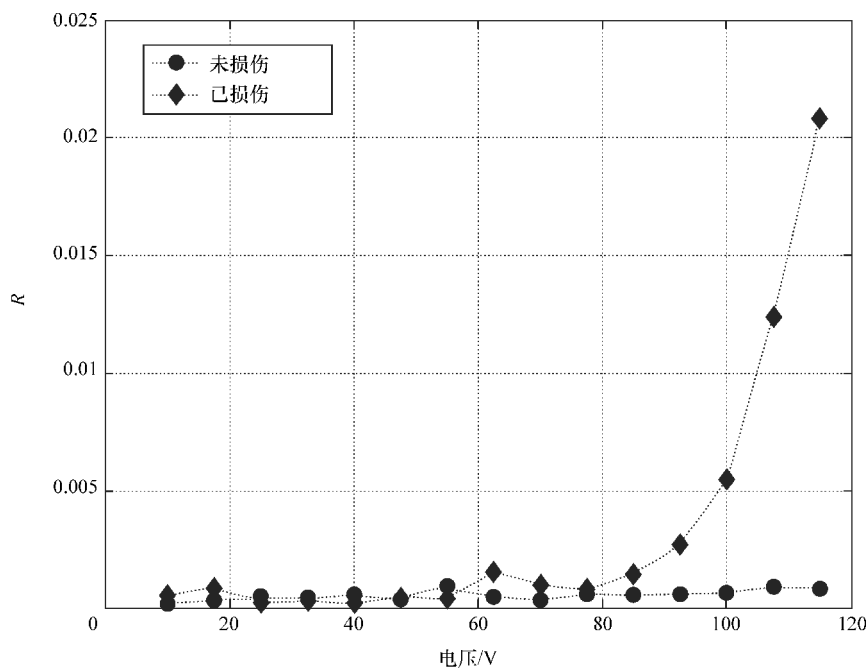


图 4.18 调制强度 R 与激励水平关系的分析

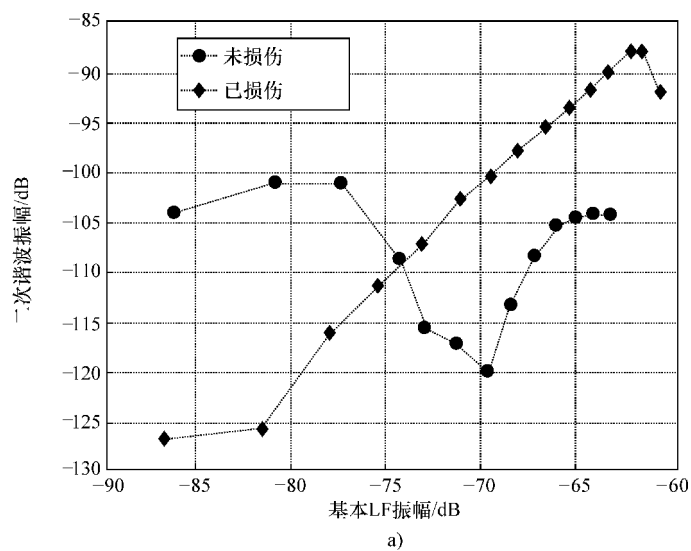


图 4.19 作为基本低频 (LF) 振幅函数的谐波分析

a) 二次谐波

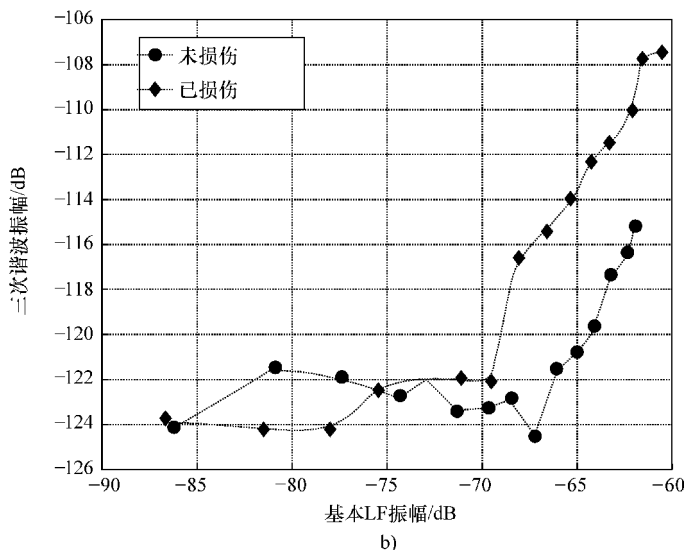


图 4.19 作为基本低频 (LF) 振幅函数的谐波分析 (续)

b) 三次谐波

大幅度增加。这证实了在由损伤引起的非线性机理的调制强度因子分析中提出的理论显示了以上某些激励水平。

通过分析第一对边带的振幅 (见图 4.20), 可以观察到相似的效应。当低频激励水平超过 70V (70dB) 时, 振幅开始大幅度增加。其结果清楚地表明了复合平板中由损伤引起的经典一阶弹性扰动非线性。当达到低频激励的某个水平时这种非线性出现。由此断定, 为了正确地诊断这种结构类型, 很有必要获得足够的应变水平, 从而允许损伤结构的非线性、动态行为的产生。较高谐波和边带的分析结果也与先前获得疲劳损伤研究结果一致。

由机械冲击引起的复合损伤有十分复杂的特性。依赖断裂类型, 不同非线性机理会以分层、裂纹、剥离或者这些类型相结合的形式产生。在 Solodov 等 (2004) 中提出了不同非线性机理。分谐波自调制光谱用来解释损伤结构中观察到的非线性现象。图 4.21a 是分层 C/C-SiC 复合结构信号响应频谱的自调制图。如作者指出的, 由于结构动态变化, 驱动频率增加。输入一组低幅值, 观测到的自调制现象变成一种不同的非线性机理, 该机理导致超低频对 (UFP) 组分的结果。基于与 9.5J 冲击复合的玻璃纤维增强 (GFR) 的 14 层环氧树脂中观测到同样的组分。自调制频谱 (见图 4.21b) 表明了 UFP 组分来源于损伤结构的非线性行为。

在 Solodov 等 (2012) 中提出了基于局部缺陷共振 (LDR) 的方法。该方法的基本假设是损伤引起一定质量的结构的局部刚度变化。这由特定的共振频率表现出来。这种频率是分层深度和其尺寸大小的函数。当结构受到等同于 LDR 频率的激励, 信号响应频谱中较高谐振的水平戏剧性地增加, 而对于激励频率不同的值, 信号响应频谱接近于线性的。这种效应如图 4.22a 和 b 所示。如果驱动频率是分数或

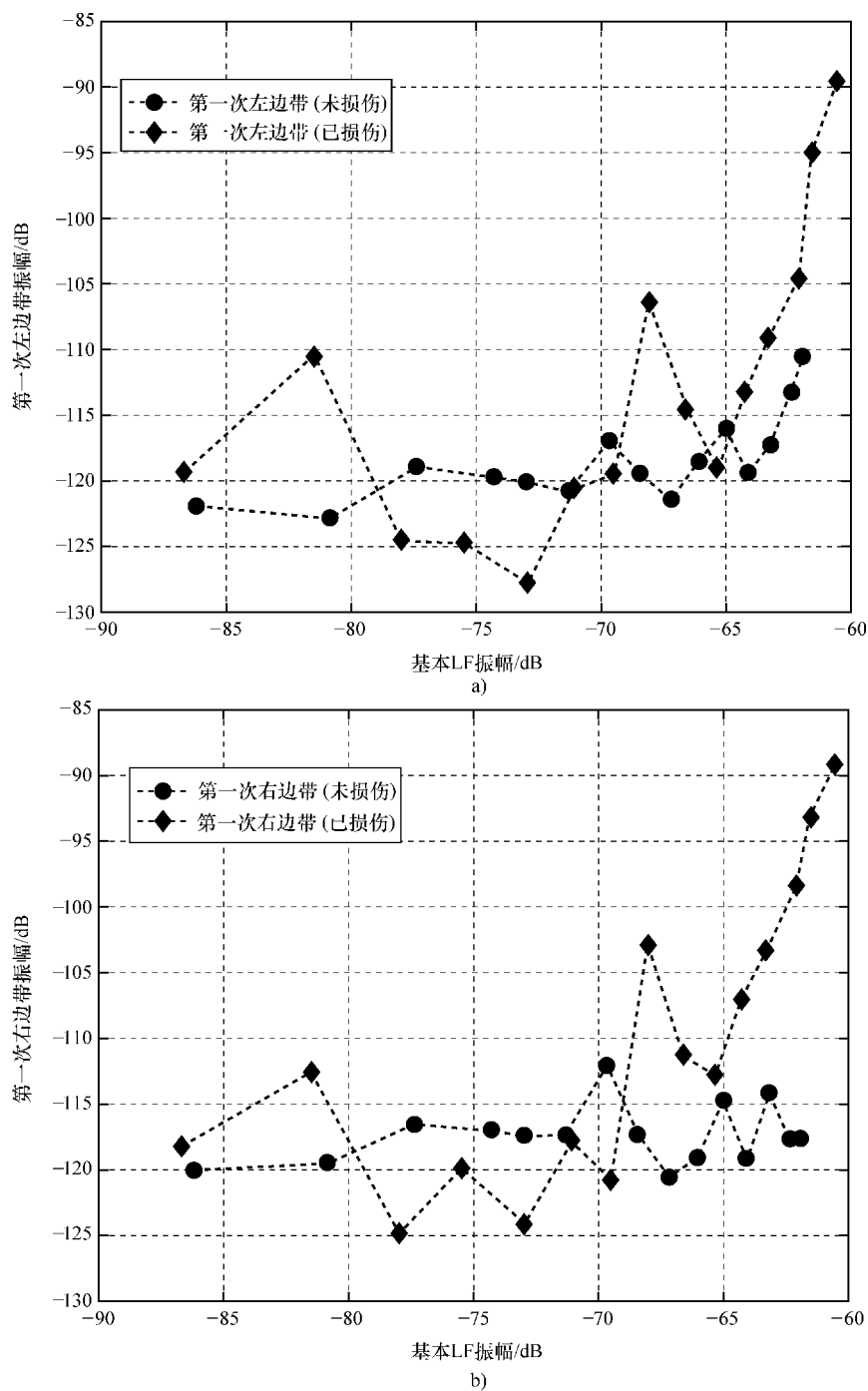


图 4.20 作为基本低频 (LF) 振幅函数的分析

a) 第一次左边带 b) 第一次右边带

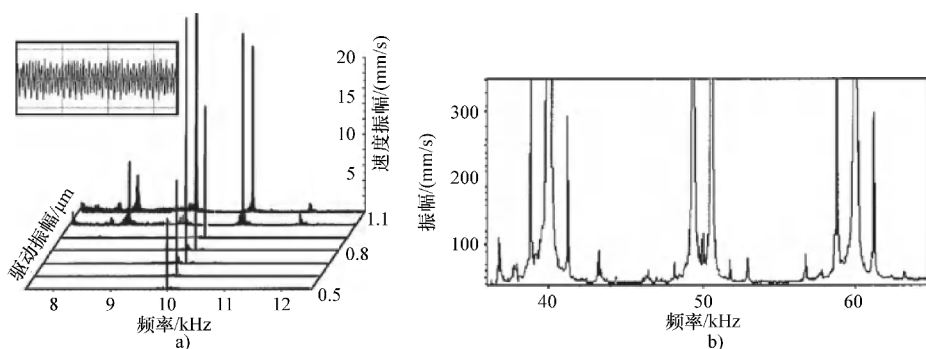


图 4.21 (来源于 Solodov I, Wackerl J, Pfeleiderer K and Busse G. 2004. Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location. Applied Physics Letters 84, 5386–5388, © 2004 American Institute of Physics)

a) 作为 C/C-SiC 复合损伤结构的驱动振幅函数的分谐波和自调制频谱 b) 嵌入 GFR 复合材料的 UFP 频谱

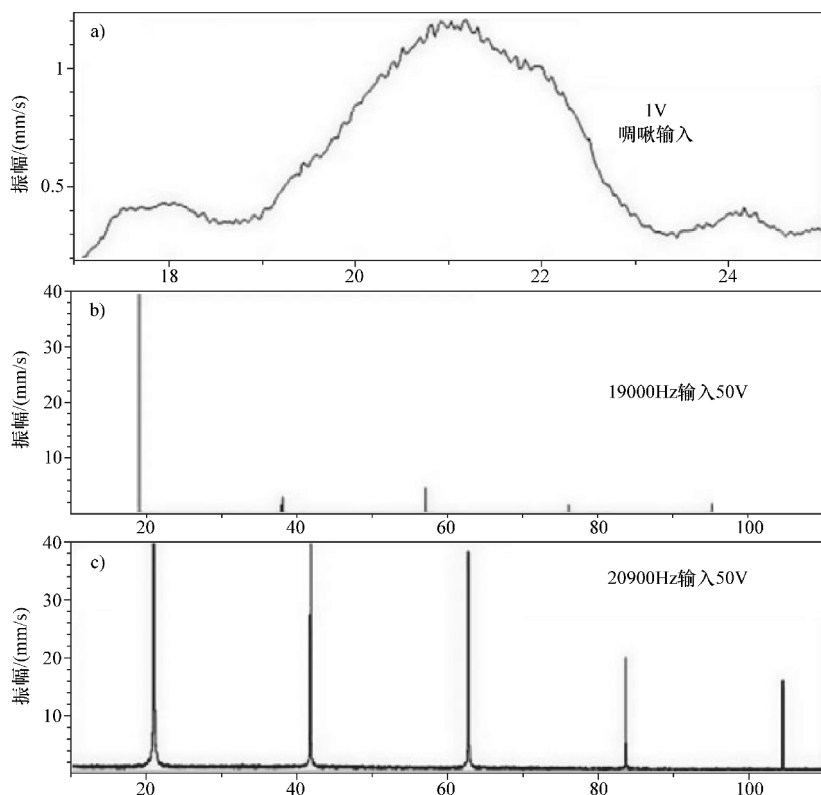


图 4.22 (来源于 Solodov I, Bai J, Bekgulyan S and Busse G. 2012.

A local defect resonance to enhance wave-defect interaction in nonlinear spectroscopy and ultrasonic thermography. 18th World Conference on Nondestructive Testing)

a) 在 GFRP 中作为分层的 LDR 频率响应 b) 在 LDR 边带外作为驱动频率的信号响应频谱
c) 作为等同于 LDR 的驱动频率的信号响应频谱

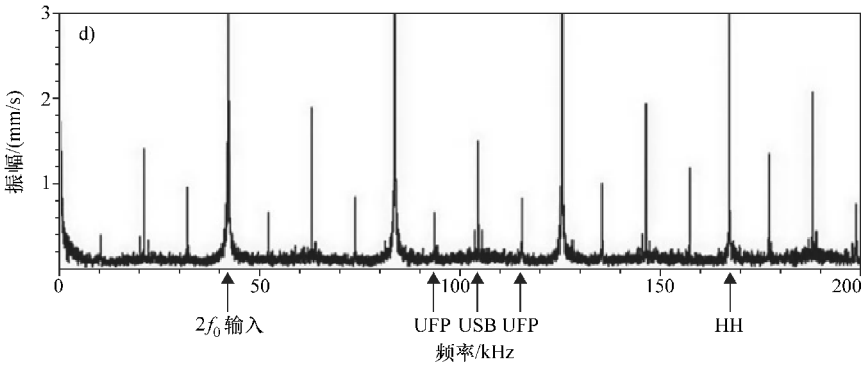


图 4.22 （来源于 Solodov I, Bai J, Bekgulyan S and Busse G. 2012.

A local defect resonance to enhance wave – defect interaction in nonlinear spectroscopy and ultrasonic thermography. 18th World Conference on Nondestructive Testing) (续)

d) 在 GFRP 中作为分层的较高谐波的 USB – UFP 共振

者是 LDR 的整数倍数，进一步非线性机理会出现。然后在信号频谱中能观测到超分谐波（USB）和 UFP。图 4.22c 是 USB – UFP 共振的举例。

4.3.1.3 玻璃和有机玻璃

非线性损伤探测方法也用于不同于固体结构的材料。就无机材料——玻璃而言，无需晶化过程冷却到固体状态。玻璃不是塑性材料：可以弹性变形或者破裂（非常大的杨氏模量，脆性）。此外，玻璃是周期的原子晶格的无定性材料。应用于玻璃的损伤探测的非线性技术是交叉调制技术。在（Zaitsev 等，2006）中泵浦波和探测波用来激励结构。这些波的频率调谐到样本的不同谐振。图 4.23 是实验结果。

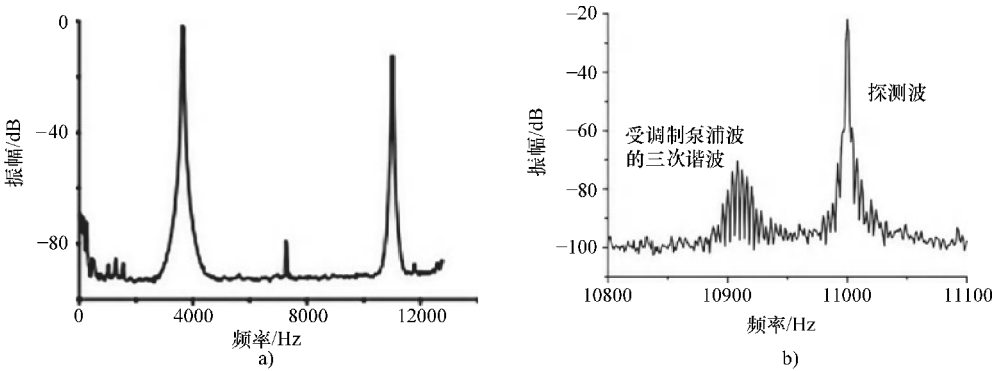


图 4.23 （来源于 Zaitsev V, Nazarov V, Gusev V and Castagnede B. 2006.

Novel nonlinear – modulation acoustic technique for crack detection. NDT&E International 39, 184 – 194. © 2006 Elsevier)

a) 用于激励的泵浦波和探测波的频谱 b) 演示调制转换到泵浦波的三次谐波的频谱

研究表明振幅依赖耗散效应在调制现象中占主导作用。在 Sutin 等 (2003) 中提出了基于非线性时间反转声学的方法。在这种技术中, 经典时间反转声学方法允许超声波集中, 并结合了非线性弹性响应。二次和三次谐波特征 (见图 4.24) 表明了损伤结构中的非经典机理。

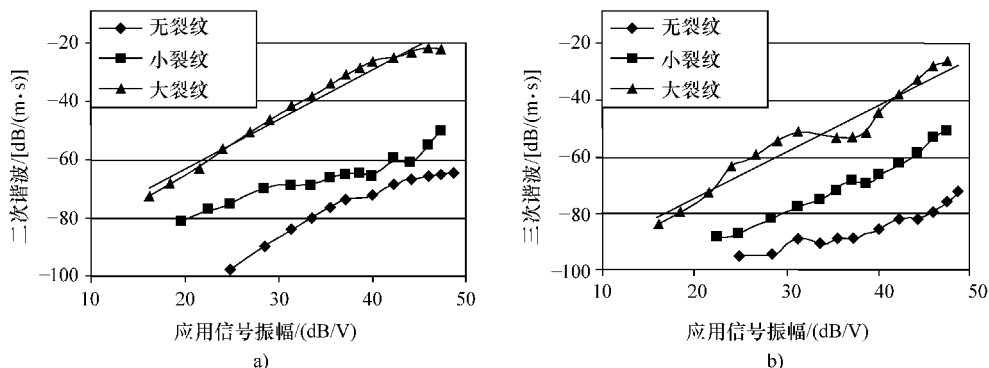


图 4.24 集中于两种不同裂纹的谐波特征 (来源于 Sutin A, Johnson P and TenCate J. 2003).

Development of nonlinear time reversed acoustics (NLTRA) for applications to crack detection in solids. Proceeding of the World Congress of Ultrasonics, p. 121)

a) 二次谐波 b) 三次谐波

4.3.1.4 混凝土, 岩石和岩土材料

非线性声学应用于另一种材料——岩土材料。它们的结构与如流体和固体的均质材料完全不同。这些不同之处是由于机械性能的原因。单晶体结构有“原子弹性”, 而岩土材料有“结构非线性弹性”或“介观弹性”。如滞后和缓慢动态效应的非线性行为是岩土材料的特征。很多研究清楚地证明了当损伤出现时微观非均质材料的非线性行为产生得很快。这允许损伤探测技术应用于陶瓷、微晶材料、岩石和混凝土等材料。非线性弹性在准静态测试中明显地表现出来。图 4.25a 是从沙岩样本中获得的应力-应变特征 (Ostrovsky 和 Johnson, 2001)。

已提出非线性行为的特征包括了非线性应力-应变、滞后和离散记忆效应。同一篇文章还提出了岩石中不同的非线性机理。图 4.25b 是不同类型岩石的频移和基模应变振幅的关系图。频移和应变水平间的关系能确定非线性类型。因此, 依赖有一种幂次定律的形式, 这意味着其为非经典, 并且滞后行为同时存在于静态和动态中。

在 Van Den Abeele 等 (2006) 的文章中, 研究损伤和未损伤的 Balegem 岩石样本用于在冲击模式中非线性波调制光谱 (NWMS)。通过冲击锤和压电式转换器产生高频声波同时激励结构, 图 4.26 是该结果。计算边带的能量来作为损伤指数。

Van Den Abeele 等 (2000b) 研究了另一种把非线性声学应用于岩土材料的方法。在这篇文章中, 非线性谐振声学光谱 (NRUS) 方法应用于有疲劳损伤的石板

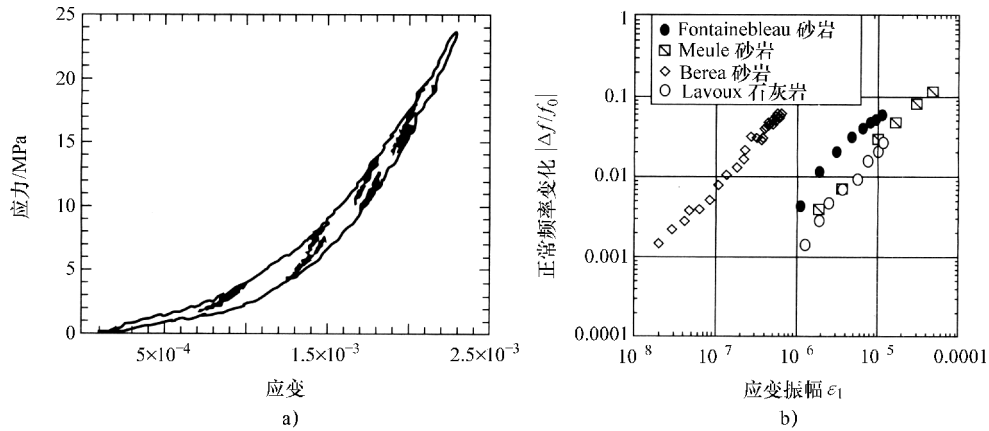


图 4.25 (来源于 Ostrovsky L and Johnson P. 2001. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. Rivista Del Nuovo Cimento)

a) 沙石的应力 - 应变实验特征 b) 标准频率偏移与不同类型岩石的应变关系图

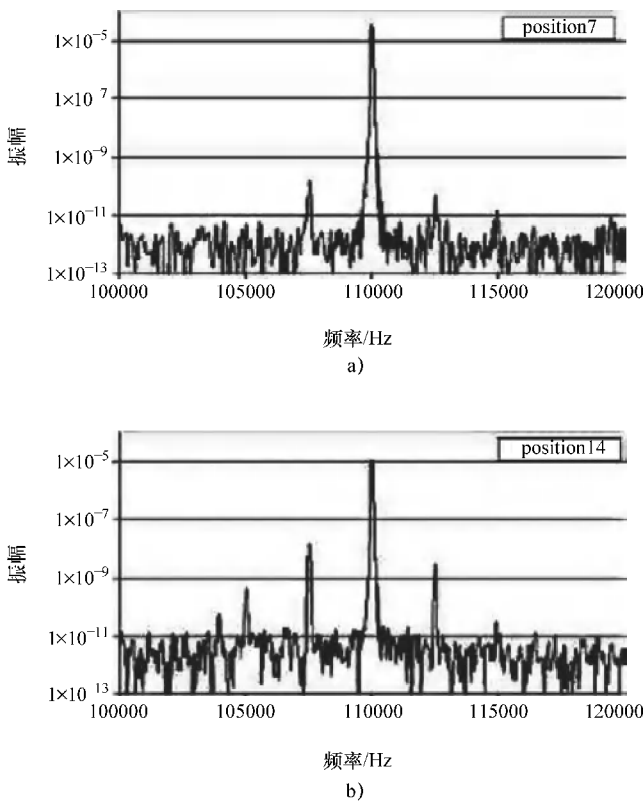


图 4.26 样本的信号响应调制频谱 (来源于 Van Den Abeele K, Katkowski T, Wilkie - Chancellor N and Desadeleer W. 2006. Universality of Nonclassical Nonlinearity. Applications to Non - Destructive Evaluations and Ultrasonics. © 2006 Springer)

a) 完整样本 b) 损伤样本

梁的损伤探测。图 4.27 是完整样本和损伤样本的实验结果。

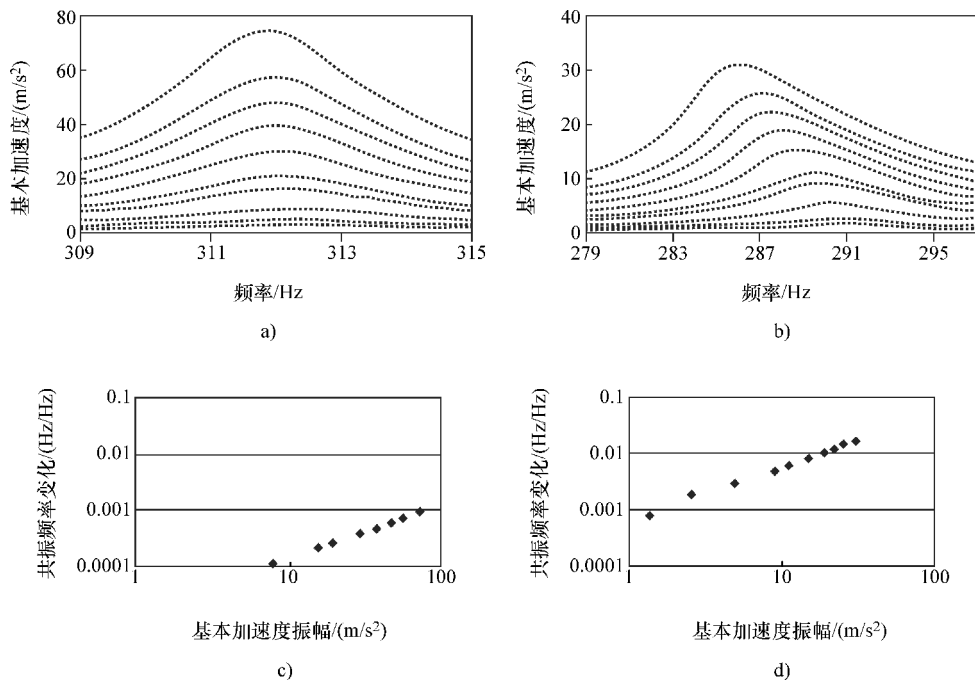


图 4.27 完整 (a) 和损伤 (b) 样本的信号响应声谱。完整 (c) 和损伤 (d) 样本的共振频率中的频移 (来源于 Van Den Abeele K, Carmeliet J, TenCate J and Johnson P. 2000b. Nonlinear elastic wave spectroscopy (news) techniques to discern material damage, Part II: Single - mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy. Research in Nondestructive Evaluation 12, 31 - 42. © 2000 Springer)

这些是结构滞后介观非线性的典型特征。对于损伤结构, 可以清楚看到软化效应连同非经典振幅依赖行为。对高次谐波和衰减系数的分析证实了对于这种类型的材料, 滞后非线性完全主导经典原子非线性。

4.4 结论

所提出的非线性现象和效应以及损伤探测方法应用没有彻底探讨与非线性声学有关的主要问题。很多提出的能引起结构非线性行为的机理都是理论模型。其中的一些机理在分析和实验中同时得到证实, 而其他的仍然处于研究之中。在非线性声学技术中最大的问题是很多机理能同时出现并且可以用相似方法来证实。在很多情况下, 这会使对结果的解释说明变得复杂。研究清楚地表明了非线性方法比线性方法更敏感。非线性技术还允许对基于损伤产生的非线性现象的损伤动态行为的精确分析。这使 SHM 和材料特性表达成为可能。本章提出的实验表明了这些方法能应用于不用类型的结构, 包括均质和非均质类型。近些年, 已证实越来越多的非线性

声学方法是可适用的。尽管有困难，但是对这些方法的研究会持续下去，并能提供越来越有前景的结果。

参考文献

- Ambrozinski L, Stepinski T, Packo P and Uhl T 2012 Self-focusing Lamb waves based on the decomposition of the time-reversal operator using time-frequency representation. *Mechanical Systems and Signal Processing* **27**, 337–349.
- Awrejcewicz J and Olejnik P 2005 Analysis of dynamic systems with various friction laws. *Applied Mechanics Reviews* **58**, 389–411.
- Aymerich F and Staszewski W 2010a Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique. *Structural Health Monitoring* **9**, 541–553.
- Aymerich F and Staszewski W 2010b Impact damage detection in composite laminates using nonlinear acoustics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* **41**, 1084–1092.
- Ballada E, Vezirova S, Pfeleiderer K, Solodov and Busse G 2004 Nonlinear modulation technique for NDE with air-coupled ultrasound. *Ultrasonics* **42**, 1031–1036.
- Bateman T, Mason W and McSkimin H 1961 Third-order elastic moduli of germanium. *Journal of Applied Physics* **5**, 928–936.
- Belyaeva I, Ostrovsky L and Zaitsev V 1997 Microstructure induced nonlinearity of unconsolidated rocks as related to seismic diagnostics problems. *Nonlinear Processes in Geophysics* **4**, 410.
- Bentahar M, Marec A, El Guerjouma R and Thomas J 2009 Nonlinear acoustic fast and slow dynamics of damaged composite materials: correlation with acoustic emission. *Ultrasonics Wave Propagation in Non Homogeneous Media* **128**, 161–171.
- Boller C, Chang FK and Fujino Y (eds) 2009 *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Breazeale M and Ford F 1965 Ultrasonic studies of the nonlinear behaviour of solids. *Journal of Applied Physics* **36**, 3486–3490.
- Bruneau M and Potel C 2009 *Materials and Acoustics Handbook*. Wiley-ISTE.
- Buck O 1990 Nonlinear acoustic properties of structural materials – a review. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* **9**, 1677.
- Buck O and Morris W 1978 Acoustic harmonic generation at unbonded interfaces and fatigue cracks. *The Journal of the Acoustical Society of America* **64**, S33.
- Cantrell JH and Yost WT 1994 Acoustic harmonic generation from fatigue-induced dislocation dipoles. *Philosophical Magazine A* **69**, 315–326.
- Cantwell WJ and Morton J 1992 The significance of damage and defects and their detection in composite materials: A review. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* **27**, 29–42.
- Donskoy D, Sutin A and Ekimov A 2001 Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing. *NDT&E International* **34**, 231–238.
- Duffour P, Morbidini M and Cawley P 2006 A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. *Journal of the Acoustical Society of America* **119**, 1463–1475.
- Farrar CR, Worden K, Todd MD, Park G, Nichols J, Adams DE, Bement MT and Farinholt K 2007 *Nonlinear System Identification for Damage Detection*. National Nuclear Security Administration.
- Friswell M and Penny J 2002 Crack modeling for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring* **1**, 139.
- Gherlone M, Mattone M, Surace C, Tassotti A and Tessler A 2005 Novel vibration-based methods for detecting delamination damage in composite plate and shell laminates. *Key Engineering Materials* **293–294**, 289–296.
- Gros XE 1995 An eddy current approach to the detection of damage caused by low-energy impacts on carbon fibre reinforced materials. *Materials & Design* **16**, 167–173.
- Guyot R, McCall K and Van Den Abeele K 1998 Slow elastic dynamics in a resonant bar of rock. *Geophysical Research Letters* **25**, 1585–1588.
- Haller K and Hedberg C 2006 Frequency sweep rate and amplitude influence on nonlinear acoustic measurements. *The 9th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC)*. Seoul, Korea. [http://www.bth.se/fou/forskinfo.nsf/all/e0a64b8c0e80a449c1257295002ed3ea/\\$file/HallerWespac2006.pdf](http://www.bth.se/fou/forskinfo.nsf/all/e0a64b8c0e80a449c1257295002ed3ea/$file/HallerWespac2006.pdf) (last accessed 8 January 2013).
- Haron M and Adams DE 2008 Implementation of nonlinear acoustic techniques for crack detection in a slender beam specimen. *Proceedings of the SPIE, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008* (ed. Kundu T), vol. 6935, pp. 69350P–69350P–12.

- Hu HF, Staszewski WJ, Hu NQ, Jenal RB and Qin GJ 2010 Crack detection using nonlinear acoustics and piezoceramic transducers instantaneous amplitude and frequency analysis. *Smart Materials and Structures* **19**, 065017.
- Iwaniec J 2011 *Selected Issues of Exploitation Identification of Nonlinear Systems*. AGH University of Science and Technology.
- Jhang K and Kim K 1999 Evaluation of material degradation using nonlinear acoustic effect. *Ultrasonics* **37**, 39–44.
- Kessler S, Spearing S and Soutis C 2002 Damage detection in composite materials using Lamb wave methods. *Smart Materials and Structures* **11**, 269–278.
- Kim J, Yakovlev V and Rokhlin S 2003 Parametric modulation mechanism of surface acoustic wave on a partially closed crack. *Applied Physics Letters* **82**, 3203.
- Kim JY and Rokhlin S 2002 Surface acoustic wave measurements of small fatigue cracks initiated from a surface cavity. *International Journal of Solids and Structures* **39**, 1487.
- Klepka A, Jenal RB, Szewdo M, Staszewski WJ and Uhl T 2010 Experimental analysis of vibro-acoustic modulations in nonlinear acoustics used for fatigue crack detection. *Proceedings of the Fifth European Workshop Structural Health Monitoring*. DEStech Publications, pp. 541–546.
- Klepka A., Staszewski WJ, Jenal R, Szewdo, M., Uhl T and Iwaniec J 2012a Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations. *Structural Health Monitoring* **25**, 197–211.
- Klepka A, Staszewski WJ, Uhl T and Aymerich F 2012b Sensor location analysis for nonlinear-acoustics-based damage detection in composite structures. *Proceedings of Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2012*, 8348.
- Kolomenskii AA, Lioubimov VA, Jerebtsov SN and Schuessler HA 2003 Nonlinear surface acoustic wave pulses in solids: Laser excitation, propagation, interactions. *Review of Scientific Instruments* **74**, 448–452.
- Kundu T 2003 *Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Engineering and Biological Material Characterization*. CRC Press.
- Landau L and Lifshitz E 1986 *Theory of Elasticity* (translated from the Russian by J. B. Sykes and W. H. Reid). Pergamon Press.
- Meo M, Polimeno U and Zumpano M 2008 Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods. *Applied Composite Materials* **1**, 115.
- Meo M and Zumpano M 2005 Nonlinear elastic wave spectroscopy, identification of impact damage on a sandwich plate. *Computers & Structures* **71**, 469–474.
- Morris W, Buck O and Inman R 1979 Acoustic harmonic generation due to fatigue damage in high-strength aluminum. *Journal of Applied Physics* **50**, 6737.
- Moussatov A, Gusev V and Castagnede B 2003 Self-induced hysteresis for nonlinear acoustic waves in cracked material. *Physical Review Letters* **90**, 124301.
- Muller M, Sutin A, Guyer R, Maryline M, Talmant P, Laugier and Johnson P 2005 Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy (NRUS) applied to damage assessment in bone. *The Journal of the Acoustical Society of America* **118**, 3946–3952.
- Nagy PB 1994 Excess nonlinearity in materials containing microcracks. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* **13**, 1987–1994.
- Nagy PB 1998 Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic material characterization. *Ultrasonics* **36**, 375–381.
- Nazarov V, Radostin A and Soustova I 2002 Effect of an intense sound wave on the acoustic properties of a sandstone bar resonator. *Acoustical Physics* **48**, 76.
- Nazarov VE 1988 Nonlinear acoustics of micro-inhomogeneous media. *Nonlinear Acoustics of Micro-inhomogeneous Media* **50**, 65.
- Ostrovsky L and Johnson P 2001 Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *Rivista Del Nuovo Cimento*. **24**, 1–46.
- Pearson MR, Eaton MJ, Featherston CA, Holford KM and Pullin R 2011 Impact damage detection and assessment in composite panels using macro fibre composites transducers. *Journal of Physics: Conference Series, 9th International Conference on Damage Assessment of Structures* **305**, doi:10.1088/1742-6596/305/1/012049.
- Pecorari C 2004 Adhesion and nonlinear scattering by rough surfaces in contact: Beyond the phenomenology of the Preisach–Mayergoyz framework. *The Journal of the Acoustical Society of America* **116**, 1938.
- Pecorari C and Solodov I 2006 *Non-classical Nonlinear Dynamics of Solid Interfaces in Partial Contact for NDE Applications*. Springer, pp. 307–324.

- Pieczonka L, Staszewski W, Aymerich, F, Uhl T and Szewco M 2011 Numerical simulations for impact damage detection in composites using vibrothermography. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **10**, Article 012062.
- Raghvan A CCES 2007 Review of guided-wave structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest* **39**, 91–114.
- Riviere, J, Renaud G, Hauptert S, Talmant M, Laugier P and Johnson P 2010 Nonlinear acoustic resonances to probe a threaded interface. *Journal of Applied Physics* **107**, doi:10.1063/1.3443578.
- Rizzo P, Cammarata M, Dutta D and Sohn H 2009 An unsupervised learning algorithm for fatigue crack detection in waveguides. *Smart Materials and Structures* **18**, 025016.
- Scholey JJ, Wilcox, P. D, Lee CK, Friswell MI and Wisnom MR 2006 Acoustic emission in wide composite specimens. *Advanced Materials Research* **13-14**, 325–332.
- Solodov I 1998 Ultrasonics of nonlinear contacts: Propagation, reflection and NDE-applications. *Ultrasonics* **36**, 383.
- Solodov I 2010 Nonlinear acoustic NDT: Approaches, methods, and applications. http://www.ndt.net/article/Prague2009/ndtip/proceedings/Solodov_10.pdf (last accessed 8 January 2013).
- Solodov I, Bai J, Bekgulyan S and Busse G 2012 A local defect resonance to enhance wave-defect interaction in nonlinear spectroscopy and ultrasonic thermography. *18th World Conference on Nondestructive Testing*. Durban, South Africa. http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/34_Solodov.pdf (last accessed 8 January 2013).
- Solodov I, Wackerl J, Pfeleiderer K and Busse G 2004 Nonlinear self-modulation and subharmonic acoustic spectroscopy for damage detection and location. *Applied Physics Letters* **84**, 5386–5388.
- Staszewski W 2004 *Structural Health Monitoring Using Guided Ultrasonic Waves*. Springer.
- Staszewski W and Parsons Z 2006 Nonlinear acoustics with low-profile piezoceramic excitation for crack detection in metallic structures. *Smart Materials and Structures* **15**, 1110–1118.
- Staszewski WJ, Boller C and Tomlinson GR (eds) 2004 *Health Monitoring of Aerospace Structures*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Sutin A, Johnson P and TenCate J 2003 Development of nonlinear time reversed acoustics (NLTRA) for applications to crack detection in solids. *Proceedings of the Word Congress of Ultrasonics*. Paris, France. http://ees.lanl.gov/source/orgs/ees/ees11/geophysics/nonlinear/2003/NLTRA_wcu.pdf (last accessed 8 January 2013).
- Van Den Abeele K, Campos-Pozuelo C, Gallego-Juarez J, Windels, F and Bollen B 2002 Analysis of the nonlinear reverberation of titanium alloys fatigued at high amplitude ultrasonic vibration. *Proceedings of Forum Acustica* <http://digital.csic.es/bitstream/10261/7959/1/non02002.pdf> (last accessed 8 January 2013).
- Van Den Abeele K, Johnson P and Sutin A 2000a Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) technique to discern material damage. Part I: Nonlinear wave modulation spectroscopy. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* **12**, 17–30.
- Van Den Abeele K, Johnson P and Sutin A 2000b Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) technique to discern material damage. Part II: Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation* **12**, 31–42.
- Van Den Abeele K, Katkowski T, Wilkie-Chancellor N and Desadeleer W 2006 Laboratory experiments using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS): a precursor to health monitoring applications in aeronautics, cultural heritage, and civil engineering. In *Universality of Nonclassical Nonlinearity. Applications to Non-Destructive Evaluations and Ultrasonics* (ed. Delsanto PP). Springer, pp. 389–409.
- Wilcox PD, Konstantinidis G, Croxford AJ and Drinkwater BW 2007 Strategies for guided wave structural health monitoring. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* (eds Thompson DO and Chimenti DE), vol. 894 of American Institute of Physics Conference Series. American Institute of Physics, pp. 1469–1476.
- Woolfries S 1998 The effects of friction between crack faces on nonlinear wave propagation in microcracked media. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **46**, 621.
- Zaitsev V, Gusev V and Castagnede B 2002a Luxembourg-Gorky effect retooled for elastic waves: a mechanism and experimental evidence. *Physical Review Letters* **89**, 105502.
- Zaitsev V, Gusev V and Castagnede B 2002b Observation of the “Luxemburg-Gorky effect” for elastic waves.. *Ultrasonics* **40**, 627–631.
- Zaitsev V, Nazarov V, Gusev V and Castagnede B 2006 Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection. *NDT & E International* **39**, 184–194.
- Zaitsev V and Sas P 2000 Dissipation in microinhomogeneous solids: Inherent amplitude-dependent losses of a non-hysteretical and non-frictional type. *Acta Acustica united with Acustica* **86**, 429.

第 5 章 导波压电复合材料传感器

5.1 引言

超声导波 (GW) 是一种弹性波, 可以在结构中传播, 并受结构几何形状的限制与引导。在传播过程中, 导波作用于结构的不连续性, 会产生能被专用传感器探测到的反射波。导波的性质是非常复杂的, 但考虑其优势, 如长距离传播几乎没有衰减, 对于不同类型的结构破坏具有选择性灵敏度, 因此导波在结构健康监测 (SHM) 的应用中是非常重要的。Raghavan 和 Cesnik (2007) 回顾了导波在 SHM 系统中的应用。

SHM 中使用的传感器应该体积小、重量轻, 以便于集成到被测结构中, 同时保证对被测物的特性无明显影响。此外, 为了使系统经济合理, 每个传感器应覆盖监控结构的一大片区域, 同时其成本要低。

本章所涉及的压电传感器能够在 SHM 系统中产生和探测表面波和兰姆波。在平面结构, 使用不同类型的传感器可以激发兰姆波, 例如超声波束角传感器 (Boonsang 等, 2006)、电磁声传感器 (EMAT) (Boonsang 等, 2006; Dutton 等, 2006; Murayama 和 Mizutani, 2002) 和激光超声系统 (Cosenza 等, 2007; Silva 等, 2003; Staszewski 等, 2004)。这些传感器中的大多数既可以作为传感器, 也可以作为执行器, 但其中很多不符合 SHM 系统的需求, 因为它们比较笨重 (如束角传感器)、脆化 (压电晶片)、产生能量波较低 (例如, 电容式微机械超声波传感器 (CMUT) 和 EMAT 探头)。

锆钛酸铅 (PZT) 陶瓷材料制成的压电传感器符合许多 SHM 的需求。这些传感器价格不高, 大小与被监测结构的大小相比, 相对较小。最合适 SHM 系统的传感器应该薄、易弯曲, 且能够产生信号强度强、高度方向性的兰姆波。从易弯曲的角度看, 可以区分两种类型的压电传感器: 易弯曲的带有均匀电极的压电陶瓷片 (PC) 和易弯曲的复合材料制成的压电片, 即活性纤维复合材料 (AFC) (Bent 和 Hagood, 1997; Birchmeier 等, 2009; Brunner 等, 2005; Gentilman 等, 2003) 和宏观纤维复合材料 (MFC) (High 和 Wilkie, 2003; Howard 和 di Scalea, 2007; Salas 和 Cesnik, 2008, 2009; Williams 等, 2002)。

活性纤维复合材料 (AFC) 和宏观纤维复合材料 (MFC) 一般优化为执行器, 提供密集、梳状电极。然而, 与交叉指型传感器 (IDT) (Jin 等, 2005; Mamishev 等, 2004) 相似, 稀疏的梳状电极创造的性能与模式的选择性有关。Monkhouse 等

(1997, 2000) 对交叉指型传感器在 SHM 应用中产生兰姆波的可行性进行了研究。作者用压电材料 PVDF (聚偏氟乙烯) 制造和研究 IDT 在 SHM 应用中具有不同的拓扑结构。PVDF 是可弯曲的、便宜的材料, 但是与 PZT 陶瓷制品相比, 其压电效应较弱。此外, PVDF 不能用在高温下, 这种缺点可能会妨碍其在某些结构中使用。

本章首先简要介绍了压电传感器, 然后研究了三种不同的由 MFC 的基片组成的传感器。其中两种是市售的具有密集电极的 MFC 执行器, 第三种是专门设计的双面稀疏电极的 IDT。首先利用数值模拟计算这三种传感器的光束模式, 然后使用激光测振仪测量, 与仿真结果进行对比。同时还使用形成导波的时间和频率分析研究了模式的选择性。最后, 对具有最佳的方向性和模式选择性的传感器进行数值模拟和实验测试, 其目的是确定其方向和频率的灵敏度接近兰姆波。

5.2 导波压电传感器

5.2.1 压电元件

尽管 PZT 陶瓷制成的压电元件有缺点, 但是仍常在 SHM 应用中用来产生和感应兰姆波 (Badcock 和 Birt, 2000; Diamanti 等, 2002; Dimitriadis 等, 1991; Klepka 和 Ambrozinski, 2010; Schulz 等, 1999)。用于产生兰姆波的典型的 PZT 传感器封装成压电元件, 埋入监测的结构中。它们一般可以作为一个小型盘片产生相对高幅度的定向波。频率、模态的选择性和波传播的主要方向与激励频率、传感器形状是密切相关的 (Collet 等, 2011), 多个传感器可以形成超声波相控阵, 以实现所产生波的方向性 (Ochonski 等, 2010), 但超声波相控阵需要相当复杂的电子器件进行信号的产生和接收。PZT 传感器在 SHM 中有严重的缺点: 脆弱性和有限的生命周期, 使得它们非常容易受到损坏。

5.2.2 基于压电复合材料的传感器

5.1 节中提到过, 已开发出两种类型的适合做传感器的柔性压电复合材料: AFC 和 MFC。麻省理工学院的 Bent 和 Hagood (1997) 已经开发了 AFC。AFC 传感器的结构由三个主要层组成, 嵌入环氧树脂基体的单一的压电陶瓷纤维层, 夹在两套密集的交叉指型电极 (IDE) 中 (Brunner 等, 2005), 如图 5.1a 所示。通过注射成型生产的压电陶瓷纤维 PZT 粉末, 混合加热能实现黏度的蜡黏合剂, 然后在高压下注入到一个冷却的模具可生产出压电陶瓷纤维 (Gentilman 等, 2003)。放置在纤维表面的顶部和底部的致密的梳状电极可以产生定向波, 环氧层使这些传感器有柔性 (Birchmeier 等, 2009)。

复合传感器中的 MFC 传感器是由 NASA 发明的 (Williams 等, 2002)。除了纤

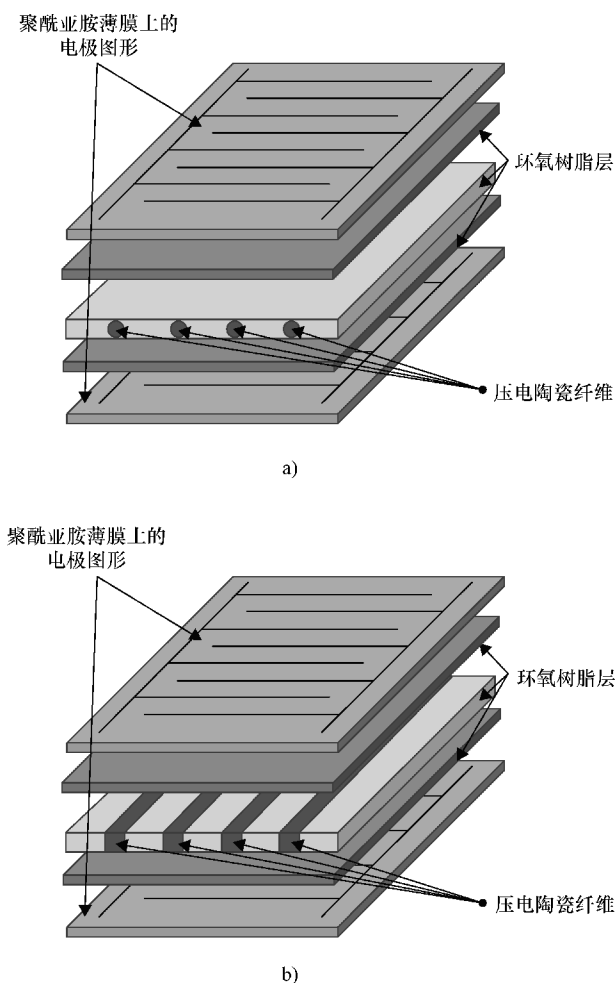


图 5.1 压电复合材料传感器的结构

a) AFC b) MFC

纤维的形状不同，MFC 的结构与 AFC 类似，如图 5.1b 所示。AFC 的纤维是圆形的，而 MFC 的纤维是矩形的。MFC 传感器中的压电纤维是从压电陶瓷切成小方块的晶片 (High 和 Wilkie, 2003)，这使得 MFC 具有成本效益。MFC 中的电极模式根据产生波的压电效应的类型和 (或) 传感器的形状而变化。

图 5.2 所示为 MFC 传感器的两种主要类型 (Collet 等, 2011)。第一种类型如图 5.2a 所示，利用在压电纤维的纤维厚度上施加电压的 d_{31} 效应；第二种类型，利用在沿纤维长度上施加电压的 d_{33} 效应 (见图 5.2b)。与 AFC 相似，MFC 传感器产生定向导波，同时压电复合材料的使用，使得传感器更具柔性。

复合压电传感器可以被制造成不同形状和大小，但最常见的是矩形。关于

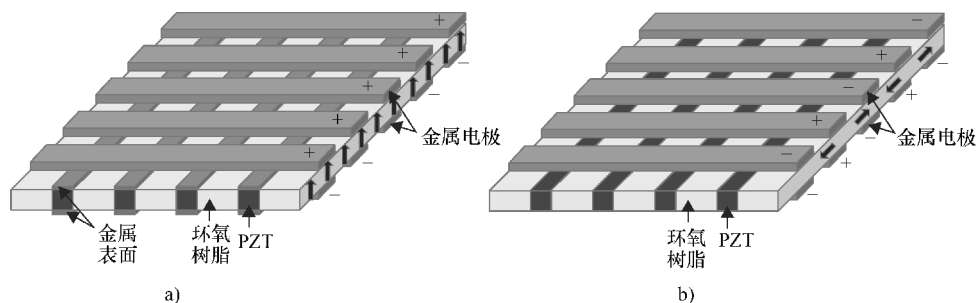


图 5.2 MFC 类型的实例
a) d31 效应 b) d33 效应

MFC 传感器的性能，相关学者已进行了许多研究，其中 Howard 和 di Scalea (2007) 的研究比较有趣。在他们的文章中，作者研究了矩形 MFC 传感器的定向性能。该研究的一个成果是设计的三叶草形 MFC 传感器（见图 5.3a），这种传感器不仅能够通过测量导波的飞行时间（TOF），而且能够通过探测接近波的方向，来探测结构的损伤。

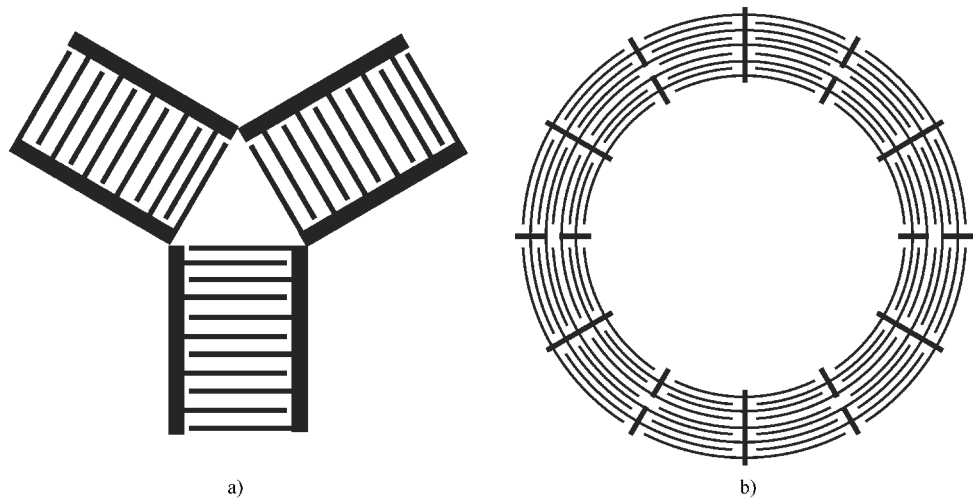


图 5.3 MFC 类型的实例
a) 三叶草形 b) 花环形

Salas 和 Cesnik (2008, 2009) 提出了一种传感器的拓扑结构，这个结构对导波到达方位角比较敏感。作者开发了一种新型结构的 MFC 结构（见图 5.3b），其中圆形的 MFC 传感器被划分为多个扇区，这些扇区可用于探测波的方向和/或产生的定向波。

然而应当指出，花环形和三叶草形这两种类型的传感器，可提供密集的、比产

生的导波的波长小的指间距梳状电极。

5.2.3 交叉指型传感器

5.2.3.1 IDT 的结构

前面介绍的传感器不适合所有的频率。与之相反,交叉指型传感器可被设计成激发特定波长的模式。通过调整梳状电极的指间距,可在被测板中产生特定的波长,传感器成为了一种选择性的带通滤波器。交叉指型传感器的起源可以追溯到表面声波(SAW)器件(Jin 等, 2005)。然而,其在 SHM 应用中的工作频率通常低于 1MHz,而 SAW 器件工作在几十兆赫到几千兆赫的频率范围内。

典型的 IDT 设计如图 5.4 所示。IDT 包括三个层次:两个电极层和一个压电层。两个电极层由压电层分离开。压电层也可以由压电聚合物(即聚偏氟乙烯; Bellan 等, 2005; Capineri 等, 2002; Monkhouse 等, 1997, 2000; Wilcox 等, 1998)、压电陶瓷(Luginbuhl 等, 1997)或压电陶瓷复合材料(Hayward 等, 2001; Manka 等, 2010, 2011; Williams 等, 2002)制成。压电层的属性确定了传感器的性能,如弹性、最大能量和所生成波的频率。

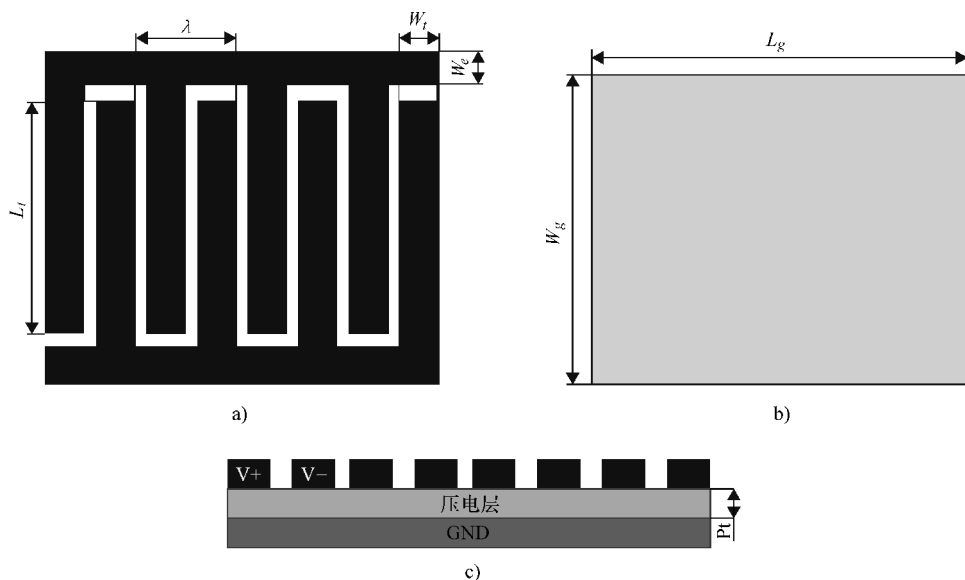


图 5.4 单面 IDT 的结构

a) 顶部电极 b) 底部电极 c) 截面

交叉指型传感器最显著的特点是梳状指型电极模式。在 IDT 中相位电极(手指分离)之间的距离决定了由传感器产生的兰姆波的标称波长(Monkhouse 等, 1997, 2000)。与 AFC 和 MFC 传感器相似,交叉指型传感器产生垂直于指状电极方

向的双向波 (Na 和 Blackshire, 2010; Na 等, 2008)。该波的发散角 (主瓣宽度) 取决于手指的数量和长度。

传统的单面 (IDT-SS) 和双面 (IDT-DS) 这两种主要类型的交叉指型传感器, 可依据电极模式的不同进行区分 (Jin 等, 2005)。典型的 IDT-SS 如图 5.4 所示, 它只在压电层的一侧有梳状电极 (见图 5.4a)。基片的另一侧覆盖着接地极板电极 (见图 5.4b)。需要三根导线连接电信号和电极 (梳状电极的两个相反相位和接地), 这表示反对称信号源的相位信号是必需的。

图 5.5 所示 IDT-DS 的两端覆盖着交叉指型电极。为了简化布线, 顶部电极和底部电极成对连接, 以便彼此相反的相位电极相互放置。这样的设计只需要两个电线, 而且不需要反对称信号源。与 IDT-DS 相比, IDT-SS 还有一个优点: 由双面版本产生的导波的振幅高于单面所产生的 (Jin 等, 2005)。

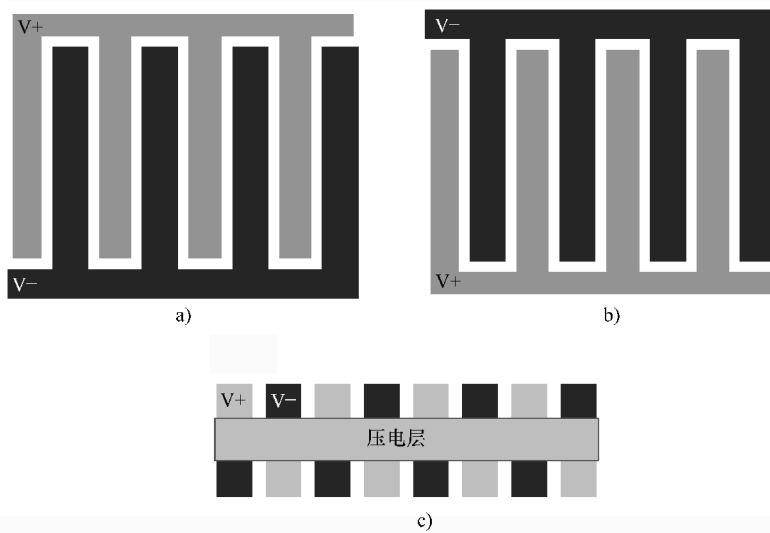


图 5.5 双面 IDT 的结构

a) 顶部电极 b) 底部电极 c) 截面

5.2.3.2 交叉指型传感器的结构修改

以上所述的两种 IDT 类型可能需要进一步地修改, 以实现一些所需的性能。这里介绍两种类型的修改, 第一种修改的目的是改善传感器的频率特性, 第二种修改的目的是实现产生单向的导波。

1. 提高传感器的频率性能

值得注意的是, SAW IDT 的基本功能是它能够模拟信号延迟。如果将两组电极放置在压电基板上, 其中一个用于输入信号, 而另一个用于接收传播的 SAW, 则输出信号将延迟于相对应的输入信号。由 TOF 产生的延迟取决于基板中的电极套和 SAW 传播速度的距离, 不久后又发现可以通过修改电极集来实现信号处理

(滤波)的目的 (Morgan, 1973)。

Tancrell (1969) 提出了改善 IDT 的频率特性的一个方法 (例如抑制旁瓣幅度)。他通过控制每个分开指状电极的幅度和延迟, 创造了使用 SAW 设备测试先进信号处理的可能性。虽然这种方法为实验工作提供了灵活性, 但它的主要缺点是需要非常复杂的电源。第二个方法称为抽指加权交叉指型法, 是指消除降低耦合的指状电极 (见图 5. 6a)。这种技术的主要缺点是, 它只对很长的传感器起作用。

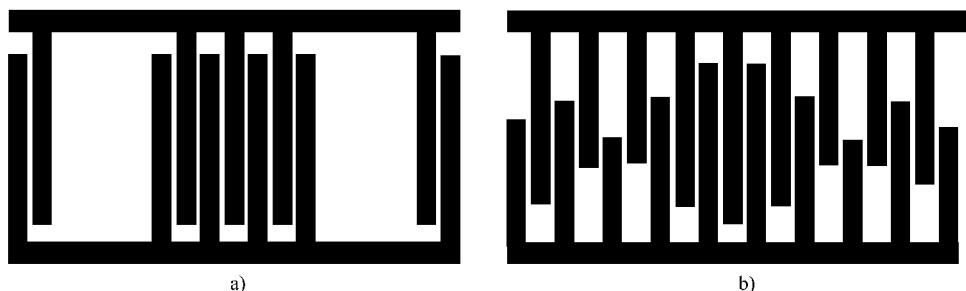


图 5.6 改变 IDT 的结构致使频率特性改变的例子

a) 取加权 b) 切趾

另一种方法——切趾是由 Tancrell (1969) 提出的。在该方法中, 采用单指状电极中重叠面积的变化来改变产生的导波的幅度。在这种方法中, 每一个指状电极的效率正比于它的有效长度 (见图 5. 6b), 因此它不需要多相电源。由于这种技术具有简单性和适应性, 现在常用于 SAW 器件中。这种切趾模式可以是对称的或者非对称的, 其形状可以根据不同的需要而进行改变。

2. 单向波的产生

IDT 设计的另一个特点是能够产生单向导波。图 5. 7 所示为一个典型的 IDT (双面和单面版本) 在垂直电极方向产生的兰姆波。然而在一些应用中, 需要单向传感器以减少结构中杂散的边缘反射。已经提出了有几种方法实现生成单向



图 5.7 模拟 IDT 产生导波波瓣的例子

波, 给出的第一种方法涉及多相结构 (Hartmann 等, 1972)。在该方法中, 施加到传感器电极上的电压是由多相信号发生器提供的。这种传感器也称为单向传感器 (UDT), 以这种方式供电仅能产生向前的波。这种类型的三相传感器的例子如图 5. 8a 所示。在本设计中, 使用由 $\lambda/3$ 的距离分隔的三电极。120°电极相移可实现产生单向导波。这种类型的传感器提供了极好的性能, 但结构复杂, 需要多级制造

工艺，同时还需要三相电源。

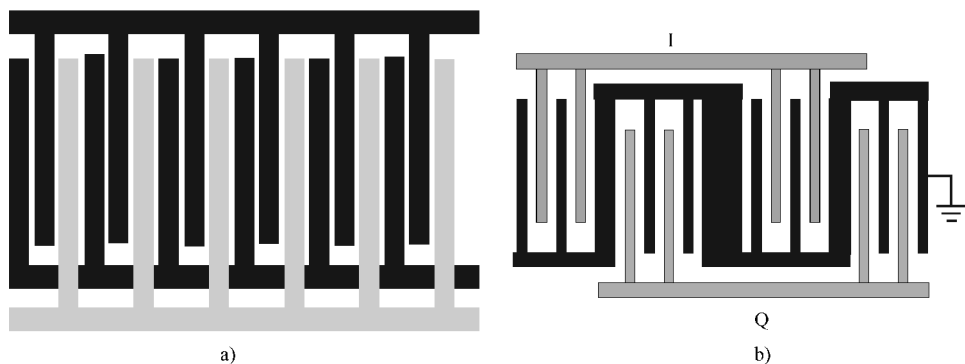


图 5.8 多相 UDT 的设计实例

a) 三相 UDT b) GUDT

为了克服这些缺点，Yamanouchi 等（1975）提出了 UDT（GUDT）类型。在本设计中尽管使用了三相传感器（见图 5.8b），但与以前的设备相反，将电极分割成两组：I（同相）和 Q（正交）。它们均采用信号的 90° 相移来供电，这样的设计并不需要多层次的制造，同时能确保产生单向波。

第二种用来获取产生单向波的方法是被动的的方法，与之前介绍的主动方法相反，在被动的的方法中不需要复杂和昂贵的多相电源。

在被动技术中，最简单的方法是谐振结构（Ash，1970）。在这种方法中，反射器被放置在一侧（“后方”），在传感器一侧和后方传播的波被困在声学腔内。这样设计的例子如图 5.9a 所示。这种方法的另一种变化是将反射结构放置在这样的位置，反射波可能被加到生成波中，消减了在反方向的波。由于所生成的超声导波的属性，单行反射器不能保证适当的反射波，因此需要多行反射器。此外，这种结构具有非常窄的频带特性，只有给定频率的超声导波可以反射。

其他类型的无源传感器，如单相的 UDT（SPUDT）与 Ash（1970）所提出的传感器类似。它也使用反射元件，但与上述传感器相反，它利用内部反射。经过多年的发展，已经开发了许多不同的单相设备。Hartmann 等（1982）提出了一种传感器，这种传感器的指状电极只能部分重叠反射电极（见图 5.9b），而电极的其余部分衰减后方的部分导波。

Lewis（1983）提出了 SPUDT 的另一个设计，该设计中 IDT 的一些部分被移走，被内部反射器所代替（见图 5.10a）。Yamanouchi 和 Furuyashiki（1984）提出的 SPUDT 也基于同样的原则。这个设计使用了一系列的浮置电极（见图 5.10b）。反射电极的分割变动实现了反射率参数的变化。例如上面例子中的修改，交叉指型传感器中一小部分的结构修改，已被用来调整它们的属性与特定应用。

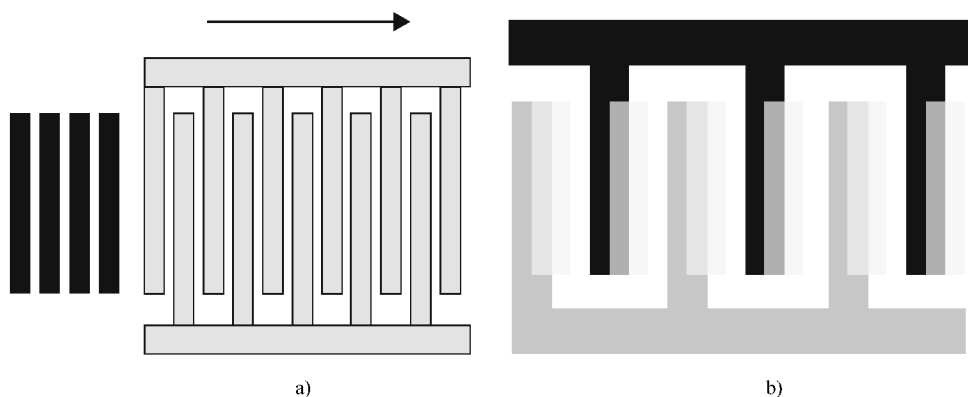


图 5.9 单相 UDT 的设计实例

a) 带反射器的 UDT b) 带有部分重叠反射器的 IDT

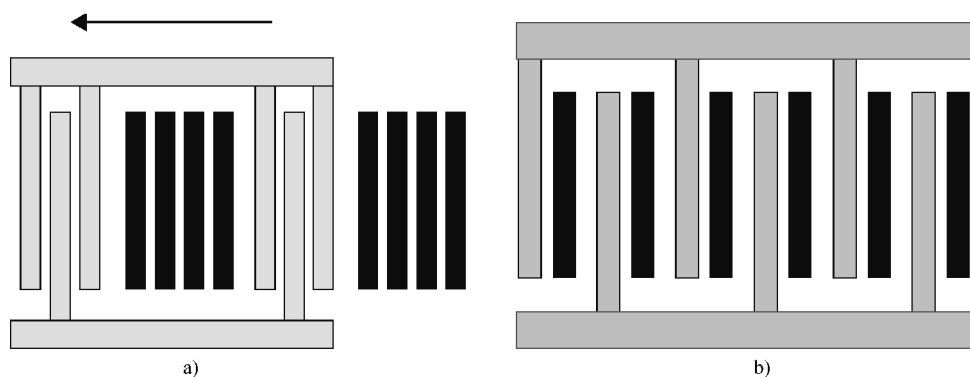


图 5.10 单相 UDT 的设计实例

a) 带内部反射器的 IDT b) 浮置电极 UDT

5.3 基于 MFC 的新型 IDT - DS

考虑 SHM 应用的具体需求，本章的重点在平面和曲面能够产生定向波的传感器，这些传感器可以很容易地集成以进行结构的监控。AFC 和 MFC 有着相似的特性，满足 SHM 的要求，原则上都可被用来设计导波的 IDT。然而，由于 MFC 的商业可用性和成本效益，本章中重点介绍基于 MFC 材料的传感器。

单片压电陶瓷提供了高压电效应（高机电常数）和全向波生成能力，但它们比较脆弱，耐久性差。虽然在尺寸低于 10mm 的小盘片或板状传感器中，这些缺点不太突出，但对于尺寸为几十毫米的大传感器，这些缺点是不可忽视的。与单片压

电陶瓷材料相比，MFC 提供了更高的弯曲性和结构耐用性，但是以降低电 - 机常量为代价。而且 MFC 具有高各向异性（由于纤维结构体），这使得它成为导波传感器/执行器结构集成的更具吸引力的材料。

在下面各节中，市售的具有密集电极的 MFC 传感器将与设计的特定波长的基于 IDT 的 MFC 传感器进行对比。以下设计的 IDT 在 4mm 厚的铝板块中激励 A_0 模式波。这种模式存在宽频带，然而最有用的是低频散，即激发近似恒定波速的频带。

这种情况出现在这些点，这些点的群速度相对于频率来说是固定的或几乎固定的，在分散点出现最大值，如图 5.11 所示。这里介绍的情况中， A_0 模式在 4mm 厚的铝板中最大群速度约为 330kHz，因此该频率被选作该 IDT 的标称频率。该例子中兰姆波的波长是

$$\lambda = \frac{c_p}{f} = \frac{246 \text{ km/s}}{330 \text{ kHz}} \approx 7.5 \text{ mm} \quad (5.1)$$

式中， c_p 为相速度， f 为频率。

IDT 设计的另一个重要方面是产生/探测波的方向性，它与手指的长度 (L) 相关，它可以根据下式进行计算：

$$\gamma = \arcsin \frac{\lambda}{L} \quad (5.2)$$

式中， γ 为光束发散角。

上述提到的传感器中，手指的长度 L 为 15mm，这将产生 30° 的发散角度。由于较高的激发波振幅和简单的接线，这里选用我们设计的双面 IDT。设计的传感器（简称 IDT - DS4）的尺寸如下：手指分离等于 $\lambda = 7.5 \text{ mm}$ ，梳状电极的厚度 $W_t = 1.9 \text{ mm}$ （见图 5.4a）。

两个标准，市售的 MFC 传感器已被选定为实验测试报告（P1 对 d33 的效应，P2 对 d31 的效应），其尺寸与那些设计的 IDT 接近。它们都是由德国德雷斯頓市的智能材料有限公司提供的。这个公司还提供了大量定制设计电极的基于 IDT 的 MFC。测试传感器的尺寸见表 5.1。该压电层的性能与所有传感器相似（光纤横截面 $0.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ ）。纤维基板两面的电极是由 0.18mm 厚的铜层制成的。研制的 IDT 的三维设计和照片如图 5.12 所示。

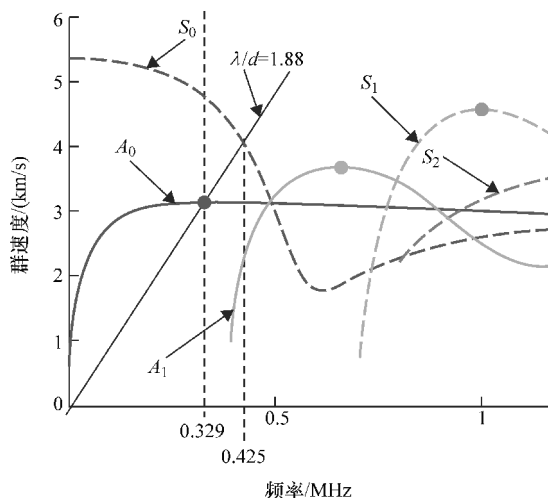


图 5.11 4mm 厚铝板的群速度

表 5.1 实验中所用传感器的几何参数

传感器类型	MFC - M2814 - P2 (d31 效应)	MFC - M2814 - P1 (d33 效应)	IDT - DS4 (d31 效应)
有效的长度/mm	28	28	28.2
有效的宽度/mm	14	14	15

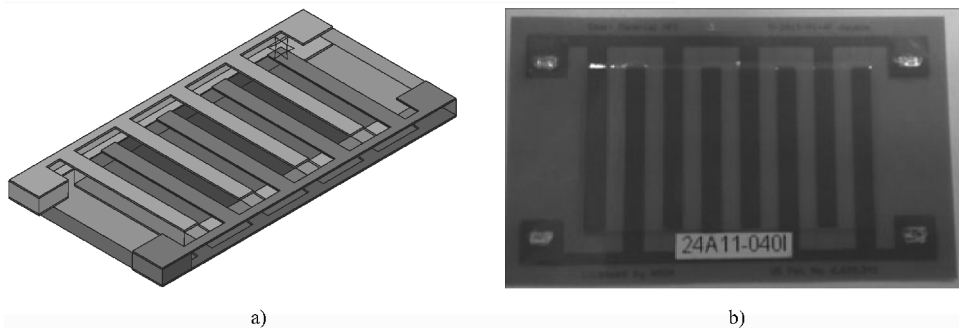


图 5.12 实验中使用的 IDT - DS4 原型

a) 三维设计 b) 照片

5.4 兰姆波生成压电复合材料传感器

5.4.1 数值模拟

为确定设计的 IDT - DS4 的属性和 MFC 传感器作为发射器的性能,进行了一系列的数值模拟。传感器和铝板的数值模型通过 ANSYS 多物理软件建立。每个传感器都被放置在 4mm 厚、尺寸为 500mm × 500mm 的铝板的中心。

使用 20 个节点的有限元建立结构的模型,进行完全耦合的瞬态分析来模拟压电效应。该传感器施加电信号(采用汉宁窗调制的五周期单音脉冲,峰峰值为 100V,频率分别为 100kHz、330kHz 和 425kHz),如图 5.13 所示。模拟的导波传播的时间间隔为 80μs。

选择上述三种激励频率进行测试:330kHz 是设计 IDT 的标称频率(4mm 铝板中 A_0 模式分散图的最大值);频率 425kHz 的 S_0 模式的波长等于 7.5mm(手指分开),采用低频 100kHz 的激励来验证测试传感器在低频率的行为。

由智能材料有限公司提供的 MFC 参数的平均值已经被用作压电层的特性,见本章附录中的表 5A.1 和表 5A.2。

5.4.1.1 波束方向图的计算

在所有进行的模拟中,均采用响应面法(RSM)(Box 和 Draper, 1986; Myers 和 Montgomery, 1995)计算波束方向图,进而分析模型化的压电传感器的动态特性。RSM 找到散布在半径为 150mm 圆上所有测量点的近似最大节点速度,随后利用扫描式激光振动计进行测量。当使用矩形的有限元(FE)时,有限元(FE)网

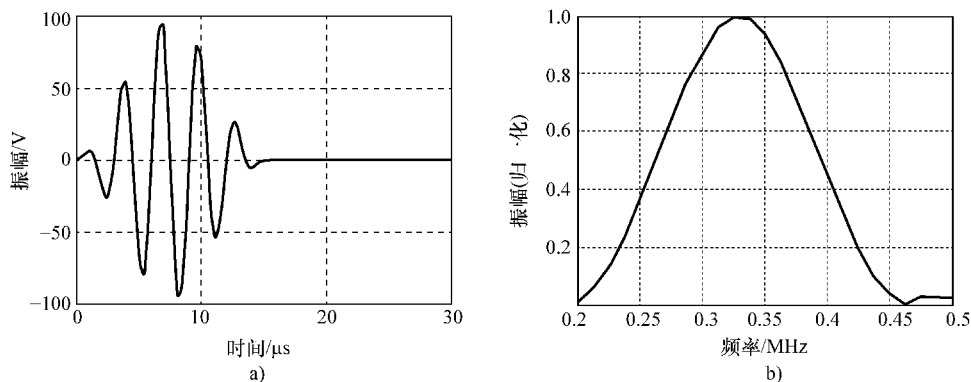


图 5.13 330kHz 频率的激励信号

a) 时域图 b) 频谱图

格中位于半径为 150mm 圆附近的一组节点被选中，造成与测量结果的直接比较是不可能的。实行从欧几里德到极系统的坐标变换来选定节点，从而减少 RSM 输入域的几何不平顺。采用希尔伯特变换来确定所有选择节点的垂直节点速度的时间历程曲线的包络面。最后，得出每个包络面的最大值，它代表生成模式的节点速度（对称或反对称）。这些数据被用来作为 RSM 应用的一个输入。IDT - DS4 采用 100kHz 进行激发的节点示例如图 5.14a 所示。

应用多项式元模型去接近输入参数（归一化半径和角度）和包络最大值之间的关系。使用最小二乘法，通过分析已知的包络极端 1405 值来确定 141 的回归系数。100kHz 激发生成 IDT - DS4 响应面例子如图 5.14b 所示。角度的归一化值和 $[-1, 1]$ 的半径区间分别代表变量 $[-90, 90]$ 和 $[148\text{mm}, 152\text{mm}]$ 。

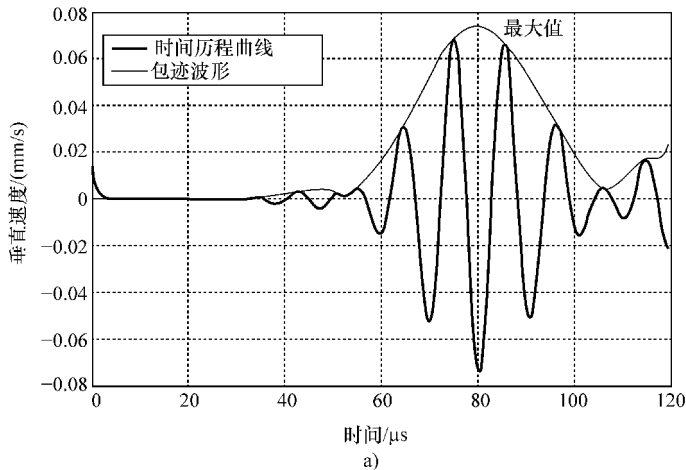


图 5.14 波束方向图计算的例子

a) 节点的垂直速度图

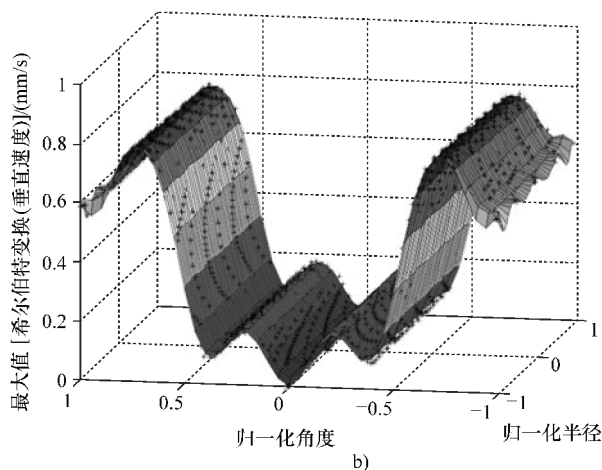


图 5.14 波束方向图计算的例子 (续)

b) 包络面的极值

5.4.2 实验验证

为了验证所研究的数值确定属性,进行了传感器的实验。被研究的传感器采用 Loctite - 3430 环氧胶安装在 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的铝板上,至少固化 24h 方可进行实验。波兰 EC 电子公司专门设计用于 SHM 应用产生电子激励信号的压电采集系统 PAS - 8000 和 PAQ - 16000D。

平面外的振动测量采用 Polytec 的 PSV - 400 扫描激光振动计,此测振仪放置在测试板的前面,如图 5.15 所示。该测振仪由两个主要部分组成: PSC - I - 400 传感器头和 OFV - 5000 测振仪控制器。

为了改善表面的反射特性,所测量的面积覆盖着逆反射材料,以方便专用激光测振的测试。测振仪的采样频率设定在 5.12MHz ,灵敏度为 $20\text{mm}/(\text{s} \cdot \text{V})$ 。为了抑制噪声的影响,每个点重复测量 4 次,然后平均和采用带宽为 100kHz ($\pm 50\text{kHz}$ 激励频率)的带通滤波器进行滤波。

实验中使用的激励信号是将五周期的正弦脉冲串由汉宁 (Hanning) 窗调制而成的。实验中使用的脉冲频率和在有限元模拟中是相同的: 100kHz 、 330kHz 和 425kHz 。计算在测振仪测量的基础上每个激励频率传感器的光束模式 (见图 5.16),采用希尔伯特变换来确定每个测量点的离面速度的包络线快照。然后,找到每个包络线的最大值,并用于波束方向图的计算。最后,将计算出的光束颤动特征进行归一化,并且通过滑动平均滤波器进行平滑处理。

5.4.3 数值模拟与实验结果

5.4.3.1 d31 效应的 MFC - P2 结果

模拟的 MFC - M2814 - P2 传感器的数值结果如图 5.17a 所示,该图表示了不

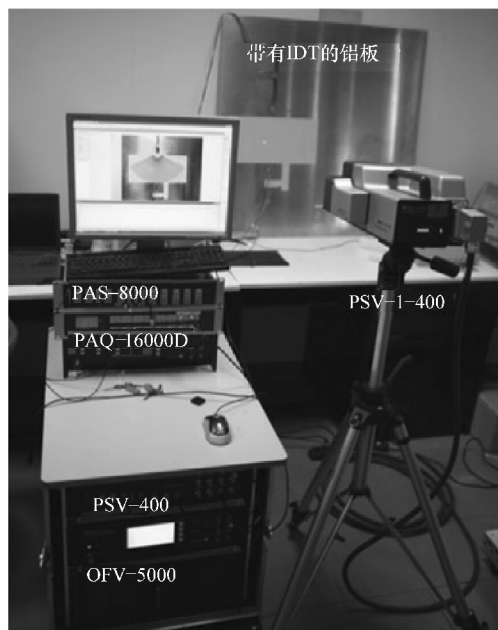


图 5.15 测试设计的传感器的实验装置

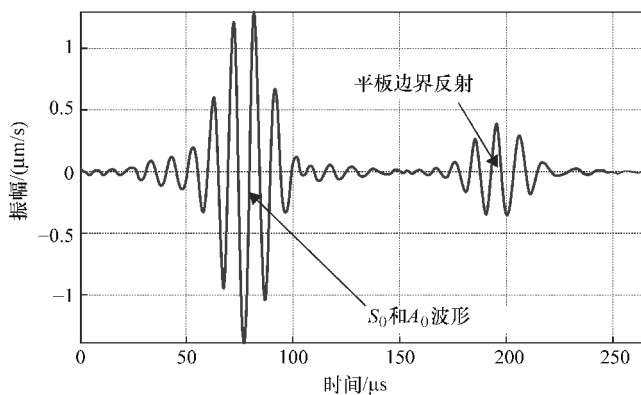


图 5.16 兰姆波在 4mm 厚铝板传播的幅值图

同激励频率的传感器的波束方向图。可以看出对所有的频率，该传感器在 4 个垂直方向上传播产生导波。然而。所有的光束模式有比较宽的叶。定义为 -6dB 幅度下降的主瓣宽度（发散角）的计算，表明 MFC - M2814 - P2 传感器分为 2 个发散角：主要和侧面。所计算的两个方向上的发散角见表 5.2。

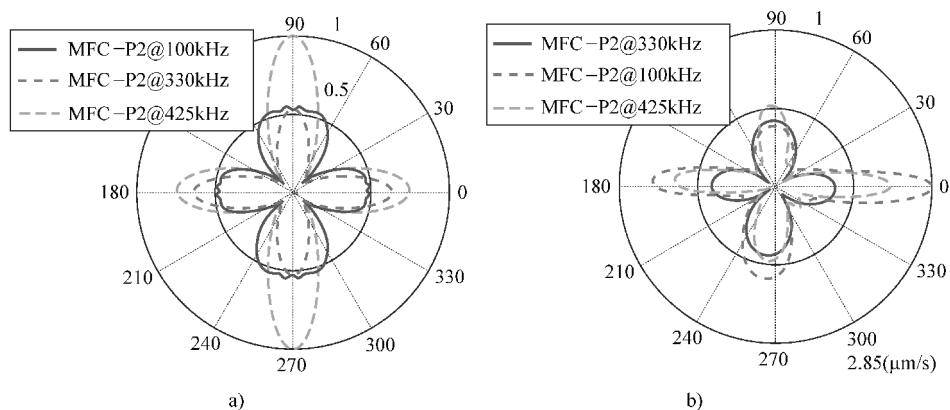


图 5.17 MFC - M2814 - P2 在 100kHz、330kHz 和 425kHz 激励频率下的归一化波束图案
a) 数值 b) 实验

表 5.2 MFC - M2814 - P2 的主要和侧面发散角

激励频率/kHz	100	100	330	330	425	425
辐射方向	主要	侧面	主要	侧面	主要	侧面
数值结果 (°)	79	51	35.28	24.7	37.62	29.76
实验结果 (°)	67.5	44/50	27.7	22/18.10	27.7	20.2/23.2

图 5.17a 给出了频率为 425kHz 传播波的最高振幅。该频率中主瓣与旁瓣幅度比 (MSLR) 为 1.3 (频率为 100kHz 时该比率是 1.1)。有趣的是, 当激励频率为 330kHz 时 MSLR 为 0.84, 这意味着主辐射方向平行于梳状电极。在主辐射方向所观察到的变化与 Collet 等 (2011) 观察到的是相似的。

图 5.17b 所示为向 MFC - M2814 - P2 传感器施加不同的激励频率所生成的波束图案的对比。与数值结果类似, 可以观察到实验光束图案的前叶和旁瓣。上述三个频率进行激励时, 前叶的幅度类似, 而旁瓣的振幅随频率变化, 当频率为 330 kHz 时振幅达到最大值。在最低频率 100kHz 时主瓣宽度是最大的, 然后随着频率的增加主瓣宽度减少 (见表 5.2)。在所有的测试频率下, 对于传感器的“左”和“右”侧, 计算出的旁瓣宽度略有不同, 这就是为什么表 5.2 给出两个旁瓣值的原因。在数值数据中观察到的主辐射方向的变化也出现在图 5.17b 所示的实验数据中。当激励频率为 100kHz 时 MSLR 是 1.06, 而对于较高的频率, 当激励频率为 330kHz 时 MSLR 降低至 0.4, 当激励频率为 425kHz 时 MSLR 降低至 0.6。实验结果表明, 若要达到相对较高的模式选择, 则需用最低频率 100kHz, 此时只可观察到单模式波, 更高的频率会产生额外的模式。

图 5.18a ~ c 所示为 MFC - M2814 - P2 使用不同的激励频率产生模拟和实验数据的对比。需要注意的是, 在各图的右下角给出的通过实验获得的最大振幅, 与最大圆的半径相对应。这些振幅分别用于模拟波束图案的幅度归一化。图 5.18a ~ c 显示模拟和实验中, 在所生成的波束图的形状方面有很好的 consistency。

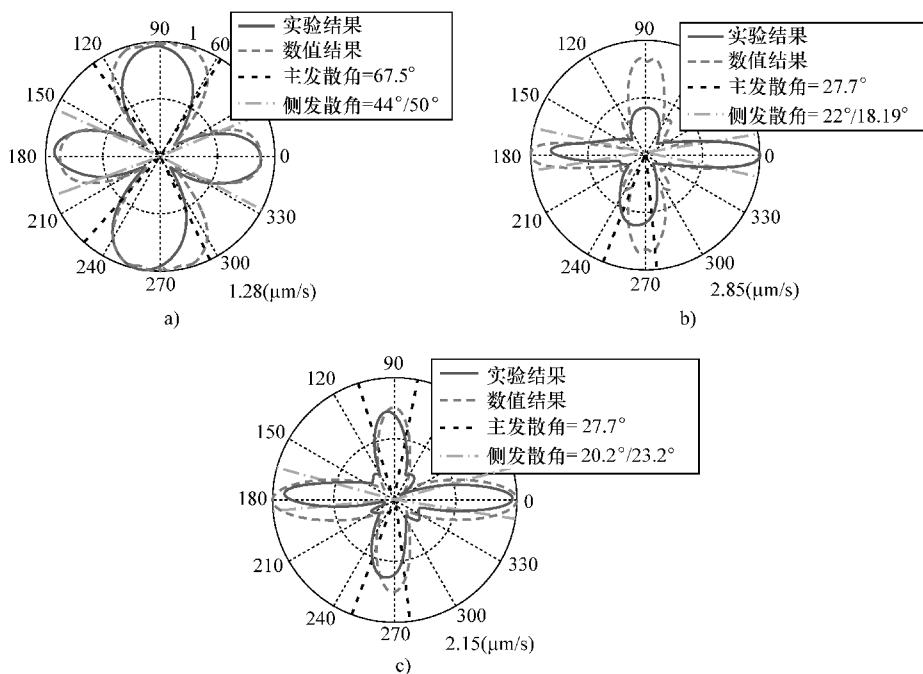


图 5.18 MFC - M2814 - P2 在不同频率下的归一化模拟（虚线）和实验（实线）波束图案
（注意在每个图的右下角给出的比例因子）

a) 100kHz b) 330kHz c) 425kHz

5.4.3.2 d33 效应的 MFC - P1 结果

第二次模拟系列采用 MFC - M2814 - P1 传感器，这种传感器呈现 d33 压电效应。激励频率为 425kHz 生成波的最高幅度可再次被观察到，如图 5.19a 所示。对

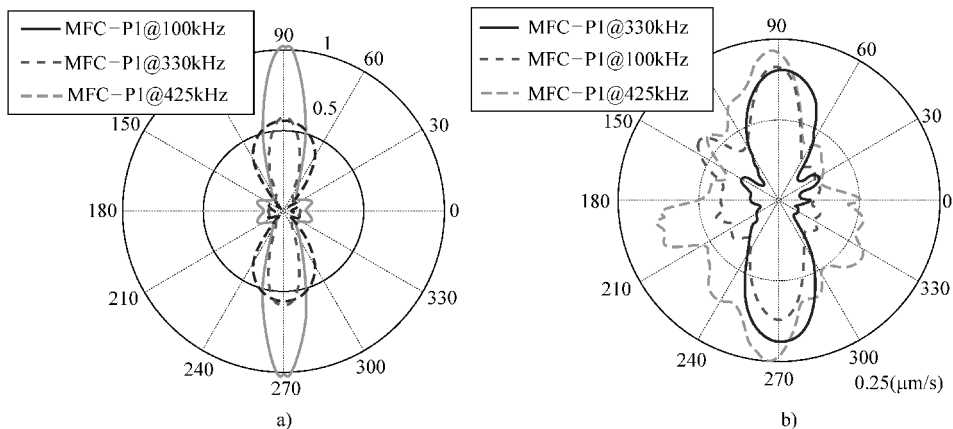


图 5.19 MFC - M2814 - P1 在 100kHz、330kHz 和 425kHz 的激励频率下的归一化波束图案
a) 数值 b) 实验

于这种传感器，只有主瓣的存在。在模拟和实验过程中确定的发散角见表 5.3。最高的主瓣宽度出现在 100kHz 时，此时该值高于 71° 。随着频率的增加，该值下降，在 425kHz 时该值降至 31.6° 。

表 5.3 MFC – M2814 – P1 确定的发散角

激励频率/kHz	100	330	425
数值结果 ($^\circ$)	71.82	35.44	31.62
实验结果 ($^\circ$)	55	46	—

另外，在这种情况下，幅度随激发频率的变化而变化的情况也可被观察到。在较低频率时生成波的振幅比激励频率为 425kHz 时生成波的振幅低约 1/2，但是波束图案的主瓣更广泛。可以看出，MSLR 还取决于激励频率：激励频率为 100kHz 时，该值为 10.8；当频率较高时，如激励频率为 330kHz 和 425kHz 时，该值分别减小到 6.5 和 7.3。

传感器在实验中的归一化的结果如图 5.19b 所示，所显示的结果证实了对于所有的测试频率，MFC – M2814 – P1 传感器产生了垂直于电极方向的双向波。

类似于 MFC – M2814 – P2，更好的模式选择性主要在最低频率（100kHz），此时只有单一的模式可以被区分开来。随着激励频率的变化，产生了导波的附加模式。与上个传感器相反，所产生的光束图案的形状（见图 5.19b）随着激发频率的改变而改变。对于更高频率的激励波，双向特性被保留下来，但是随着频率变化，幅度和局部变化，出现了额外的旁瓣。在这种情况下，因为旁瓣的振幅较高，无法估计频率为 425kHz 时的发散角。实验结果见表 5.3，激发频率为 100kHz 时 MSLR 最好为 4.1。

在这种情况下可以观察到，实验和模拟数据之间具有良好的一致性，特别是在最低激发频率时（见图 5.20a）；较高激发频率时会出现附加的旁瓣，而这种情况在模拟数据中不存在。对应于光束图案振幅的激光振动计测试的速度如图 5.20 所示，可以看出，比 MFC – M2814 – P2 测量的低约一个数量级。

5.4.3.3 d31 效应的 IDT – DS 结果

研究的第三个传感器是定做的具有 d31 压电效应的 IDT – DS，它与 MFC – M2814 – P2 具有相同的基板。设计的 IDT – DS4 工作在选定的标称频率（330kHz），但与 MFC 比较，它可以被上文提出的传感器的相同频率所激发。

IDT – DS4 的模拟结果比较如图 5.21a 所示。可以看出，激励频率为 330kHz 时可获得最佳的性能。该频率时主瓣的特点是出色的 MSLR 和窄发散角（等于 30° ）。对于更高的激励频率的光束模式与上述的类似，但在主瓣两侧约 30° 处出现明显的旁瓣。对于 100kHz 的激励频率，模拟波束图案的宽主瓣（见表 5.4）和相当多的旁瓣表现为蝴蝶的形式。

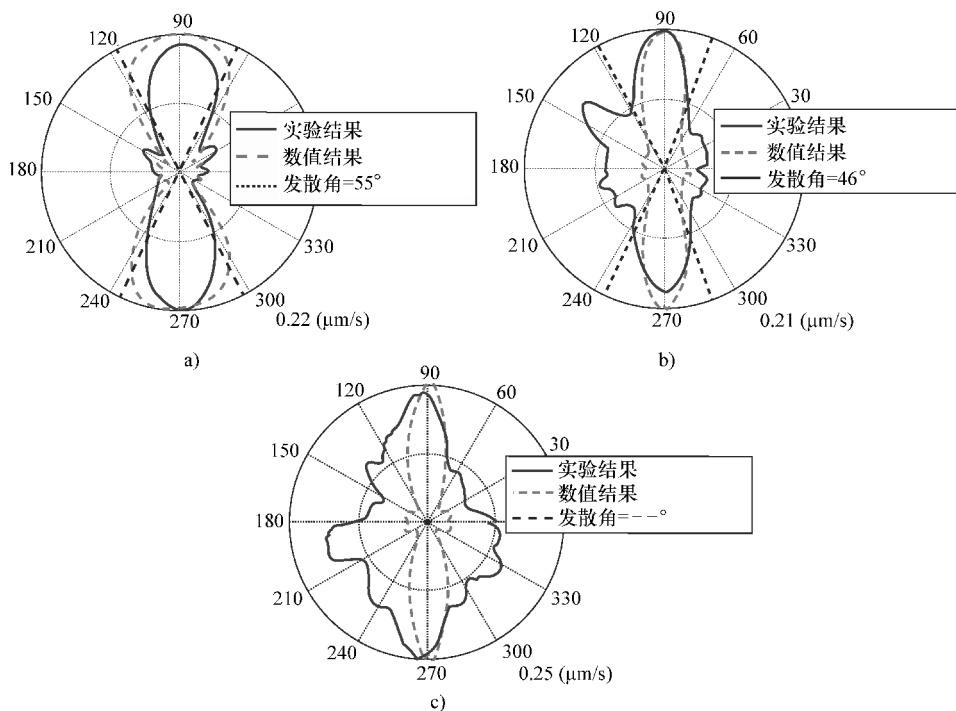


图 5.20 MFC-M2814-P1 在不同频率下的归一化仿真（虚线）和实验（实线）波束图案（注意在每个图的右下角给出的比例因子）

a) 100kHz b) 330kHz c) 425kHz

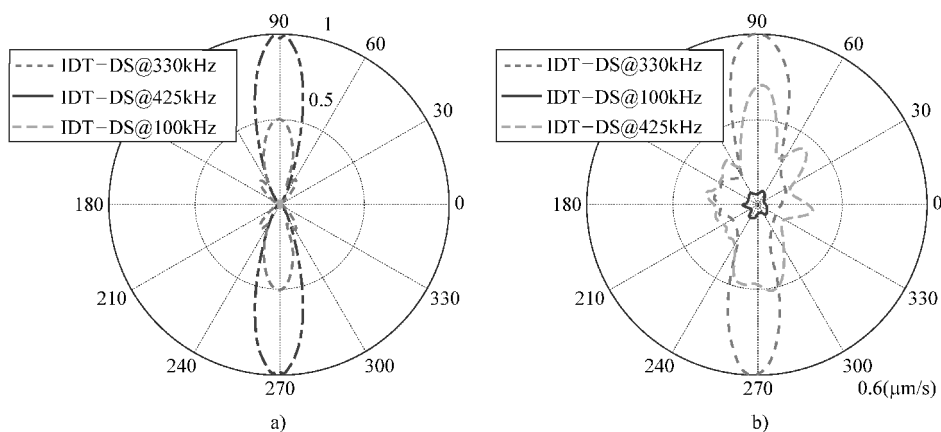


图 5.21 IDT-DS4 在 100kHz、330kHz 和 425kHz 的激励频率下的归一化波束图案

a) 数值 b) 实验

表 5.4 对 IDT - DS4 确定的发散角

激励频率/kHz	100	300	425
数值结果 (°)	86.6	30.34	31.36
实验结果 (°)	—	34	36/34

IDT - DS4 的最佳 MSLR 为 110, 此时其标称频率为 330kHz; 当激励频率为其他值时, 该 MSLR 会低得多, 但仍高于 MFC - M2814 - P1 传感器的。例如, 激励频率为 100kHz 和 425kHz 时的 MSLR 分别为 28 和 39。

这种传感器的实验性波束方向图的特性如图 5.21b 所示, 显示了在垂直于梳形电极方向产生双向波的能力。在模拟结果中, 传感器的最佳性能出现在激励频率为 330kHz 时。

时域和频域的分析结果表明, 在这个频率产生了三种模式: 在 330kHz 时产生 A_0 和 S_0 模式, 在 425kHz 时产生弱 S_0 模式, 这种对应于电极间距模式的对称模式如图 5.11 所示。这种模式由 330kHz 脉冲较高频带的少量能量所激发, 并由在 425kHz 时对应于 S_0 模式波长的指间间距所放大。 S_0 模式与 A_0 模式 (传播速度为 3.1km/s) 相比, 具有更高的传播速度 (分别为 4.8km/s 和 4.1km/s), 其 MSLR 在标称频率时为 4.6, 发散角为 34° (见图 5.21b)。

频率为 100kHz 得到的结果非常难以解释, 因为所生成波的振幅非常低。从图 5.22 可以看出, 100kHz 时的最大幅度远低于在 330kHz 时, 而且其光束模式不具

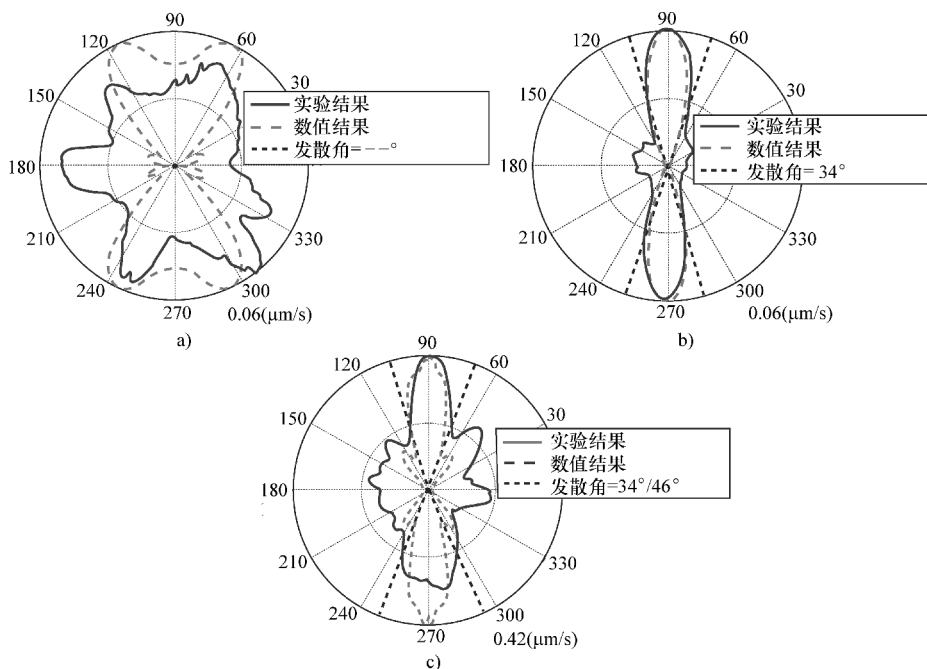


图 5.22 IDT - DS4 在不同频率下的归一化模拟 (虚线) 和实验 (实线) 波束图案 (注意在每个图的右下角给出的比例因子)

a) 100kHz b) 330kHz c) 425kHz

有良好的方向性。最高频率时主波瓣更明显，但幅度仍然比在标称频率时低，附加的旁瓣也可见。此外在此频率下，除了模式与激励频率相关外，与电极间距相关的 A_0 模式可以被区分 ($A_0 @ 330\text{kHz}$)。IDT - DS4 模拟和实验结果的比较如图 5.22a ~ c 所示，显示了标称频率时模拟和实验有很好的 consistency。频率为 425kHz 时的光束模式也类似，包括在传感器边缘处产生的附加旁瓣。

5.4.4 讨论

只有每种类型传感器的单一结果被选为进行模拟和实验测试的对比。在 MFC 传感器的模拟数值结果中，观察 425kHz 的最高幅值和最低发散比，并用其进行对比。IDT - DS4 的数值试验表明，传感器的标称频率为 330kHz 时，可得到最好的结果。图 5.23a 所示为与所研究的施加三种激励频率的传感器形成的最大振幅相关的光束图案的比较，包括 330kHz 时的 IDT - DS4。

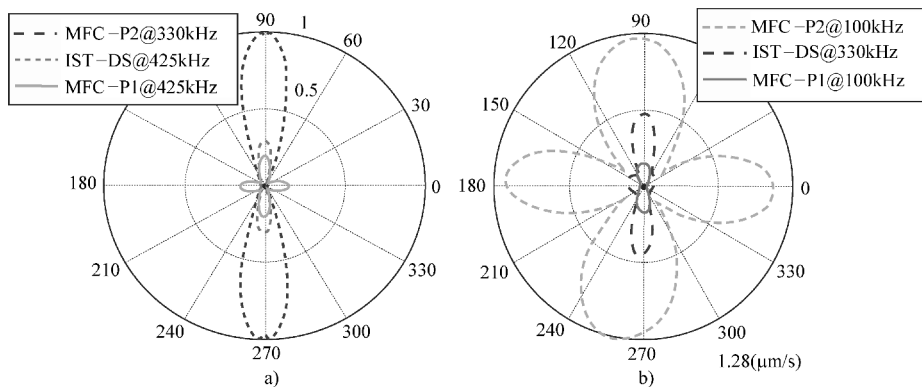


图 5.23 所研究三种传感器的归一化波束图案
a) 数值 b) 实验

可以看出，IDT - DS4 传感器产生的波束图案不仅具有最高 MSLR，而且有最高的主瓣幅度和最小的发散角。实验测试中，MFC - M2814 - P2 的最高振幅出现在 330kHz 频率时，但这个幅度在平行于指状电极（旁瓣）的方向上产生，从而导致最低的 MSLR。最高的主瓣幅度出现在 425kHz 频率时，但在该频率下旁瓣的幅度也非常高，导致较低的 MSLR。在这种情况下，最优 MSLR 和相当大的幅度出现在频率为 100kHz 时，该频率已被选定进行比较。MFC - M2814 - P1 的实验测试表明，最优 MSLR 和最好的方向性出现在 100kHz 的激励频率时。

与其他两个传感器相反，IDT - DS4 在标称频率为 330kHz 时显示出最佳的方向性和 MSLR。图 5.23b 所示为实验中传感器产生的最高 MSLR 的波束图案，对于波束方向图振幅的比例因子是 $1.28\mu\text{m/s}$ 。从图 5.23b 可以看出，所研究的关于旁瓣水平的传感器中，IDT - DS4 的方向性最好，它的 MSLR 约为 5；而 MFC - M2814 - P1 的 MSLR 约为 4，MFC - M2814 - P2 的 MSLR 仅为 1。另外，IDT - DS4 在发散角方面具有最好的方向性，它的主瓣宽度是 34° ；而 MFC - M2814 - P1 的主瓣宽度是 55° ，MFC - M2814 - P2 的主瓣宽度是 67° (50° 方波)。

因为每种类型只有一个传感器经过测试,所以只有进行定性的比较。传感器手工黏合到被测板的不同位置上,这可能导致传感器和被测板的粘接质量不同。为了减少这些负面因素的影响,需要开展多次实验,然后基于统计分析进行定量的比较。在光束图案的形状上,实验结果与数值模拟结果相符。但是,与数值结果不同,实验中 MFC - M2814 - P2 产生最高幅度,该幅度比 IDT - DS4 产生的高 2 倍,比 MFC - M2814 - P1 产生的幅值高 10 倍。这种差异来自以上所述的多种因素(粘接质量,被测板或压电传感器的材料特性),或者由于数值模拟的缺陷。数值模拟和实验结果之间差异的原因是目前主要研究工作之一。

5.5 IDT - DS4 的兰姆波传感特性

上一节的结果已证明了 IDT 用作兰姆波的传感器,具有较高的性能。该传感器的模式和频率选择性使得其调谐到所需的频率。本节主要研究所设计的 IDT - DS4 传感器的方向特性,为识别设计的传感器的传感能力,开展了数值模拟和实验测试。

5.5.1 数值模拟

采用 ANSYS 多物理仿真软件进行数值模拟,来识别设计的 IDT - DS4 传感器的传感能力。与以前使用的模型相比,另加的 PZT 传感器被放置在被测板半径为 150mm 的边上,参考 PZT 放置在板的中心。

为识别由 IDT - DS4 产生的电信号对兰姆波源的角位置的影响,将 9 个矩形传感器放置在被测板半径为 150mm 的边上,如图 5.24a 所示。每个传感器之间的角距

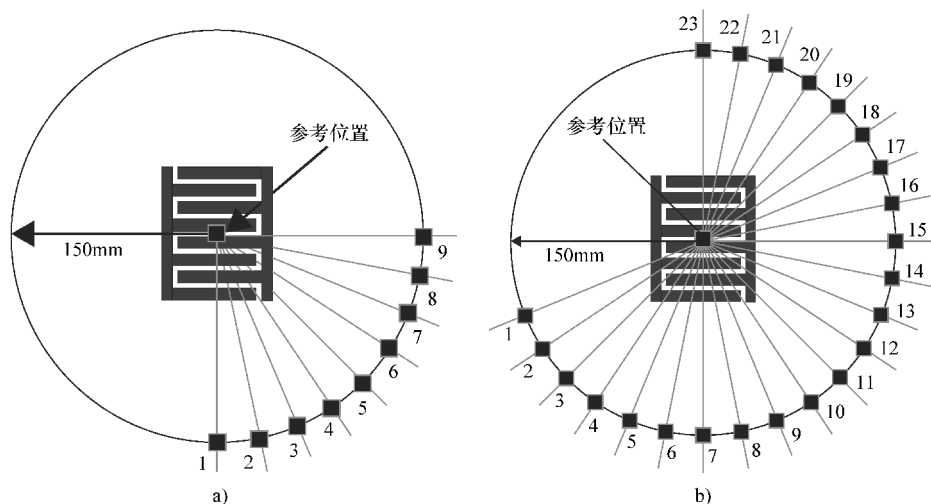


图 5.24 用于方向性评估的测试装置

a) 数值 b) 实验

离为 11.25° 。所述的传感器被模拟成 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的 PZT（类似于 Noliac CMAP12 传感器）。接着，这些传感器上施加频率为 330kHz 的电信号进行激励（IDT-DS4 的标称频率）。

图 5.25 所示为在梳状电极上连接 100Ω 电阻（负载）所测试的信号。接着，为确定信号的包络面，对所有的测量进行希尔伯特变换。最后，采用 MATLAB 软件的三次样条插值法对图像进行平滑处理，增加角分辨率（见图 5.26）。

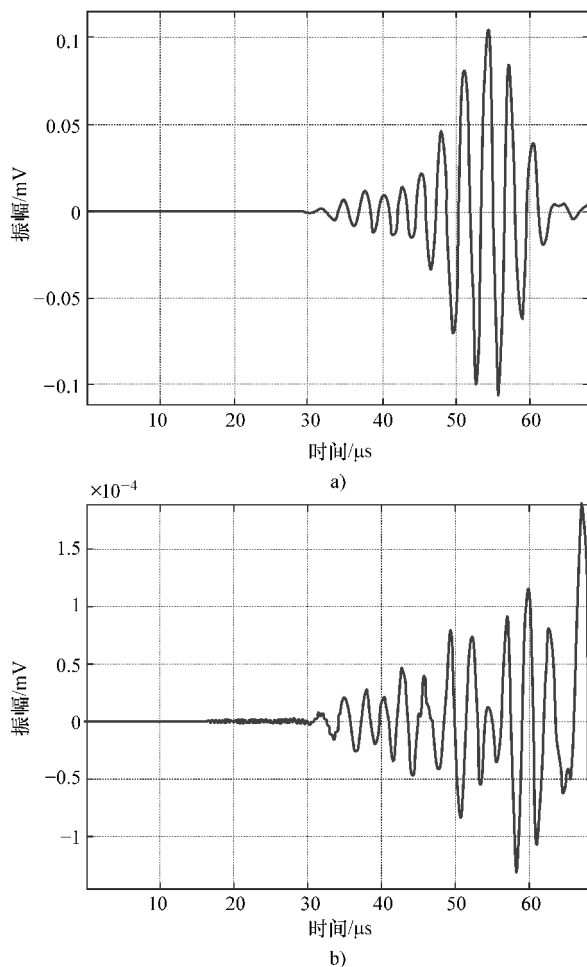


图 5.25 两个不同方向的 IDT-DS4 接近波的测量（注意振幅的差异）

a) 垂直方向 b) 平行方向

模拟仿真得到的结果表明，被测 IDT 传感器对接近波的方向非常敏感。平行指状电极方向上所测量信号的振幅，比从垂直方向入射波所获得的小两个数量级（见图 5.25）。在测量信号的基础上确定角灵敏度（见图 5.27），然后计算定向灵敏度

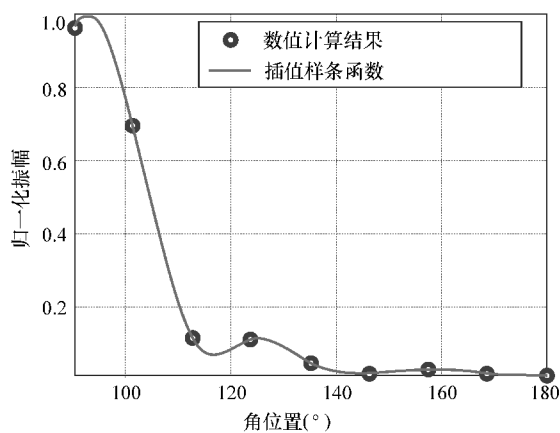


图 5.26 数值计算结果和插值

确定方位角（下降到低于 -6dB ）。这个角度约为 30° ，等于前面各节中所介绍的发散角。

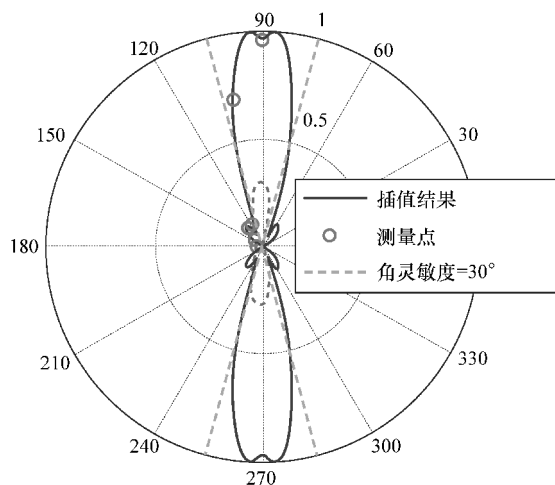


图 5.27 IDT-DS4 的数值角灵敏度

5.5.2 实验验证

为了验证模拟计算结果，进行了实验测试。实验中的设置与模拟中类似，如图 5.24b 所示。另加的 PZT 传感器（Noliac CMAP12）分别用蜡安装在本侧板半径为 150mm 的边上，相邻传感器之间的角间距和模拟中的一样（ 11.25° ）。为了减少粘接质量的影响，利用安装在板的相对侧的同一位置的 PZT 传感器（Noliac CMAP12）作为参考信号。采用 PAS-8000 压电采集系统从测试的 IDT-DS4 和参

照压电传感器上获取感应信号。

实验中，PZT 传感器安装在半径为 150mm 被测板的圆周上，对每个 PZT 传感器激发连续的兰姆波。对每个传感器重复测定，取平均值。剔除与平均值相差较大的值，然后根据剩余的值计算新的平均值，并用于包络线计算。数据的最后处理步骤是，采用被测板中心的压电陶瓷传感器检测的信号对 IDT - DS4 的信号进行归一化，这个过程的目的是减少在测得信号时 PZT 粘接质量的影响。

另外，为了提高计算的角分辨率，采用三次样条数据插值算法，插值结果和测试结果如图 5.28 所示。

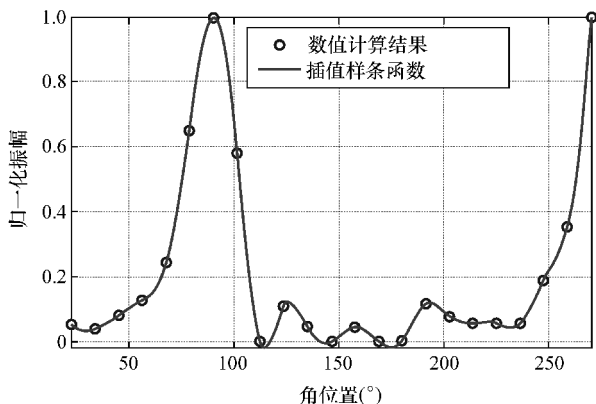


图 5.28 实验结果和插值

IDT - DS4 测角灵敏度的极坐标图如图 5.29 所示。与数值计算结果相似，来自垂直于梳状电极方向的信号振幅，比来自平行于梳状电极方向入射的振幅大两个数量级。在 -6 dB 的峰值灵敏度为 27°，略小于从数值模拟中得到的值，以及在 IDT - DS4 作为变送器的实验测试中得到的发散角（见图 5.22b）。

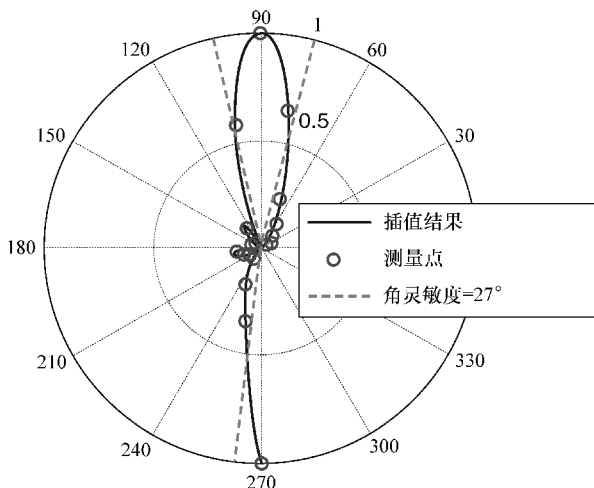


图 5.29 IDT - DS4 的实验角灵敏度

5.6 结论

在本章中,我们采用数值模拟和实验比较了两种使用 MFC 基板的传感器。该传感器具有不同的电极布局:标准密集电极和 IDT-DS 电极。两种传感器均为薄而灵活可弯曲的贴片,适用于 SHM 应用。两种类型的 MFC 基板都用于密集电极的传感器, MFC-P1 的 d33 极化和 MFC-P2 的 d31 极化;而 IDT-DS 传感器采用 d31 效应的 MFC 制成。

本章介绍的数值模拟和实验的结果表明, IDT 传感器与其他两种类型的传感器相比更优越,因为它的额定频率,最窄的主瓣具有高振幅和最低的旁瓣等特性。此外, IDT-DS 具有的与电极之间距离相关的模式选择性,与所选波模式的波长相匹配 (330kHz 时的 A_0)。

这意味着与具有密集电极的 MFC-P1 和 P2 相比,基于 IDT-DS 的 MFC 更适合 SHM 应用。基于 IDT-DS 的 MFC 具有更高的幅度,它可以将工作频率调至最佳频率,使得激发模式的扩散为最小。这些特性使得 IDT 非常适合长距离超声波检测。

第二组模拟和实验系列的结果证明, IDT-DS 作为传感器在标称频率时仍具有模式选择性和高指向性。此外,传感器的方向特性允许进行到达方位的检测。用于兰姆波到达角度检测的 IDT 传感器可以是内置的,形如 Howard 和 di Scalea (2007) 提出的花环 MFC 传感器。

到目前为止,一般使用 PZT 陶瓷或 PVDF 作为压电层来制造 IDT 传感器,其特性导致传感器的脆性 (PZT) 或弱 (PVDF)。本章介绍表明,基于 MFC 基板的 IDT-DS 结合了 IDT 和 MFC 的优点,因为它可以制造灵活 (弯曲) 的传感器,这种传感器生成高定向性的高振幅波。

附录

表 5A.1 用于 IDT-DS4 和 MFC-M2814-P2 的 31 个复合材料的压电性能

$c_{11}^E = 3.94 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{22}^E = 2.03 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{33}^E = 3.25 \times 10^{10} \text{ Pa}$
$c_{12}^E = 1.29 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{12}^E = 0.83 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{23}^E = 0.53 \times 10^{10} \text{ Pa}$
$c_{44}^E = 0.55 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{55}^E = 0.55 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{66}^E = 1.31 \times 10^{10} \text{ Pa}$
$\varepsilon_{31} = -7.12 \text{ Cm}^{-2}$	$\varepsilon_{33} = 12.1 \text{ Cm}^{-2}$	$\varepsilon_{32} = -4.53 \text{ Cm}^{-2}$
$\varepsilon_{24} = -17.03 \text{ Cm}^{-2}$	$\varepsilon_{15} = -17.03 \text{ Cm}^{-2}$	$\rho = 7000 \text{ kgm}^{-3}$
$\varepsilon_{11}^E = 237.2 \varepsilon_0 \text{ CV}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$\varepsilon_{11}^E = 237.2 \varepsilon_0 \text{ CV}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$\varepsilon_{33}^E = 143.4 \varepsilon_0 \text{ CV}^{-1} \text{ m}^{-1}$

表 5A.2 用于 MFC – M2814 – P1 的 33 个复合材料的压电性能

$c_{11}^E = 3.94 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{22}^E = 2.03 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{33}^E = 3.25 \times 10^{10} \text{ Pa}$
$c_{12}^E = 1.29 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{12}^E = 0.83 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{33}^E = 0.53 \times 10^{10} \text{ Pa}$
$c_{44}^E = 0.55 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{55}^E = 0.55 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$c_{66}^E = 1.31 \times 10^{10} \text{ Pa}$
$\varepsilon_{31} = 13.62 \text{ Cm}^{-2}$	$\varepsilon_{33} = -4.1 \text{ Cm}^{-2}$	$\varepsilon_{32} = 0.55 \text{ Cm}^{-2}$
$\varepsilon_{24} = -17.03 \text{ Cm}^{-2}$	$\varepsilon_{15} = -17.03 \text{ Cm}^{-2}$	$\rho = 7000 \text{ kgm}^{-3}$
$\varepsilon_{11}^E = 237.2 \varepsilon_0 \text{ CV}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$\varepsilon_{22}^E = 141.2 \varepsilon_0 \text{ CV}^{-1} \text{ m}^{-1}$	$\varepsilon_{33}^E = 141.2 \varepsilon_0 \text{ CV}^{-1} \text{ m}^{-1}$

参考文献

- Ash E 1970 Surface wave grating reflectors and resonators. *IEEE Proceedings of the 1970 G-MIT International Microwave Symposium*, pp. 385–386.
- Badcock R and Birt E 2000 The use of 0–3 piezocomposite embedded Lamb wave sensors for detection of damage in advanced fibre composites. *Smart Materials and Structures* **9**, 291–297.
- Bellani F, Bulletti A, Capineri L, Masotti L, Yaralioglu GG, Degertekin LF, Khuri-Yakub BT, Guasti F and Rosi E 2005 A new design and manufacturing process for embedded Lamb waves interdigital transducers based on piezopolymer film. *Sensors and Actuators A: Physical* **123–124**, 379–387.
- Bent AA and Hagood NW 1997 Piezoelectric fiber composites with interdigitated electrodes. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **8**(11), 903–919.
- Birchmeier M, Gsell D, Juon M, Brunner AJ, Paradies R and Dual J 2009 Active fiber composites for the generation of Lamb waves. *Ultrasonics* **49**, 73–82.
- Boonsang S, Dutton B and Dewhurst RJ 2006 Modelling of magnetic fields to enhance the performance of an in-plane EMAT for laser-generated ultrasound. *Ultrasonics* **44**, 657–665.
- Box G and Draper N 1986 *Empirical Model Building and Response Surfaces*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Brunner AJ, Barbezat M, Huber C and Flueler PH 2005 The potential of active fiber composites made from piezoelectric fibers for actuating and sensing applications in structural health monitoring. *Materials and Structures* **38**, 561–567.
- Capineri L, Gallai A, Masotti L and Materassi M 2002 Design criteria and manufacturing technology of piezopolymer transducer arrays for acoustic guided waves detection. *IEEE International Ultrasonic Symposium*.
- Collet M, Ruzzene M and Cunefare KA 2011 Generation of Lamb waves through surface mounted macro-fiber composite transducers. *Smart Materials and Structures* **20**, 1–14.
- Cosenza C, Kendrican S, Djordjevic B, Green Jr RE and Pasta A 2007 Generation of narrowband antisymmetric Lamb waves using a formed laser source in the ablative regime. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* **1**(54), 147–156.
- Diamanti K, Hodgkinson J and Soutis C 2002 Damage detection of composite laminates using PZT generated Lamb waves. *Proceedings of the First European Workshop on Structural Health Monitoring*. (ed. Balageas D). DESTech Publications, pp. 398–405.
- Dimitriadis E, Fuller C and Rogers C 1991 Piezoelectric actuators for distributed vibration excitation of thin plates. *Journal of Vibration and Acoustics* **113**, 100–107.
- Dutton B, Boonsang S and Dewhurst RJ 2006 A new magnetic configuration for a small in-plane electromagnetic acoustic transducer applied to laser ultrasound measurements: Modelling and validation. *Sensors and Actuators A: Physical* **125**, 249–259.
- Gentilman R, McNeal K, Schmidt G, Pizzochero A and Rosetti GJ 2003 Enhanced performances active fibercomposites. *Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies* **5054**, 350–359.
- Hartmann C, Jones W and Vollers H 1972 Wideband unidirectional inderdigital surface wave transducers. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics* **SU-19**(2), 372–381.

- Hartmann C, Wright P, Kansy R and Garber E 1982 An analysis of SAW interdigital transducers with internal reflections and the application to the design of single-phase unidirectional transducers *IEEE International Ultrasonics Symposium* **1**, 40–45.
- Hayward G, Hailu B, Farlow R, Gachagan A and McNab A 2001 The design of embedded transducers for structural health monitoring applications. *Proceedings of SPIE* **4327**, 312–323.
- High JW and Wilkie KW 2003 Method of fabricating NASA-standard macro-fiber composite piezoelectric actuator. Technical report, NASA.
- Howard MM and di Scalea FL 2007 Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures. *Smart Materials and Structures* **16**, 1489–1499.
- Jin J, Quek ST and Wang Q 2005 Design of interdigital transducers for crack detection in plates. *Ultrasonics* **43**, 481–493.
- Klepka A and Ambrozinski L 2010 Selection of piezoceramic sensor parameters for damage detection and localization system. *Diagnostyka / Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej* **4**, 17–22.
- Lewis M 1983 Low loss saw devices employing single stage fabrication. *IEEE International Ultrasonics Symposium* **1**, 104–108.
- Luginbuhl P, Collins SD, Racine G, Gretillat MA, de Rooij NF, Brooks KG and Setter N 1997 Microfabricated Lamb wave device based on PZT sol-gel thin film for mechanical transport of solid particles and liquids. *Journal of microelectromechanical systems* **6**(4), 337–346.
- Mamishv AV, Sundara-Rajan K, Yang F, Du Y and Zahn M 2004 Interdigital sensors and transducers. *Proceedings of the IEEE* **92**(5), 808–845.
- Manka M, Rosiek M, Martowicz A, Uhl T and Stepinski T 2010 Design and simulations of interdigital transducers for Lamb-wave based SHM systems. *Proceedings of 11th IMEKO TC 10 Workshop on Smart Diagnostics of Structures*. Krakow, Poland.
- Manka MM, Rosiek M, Martowicz A, Uhl T and Stepinski T 2011 Properties of interdigital transducers for Lamb-wave based SHM systems. The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring. Stanford University, p. 1488.
- Monkhouse R, Wilcox P and Cawley P 1997 Flexible interdigital PVDF transducers for the generation of Lamb waves in structures. *Ultrasonics* **35**, 489–498.
- Monkhouse R, Wilcox P, Lowe M, Dalton R and Cawley P 2000 The rapid monitoring of structures using interdigital lamb. *Smart Materials and Structures* **9**, 304–309.
- Morgan DR 1973 Surface acoustic wave devices and applications: I. Introductory review. *Ultrasonics* **11**(3), 121–131.
- Murayama R and Mizutani K 2002 Conventional electromagnetic acoustic transducer development for optimum Lamb wave modes. *Ultrasonics* **40**, 491–495.
- Myers R and Montgomery D 1995 *Response Surface Methodology Process and Product Optimization using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Na JK and Blackshire JL 2010 Interaction of Rayleigh surface waves with a tightly closed fatigue crack. *NDT&E International* **43**, 432–439.
- Na JK, Blackshire JL and Kuhra S 2008 Design, fabrication and characterization of single-element interdigital transducers for NDT applications. *Sensors and Actuators A* **148**, 359–365.
- Ochonski J, Ambrozinski L, Klepka A, Uhl T and Stepinski T 2010 Choosing an appropriate sensor for the designed SHM system based on Lamb waves propagation. *Proceedings of 11th IMEKO TC 10 Workshop on Smart Diagnostics of Structures*. Kraków, Poland.
- Raghavan A and Cesnik CE 2007 Review of guided-wave structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest* **2**(39), 91–114.
- Salas KI and Cesnik CE 2008 Design and characterization of the CLoVER transducer for structural health monitoring. *Proceedings of SPIE* **6935**.
- Salas KI and Cesnik CE 2009 Guided wave excitation by a CLoVER transducer for structural health monitoring: theory and experiments. *Smart Materials and Structures* **18**, 1–27.
- Schulz M, Pai P and Inman D 1999 Health monitoring and active control of composite structures using piezoceramic patches. *Composites: Part B* **30**, 713–725.
- Silva M, Gouyon R and Lepoutre F 2003 Hidden corrosion detection in aircraft aluminium structures using laser ultrasonics and wavelet transform signal analysis. *Ultrasonics* **41**, 301–305.
- Staszewski WJ, Lee BC, Mallet L and Scarpa F 2004 Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: I. Lamb wave sensing. *Smart Materials and Structures* **13**, 251–260.
- Tancrroll R 1969 Acoustic surface wave filters. *IEEE International Ultrasonics Symposium* **1**, 48–64.

- Wilcox PD, Cawley P and Lowe MJ 1998 Acoustic fields from PVDF interdigital transducers. *IEE Proceedings Science, Measurement and Technology* **145** (5), 250–259.
- Williams BR, Park G, Inman DJ and Wilkie KW 2002 An overview of composite actuators with piezoceramic fibers. *20th International Modal Analysis Conference*, Los Angeles pp. 421–427
- Yamanouchi K and Furuyashiki H 1984 Low-loss SAW filter using internal reflection type of new single phase unidirectional transducer. *IEEE International Ultrasonics Symposium* **1**, 68–71.
- Yamanouchi, K. and Nyffeler F and Shibayama K 1975 Low insertion loss acoustic surface wave filter using group-type unidirectional interdigital filter transducer. *IEEE International Ultrasonics Symposium* **1**, 317–321.

第 6 章 机电阻抗方法

6.1 引言

针对机械结构，机电阻抗方法是一种非常有效的局部结构健康监测（SHM）技术。它是基于间接测量的机械阻抗的变化，机械阻抗包含了机械系统的结构特性有关的信息。考虑到直接测量机械阻抗的困难性，主要测量安装在被监测结构上压电传感器（PZT）的电阻抗变化。由于机械阻抗和电阻抗的耦合，在 PZT 的电响应与机械阻抗直接相关。因此，它可以很容易地用于评估结构的状态，被称为机电阻抗（Liang 和 Rogers, 1994; Park 等, 2003; Sun 等, 1995）。

上述的方法已成功地应用于飞机部件故障探测。Chaudhry 等（1995）进行了第一次尝试。他们研究轻型双引擎飞机的中尾段损伤探测的可能性。他们在接头连接的结构元件中引入了两个不同的位置结构的损伤：第一个在 PZT 附近，第二个在更远的位置。实验证明该方法对近场损伤的灵敏度非常好，而对远场敏感性很差。

阻抗法也被用于军用直升机转子叶片的脱粘探测（Giurgiutiu, 2007）。在试验过程中，转子叶片置于飞行中的振动环境，将会导致其结构元件之间的脱粘。为探讨这种损伤，在转子叶片部分放置多个 PZT。试验采用人工设置的局部脱粘。损伤的发生表现在阻抗图中的共振峰的频移（由于局部刚度减少），峰值幅度的增加引起局部阻尼减少和出现与新峰值对应的新的局部模态形状。

修复片常用于修复老化的飞机结构。这样的元件，主要由复合材料制作而成，被放置在结构的性能退化区域，即开裂或腐蚀区域。但是使用修复片后，难以监测位于复合材料下方的损伤的传播，以及对粘接的质量进行评估。Koh 等（1999）通过试验研究了修复结构的损伤探测的可行性评估。

粘接硼/环氧片的铝标本用于重构一种典型的修补结构。聚四氟乙烯嵌件安置在所述粘接层，在制造过程中用于模拟脱粘。接着，把每个样品配备 3 个 PZT，1 个附着在复合材料片上，2 个安装在主结构上。

由于脱粘，整个阻抗曲线发生了明显的纵向偏移。Koh 和他的团队能够在记录的数据基础上确定损伤的大小。他们还证明用于阻抗测量的频率范围的选择是一个关键问题。

Roach 和 Rackow（2006）比较了上述探测技术与其他损伤探测方法的效率。他们测试了在铆接铝板的裂纹和腐蚀的缺陷探测的可能性。铝板布满方形 PZT 和

谐振器，用阻抗分析仪提供激励和采集信号。所得到的结果证实了机电阻抗测量适宜观察类似元件结构上的改动。新兴应用领域，以及硬件和软件的不断发展决定 SHM 系统的必要性。

通过改进初期损伤灵敏度，以及防止误报，以提高监测过程的质量；另一方面，对于一个新设计的 SHM 系统，降低能源消耗和安装、维护成本可能是一个关键的问题。

本章中，在已知机电阻抗方法的理论背景下，将介绍用于损伤探测的测量操作和信号处理算法。该方法由简单的机械结构，如梁、板的有限元模拟数值结果进行说明。在实验室条件下，将给出简单结构（如铝基板和管道）的实验结果。最后，使用一个特别设计的多通道仪器，对该方法在现实中结构的损伤探测测试进行了验证。本章还讨论了两架飞机的结构（主起落架托架的螺栓联接和铆接机身面板）的机电阻抗的测量结果，以及该方法的 SHM 可行性。

6.2 理论背景

对于机电阻抗方法，安装在被监测结构上的 PZT 采用直接和逆压电效应。结构由逆压电效应激发产生受迫振动，应变导致电场的产生。相反，因为应变可以产生电响应，电阻抗或导纳可以由压电效应直接测量。传感器获得受探测区域的动态响应信号后，然后再转化为电信号形式。最终，损伤的发生导致电响应幅值和相位的变化。

6.2.1 机电阻抗的定义

对于线性压电材料，机械性能和电性能之间的关系可以被定义为（Park 和 Inman, 2007）：

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d_t \\ d & \epsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

式中， S 为机械应变， T 为机械应力， E 为电场， D 为电位移场（把电路中的 PZT 看作电容器，电位移场即该电容的电荷密度）， s 为机械动柔度， d 为压电应变常数， ϵ 为介质的介电常数。上标 E 和 T 分别表示零应力情况下，电极直接相连所测量的量。下标 t 表示换位。方程第二部分描述了直接压电效应，而第一部分描述了相反的效果。确定机电导纳（机电阻抗倒数）所使用的推导公式，在 Bhalla 和 Soh (2003) 的一个例子中可以找到。在所引用的参考文献中，压电片模型由高强度的环氧粘合剂粘接在被监测结构的表面上。压电片沿其纵向轴线振动为方向'1'，在横向方向'3'施加交变电场 E_3 。PZT 的性能符合由式 (6.1) 推导的本构方程。

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

式中, S_1 是'1'方向的应变, D_3 是通过 PZT 传感器的电位移场 (即电荷密度), d_{31} 是压电应变系数, T_1 是'1'方向的压电片的轴向应力。复机械柔度 s_{11}^E 是复刚度的倒数, 直接定义为复杨氏模量 Y_{11}^E , 即

$$s_{11}^E = (Y_{11}^E)^{-1} \quad (6.3)$$

杨氏模量 Y_{11}^E 和介电常数 ε_{33}^T 都视为复数的量, 以引入机械性能和电损耗因数。

详细的模型基于以下假设:

- 与主机的结构相比, 振动片的质量和刚度可以看作无穷小, 因此可以忽略不计。

- 结构可以假定为在整个粘接区内有均匀的动态刚度。

- 安装压电片的两个端点处, 结构的机械阻抗 Z_M 相同。

机电导纳 Y 取决于被监测结构的机械阻抗 Z_M 和压电传感器 Z_a , 依照下面的公式有 (Park 等, 2003; Sun 等, 1995):

$$Y = j\omega a \left[\varepsilon_{33}^T - \frac{Z_M}{Z_M + Z_a} d_{31}^2 Y_{11}^E \right] \quad (6.4)$$

式中, a 是压电式传感器的几何常数。

结构的任何损伤都将改变机械阻抗 Z_M 。假设 PZT 的机械性能没有改变时, 所得到的机电导纳 Y 和阻抗 Z 能表示所监测结构机械性能的任何变化。

式 (6.4) 包括两个组成部分。第一个是自由 PZT 的电容导纳。它描述了导纳 Y 随着频率的线性增加。此组成部分表示 Y 和 Z 虚部的大多数。第二部分表示被监测结构和传感器的机械性能变化导致的 Y 频率特性的变化。它定义了机电导纳和阻抗的实部的大部分。因此, 阻抗和导纳的实部, 即 $\text{Re}(Z)$ 和 $\text{Re}(Y)$ 由于其更加敏感而最常用于监测结构参数的变化。实数部分的测量值提供有关压电元件的电气性能和整个结构的力学行为的信息 (Sun 等, 1995)。

6.2.2 测量技术

有两种模型可能适用于机电阻抗的测量:

- 单点频率响应模型, 如图 6.1a 所示。
- 传输频率响应模型, 如图 6.1b 所示。

对于单点频率响应模型, 假设只有一个 PZT 被使用, 同时作为驱动器和传感器 (Park 等, 2003)。但是, 该方法的缺点是探测区域较窄, 测量的灵敏度不足, 因为当 PZT 作为一种高效的振动驱动器和一个灵敏的传感器时, 其机电特性将下降。如图 6.1a 所示的电路由交变电压 V_{IN} 所驱动。输出电压 V_{OUT} 取决于 PZT 产生的电压 V 。它对应于结构的机械阻抗。

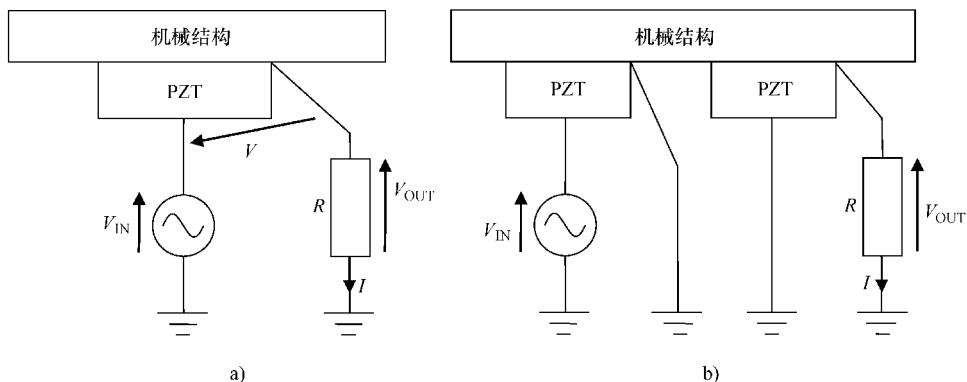


图 6.1

a) 单点频率响应模型 b) 传输频率响应模型

因此，任何结构损伤造成的机械阻抗的变化，应该体现在 PZT 的复阻抗 Z 的测量值上 (Park 和 Inman, 2007)。机电阻抗可以通过直接测量 PZT 的电压和电流所确定，可从下面的公式得到：

$$Z = \frac{(V_{IN} - V_{OUT})R}{V_{OUT}} \quad (6.5)$$

后一个模型要求使用两个独立的 PZT 进行激励和测量 (Koh 等, 1999; Peairs 等, 2002; Sun 等, 1996)。该方法的优点是，每个 PZT 可以单独根据它的运行特点，选择增加测量灵敏度和传输到结构的振动能量。但是，其主要缺点是粘接 PZT 数量的增加和更复杂的控制电路，必须包括电荷放大器额外的系统。机电阻抗的计算方法如下：

$$Z = \frac{V_{IN}R}{V_{OUT}} \quad (6.6)$$

进行阻抗测量时，结构被施加高频振动，以激发产生局部模态形状。类似实验的一个典型频率范围是 10 ~ 500kHz，具体取决于被监测物体和测量装置 (Ayres 等, 1998; Naidu 和 Soh, 2004; Park 和 Inman, 2007; Yan 等, 2007)。高频率测量具有对监测结构机械性能的局部变化高敏感性的特点。主要因为损伤尺寸对微小波长为特征的高频正交模态干扰很强，微小波长一般指与损伤同一级别。然而，必须指出，基于阻抗的 SHM 仅在安装 PZT 的附近可进行有效监测，即监测的距离为毫米和厘米的量级，而不是米量级 (Chaudhry 等, 1995)。此外，定位效果还取决于具体的阻尼，例如桁架结构的关节周围的摩擦阻尼，对关节和在 PZT 材料中波的传播干扰非常明显 (Ayres 等, 1998)。另外，在高频率范围内，要求小电压，通常会小于 1V，给结构提供正确的激励，该测量方法是适用于正常工况为低频率振动、静态负载和位移的结构。当结构整体质量、刚度和边界条件的变化远超所

安装的传感器的周围区域时，并不影响要求的阻抗图（Ayres 等，1998）。

6.2.3 损伤探测算法

进行损伤评估时，需要定义结构被认为健康状态时的基线阻抗图。随着时间的推移，逐渐采集到当前测量的频率特性，并监测出它们相对于所存储的基线图的变化。为定性评估阻抗曲线的变化，即损伤特征，以下损伤指标常常用于度量损伤特征（Park 和 Inman, 2007; Rosiek 等, 2010b）：

$$DI_1 = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\operatorname{Re}(Z_{0,i}) - \operatorname{Re}(Z_i)}{\operatorname{Re}(Z_{0,i})} \right| \quad (6.7)$$

$$DI_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\operatorname{Re}(Z_{0,i}) - \operatorname{Re}(Z_i)}{\operatorname{Re}(Z_{0,i})} \right)^2} \quad (6.8)$$

$$DI_3 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left| \frac{\operatorname{Re}(Z_{0,i}) - \operatorname{Re}(Z_i)}{\operatorname{Re}(Z_{0,i})} \right|} \quad (6.9)$$

$$DI_{4,q} = \left(1 - \frac{1}{1-n} \frac{\sum_{i=1}^n (\operatorname{Re}(Z_{0,i}) - \operatorname{Re}(Z_0)) (\operatorname{Re}(Z_i) - \operatorname{Re}(Z))}{s_0 s} \right)^q \quad (6.10)$$

式中， $Z_{0,i}$ 和 Z_i 分别为第 i 阶频率机电阻抗的参考值和当前值； Z_0 、 s_0 和 Z 、 s 分别为参考阻抗值的均值和标准差； n 为所选取频率的个数； q 为损伤指标的阶数。损伤指数 DI_2 为方均根偏差（RMSD），不同的研究学者均广泛采用此指标（Naidu 和 Soh, 2004; Rosiek 等, 2010b）； DI_4 为互相关的统计度量（Park 和 Inman, 2007; Raju 等, 1998）； DI_1 和 DI_3 由本章作者提出（Rosiek 等, 2011b）。相对偏差是由 Sun 等（1995）在研究桁架结构接头松动时所提出。Park 等（1999）提出了实部导纳变化二次方的和作为损伤指标。Bhalla 和 Soh（2003）提出所测量导纳的实部和虚部均可以用于描述损伤定量。Zagrai 和 Giurgiutiu（2001）研究了其他损伤指标，例如平均绝对百分比方差，相关系数方差，协方差变化等。基于阻抗的 SHM 技术，其主要特征是处理所监测的机械结构和不同的制造材料类型的应用通用性。众所周知，在金属、复合材料、混凝土和钢筋混凝土中应用的 SHM 类型有（Ayres 等, 1998; Koh 等, 1999; Park 和 Inman, 2007; Peairs 等, 2002; Roach 和 Rackow, 2006; Sun 等, 1996）：螺栓和螺纹接头，焊接和点焊接头，胶合缝，管道和铁轨。例如，可以探测到的常见的各种损伤有：裂纹、疲劳断裂、腐蚀、松动关节、脱胶和分层。

6.3 数值模拟

虽然基于阻抗的损伤探测方法不是一个基于模型的技术，监测结构的机电响应

模型可以用于预测损伤增长,或指导设计结构监测中的 PZT 的位置。机电阻抗解析模型,仅可以适用于不复杂的结构(梁、板、杆)(Giurgiutiu 和 Rogers, 1999; Giurgiutiu 和 Zagrai, 2001)。应用耦合电路分析的谱元方法对压电系统建模也有很多尝试(Peairs 等, 2005)。这种技术在计算成本方面非常有效,然而,由于缺乏适当的软件对复杂的几何形状进行结构建模,难以实现在复杂结构中的应用。除了上面提到的方法,耦合有限元似乎是适用于更复杂的工程结构建模的最准确、最简单的方法,虽然它需要很强的计算能力(Liu 和 Giurgiutiu, 2007; Yang 等, 2008)。6.3.1 节提出关于利用耦合有限元解释机械结构中损伤探测与机电阻抗现象结合的研究。

6.3.1 基于有限元的机电阻抗建模方法

第一个用于测试的对象是自由悬挂的铝梁,梁上粘接 PZT,如图 6.2a 所示。铝梁的尺寸为 $100\text{mm} \times 16\text{mm} \times 1\text{mm}$,PZT 的尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.3\text{mm}$,材料为 PIC151 (PICeramic),位于结构的左侧(距梁端部 5mm)。第二个测试对象是悬臂钢梁,尺寸为 $120\text{mm} \times 15\text{mm} \times 1\text{mm}$,粘接有两个 PZT,其材料为 S1 和 S2 (Noliac),如图 6.2b 所示。较小尺寸的 PZT 作为执行器,尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2\text{mm}$,位于距梁夹紧边缘 24.5mm 的地方。较大尺寸的 PZT ($7\text{mm} \times 7\text{mm} \times 2\text{mm}$)作为传感器,位于距紧固端 64mm 处。一层薄的环氧树脂黏结剂也应当在两种模型中加以考虑。

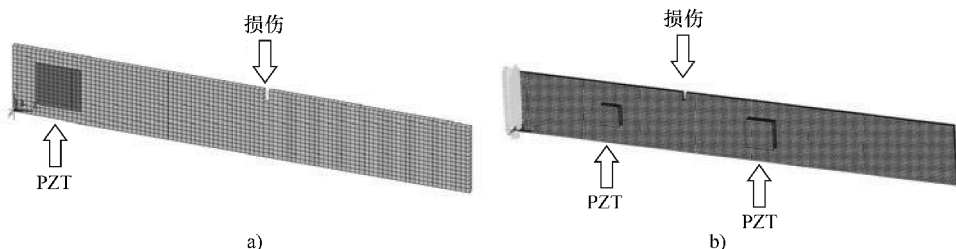


图 6.2

a) 简单悬挂铝梁有限元模型 b) 悬臂钢梁的有限元模型

采用 ANSYS 软件建立有限元模型,结构建模采用三维 20 节点抛物型单元 SOLID95 和 SOLID226,电压源和电阻采用 CIRCU94 单元建模。SOLID226 单元是耦合场固体单元,具有热电、压电和压阻能力,因此,它非常适合于复杂多物理问题建模。特别指出,它可以将存在于压电材料的机电耦合完整融合(Yang 等, 2008)。PZT 的电极上施加幅值为 1V 的交流电压 V_{IN} ,激发其振动。一个 100Ω 参照电阻被用来评估这两种结构的机电阻抗。为了得到收敛性的求解,并获得足够精度的结果,有必要设计一个合适的网格划分。根据 Yang 等(2008)推荐的标准,相对于所选择的频率范围,所选择的单元尺寸为 1mm。损伤由一个垂直的槽口建模,槽口深度分别选择 1~4mm。

在图 6.3 中表示后来的损伤情况,如损伤 1 到损伤 4。通过谐波分析,得到铝

梁的机电阻抗点频率响应函数 (Point FRF) 和钢梁的传递频率响应函数 (Transfer FRF)。图 6.3a 和 b 表示这些阻抗特性的绝对值。由此可以看出, 与损伤的增长正相关, 由于梁的组合整体刚度减少, 大部分的共振峰值偏移 to 较低的频率。也可以观察到峰值振幅的一些细微的变化。对于较大的缺口 (例如 3mm 和 4mm), 结构受到的干扰更加显著, 出现新的正态模式。

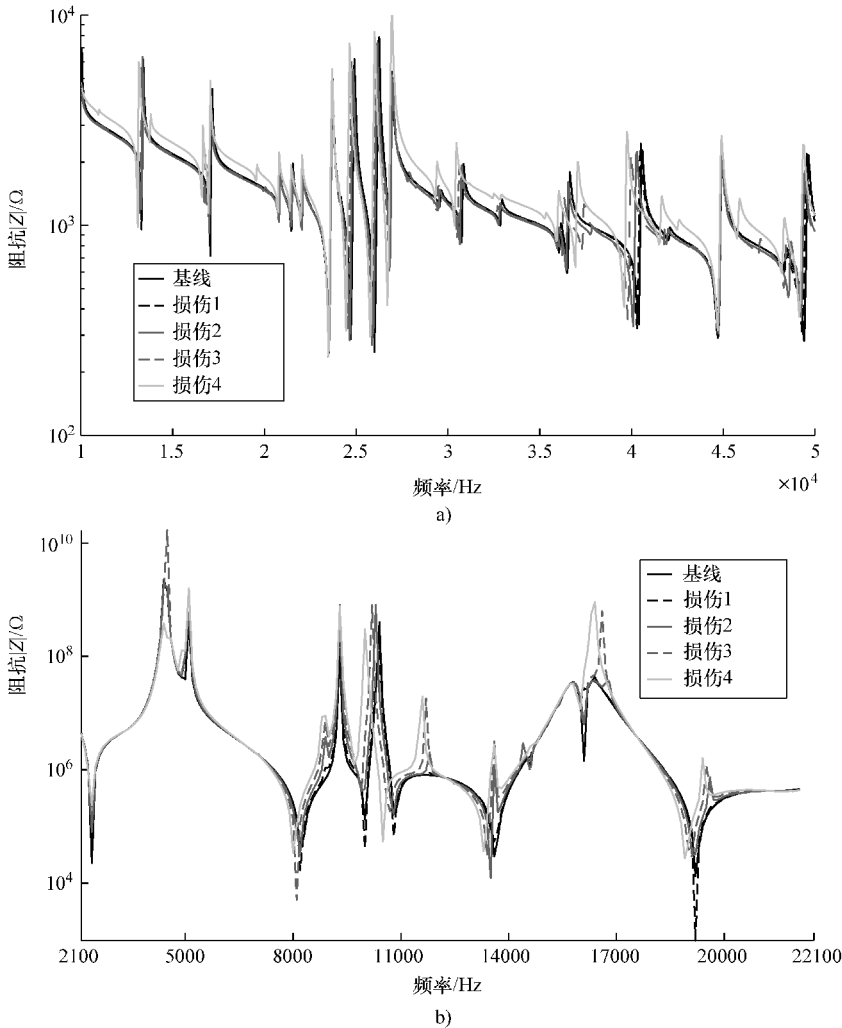


图 6.3

a) 铝梁的点频率响应函数 b) 钢梁的传递频率响应函数

图 6.4 显示了铝梁一个点频率响应函数实部的特写视图。阻抗测量过程中, 除那些压电片基本上不能激发的, 可以识别大部分的自然频率。如果没有显著的压电效应, d_{31} 表示为一个特定的模式形状, 或传感器的一半表现为负应力, 而另一半表现为正应力, 而在 PZT 感应的整体电荷接近于零。在这种情况下, 参照电阻中

通过的电流是可以忽略的，图中本没有峰值显示。然而，就像前面提到的，由于模态形状的非对称特征，部分固有频率可能会出现在损伤结构评估的阻抗图中。

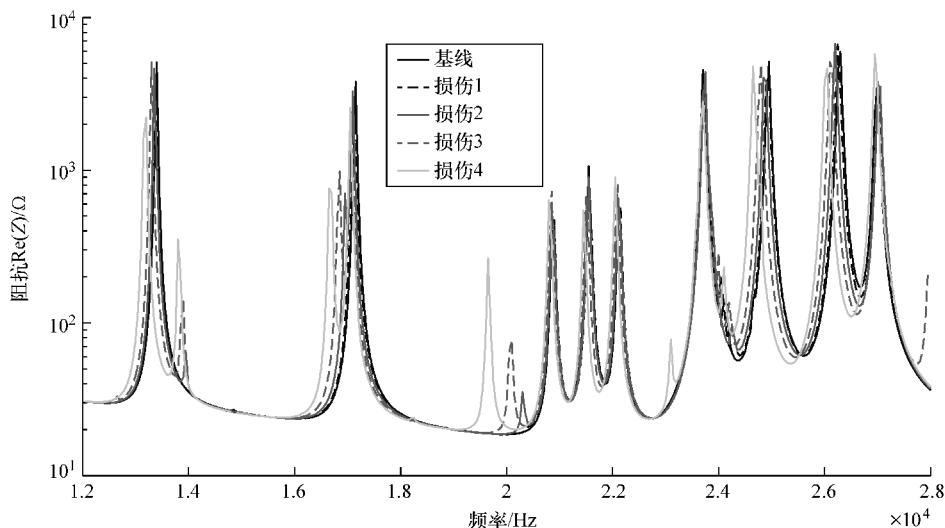


图 6.4 点频率响应函数的特写视图

仅阻抗的实部被用于计算损伤指标，因为它对初期损伤具有更高的灵敏度 (Park 等, 2003)。所有的四个之前定义的损伤指数 DI_1 、 DI_2 、 DI_3 和 DI_4 都基于图 6.3a 和 b 中表示的阻抗图，可以根据式 (6.7) ~ 式 (6.10) 计算得到。在所有的情况下，可以证明损伤尺寸大小和损伤指标值具有单调性关系，因此可以用于监测结构的损伤扩展情况（见图 6.5）。

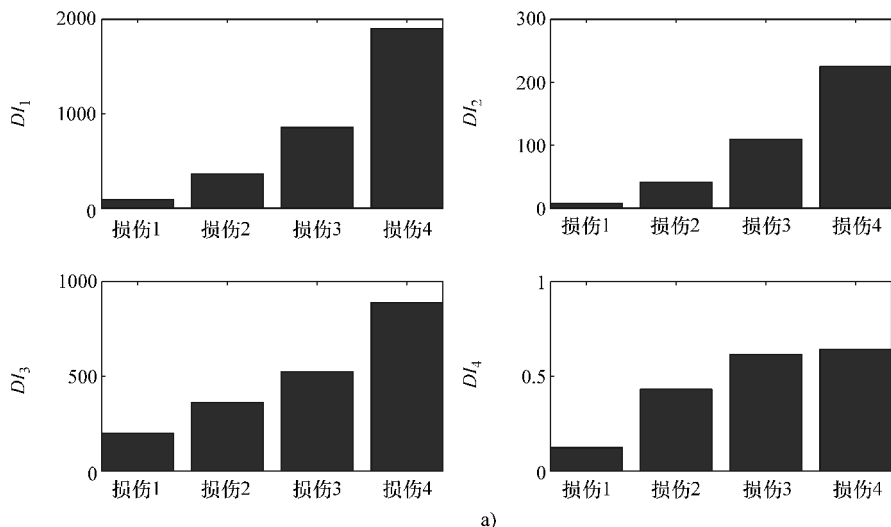


图 6.5

a) 铝梁的损伤指数的计算

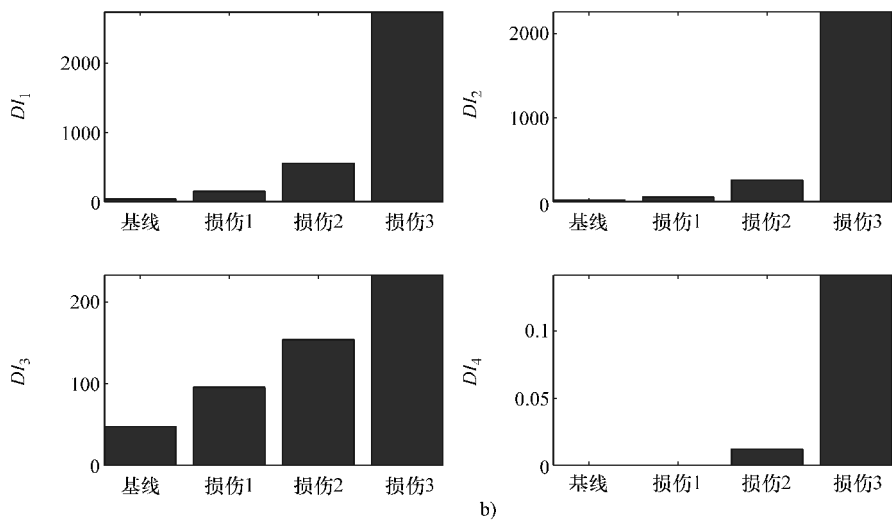


图 6.5 (续)

b) 钢梁的损伤指数的计算

通过试验验证了建模技术的精度，该建模技术用于模拟所讨论的结构动力学行为。Agilent 4395A 和 Analog Devices AD5933 的阻抗分析仪用于测量先前所描述的梁。实验获得的阻抗图与数值模拟结果比较显示：试验数据和模拟数据吻合得很好，如图 6.6a 和 b 所示。由于有限元模型完成测量后，没有被更新，可以观察到共振峰值和振幅的一些微小变化。

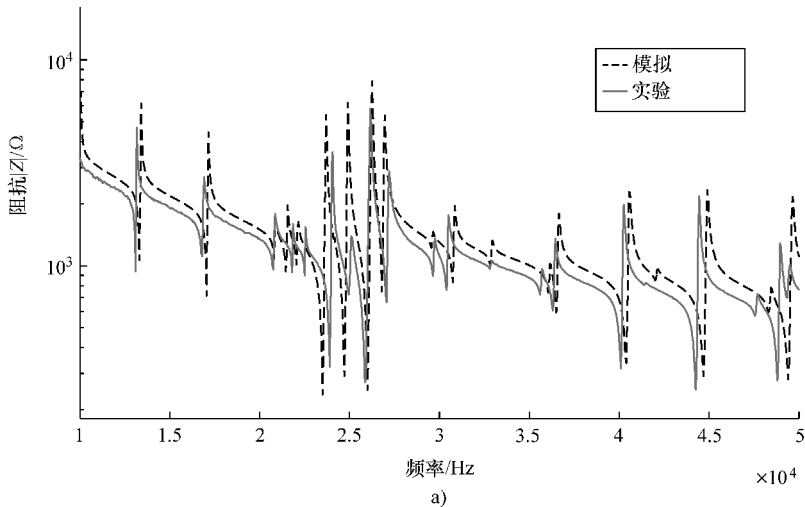


图 6.6 模拟值与实验值的比较

a) 点频率响应函数

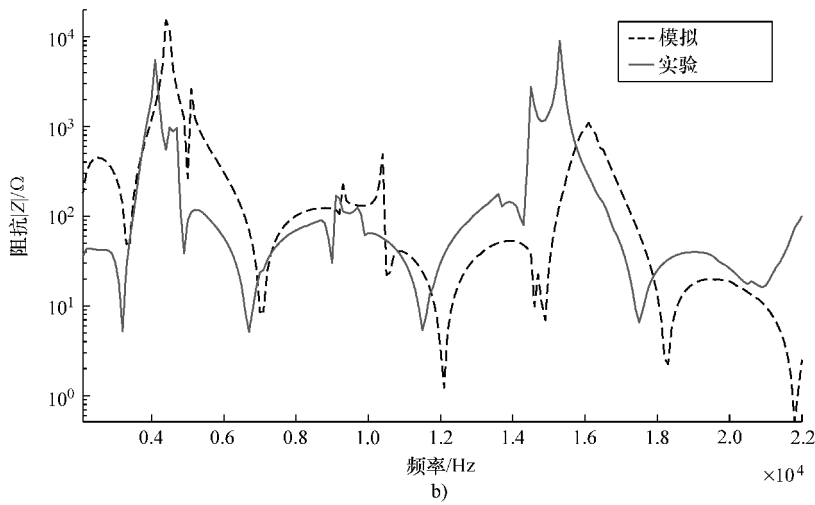


图 6.6 模拟值与实验值的比较（续）
b) 传递频率响应函数

6.3.2 不确定性和敏感性分析

为了检验阻抗特征中结构参数变化的有效性，采用蒙特卡罗方法分析了不确定性和敏感性（Rosiek 等，2010a）。选择确定的压电传感器机电性能参数和粘接剂机械性能参数作为随机输入变量。假设所有输入参数遵循正态分布，相应的平均值和标准偏差见表 6.1。

表 6.1 随机输入变量

序号	输入值	标称值	与标称值的标准偏差（%）
1	压电材料介电常数 $\varepsilon_{31}^S/\varepsilon_0$	1110	2.5
2	压电材料介电常数 $\varepsilon_{33}^S/\varepsilon_0$	852	2.5
3	压电材料密度 ρ_p (kgm^{-3})	7.76×10^3	2
4	压电材料刚度 c_{11}^E (Nm^{-2})	10.76×10^{10}	5
5	压电材料刚度 c_{12}^E (Nm^{-2})	6.31×10^{10}	5
6	压电材料刚度 c_{13}^E (Nm^{-2})	6.38×10^{10}	5
7	压电材料刚度 c_{33}^E (Nm^{-2})	10.04×10^{10}	5
8	压电材料刚度 c_{44}^E (Nm^{-2})	1.96×10^{10}	5

(续)

序号	输入值	标称值	与标称值的标准偏差 (%)
9	压电常数 e_{31} (Cm^{-2})	-9.6	5
10	压电常数 e_{33} (Cm^{-2})	15.1	5
11	压电常数 e_{15} (Cm^{-2})	12	5
12	传感器长度 l_p (m)	0.01	0.5
13	传感器宽度 w_p (m)	0.01	0.5
14	传感器厚度 h_p (m)	3×10^{-4}	5.7
15	传感器位置中心 x_p (m)	0.01	1.7
16	传感器位置中心 y_p (m)	0.008	2.1
17	胶厚度 h_a (m)	6×10^{-5}	5.5
18	胶弹性模量 E_a (Pa)	2500	2
19	胶泊松比 ν_a	0.4	2
20	胶密度 ρ_a (kgm^{-3})	1150	2

概率处理选择无损伤的铝梁有限元模型和一个带有 2mm 切口的模型，如图 6.2 所示。根据应用蒙特卡罗方法，分析包括 250 个模拟回路。采用拉丁超立方体采样技术，以使带产生样本的输入域具有更好的覆盖性，并降低计算时间 (Helton 和 Davis, 2003)。结果可以获得数值模拟点频率响应函数的散点图。机电阻抗的实部也纳入考虑之中 (见图 6.7a)。图 6.7b) 显示了带有损伤和完好梁的散点图的包络。在整个频域内，损伤结构的响应峰值偏移到更低频域的总趋势保持不变。

图 6.8 中直方图显示了四个输出参数的不确定性传播，例如损伤指标。可以看出，统计指标 DI_4 对参数的变化最不敏感。几乎所有指数的值都不超过平均值的 $\pm 20\%$ ，而对于 DI_1 和 DI_2 ，其变化程度是在平均值的 $\pm 50\%$ 左右。所有损伤指标的敏感性分析的结果如图 6.9 所示。

首先，对所有敏感性分析结果的绝对值进行了排序，然后考虑它们的符号并采集。所示排序，用于辅助确定哪些输入参数对损伤指标不确定性影响最大，反过来，可以忽略这些影响相对较小的指标。损伤指标的变动百分率与其均值的比值定义为分析显著性水平，类似地，输入参数的变动百分率与其含义值的比值。所有敏感性被定义为在响应面法应用的线性近似任务中的线性回归系数 (Myers 和 Montgomery, 1995)。

图 6.9 的参数编号对应于表 6.1。例如，参数 w_p 为 PZT 宽度，是所有损伤指标中最有影响力的参数。该观察结果可以由梁宽度和传感器之间的微小差异解释。

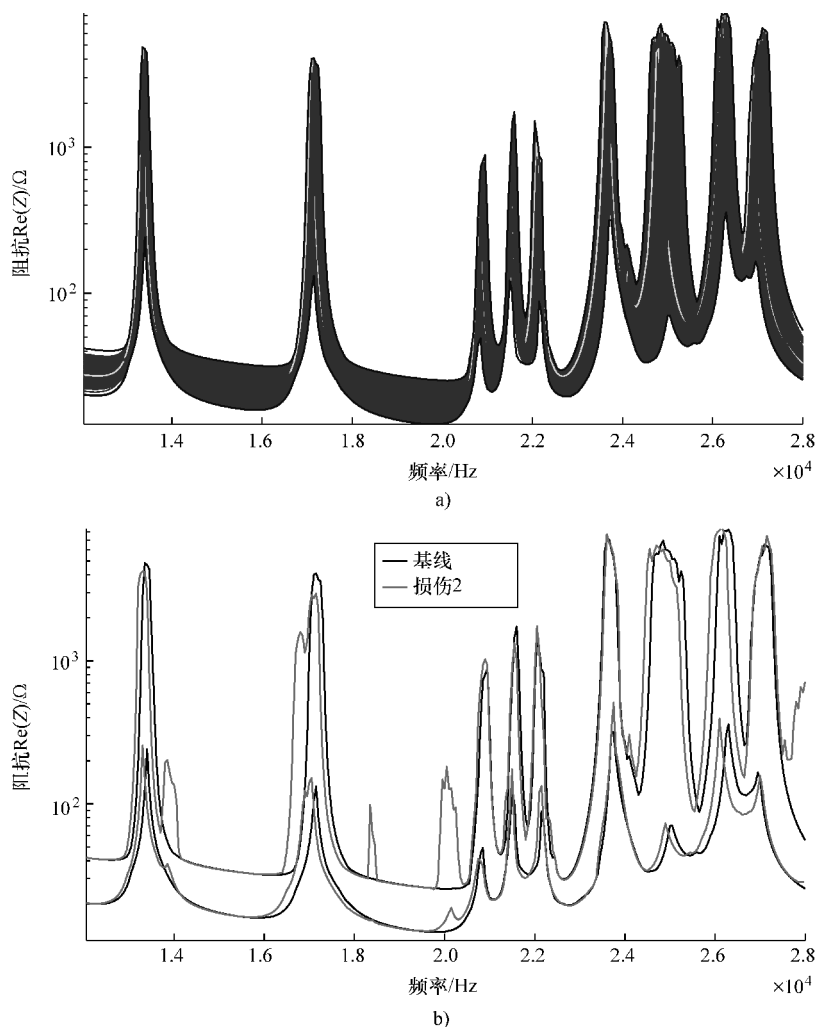


图 6.7

a) 获得的完好模型阻抗散点图 b) 损伤结构和完好结构的包络图

PZT 几乎覆盖了它所放置位置的整个梁的横截面。即便参数 w_p 变化很小比例，都可能会引起正态模式、固有频率和最终的机电阻抗值很大的变化。例如对于 y_p 参数——描述传感器定位的参数——的情况，可以推导出类似的结论。一组较小的敏感性特征的参数表示材料性能。据已发表的不确定性分析研究，发现敏感性最小绝对值可以从统计损伤指数 DI_4 得出。在损伤指标 DI_4 的情况下，发现率的绝对值小于 3，而在其他指标的情况下，它们的值增加到 10。

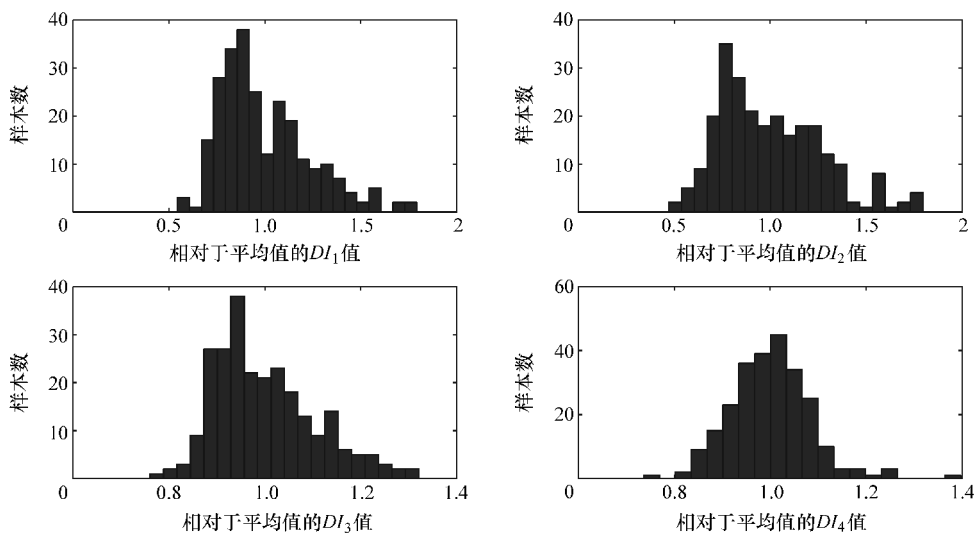


图 6.8 损伤指标的直方图

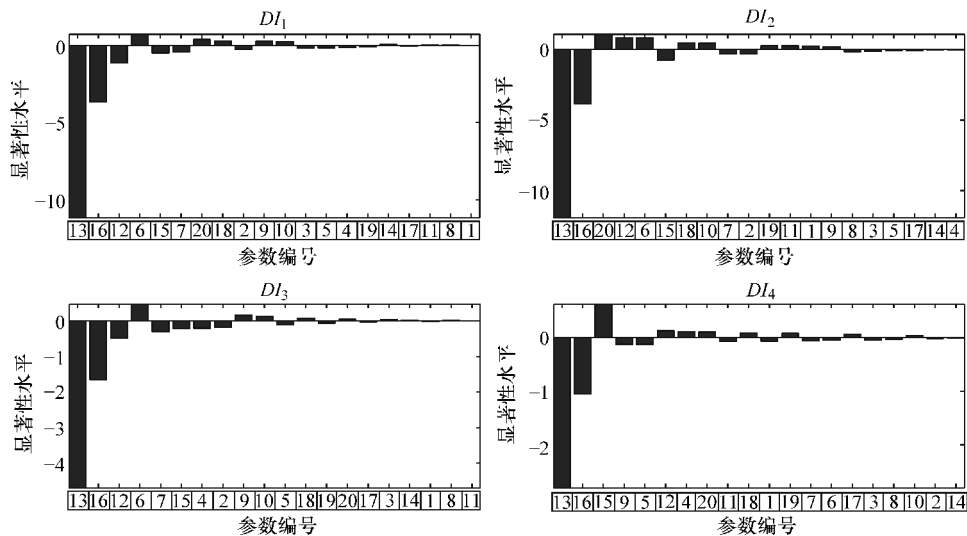


图 6.9 损伤指标的敏感性曲线

6.3.3 讨论

本章讨论的有限元模型模拟压电系统的动力学行为的可用性。详细阐述带有 PZT 的简支梁的有限元模型，并进行了耦合模拟。数值模拟的结果证明：所考虑的建模技术是适合于模拟机械结构机电与所粘贴 PZT 的相互机电作用。通过使用有限元法可以重现结构中损伤逐渐增长引起的阻抗特性的变化。有限元法也可用于发现哪种类型的模态形状对阻抗特性产生最大的影响。接下来将讨论，机电阻抗 SHM 系统的鲁棒性设计问题。

针对系统中不同机电参数的 PZT，使用蒙特卡罗方法评价阻抗和损伤指标的散点图以进行不确定性和敏感性分析，在确定性分析的情况下，发现了损伤尺寸大小和损伤指标值之间的单调性关系。在所有参数中，只有几何相关的参数在损伤指标的变化中作用最为显著。所得到的结果可用于基于阻抗监测的系统中，以改善校准程序。

6.4 先进 SHM 系统

基于理论性思考，波兰的 AGH 科技大学（克拉科夫）开发了结合机电阻抗原理的 SHM 系统。所设计的系统具有模块化架构，对不同的应用领域具有通用性，例如，民用、工业监测、海洋或航空航天结构等领域。

系统的整个结构如图 6.10 所示。该系统由数据采集单元（DAU）、基站和一个与控制面板连接的服务器系统组成。DAU 和基站放置在所监测结构的区域附近。DAU 的主要任务是通过已安装的 PZT 检查被监测结构的状况。集中在 DAU 的数据发送到基站，或通过有线或无线网络直接连接到系统服务器。所有的信息都存储在系统服务器中，并可以在控制面板中实时获取。控制面板为已安装 SHM 系统的移动电脑或台式机，并可以接入到互联网。整个系统的配置设置可以由远程操作实现。测量可以根据设定的时间间隔触发自动，或通过控制面板手动实现。该系统的主要组成是 DAU，如图 6.11a 所示。所示硬件起到传感器节点的作用，并可以用于查询和寄存结构的阻抗特性。DAU 具有能够对所测得的阻抗特性进行预处理的功能，并可以计算损伤指标值和评价监测结构的状态。传感器节点收集到的信息可以事后发送到主单元，例如，航空电子系统的飞机或外部基站，如图 6.11b 所示。设计的

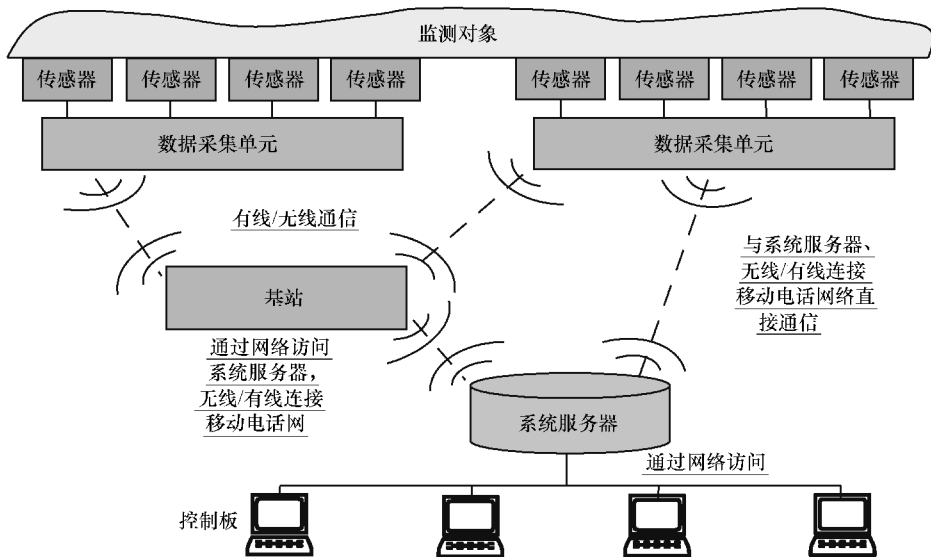


图 6.10 开发的 SHM 系统的结构



图 6.11

a) 数据采集单元 b) 基站

DAU 具有在高达 100kHz 的频率范围内, 寄存 16 个压电传感器的阻抗特征码的能力。该系统的设计既可以测量单传感器 (自感驱动) 的点频率响应函数, 也可以测量结构上所安装的传感器中, 任意两个传感器之间的传递频率响应函数 (Rosiek 等, 2011a, b)。传感器节点可独立操作, 也可被组合在网络中。DAU 的主要硬件电路板可以配备一个基于 ARM7 处理器的额外处理模块, 以提高系统的整体计算能力。通过附件的温度和湿度传感器, DAU 可以评估环境条件。上述两个参数的变化应进行评估, 因为它对机电阻抗频率特性的确定影响显著 (Park 等, 1999)。在该系统中, 有几种可选的有线或无线传输技术, 可以用于所有系统组件之间的数据传输。根据所选择的通信技术, 各种通信模块可以很容易地更换。DAU 和基站之间的通信技术可以通过以下几种方式实现: 无线 (ZigBee 和 WiFi)、有线连接和以太网协议。基站与系统服务器之间的数据连接也可以通过有线, 例如通过互联网, 或者通过移动电话网络基站 (GSM 技术)。对于应用程序而言, DAU 和系统服务器之间通过直接通信, 即应用程序不需要基站, 适用的通信技术与前面提到的用于在基站与系统服务器之间的连接是一样的。DAU 可以单独工作或创建一个网络。对于每个不同的通信方式, DAU 用于连接和发送一个数据包 (2213B) 所需时间的近似功耗都列于表 6.2 中。所收集的数据可以被存储在 SQL 数据库中, 已进行进一步的评估。可以通过所开发的专用软件访问所采集数据和远程监测系统的要素配置参数。软件的图形用户界面, 如图 6.12 所示。

开发的系统受环境条件限制很小: 在温度范围 $-40 \sim +85^{\circ}\text{C}$ (系统在 $-20 \sim +50^{\circ}\text{C}$ 下配备了附加的高容量蓄电池), 湿度可以达到 100%。工业应用需要增加封装保护外壳, 并确保保护外壳是符合 IP66 防护级别。外壳盒所有电线插座绝缘。DAU 附带选配有光伏板的蓄电池, 用于延长不间断的工作周期。其他系统组件是由外部电压 230V/50Hz 供电。基站配备有不间断电源。DAU 用于测量时, 需要校准, 以评价阻抗的真实值。然而, 所使用的监测技术是基于健康和退化结构固有特征的相对变化。如果 DAU 设定保持不变, 则该校准过程可以被省略, 并且可以比较装置的原始数据, 以计算损坏指标。认为是无量纲量的阻抗特性仍然可以被用来

计算损伤指数和执行的结构状态的评估。

表 6.2 功耗和数据传输时间

传输介质	功耗/W	传输时间/s
WiFi 以太网	5.5	< 1
ZigBee	1	60
GSM – GPRS	3	5
以太网（有线）	4.5	< 1

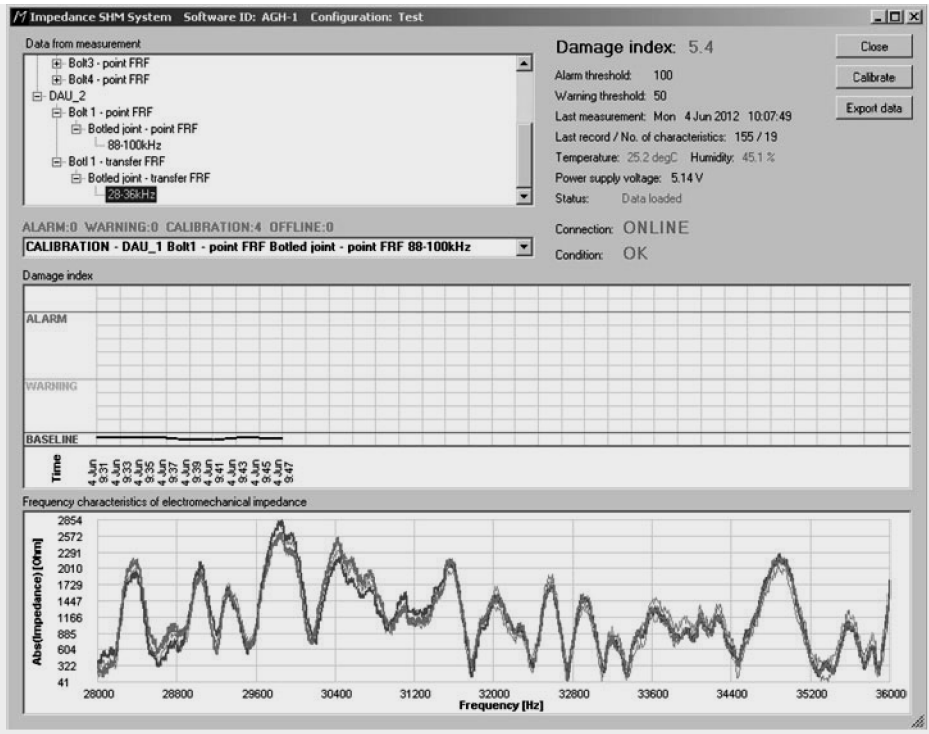


图 6.12 用于获取和处理测量数据的专用软件

6.5 实验室测试

为验证先进监测系统的特性，在实验室条件下进行一系列试验。该试验测量了带有不同类型损伤的不同类型结构的机电阻抗。

6.5.1 板结构试验

用于测试的第一个结构是一个自由悬挂的铝板，带有 4 个 PIC151 材料（PI 陶瓷）制成的压电片，由环氧树脂胶固定粘接（Rosiek 等，2011a）。测试对象的尺寸和损伤位置如图 6.13a 所示，试样如图 6.13b 所示。试验考虑了结构中两个位置存在损坏的情况。在第一种情况下，损伤与距传感器的距离相等。在第二种情况下，损伤移向 PZT4。额外的质量和刚度用于模拟结构损伤。将两种不同尺寸的厚

钢垫圈用蜡黏结在结构上,以改变结构动力学性质的局部变化。绘出未损伤结构的两组基线,以检查试验的可重复性,并确定损伤指标的初始值。接着,结构上引入损伤,并重复在相同的频率范围内测量。试验的结果是一组机电阻抗曲线。对作为执行器和传感器的 PZT 的点频率响应函数和传递频率响应函数进行了评估。试验测量的频率范围为 24~28kHz,以 10Hz 步长逐级增加。相对小的频率步长,用以确保测量具有足够的分辨率,由于该结构所选择的高频范围内具有高模态密度。

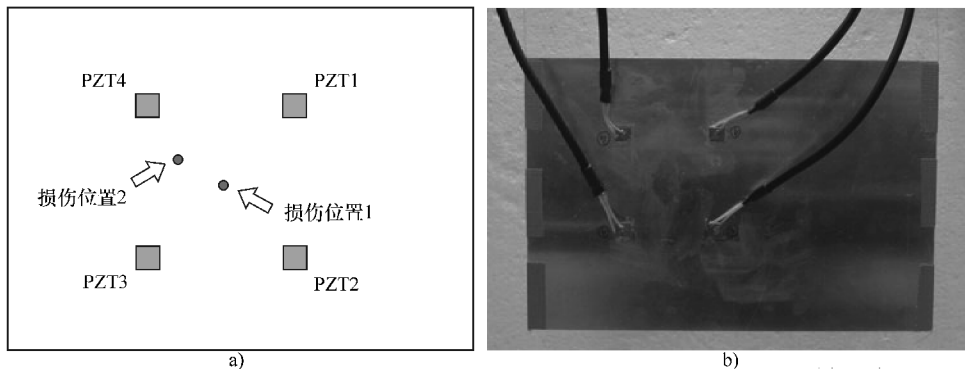


图 6.13

a) 监测结构尺寸与损伤位置 b) 检验样本

对于 PZT1 和 PZT3 的点频率响应函数的数据作为示范结果,分别如图 6.14a 和 b 所示。它可以看出,损伤的存在,将导致共振峰的偏移,以及它们的振幅的变化。对于置于位置 1 处的损伤,在所记录的阻抗数据的基础上计算得出的度量指标值如图 6.15 所示。获得了所有的损伤尺寸和 PZT 的 DI 值之间的单调关系。在第二种损伤位置的情况下,计算出不同尺寸的损伤指标之间的比例仍然相似。所选择用于评估传递频率响应函数数据的阻抗图如图 6.16 所示。与损伤位置 2 对应的 DI 如图 6.17 所示。

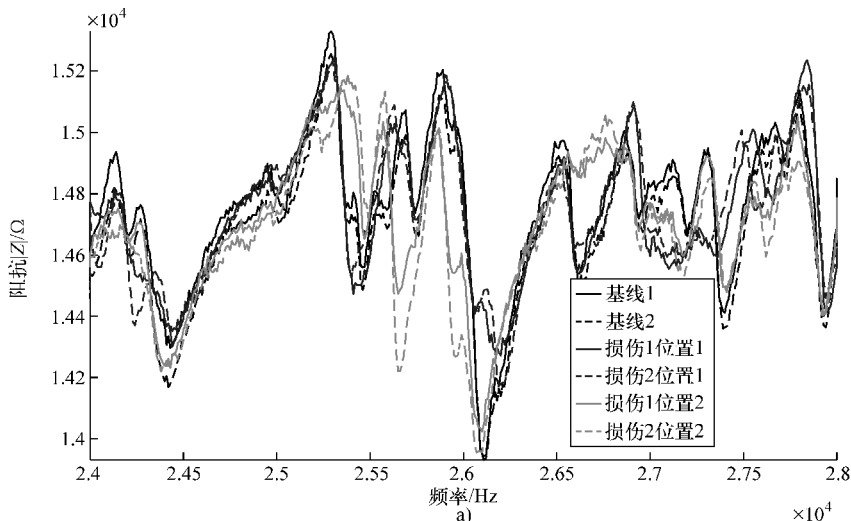


图 6.14 铝板的点频率响应函数

a) PZT1

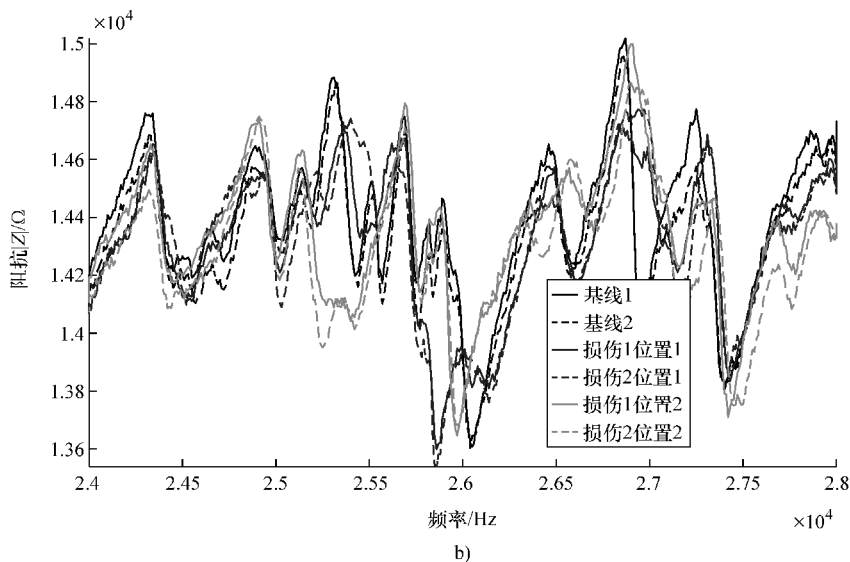


图 6.14 铝板的点频率响应函数 (续)

b) PZT3

在所有考虑的情况下，观察到统计指标 DI_4 最能体现的损伤大小之间的差异。同时，对于传递频率响应函数的情况，发现阻抗基准信号具有更好的重复性。根据所得到的实验结果，可以得出结论，基于阻抗测试的 SHM 可以探测机械结构中损伤的存在，并跟踪其生长。

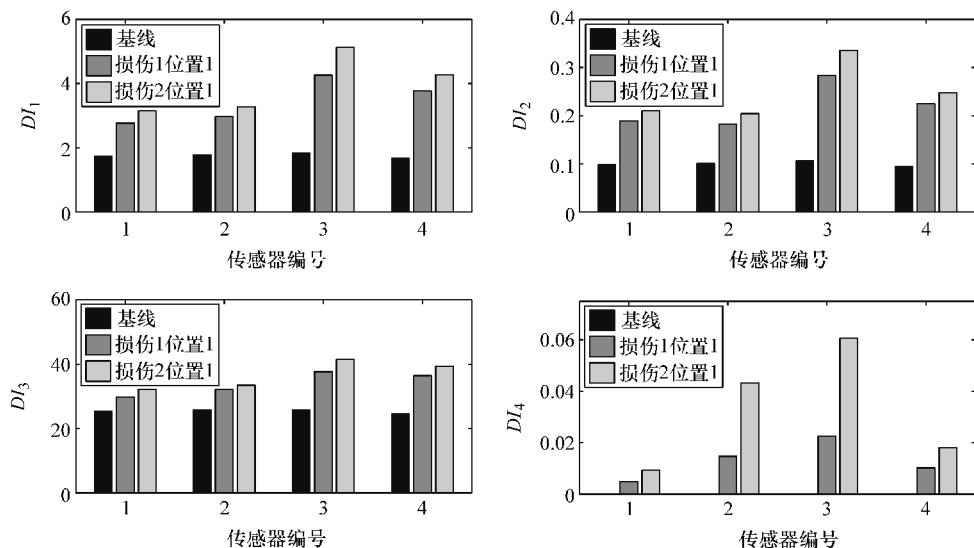


图 6.15 基于点频率响应函数的铝板损伤指标：损伤位置 1

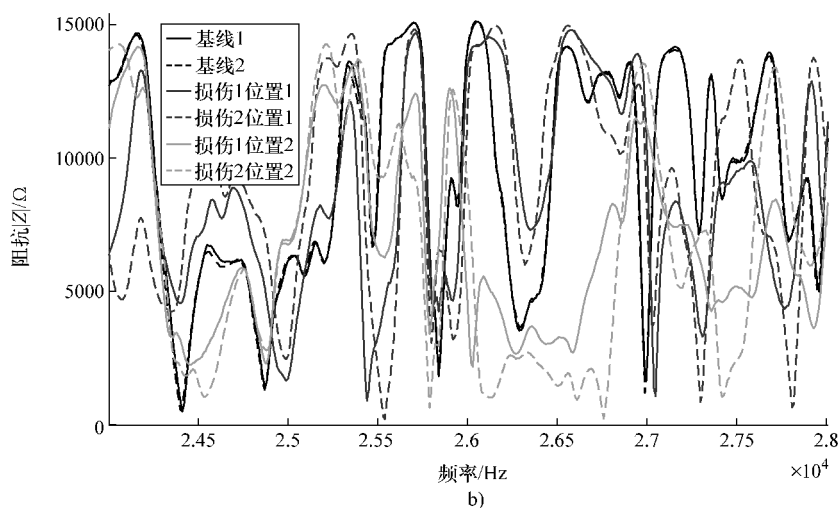
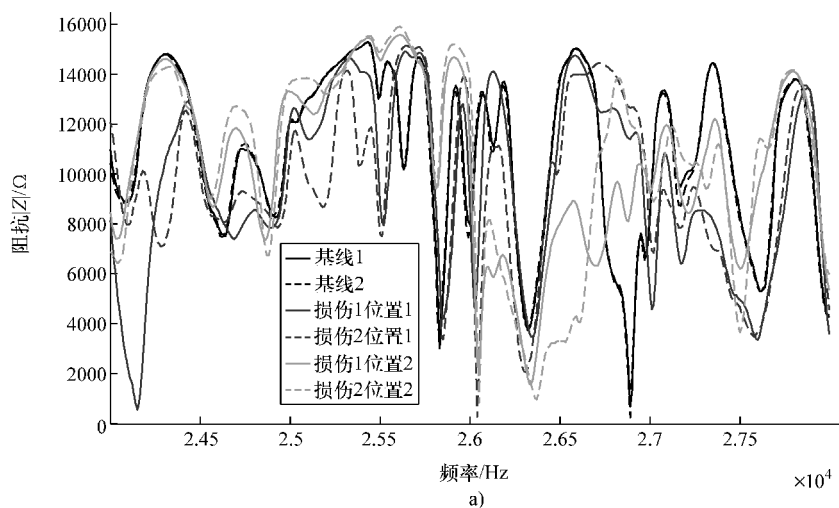


图 6.16 铝板传递频率响应函数

a) PZT2 b) PZT4

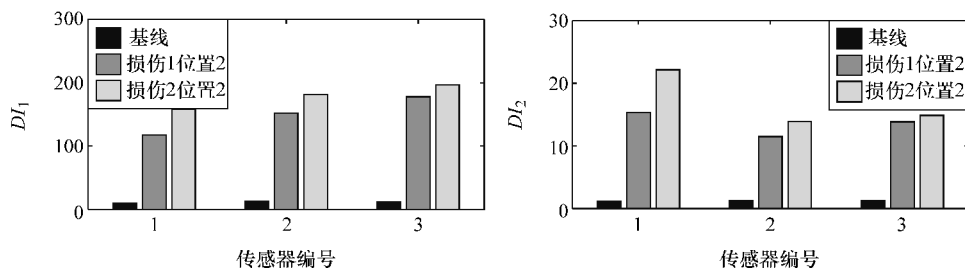


图 6.17 基于传递频率响应函数计算的铝板的损伤指标：损伤位置 2

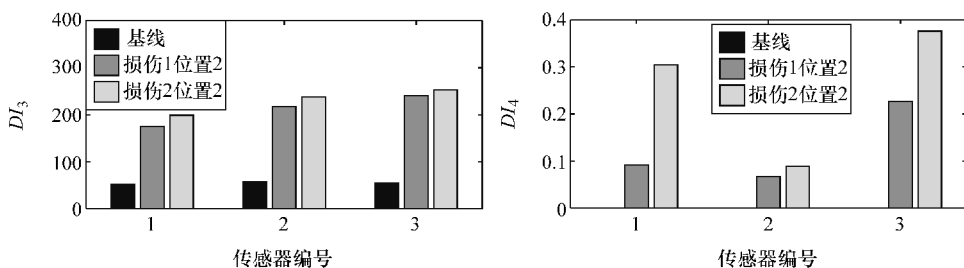


图 6.17 基于传递频率响应函数计算的铝板的损伤指标：损伤位置 2（续）

6.5.2 管道截面的状态监测

用于损伤探测实验的对象是一段管道，用四个螺钉和螺母联接（见图 6.18）（Rosiek 等，2011b）。以验证该实验系统可以探测螺钉与螺栓接头联接松动的能力。测试对象是配备一种特殊类型的钢垫圈，螺钉头、管道法兰和螺钉之间放置与结构粘接的压电传感器。这种方法最早由 Mascarenas 等（2007）提出。

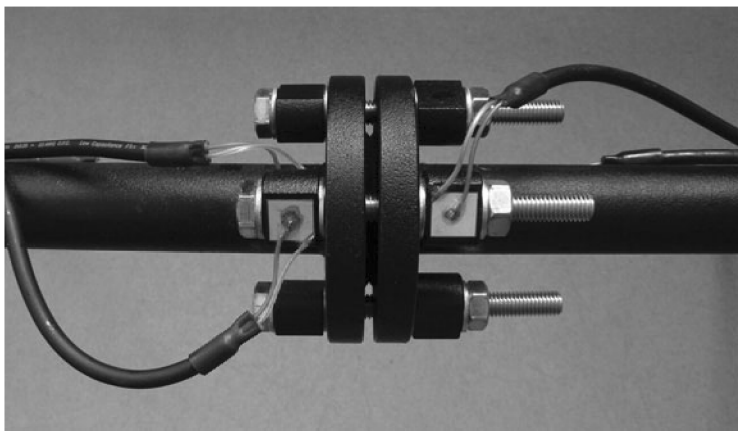


图 6.18 由钢垫圈连接的管道段，螺栓上安装压电片

完成评估基线阻抗曲线后，松开结构中的一个螺钉，以引入了结构中的损伤。首先，所有联接到管道元件的四个螺钉被 $20\text{N} \cdot \text{m}$ 的力矩拧紧。这种情况被作为对于该损伤指标的初始值进行评价的基线数据。随后，将其中一个螺栓松开并重新拧紧至 $15\text{N} \cdot \text{m}$ ，对应于所述第一种损伤的情况。 $10\text{N} \cdot \text{m}$ 扭矩的情况，重复了该过程（第二种损伤情况）。测试了所有的点和传递频率响应函数（FRF）。

点频率响应函数（FRF）的测量结果如图 6.19a 所示。该测量在有限的频率范围内进行： $80 \sim 100\text{kHz}$ ，这主要是由于只有超过 80kHz 阻抗特征中存在显著峰。阻抗图由传递频率响应函数曲线获得，如图 6.19b 所示，该测量的频率范围为 $30 \sim$

80kHz。图 6. 20a 和 b 分别为基于跨点频率响应函数和传递响应函数计算的损伤指标。

可以看出，结构中螺栓松动引起的共振峰的振幅和频率的巨大变化，可以在阻抗图明显观察到（见图 6. 19）。

损伤的存在导致共振峰向较低的频率偏移，并使得幅值大幅变化。在所有情况下，有可能发现缺陷的大小和损伤指标值之间的单调关系（见图 6. 20）。

在所有分析指标中，指数 DI_4 被认为是最有效的， DI_4 是基于统计参数，并以完好结构的最小初始值为特征。

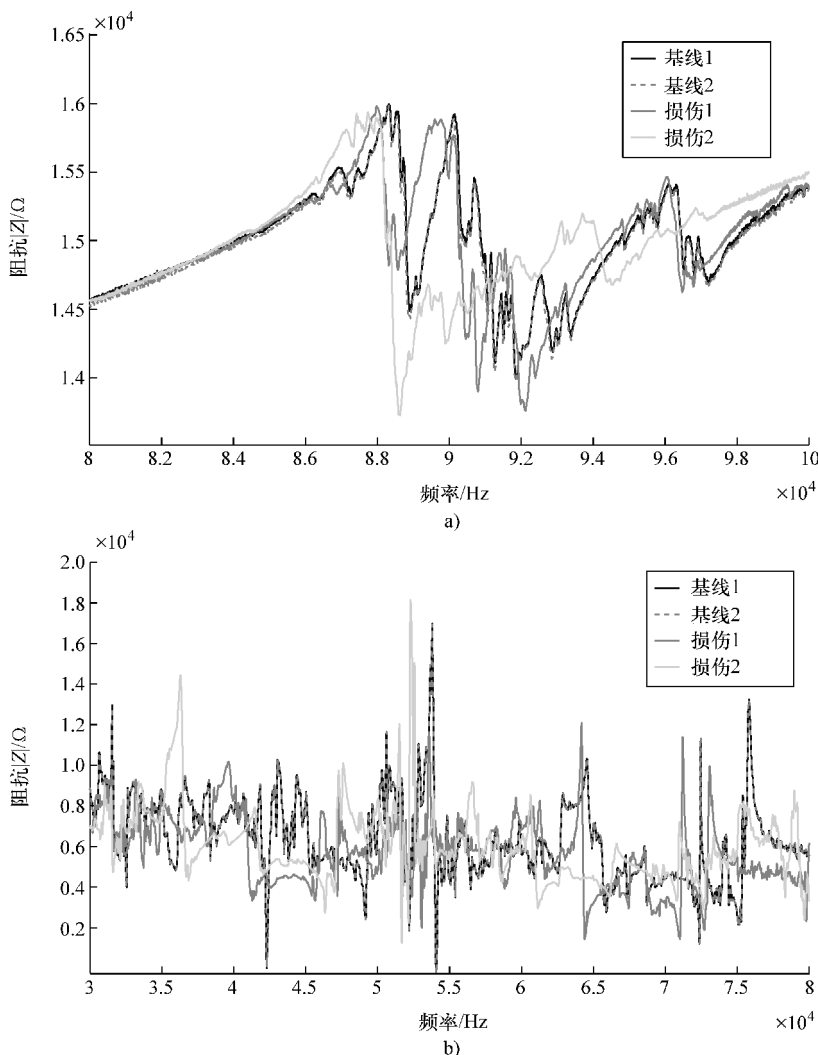


图 6. 19 所测量管道的阻抗曲线

a) 点频率响应函数 b) 传递频率响应函数

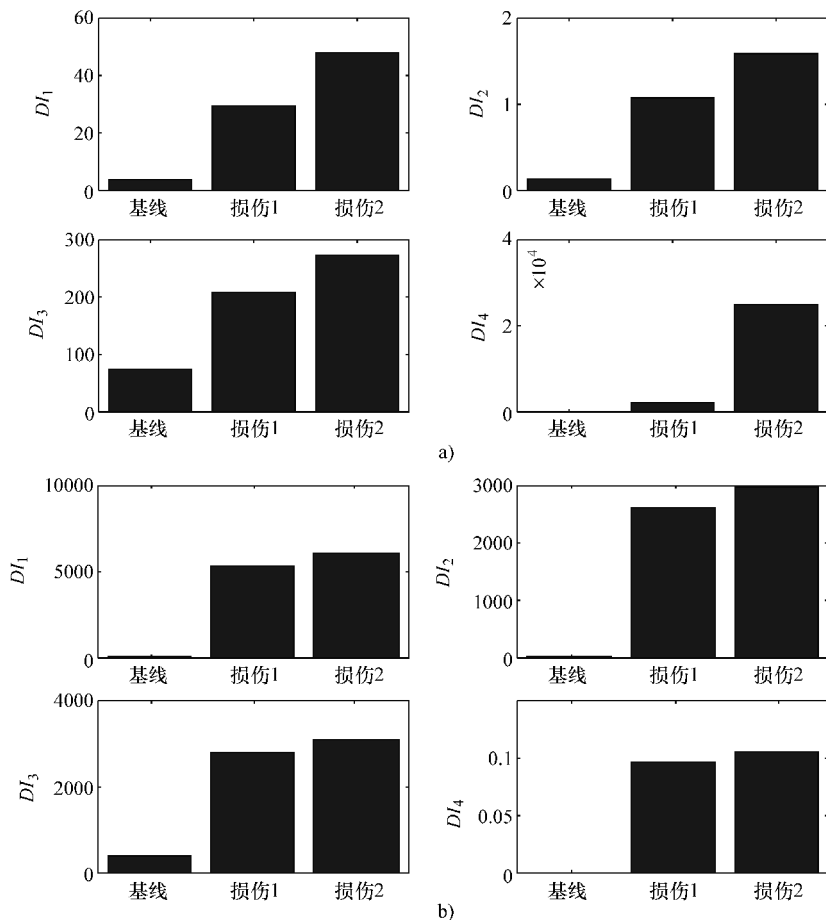


图 6.20 管道段的损伤指标

a) 基于点频率响应函数 b) 基于传递频率响应函数

6.5.3 讨论

基于铝板进行的实验结果表明：所描述的测量方法对初期的和不断增长的损伤是敏感的。由于本身的特性，以阻抗为基础的 SHM 是一个很有前途的技术，尤其是针对机械结构的局部监测。管道段的试验结果进一步证实：阻抗法具有探测螺钉在接头松动的能力。应当注意到，机电阻抗测量方法主要可以提供损伤的定性评估。损伤的产生可以被探测和跟踪，但是，所得到的结果不能进行损伤定位。应该注意到，由于发生较大的结构性变化，对比较大的缺陷（例如缺少螺钉），即使是最好的损伤指标，也可能是无效的。

6.6 飞机结构应用验证

为了评价该先进 SHM 系统来探测飞机结构损坏的可行性，在一架退役的喷气飞机上进行了一系列的测试试验。下面所述的测量实验包含两个不同飞机的两种不同类型机身元件的连接（Rosiek 等，2012）。

6.6.1 主起落架舱螺栓联接的监测

结构的监测部分是喷气战斗机的机身主起落架舱的螺栓联接（见图 6.21a）。四个圆形压电陶瓷贴片，每个直径为 15mm，用环氧胶粘接到结构上。被监测的螺栓如图 6.21b 所示，分别标记为 S1、S2 和 S3，PZT 的标记分别为 P1、P2、P3 和 P4。



图 6.21

a) 机身监测区域 b) 粘接在主起落架舱的 PZT

在进行测量前，所有的四个螺钉都由扭矩扳手拧紧到 $25\text{ N} \cdot \text{m}$ 的力矩。针对所考虑的结构特点，选择传感器节点的电路设置和选定一组基准阻抗曲线。所得到的结果，对应于螺栓联接的健康状态，用于计算损伤指标的初始值。此后，在结构中引入损伤，主要方案如下：

- 损伤 1：螺钉 S2 被松开并重新拧紧扭矩 $15\text{ N} \cdot \text{m}$ 。
- 损伤 2：螺钉 S2 被完全松开。
- 损伤 3：螺钉 S3 被完全松开。

对应不同的损伤情况下，所有拧紧力矩的值列于表 6.3。

用于测试结构的点频率响应函数的频率范围为 $20 \sim 60\text{ kHz}$ （见图 6.22a），传递频率响应函数的测量频率范围为 $20 \sim 52\text{ kHz}$ 和 $52 \sim 100\text{ kHz}$ （见图 6.22b，第一频率范围中得到的阻抗曲线）。损伤的萌生导致阻抗曲线形状发生垂直偏移，但是整体形状并没有显著改变。对于点频率响应函数情况，这样的现象是特别明显的（见图 6.22a）。损伤的增长引起了共振峰值水平偏移和新出现的峰值。由于超限损伤 3 引起的结构的巨大变化，传递频率响应函数可以明显观察到（完全松开螺栓 S2 和 S3）。

表 6.3 不同损伤情况下，拧紧力矩值

损伤情况	螺栓 S1/N · m	螺栓 S2/N · m	螺栓 S3/N · m
没有损伤	25	25	25
损伤 1	25	15	25
损伤 2	25	0	25
损伤 3	25	0	0

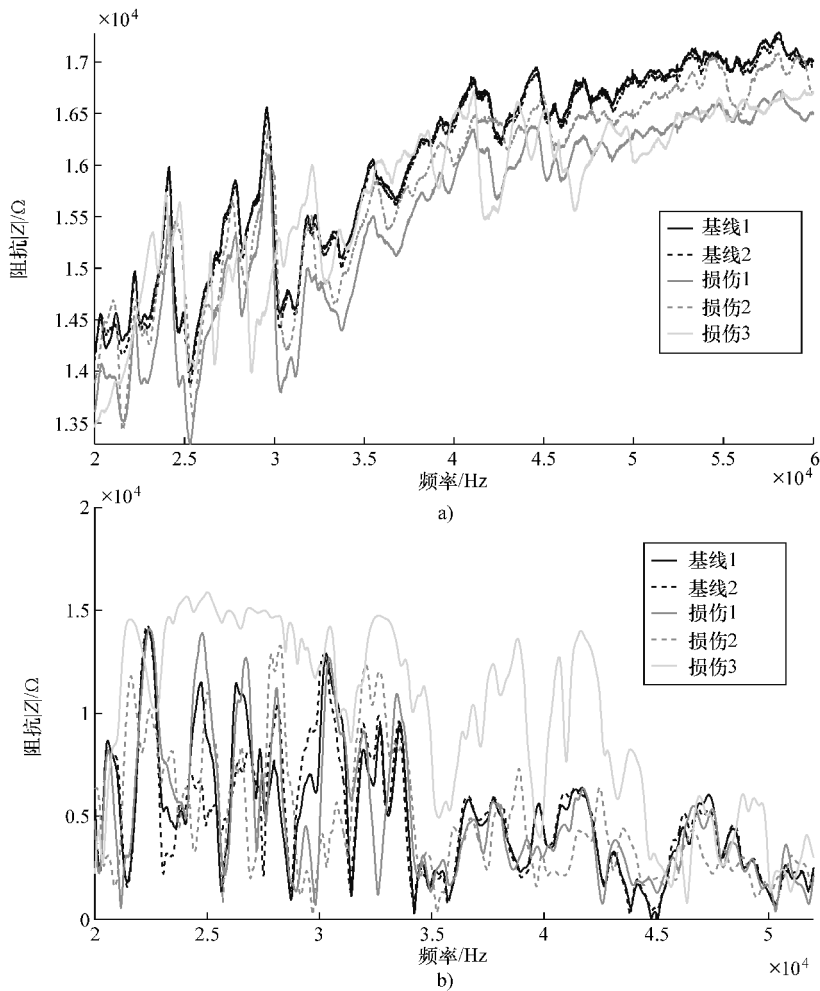


图 6.22 机身连接获得阻抗曲线

a) 由 P4 执行器/传感器测量得到的点频率响应函数

b) 由 P3 执行器、P4 传感器测量得到的传递频率响应函数

此外，传递频率响应函数的主要特征有：更高的信号动态，更好的重复性和比点频率响应函数更好的信噪比，如图 6.22b 所示。

如图 6.23、图 6.24 和图 6.25 所示的条形图，显示应用损伤指标的值（见式 (6.7) ~ 式 (6.10)），损伤指标的值基于测量的点频率响应函数和传递频率响应

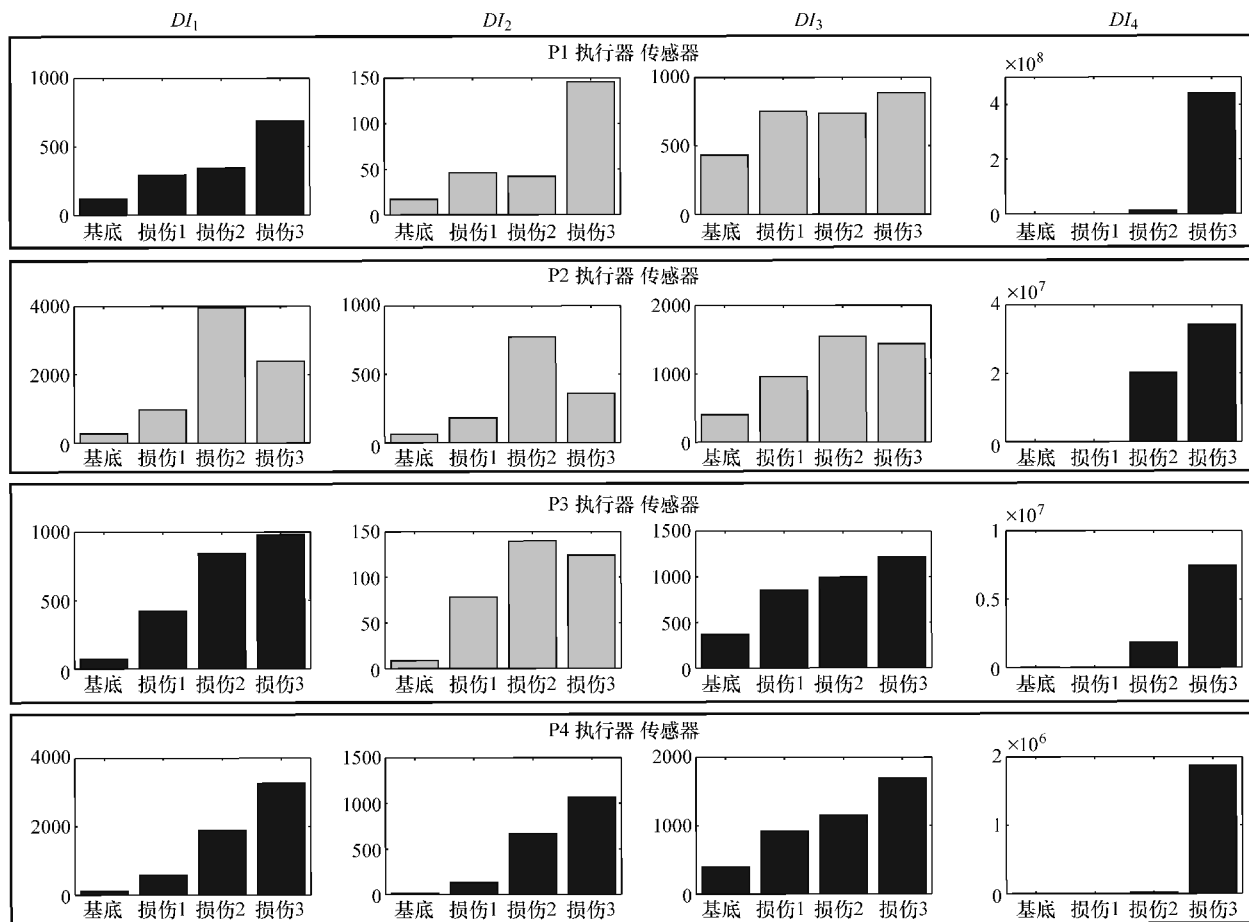


图 6.23 基于点频率响应函数的损伤指标，频率范围：20 ~ 60kHz

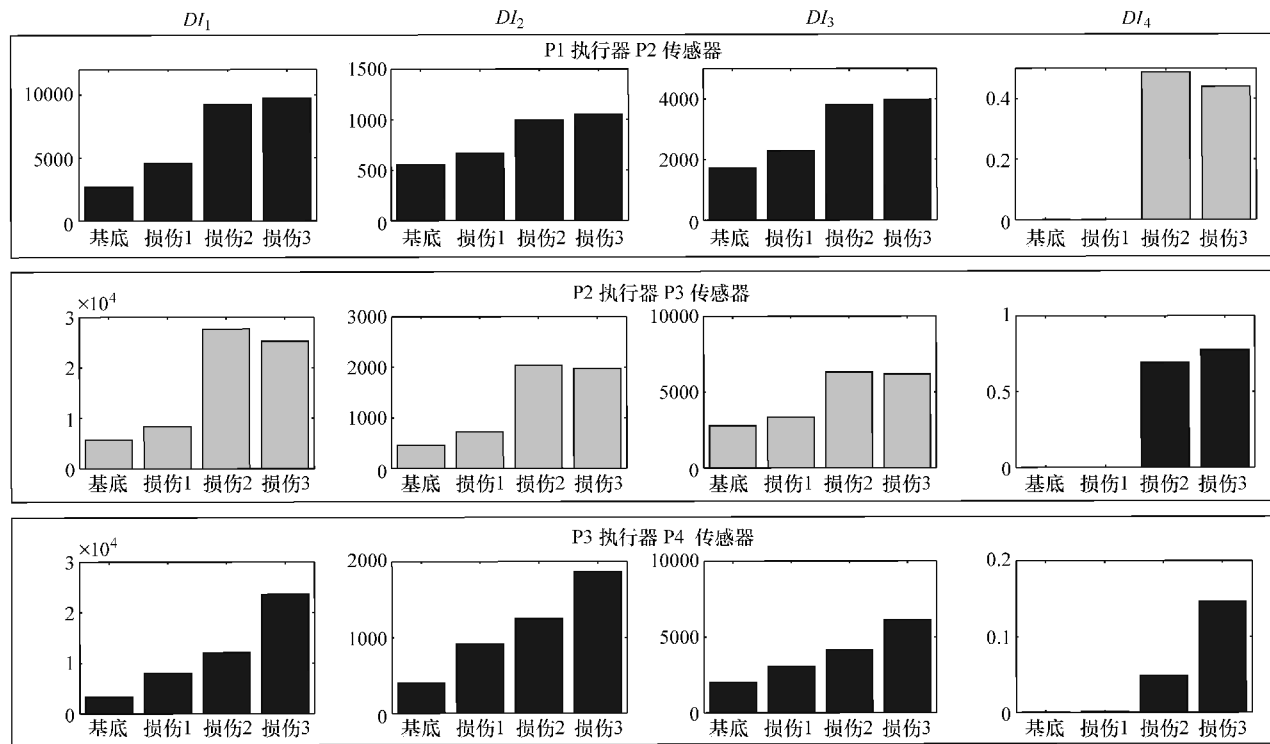


图 6.24 基于传递频率响应函数的损伤指标，频率范围：20 ~ 52kHz

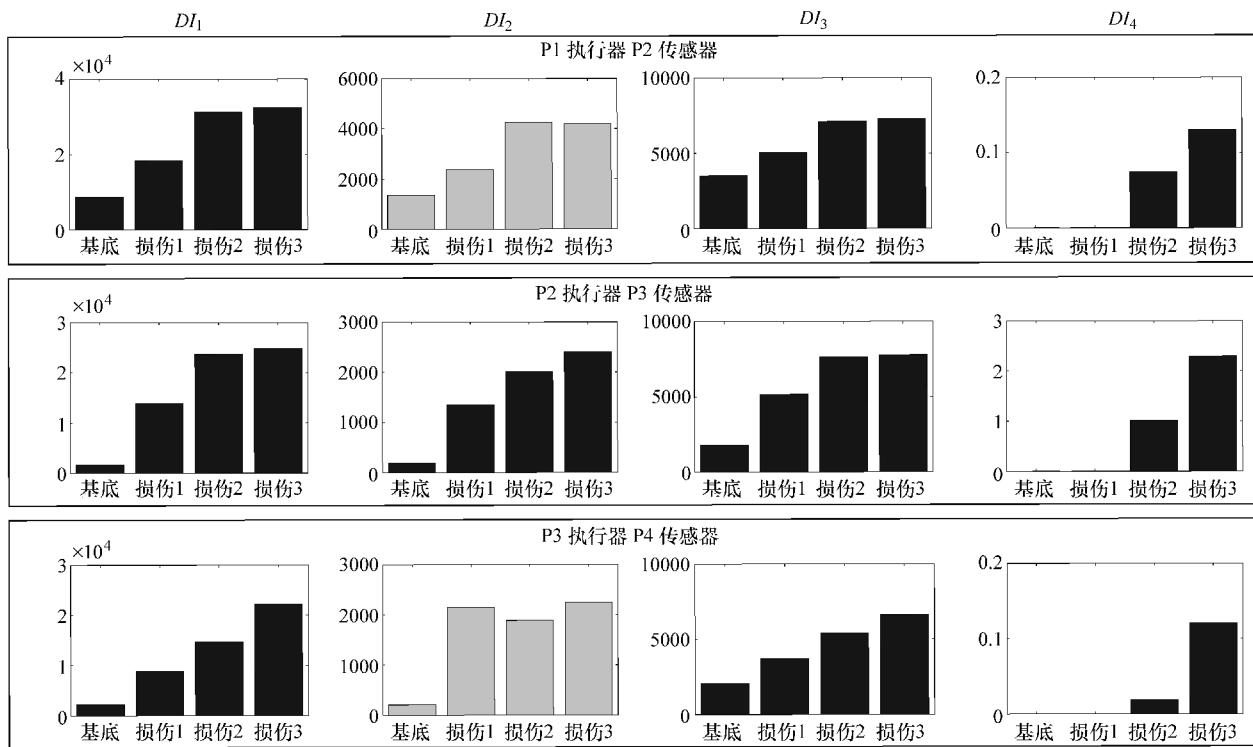


图 6.25 基于传递频率响应函数的损伤指标, 频率范围: 52 ~ 100kHz

函数的计算得出。确定了损伤的指数值和损伤大小之间的单调关系，条形图则显示为深色阴影。所获得的结果表明，损伤定位仍然难以确定，这是由于螺栓在结构上密集排列，一个螺栓的松动增加了损伤指标值。从这可以得出结论：在如图 6. 21 所标记的区域监测，可能需要较少的压电元件。

统计指标 DI_4 被证明对远处的损伤，以及在初始阶段的损伤最不敏感。另一个可能影响损伤评估过程的重要因素是试验环境。该测量过程是在室温条件下，温度变化较大，这可能影响所获得的阻抗特征。

6. 6. 2 铆接机身面板监测

第二个测试对象是一个训练喷气飞机的发动机铆接壳体的一部分（见图 6. 26a）。如图 6. 26b 所示的结构节点为研究的对象。两个 MFC 为 d31 型 PZT，如图 6. 27a 中 P1 和 P2 所标示，粘接在被监测区域的附近。三个铆钉，如图 6. 27b 中 R1、R2 和 R3 所标示，铆钉上预置缺口以模拟疲劳裂纹。

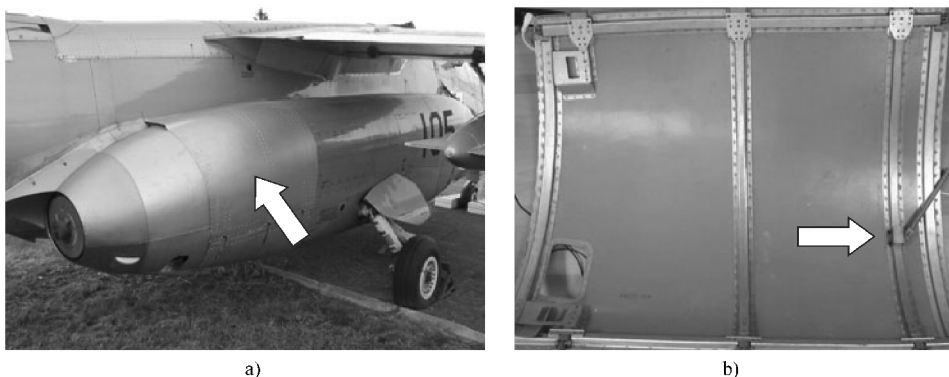


图 6. 26

a) 飞机的监测部件 b) 所监测发动机壳体的内部

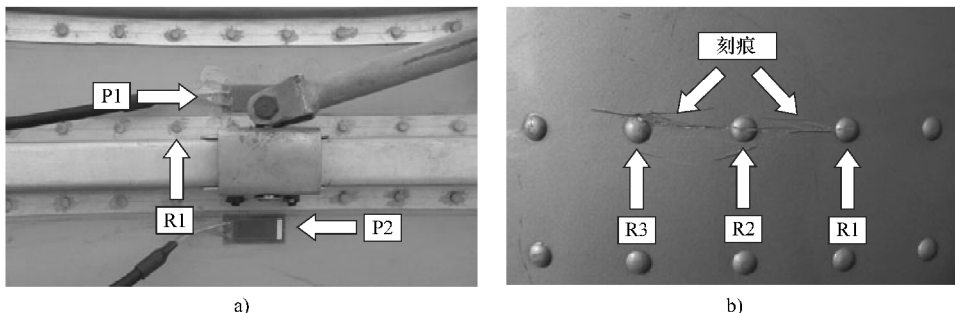


图 6. 27 发动机外壳的特写视图

a) 安装有可见 MFC 传感器的发动机外壳内侧 b) 发动机外壳内侧，铆钉之间的可见切口

所假设的损伤情况如下：

- 损伤 1：铆钉 R2 和 R3 之间用锋利的工具制作缺口。

- 损伤2：铆钉 R2 和 R3 之间缺口进一步加深。
- 损伤3：铆钉 R1 和 R2 之间用锋利的工具制作出缺口。

由于在点阻抗特征中缺乏共振峰，实验过程中只记载了传递特征。在此试验设计中，传感器 P1 用来激励结构，P2 被用作传感器。

进行试验测量的频率范围为 30 ~ 100kHz。图 6.28a 为完好和损坏的结构传递频率响应函数（FRF），从图中可以观察到共振峰幅值的显著变化。对于计算出的损伤指标值，可以观察到其随着损伤的发展而增加（见图 6.28b）。从结果可以发现，对于确定性的指标 DI_1 、 DI_2 和 DI_3 ，相对于铆钉 R2 和 R3 之间的缺口不断加深，增量变化最为显著。

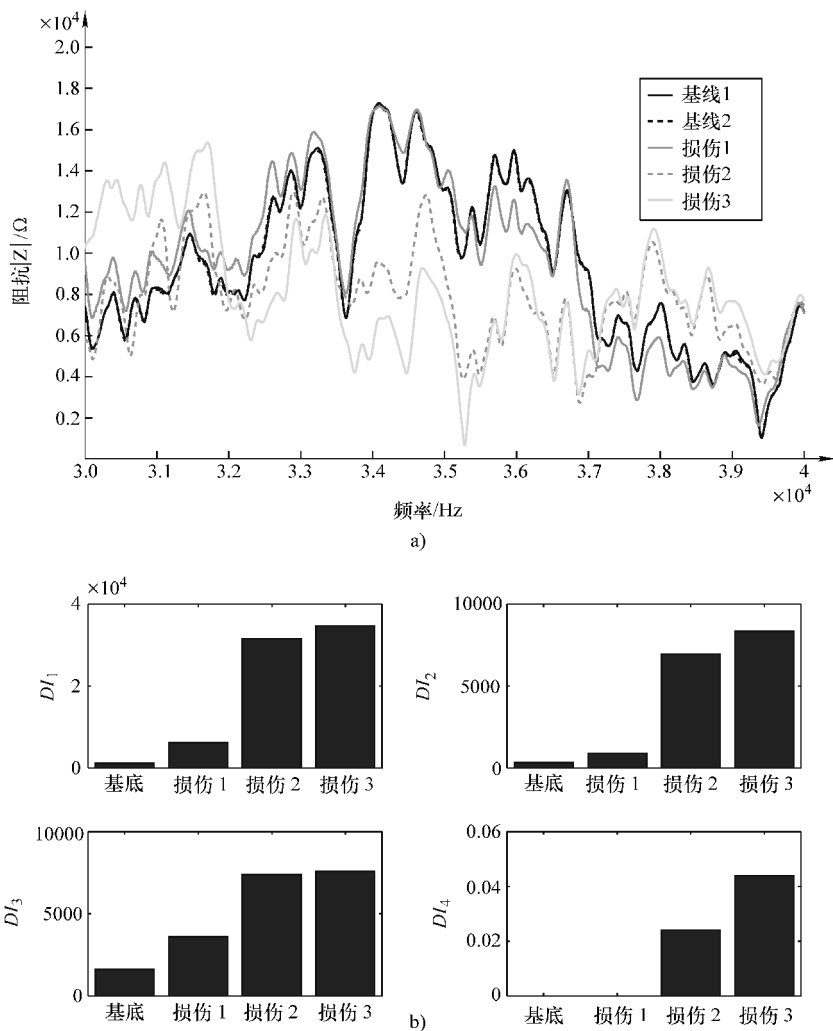


图 6.28

a) 发动机壳的传递频率响应函数 b) 损伤指标

统计损伤指标 DI_4 与完好结构的初始值区分度最小, 在第一种损伤情况下, 并没有产生令人满意的结果。预置第一个缺口 (损伤 1) 后, DI_4 无显著变化, 因此指标不能揭示早期损伤的出现。然而在损伤 3 情况下, 即铆钉 R1 和 R2 之间的预置缺口, 却造成了 DI_4 值发生非常大的变化, 没有观察到其他损伤指标发生类似的变化。可以得出如下的结论: 要实现对结构损伤发展的可靠监测, 有必要使用多种损伤指标。

6.6.3 讨论

所获得的试验结果证明该方法的定性特征。使用损伤指标方法对被监测结构进行状态评估时, 难以确定故障的大小和位置, 特别是在当有多个损伤发生的情况。然而, 用所提出的方法进行损伤探测时, 在不同阶段配合使用不同的损伤指标。确定性的指标在探测早期阶段的损伤发展是可行的。虽然统计指数是对早期损害较不敏感的, 也不容易受阻抗曲线的偏移而改变其形状, 认为这可能是由于温度变化的影响。影响该方法效率的一个主要因素是在监测结构上的 PZT 的布局。由于阻抗技术的局部特性, PZT 应放置在最有可能发生损伤的位置, 例如, 应力明显集中位置。然而, 过于密集的传感器布设方法, 并没有改善损伤探测效率, 却提高实施 SHM 系统的总成本。因此, 进一步的研究旨在确定对不同类型结构的损伤探测敏感区域。今后的工作中也应侧重于研究对环境的影响, 如温度变化, 以及飞行中静态和动态载荷的影响。

6.7 结论

基于机电阻抗的 SHM 方法, 利用 PZT 与其所安装结构的机电耦合特性, 可以实现对被监测的机械结构中的损伤及其发展进行有效探测。损伤存在造成的力学性能的任何显著变化, 可以用数值损伤指标进行度量和评估。所测量的机电阻抗信息, 既包括被监测结构, 又包括 PZT。因此, 试验所安装的传感器进行自监测也是可行的。相反, 作为基于机械阻抗的第一种方法, 基于机电阻抗方法的运用中, 所有传感器都薄, 不对结构的运行产生干扰。这一特性可以使得传感器永久安装到监测结构上。压电片的特点是尺寸和重量都较小, 所以它们对主体结构的性能影响可以忽略不计。PZT 几乎可以在任何位置布设。压电元件可以同时用来作为驱动器和传感器, 这对于基于阻抗法的应用是至关重要的, 因为这可以减少压电元件、电气配线以及所需的硬件的数量。一个简单的传感器就能进行机电阻抗测量。阻抗法的灵敏度可以与超声波方法的灵敏度相媲美, 但对于前者来说, 不需要有经验的技术人员进行损伤定位。基于阻抗技术所需的硬件成本也更低廉。这些方法作为全局结构方法和超声波之间的折中。此外, 所安装的压电元件也可用于其他无损探测方法。压电主动传感技术的一个重要方面: 执行监测的过程中, 通常需要大量的分布

式传感器和执行器。这个问题也牵涉到每一个 PZT 的探测范围。如 Sun 等 (1995) 所述, 对于桁架结构情况, 通过实验证明, 粘接 PZT 的探测范围的局限性很强, 仅仅在它安装位置的附近。因此可以对损伤位置进行精确定位, 但需要足够密度的传感器。此外, 在复合材料层压板的情况下, 可以在被监测结构的连续层之间安装 PZT, 而不会降低结构完整性 (Bois 等, 2007)。因为文中所述的方法对温度、湿度, 以边界条件和运行载荷的附加变化都比较敏感, 但只有当它们对 PZT 驱动频率产生干扰, 进行阻抗监测时, 需要正确地对这些参数进行评估。但是, 对测量过程干扰最为严重的参数是温度。温度的变化导致所测量的机电阻抗特征的频率变化。Park 等 (1999) 通过试验方法提出了不同温度效应的补偿。损伤指标定义为导纳实部变化量的平方和, 这些通过损伤指标值最小化后的系数计算得出。基于阻抗的方法是一种定性的测量方法, 因为不同类型的损伤, 如裂纹、腐蚀、剥离、连接松动所引起机械阻抗改变比较类似, 这区分不同类型损伤是非常困难的, 甚至是不可能的。

参考文献

- Ayres J, Lalande F, Chaudhry Z and Rogers C 1998 Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures. *Smart Materials and Structures* **7**, 599–605.
- Bhalla S and Soh C 2003 Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **32**, 1897–1916.
- Bois C, Herzog P and Hochard C 2007 Monitoring a delamination in a laminated composite beam using in-situ measurements and parametric identification. *Journal of Sound and Vibration* **299**, 786–805.
- Chaudhry Z, Joseph T, Sun F and Rogers C 1995 Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches. *Smart Structures and Integrated Systems SPIE 2443, SPIE Conference*, San Diego, USA.
- Giurgiutiu V 2007 *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Elsevier Academic Press.
- Giurgiutiu V and Rogers CA 1999 Modeling of the electro-mechanical (E/M) impedance response of a damaged composite beam. *ASME Winter Annual Meeting, ASME Aerospace and Materials Divisions, Adaptive Structures And Material Systems Symposium*. Nashville, USA, pp. 39–46.
- Giurgiutiu V and Zagrai AN 2001 Electro-mechanical impedance method for crack detection in metallic plates. *Proceedings of SPIE, Advanced Nondestructive Evaluation for Structural and Biological Health Monitoring*, vol. 4335 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Newport Beach, USA, pp. 131–142.
- Helton JC and Davis FJ 2003 Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. *Reliability Engineering and System Safety* **81**, 23–69.
- Koh Y, Rajic N, Chiu W and Galea S 1999 Smart structure for composite repair. *Composite Structures* **47**, 745–752.
- Liang C and Rogers C 1994 Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **5**, 12–20.
- Liu W and Giurgiutiu V 2007 Finite element simulation of piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring with coupled-filed elements. *Proceedings of SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007*, vol. 6529 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. San Diego, USA.

- Mascarenas D, Todd M, Park G and Farrar C 2007 Development of an impedance-based wireless sensor node for structural health monitoring. *Smart Materials and Structures* **16**(6), 2137–2145.
- Myers R and Montgomery D 1995 *Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Naidu A and Soh C 2004 Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers. *Smart Materials and Structures* **13**, 393–403.
- Park G and Inman D 2007 Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **365**, 373–392.
- Park G, Kabeya K, Cudney H and Inman D 1999 Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. *JSME International Journal* **42**(2), 249–258.
- Park G, Sohn H and Farrar C 2003 Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *The Shock and Vibration Digest* **35**, 451–463.
- Peairs D, Gyuhae P and Inman D 2005 Simplified modeling for impedance-based health monitoring. *Key Engineering Materials* **293–294**, 643–652.
- Peairs D, Park G and Inman D 2002 Self-healing bolted joint analysis. *Proceedings of 20th International Modal Analysis Conference*. Los Angeles, USA, pp. 1272–1278.
- Raju V, Park G and Cudney H 1998 Impedance-based health monitoring technique of composite reinforced structures. *Proceedings of 9th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*. Cambridge, USA, pp. 448–457.
- Roach D and Rackow K 2006 Health monitoring of aircraft structures using distributed sensor systems. Technical report, Sandia National Laboratories, FAA Airworthiness Assurance Center Albuquerque.
- Rosiek M, Martowicz A and Uhl T 2010a Uncertainty and sensitivity analysis of electro-mechanical impedance based SHM system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **10**, 1–9.
- Rosiek M, Martowicz A and Uhl T 2011a SHM system based on impedance measurements. *Diagnostyka-Diagnostics and Structural Health Monitoring* **59**(3), 3–8.
- Rosiek M, Martowicz A and Uhl T 2011b Structural health monitoring system based on electromechanical impedance measurements. *Proceedings of 8th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, USA, pp. 314–321.
- Rosiek M, Martowicz A and Uhl T 2012 Electromechanical impedance based SHM system for aviation applications. *Key Engineering Materials* **518**, 127–136.
- Rosiek M, Martowicz A, Uhl T, Stepinski T and Lukomski T 2010b Electromechanical impedance method for damage detection in mechanical structures. *Proceedings of 11th IMEKO TC 10 Workshop on Smart Diagnostics of Structures*. Kraków, Poland.
- Sun F, Chaudhry Z, Liang C and Rogers C 1995 Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **6**, 134–139.
- Sun F, Rogers C and Liang C 1996 Structural frequency response function acquisition via electric impedance measurement of surface-bonded piezoelectric sensor/actuator. *Proceedings of 36th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. New Orleans, USA, pp. 3450–3461.
- Yan W, Lim C, Chen W and Cai J 2007 A coupled approach for damage detection of framed structures using piezoelectric signature. *Journal of Sound and Vibration* **307**, 802–817.
- Yang Y, Lim Y and Soh C 2008 Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: II. Numerical verification. *Smart Materials and Structures* **17**(3), 1–12.
- Zagrai A and Giurgiutiu V 2001 Electro-mechanical impedance method for crack detection in thin wall structures. *Proceedings of 3rd International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford, USA.

第 7 章 导波波束的形成

7.1 引言

由于板状结构必须符合高安全标准，所以板状结构的结构健康监测（SHM）成为一项热门研究主题。兰姆波是板状结构 SHM 一种强有力的工具，因为其能够远距离传播，对各类损伤具有敏感性（Raghavan 和 Cesnik，2007）。板状结构的 SHM 的关键因素是传感器的设计和传感器在所监测板上的分布。此领域内的众所周知的方法是分布式传感器的使用（Michaels，2008）。SHM 系统的灵敏度可以通过具有优异的信噪比和波束指向能力的有源超声相控阵（PA）得到提高（Giurgiutiu，2008）。

超声波束指向性的概念和相控阵的用途是建立在医疗（Karaman 等，2009）和无损检测（Drinkwater 和 Wilcox，2006）成像基础上的。然而看来，板状结构 SHM 方法的实施需要二维拓扑阵列，以避免模棱两可的损伤定位（Giurgiutiu，2008）。因此几篇关于不同形状阵列的报道已经公布，如星形阵列（Ambrozinski 等，2011）、方形阵列（Engholm 和 Stepinski，2010b）、圆形阵列（Wilcox，2003a）、螺旋阵列（Yoo 等，2010）。

在已确定形状阵列的作用下，图像生成的质量取决于阵列孔径和成像技术。在机械化无损检测应用中，运动式传感器能增加合成孔径聚焦技术（SAFT）中的阵列孔径（Doctor 等，1986）。因为这种解决办法在大多数 SHM 应用中是不可行的，所以本章重在介绍静态阵列，它可以永久的在所监测结构和 SHM 应用中使用。多个发射传感器能够从一组多样化的定位中发现缺陷，这些阵列正是利用了这一优势，使得阵列有效孔径得到了扩大（Moreau 等，2009）。

另一个影响基于 SHM 系统的相控阵性能的关键因素是在波束形成方案中采用的信号处理技术。由于阵列的简单性和鲁棒性，处理它捕获快照数最常见的方案是在时域采用延迟叠加法（DAS）的操作。利用相控阵，兰姆波可以采用能改善角度（Engholm 和 Stepinski，2010a）和径向（Liu 和 Yuan，2010；Wilcox，2003b）分辨率的更为先进的方法。然而，先进的处理需要关于材料性能的精确信息，这在实际应用尤其是各向异性材料的应用中能够产生限制。

为解决这类问题引进了自聚焦方法，例如，超声波引进了时间反转镜像技术。时间反转镜像技术是一种强有力的工具，它能够改善信噪比，并降低分散效应。迭代时间反转镜像能够选择性地聚焦在感兴趣区域最强的反射器上（Prada 等，

1991)。但是, SHM 应用也经常需要聚焦在具有较低自反性的目标上。为了检测和聚焦波在多重反射体上已经引进时反算子分解 (DORT) 方法。DORT 是一种信号处理技术。在已接收到的数据基础上, 它能够估计选择性聚焦波在某一目标上所需的时间延迟。这种方法已经成功运用于无损检测 (Kerbrat 等, 2002) 和兰姆波定征 (Prada 和 Fink, 1998) 中。

但是, 对于解决多个散射体问题, 这种方法在一些情况下是不适用的。由此种方法扩展的信号时间-频率显示能较好地解决这一问题 (Ambrozinski 等, 2012a)。由于色散现象, 兰姆波在薄板中传播通常会产生非平稳响应, 连续的小波变换 (CWT) 可以计算信号的时频特性。在频域上不能正确解析的散射体可以在时域上解析 (Ambrozinski 等, 2012a)。

二维星形有源阵列的损伤成像应用了扩展的 DORT 方法。该阵列由一个能够自聚焦的发射子阵和一个用于捕捉散射体反射回波的接收子阵组成。本章对修正过的 DORT 进行了分析, 并将其与基于标准的 DAS 波束形成的多静态成像 (MSI) 进行了比较。这两种方法均适用于使用二维星形有源阵列的铝板损伤检测。

本章主要内容如下: 7.2 节讲述所列方法的理论背景。首先, 7.2.1 节和 7.2.2 节分别介绍合成孔径和有效孔径的概念、原则。7.2.3 节详细介绍基于上述方法的成像方案。最后, 7.2.4 节介绍了自聚焦技术及其成像应用的理论依据。理论概述之后, 7.3 节介绍所提出方法的数值研究。7.3.1 节对有效孔径进行了检查。7.3.2 节利用星形阵列展现了各种成像方案的应用。最后, 7.3.3 节对自聚焦 DORT-CWT 方法进行验证。7.4 节给出用所提出方法获得的实验结果。7.4.1 节和 7.4.2 节对传感阵列和有效孔径进行评价。7.5 节和 7.6 节分别为本章的讨论和结论部分。

7.2 理论

下面介绍合成孔径和有效孔径的简要概念, 为上述所提出方法提供坚实的理论基础。理论背景用来呈现下文成像方案中的合成孔径概念, 提出一个二维超声波阵列的设计方法, 并评价它们的指向特性。

在下节中, 将介绍应用了自聚焦技术的损伤成像。首先, 概述 DORT 技术及其扩展技术 DORT-CWT 的理论背景。其次, 介绍该扩展技术的数值模拟和实验评价。最后, 将给出 PA 模式下自聚焦发射阵列的成像结果。

7.2.1 合成孔径成像

阵列技术在薄板结构 SHM 的应用涉及一系列传感器。这些传感器应满足永久连接到或嵌入到该结构中, 以保证固定位置的大面积感兴趣区域 (ROI) 执行检查。在主动脉冲回波设置中, 阵列的发送元素在薄板结构中产生弹性波, 弹性波之

后被结构中的不连续面散射，最后散射波由阵列的接收元素感知。

如果在 PA 模式中使用阵列，那么发射子阵列和接收子阵列一般由相同的元素组成。在传输过程中，时移脉冲激发元素后获得转向波前。在接收模式下，转向波前由相同的元素接收，并通过引入各自的时间延迟扩增。时间延迟能够获取同相位接收脉冲。实施这项 DAS 技术的波束形成，通常应用于超声方面。转向并可能聚焦的光束能够提高超声成像的波角（方位角）分辨率，但它需要扫描整个感兴趣区域。这就意味着发送-接收循环必须在感兴趣区域内进行一些重复的方位角和范围，将导致采集速度低。

另一种可以替代相控阵的方法是合成孔径方法。雷达行业现已利用合成孔径方法研发出 SAR（即合成孔径雷达），而现在合成孔径方法更多的是应用于医用超声。一般情况下，SA 波束形成用于成像时，使用不同的发射和接收子阵列。在经典的 SA 技术中，图像通过所有发射元件的连续激发和其他阵列元素散射波的接收形成。最终的图像是来自所有传播周期中波束形成能源的叠加。SA 图像在所有接收数据经过大量集成运算的后处理后产生。合成孔径成像实质上相当于传统的 PA 成像使用与 ROI 内像素数相等的发射-接收聚焦光束周期数后的成像结果。

对于 N 个元素的线性阵列，如果所有元素在 N 个传输周期全部发射出去，那么可以获得 N^2 发射-接收数据的全矩阵。然而，依赖于发射孔径阵列的几何形状和拓扑结构，用于 SA 处理的数据还有许多其他采集方式。大部分方法旨在减少发送次数，但伴随有轻微的分辨率损失，信噪比在可以接受的范围之内。一般情况下，通过使用稀疏的传输孔径可以做到减少发送次数。如果稀疏孔径的元素分布在阵列的全孔径，那么视场中不会有任何损失，只有轻微的横向分辨率损失。以下，将说明 SA 成像中，评估二维发送-接收孔不同组合的一些原则。

在坐标系中，位于二维同向介质（如薄板结构）中的发射-接收对，如图 7.1a 所示。在坐标系中，向量坐标为 $\vec{s}_T$ 的点发射器 T 发出弹性波，经坐标向量为 $\vec{r}$ 的点反射器 P 散射，最终由坐标向量为 $\vec{r}_R$ 的点接收器 R 接收。点 P 与发射器 T 距离为 $|\vec{r} - \vec{s}_T|$ ，此处频率为 ω 的波的波前表达式如下（Giurgiutiu, 2008）：

$$f(\vec{r}, \vec{s}_T, t) = \frac{A}{\sqrt{|\vec{r} - \vec{s}_T|}} e^{j[\omega t - \vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{s}_T)]} \quad (7.1)$$

式中， A 为常数， $\vec{\eta} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ ， $\vec{k} = \vec{\eta}\omega/c$ 是在 $\vec{r}$ 传播方向上的非色散波模的波数矢量，

t 是时间， $\vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{s}_T)$ 表示点乘。假设发送孔径由 M 个角频率为 ω 的点发射源组成。在这种情况下，在 $\vec{s}_{Tm}$ 处的 m 个发射器的波前公式为

$$f(\vec{s}_{Tm}, t) = \frac{A}{\sqrt{|\vec{r}_m|}} e^{j[\omega t - \vec{k}_m \cdot \vec{r}_m]} \quad (7.2)$$

式中, $\vec{r}_m = \vec{r} - \vec{s}_{Tm}$, $\vec{k}_m = \vec{\eta}_m \omega / c$ 。

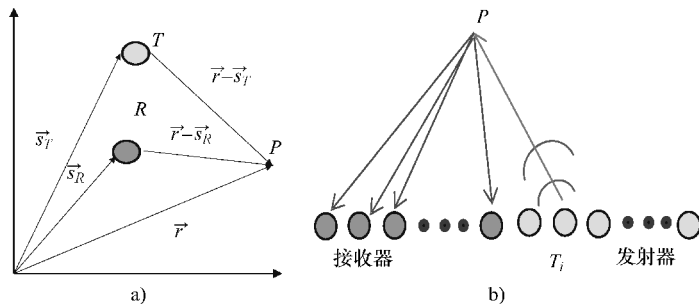


图 7.1

a) 使用单独的超声波发射-接收对形成导波 b) 合成孔径成像原则

由孔径发送的合并波前将是 M 个元素影响的叠加。

$$z_T(\vec{r}, t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m \frac{A}{\sqrt{|\vec{r}_m|}} e^{j(\omega t - \vec{k}_m \cdot \vec{r}_m)}$$

$$= f(\vec{r}, t - \frac{|\vec{r}|}{c}) \sum_{m=0}^{M-1} w_m \sqrt{\frac{|\vec{r}|}{|\vec{r}_m|}} e^{j\omega \frac{\vec{r} - \vec{r}_m}{c}} \quad (7.3)$$

式中, w_m 为所有孔径元素的加权系数。

在发射和接收过程中, 成像设置的整体特性通过点扩散函数 (PSF) 定义。PSF 是对点状目标的响应, 通过卷积函数计算。

$$z_{TR}(\vec{r}, \vec{s}_T, \vec{s}_R, t) = z_T(\vec{r}, t) * z_R(\vec{r}, t) \quad (7.4)$$

可以看出, 对于远场条件下, 即 $|\vec{r}| \gg |\vec{r}_m|$, 各自的向量几乎变成了平行, 例如 $\vec{k}_m = \vec{\eta} \omega / c_p = \vec{k}$, $\sqrt{r_m} \approx \sqrt{r}$, 那么式 (7.2) 可以近似为

$$f(\vec{r}_m, t) \approx f(\vec{r}, t - \frac{|\vec{r}|}{c}) e^{j\frac{\omega}{c} \vec{\eta} \cdot \vec{s}_{Tm}} \quad (7.5)$$

为了产生转向束, 获得所需方位角 ϕ_s , 不得不申请延迟 $\delta_m(\phi_s)$ 和切趾系数 w_m 。

发射孔径的指向图案 (BP) 的函数表达式如下 (Giurgiutiu 等, 2008):

$$\text{BP}(w_m, \eta_m, \phi_s) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} w_m e^{j\frac{\omega}{c} [\vec{\eta} \cdot \vec{r}_m - \delta(\phi_s)]} \quad (7.6)$$

接收孔径也具有类似的函数关系。对于给定的角频率, 指向图案界定了频域内的阵列特性, 而 DAS 波束形成是在时域内产生的。

DAS 算法的原则是补偿发射器发射脉冲信号时产生的相位移。相位移首先在成像点 $\vec{r}$ 处, 然后在接收器点 $\vec{r}_R$ 处。这种方法应用在时域中用于补偿时间延迟, 相当于补偿接收元素接收的宽带信号的相移。执行此操作后, 图像的光线强度在点

P 的表达式为 (Moreau 等, 2009)

$$I(\vec{r}) = y_{TR} \left(\frac{|\vec{r} - \vec{r}_T| + |\vec{r} - \vec{r}_R|}{c} \right) = y_{TR}(\tau_T + \tau_R) \quad (7.7)$$

式中, c 为波模的传播速度, τ_T 和 τ_R 分别为发射器到点 P 、点 P 到接收器的传播时间, $y_{TR}()$ 是发射器发出信号后由接收器接收到的相应时域信号。现考虑由 N 个发射器和接收器组成的线性超声阵列的二维结构, 如图 7.1b 所示。使用 N 条传输线路, 由经典 SA 步骤产生图像强度应该是从每个元素获得的强度之和。

$$I(\vec{r}) = \sum_k^N \sum_l^N y_{k,l} \left(\frac{|\vec{r} - \vec{r}_T^k| + |\vec{r} - \vec{r}_R^l|}{c} \right) = \sum_k^N \sum_l^N y_{k,l}(\tau_T^k + \tau_R^l) \quad (7.8)$$

式 (7.8) 用于发射和接收孔径没有加权函数的情况, 例如没有切趾函数是用于纠正孔径特性。

如果稀疏的发射和接收孔要产生期望的最终点扩散函数 (PSF), 可以通过切趾来实现。假设加权系数可用于发射孔径和接收孔径, 即为了控制孔径元素的相对贡献, 函数 w_T 和 w_R 分别表示应用到发射和接收孔径的权重函数。然后所产生的图像强度表达式如下 (Moreau 等, 2009):

$$I(\vec{r}) = \sum_{k \in T} \sum_{l \in R} w_T^k w_R^l y_{k,l} \left(\frac{|\vec{r} - \vec{r}_T^k| + |\vec{r} - \vec{r}_R^l|}{c} \right) \quad (7.9)$$

根据式 (7.9) 处理时域信号 $y_{k,l}(\cdot)$, 产生的感兴趣区域 (ROI) 内所有点 (像素) 的图像。但是, 由于时域信号 $y_{k,l}(\cdot)$ 的时间离散特性, $y_{k,l}(\cdot)$ 通常需要差值。

7.2.1.1 二维 PA 设计实例

如前所述, 传感器的相控阵在发送模式中可以作为一个定向源, 允许所需方位上的波得到加强, 并抑制那些来自其他方向的波。而在接收模式下, 传感器相控阵像一个空间滤波器, 隔离出从期望方位角到达的波。但是, 辐射和过滤几乎从来都不是完美的, 因此在阵列的设计过程中需要对阵列角性能进行调查。光束模式图以阵列的功率输出作为辐射角的函数, 是非常有用的工具。

为说明这一点, 考虑一个由 M 个元素组成的线性阵列, 间距 d 以坐标原点为中心, 如图 7.2a 所示。第 m 个点处传感器的位置向量为

$$\vec{s}_m = \left[\left(m - \frac{M-1}{2} \right) d, 0 \right]$$

那么, 对于远场, 此阵列的指向图案 (BP) 为 (Giurgiutiu, 2008)

$$\text{BP}(w_m, \frac{d}{\lambda}, M) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} w_m e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \left[\left(m - \frac{M-1}{2} \right) \cos \phi \right]} \quad (7.10)$$

式中, λ 为波长, ϕ 为发射或接收波的相位角, w_m 为属于切趾函数的加权系数。

线性非切趾阵列, 其中 $M = 9, d = \lambda/2$, 在极坐标中以 ϕ 为自变量, 其标准指向图案如图 7.2b 所示。可以看出, 指向图案关于阵列轴对称, 是模糊成像源。进

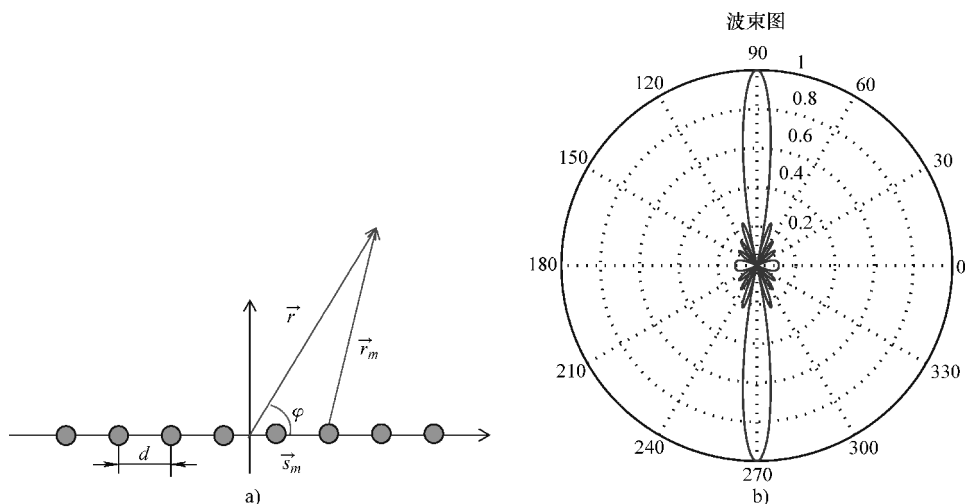


图 7.2

a) 线性均匀阵列 b) 元素数 $M=9$ 的线性均匀阵列的归一化波束指向图

一步可以看出，非切趾阵列的旁瓣级相当大。线性阵列另一个不期望的特征，相位角依赖角分辨率 – 转向阵列的主瓣宽度随相位角增加而增加，在阵列发射的两端获得最大值。为了避免线性阵列的上述缺陷，可以考虑特征元素分布均匀、具有高度对称性的二维数组拓扑结构。

图 7.3a、b、c 所示为 3 个二维拓扑结构实例，分别为十字交叉形、方形、星形，它们阵列元素个数不同，但元素间距相同。在两个示例性转向角为 70° 和 180° ，用于评估调查阵列的指向图案如图 7.3d ~ f 所示。从图中可以看出，就主瓣级和旁瓣级宽度而言，方形阵列表现最好（见图 7.3b 和 e），这并不奇怪，因为它的元素数量最大。此外，可以看出相比十字交叉形阵列，星形阵列旁瓣级相当低；与方形阵列相比，星形阵列主瓣级略宽。因此，通过进一步评估认为：星形阵列是简单和性能之间的折中选择。

7.2.2 有效孔径概念

一般情况下，在每个测量周期内，可以使用稀疏的发射/接收孔的任意组合为成像算法提供数据。成像算法具有能够为一系列不同的发射器/传感器结构获取多个快照的优势。如果在同一激励周期中，波束形成器能够在元素的发射和接收之间交换，那么对于给定的由 N 个元素组成的阵列能采集 N^2 时间的痕迹，即发射 – 接收数据的全矩阵。虽然全矩阵使用一个阵列从一固定位置上获取最大的信息量，但是信息的采集在许多应用中是费时的，因此也不切实际（Lockwood 等，1998；Moreau 等，2009）。

孔径分布稀疏可以在图像质量和采集时间之间做折中。这里说的采集时间指

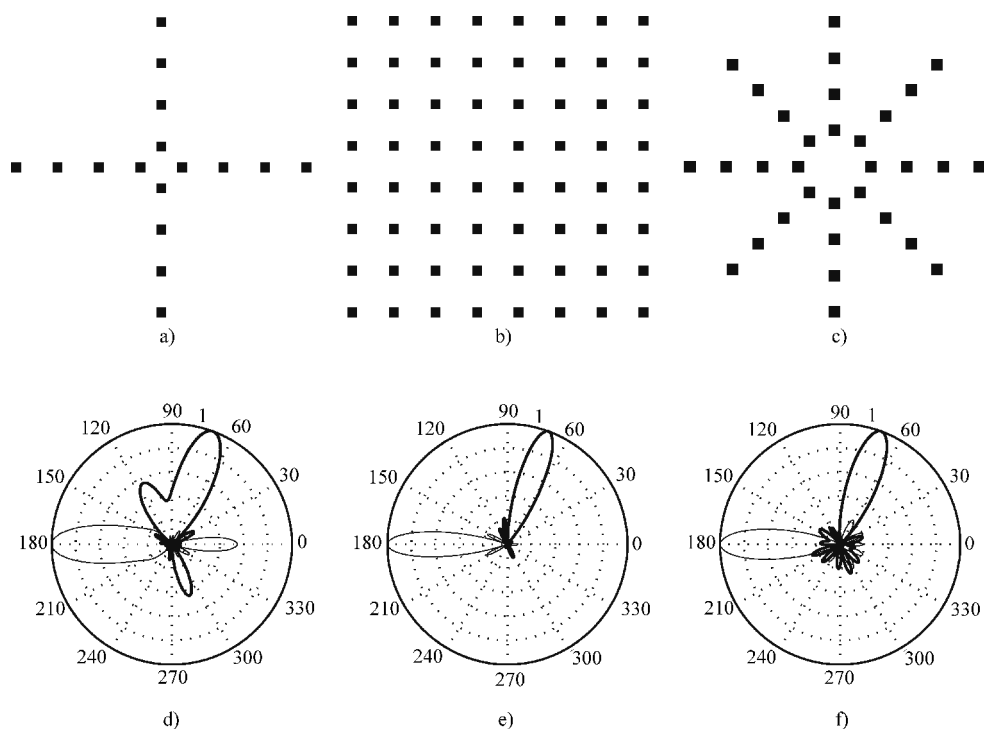


图 7.3 三备选二维数组配置及 70° 和 180° 的转向角时的波束指向图对比：
十字交叉形，16 个元素 (a 和 d)；方形，64 个元素 (b 和 e)；星形，32 个元素 (c 和 f)

SA 方法中，单位时间的图像数。其主要思想是有效地把传感器分为发射和接收子阵。发射孔径元素在相同的传输周期内发射，可获得转向波前。另外，分别激发各个独立的发射器，接收孔径的元素可获取多个响应。所获得的反射信号的快照可用于后处理过程中的合成聚焦。

如果阵列被分为两部分，它们各自的指向图案均可通过上节中介绍的方法进行评价。然而，当两个子阵列用于成像时，整个有源阵列的有效辐射图可通过有效孔径的概念进行评价。

一个阵列的有效孔径是指等效接收孔径。即如果一个点源用于传输，等效接收孔径将产生相同的双向辐射图形 (Lockwood 等, 1996)。因为有效孔径是发射孔径和接收孔径的卷积，所以在单个激励源的情况下，有效孔径仅仅是一个接收孔径 (Lockwood 等, 1998; Moreau 等, 2009)。假设权重函数 $w_T(s_T)$ 和 $w_R(s_R)$ 分别代表发射孔径和接收孔径，那么有效孔径 $a_{TR}(s_T, s_R)$ 将是它们的空间卷积，即

$$a_{TR}(s_T, s_R) = w_T(s_T) * w_R(s_R) \quad (7.11)$$

式中，三个孔均被表示为矢量函数的形式，在发射孔径和接收孔径中分别定义了元素位置 s_T 和 s_R 。

7.2.3 成像方案

在 SHM 应用中, 损伤成像一般依赖于位图形式的 ROI 表示和用于评估图像强度的信号处理。信号处理通常只涉及响应的时移。然而, 根据不同的测量技术, 所捕获快照的处理可以在细节上有所不同。在下节中, 将介绍使用兰姆波实现损伤成像的方案。首先, 将介绍在单基成像设置中, 使用单发射器和多接收器阵列的成像。该方法将被再推广到 MSI。最后, 将介绍使用有源发射阵列用于清扫 ROI 的合成孔径概念。

7.2.3.1 单发射器, 多接收器阵列

考虑一个由 M 个传感器组成的均匀线性传感阵列系统 (见图 7.4a) 和位于点 $(0, 0)$ 处的点状发射器。发射器是单一色散兰姆模式的全向点状光源。由于色散性质, 个体波以不同于波包的速度传播。个体波速度决定于相位速度, 这将直接影响到波的相位。群速度涉及各个组的波包速度, 决定了波能运输速度 (Giurgiutiu, 2008)。

现在假设, 在阵列远场中点状散射器 P 位于距离原点 $|\vec{r}|$ 处, 方位角为 ϕ 。激励波通过介质传播, 当它遇到障碍物时激励波被散射, 并向感应阵列传播。激励波和反射波包之间的时移到达 $(0, 0)$ 的表达式为

$$\tau_g(|\vec{r}|) = \frac{2|\vec{r}|}{c_g} \quad (7.12)$$

式中, c_g 表示兰姆波的群速度。

如果散射器处在阵列的远场, 反射波可以假设成平面, 其波前在 $(0, 0)$ 构成的线垂直于波达方向。因为随后的接收器和波阵面之间的距离不同, 所获得的快照之间存在相位差。根据上述规定的假设, 可由下面的三角表达式预测波传播的差异以及由此产生的时移。

$$\tau_m(\phi) = \frac{d\left(m - \frac{M-1}{2}\right)\cos\phi}{c_p} \quad (7.13)$$

式中, c_p 是波传播的相速度, d 是传感器间距。

如前所述, 当波达方向引导阵列时, 波束形成算法能够补偿这些时移。这种补偿可以看成是发射或接收元素一种虚拟的移动 (Wilcox, 2003a)。

在本节介绍的方法中, 成像以极坐标系中位图的形式进行。在极坐标中, 任何一个像素点可以通过角度位置 α 和与原点距离 $|\vec{r}|$ 唯一确定。于是, 像素强度可通过下式计算:

$$I(|\vec{r}|, \alpha) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m y_m(\tau_m(\alpha) + \tau_g(|\vec{r}|)) \quad (7.14)$$

式中, y_m 是第 m 个传感器所获取的时域信号, 对成像的影响权重系数 w_m 。

为了定位散射体, 该图像不得不用于一组方位角。如果 α 等于入射角 φ , 时间延迟得到补偿, 这将决定快照成直线排列, 示意图如图 7.4a 所示。因此, 对准的信号相干相加, 使得生成的图像的对比度得到提高。

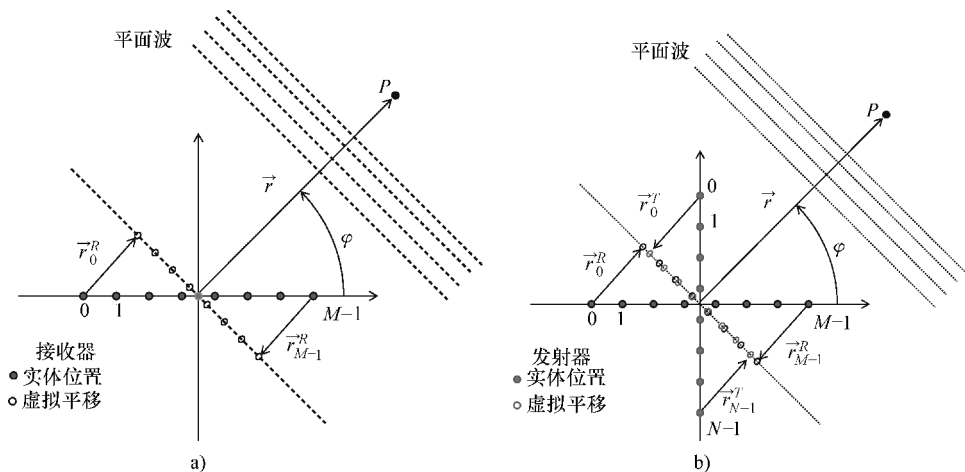


图 7.4 远场假设条件下线性均匀传感阵列的成像

a) 合成孔径 b) 线性均匀传感阵列在角度为 φ 时的反射图

7.2.3.2 多基配置的孔径合成

现在假设, M 个感应接收元素 N 个发射元素用于成像, 如图 7.4b 所示。在多基合成孔径成像中, 信号到达传感器, 感应接收元素获得响应。损伤成像也可依据类似前面的情况进行。但是, 发射元素的时移也应该得到补偿。每个发射-接收周期都应形成一个单独的图像, 最终结果应由一系列上述图像组成。因此, 像素强度 $I(|\vec{r}|, \alpha)$ 可通过下式评估:

$$I(|\vec{r}|, \alpha) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} w_T^n w_R^m y_{m,n} (\tau_m^R(\alpha) + \tau_n^T(\alpha) + \tau_g(|\vec{r}|)) \quad (7.15)$$

式中, $\tau_n^T(\alpha)$ 和 $\tau_m^R(\alpha)$ 分别表示在角度 α 下, 引导发射和接收子阵列所需要的时间延迟, $y_{m,n}$ 指第 m 个传感器捕获的时间信号, 改时间信号由第 n 个发射器的激励而产生的。

如果硬件能够同时激励来自发射元素的时移信号, 那么发射阵列能够用于引导传输序列中一组预定义方位角的波。接收元素获得对每个传输波前的响应, 由于波的转向在发射过程中已经完成, 因此成像表达式可以简化为

$$I(|\vec{r}|, \alpha) = \sum_{m=0}^{M-1} y_{m, \alpha_T} (\tau_m(\alpha) + \tau_g(|\vec{r}|)) \quad (7.16)$$

式中, y_{m, α_T} 是由于方位角 α_T 下波前的引导传输将引起第 m 个传感器响应。

如果图像在发射方位角 $\Delta\alpha$ 的角分辨率下进行的, 那么式 (7.16) 中角 α 可以

用 $\alpha_T = m\Delta\alpha + \alpha_0$ 代替。但是一般情况下，成像在发射和接收采取不同的分辨率。在这样的情况下，与发射角 α_T 相关的数据用于产生一组较大角度 α 下的图像，例如，由下列关系式确定 $|\alpha_T - \alpha| \leq \Delta\alpha/2$ 。

7.2.4 自聚焦阵列

本节将介绍自聚焦阵列的理论背景，以时反算子分解（DORT）方法的原理作为起点。其次，将介绍 CWT 使用下的技术扩展。最后，将介绍使用传输阵列自聚焦方法的成像方案。

7.2.4.1 时反算子分解

在时反算子分解（DORT）方法中， N 个发射-接收传感器组成的阵列，可以认为是一个 N 输入 N 输出的线性时不变系统。第 l 个元素接收的信号 $1 \leq l \leq N$ 表达式如下：

$$r_l(t) = \sum_{m=1}^N k_{lm}(t) \otimes e_m(t) \quad (7.17)$$

式中， $e_m(t)$ 是元素 m 的传播信号， k_{lm} 是从元素 m 到元素 l 的脉冲响应函数。在傅里叶域中，式（7.17）可以用如下矩阵形式表达：

$$R(\omega) = K(\omega)E(\omega) \quad (7.18)$$

式中， $R(\omega)$ 和 $E(\omega)$ 分别是经傅里叶变换后接收信号和发射信号的向量，而 $K(\omega)$ 是系统的 $N \times N$ 转换矩阵。基于式（7.18），可推导出两次连续时间反转操作后的发射信号的表达式。如果最初的输入矢量信号是 E^0 ，然后输出信号 $R^0 = KE^0$ 。新的输入信号为一次时间反转后的输出信号，这在频域内等效于相位共轭。

$$E^1 = K^* E^0 \quad (7.19)$$

根据式（7.19）发射信号引起的接收信号为

$$R^1 = K^* E^1 = (K^* KE^0)^* \quad (7.20)$$

矩阵 $K^* K$ 称为时反算子（TRO）。根据互易定理 $k_{l,m}(t)$ 与 $k_{m,l}(t)$ 应该相等。这说明矩阵 K 是对称的， $K^* K$ 是对角化矩阵（Prada 和 Fink, 1998）。由于 DORT 方法的名称所暗示的，它是基于 TRO 的分解。DORT 方法的详细过程示意图如图 7.5 所示。首先，采集元素间的脉冲响应产生 K 矩阵。接下来，时域信号经傅里叶变换后，获得转换矩阵 $K(\omega)$ 。第二步，在特定频率下计算 TRO 的对角化矩阵。已经证明：TRO 的显著特征值的个数相当于介质中的点状散射体的个数。然而，兰姆波具有多模态的优势，而且对于每种散射体反射模态，都存在相应的特征向量（Prada 和 Fink, 1998）。DORT 方法的最后一步是该结构中最显著特征向量的反向传播。为了集中光束到第 m 个散射体上，阵列应该利用信号的相位和振幅信息。而这些信息包含在 DORT 方法计算处的特征向量 V_m 中。在单色情况下，该信号可通过下式计算：

$$V_m = [A_1 e^{i\phi_1}, A_2 e^{i\phi_2}, \dots, A_n e^{i\phi_n}]^T \quad (7.21)$$

然后信号

$$s_p(t) = A_p \cos(\omega t - \phi_p) \quad (7.22)$$

该信号由传感器 p 接收后, 获得聚焦在损伤处的光束 (Mordant 等, 1999)。

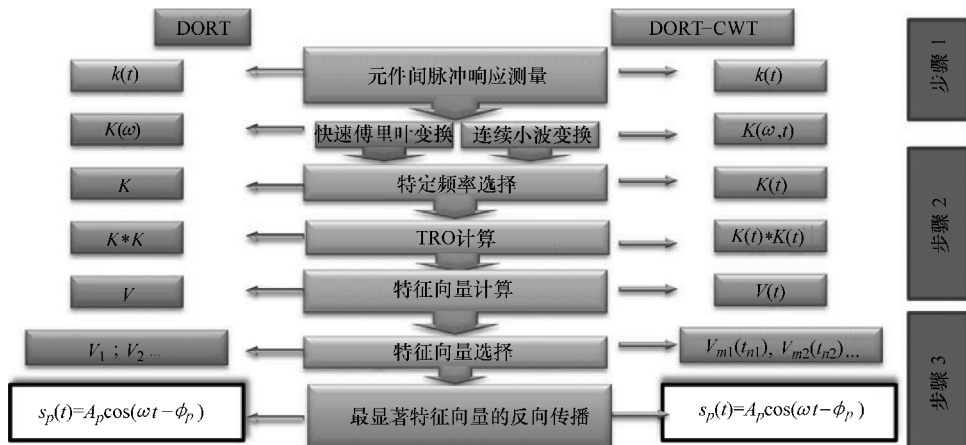


图 7.5 DORT (左) 和 DORT-CWT (右) 算法流程图

7.2.4.2 DORT-CWT 算法

DORT 方法使超声波有选择性地聚焦在不同介质的散射体上。这种算法可以解决的散射体的数量取决于 TRO 矩阵 $K * K$ 的大小, 该矩阵大小由传感器数量决定。在以上提到的方法中 (Fink, 1992; Fink 等, 2000; Ing 和 Fink, 1995, 1996, 1998; Kerbrat 等, 2002; Prada 和 Fink, 1998; Prada 等, 1996) 都使用了具有大量传感器的阵列。因此, 试图在只由 8 个传感器组成的小阵列中实施 DORT 方法 (Ambrozinski 等, 2012a)。在铝板的损伤检测中, 这个阵列在理论上能够解决该板中高达 8 处损伤。

由于色散现象的存在, 传播中的兰姆波产生的快照是非平稳的, 在所提出的算法中, 小波变换用于获得信号的 TFR。本节中 DORT-CWT 方法与经典 DORT 方案的流程图对比如图 7.5 所示。该算法在实现过程中, 将复 Morlet 小波作为母小波。它能够使信号在复域内分解为一个具有很好的时间和频率定位的信号。接下来, 计算连续时间样本在所选定频率下的时反算子 $K(t) * K(t)$ 。同经典的 DORT 一样, DORT-CWT 方法的最后一步是选择最显著的特征值并进行反向传播。在所提出的方法中, 可以得到随时间变化的样本的特征值, 即 $V_m(t_n)$ 的分布。如在经典的方法中一样, 反向传播步骤可以通过使用式 (7.22) 执行。虽然每个连续时刻计算出的特征向量可以反向传播, 但只考虑对应显著特征值的向量。即使应用了分离有关特征值的阈值, 仍存在大量应该反向传播的特征向量。通过对模拟和实验数据进行彻底的本征值分布分析, 发现该显著特征值局部极大值的数量等于存在于该板中损伤的数目。下面将显示对应于局部极大值的向量反向传播来使波聚焦于损

伤处。

7.2.4.3 自聚焦发射阵列成像

在 7.2 节提出的方法中, 成像依赖于—组角度的转向阵列和时移响应的分析。因此, 在初步清扫步骤中, 阵列在存在预期损害的方位和不存在损害的方位, 都必须进行转向。但是, 自聚焦技术允许照亮大面积的 ROI, 并根据所得到的响应, 检测强散射体所在的方位角。

这里提出的成像算法, 由两个步骤组成: 使用 DORT - CWT 方法进行发射阵列的自聚焦; 所获取数据 DAS 产生损伤图像。

自聚焦算法产生—组显著特征值, 这组特征值可反向传播, 在散射体所在位置获得光束的选择性聚焦。需要注意的是, 无论在目标的近场还是远场位置, 在自聚焦步骤中不可使用平行射线近似。在第二步中, 将进行本征值物理上的反向传播。反向传播由时间延迟信号和响应的同时发射组成, 并由接收子阵列捕获到, 最后经处理后获得损伤图像。使用式 (7.14) 进行成像。然而对于每次反向传播, 都会获得一个单独的图像。

7.3 数值结果

在本节中, 将给出上述所提出方法的数值计算。首先, 将给出十字交叉形阵列和星形阵列有效孔径的实例。然后, 介绍使用星形阵列成像, 并对单设置和多设置进行对比。最后, 给出自聚焦技术的数值计算。

7.3.1 有效孔径实例

为了说明有效孔径的概念, 如图 7.6a 所示, 为一个十字交叉形阵列的有效孔径, 由线性发射子阵列及与其相交成 90° 的接收子阵列组成。发射和接收孔径采用线性阵列的形式, 线性阵列由间距为 $d = 5\text{mm}$ 的 8 个点要素组成, 而假定传播模式的波长 $\lambda = 12\text{mm}$ 。

如图 7.7a、b 和 c 所示, 本章考虑了星形拓扑阵列三种发射 - 接收配置的实例。在所有情况下, 发射器和接收器的数目虽然相同, 但发射器的位置不同决定了获得的结果不同。请注意, 无论是发射器还是接收器, 都是不变迹的, 即 w_T 和 w_R 是单一向量。

利用式 (7.6) 和式 (7.11) (后者为频域方程) 为图 7.7a ~ c 所示的结构计算出的有效波束方向图, 示于图 7.7d ~ f。BP 是在波长 $\lambda = 2d$ 情况下计算出的。主瓣宽度、旁瓣电平、后瓣电平可以评价这些配置参数。

表 7.1 汇总了这些结果。图 7.7a 和 b 所示两个圆的配置在四个象限内全部对称, 并在表 7.1 中所列的各参数在所有方位角上都是相对恒定的。但是, 由于技术上的原因, 图 7.7c 所示的线性发射器布局结构将用于进一步实验。表 7.1 中的仿

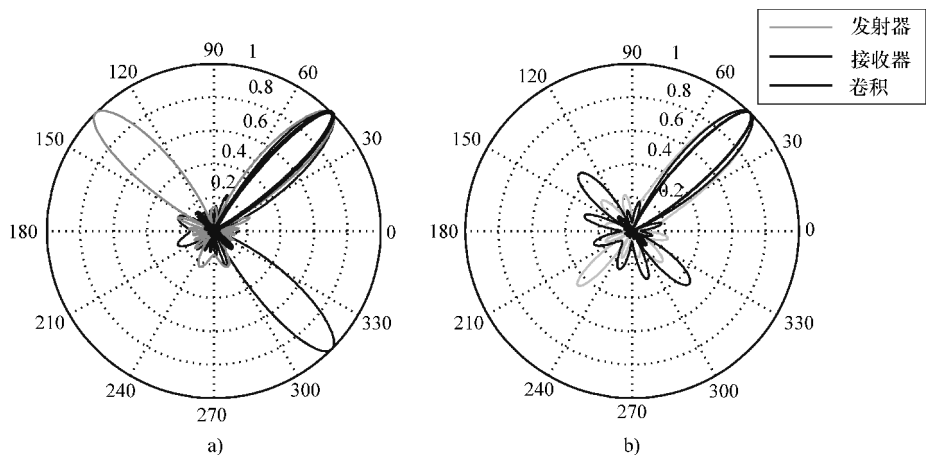


图 7.6 波束图案函数计算实例

- a) 十字交叉形阵列，水平方向为发射器，垂直方向为接收器，波前为 45°
 b) 星形阵列，水平和垂直方向均为发射器，对角线方向为接收器

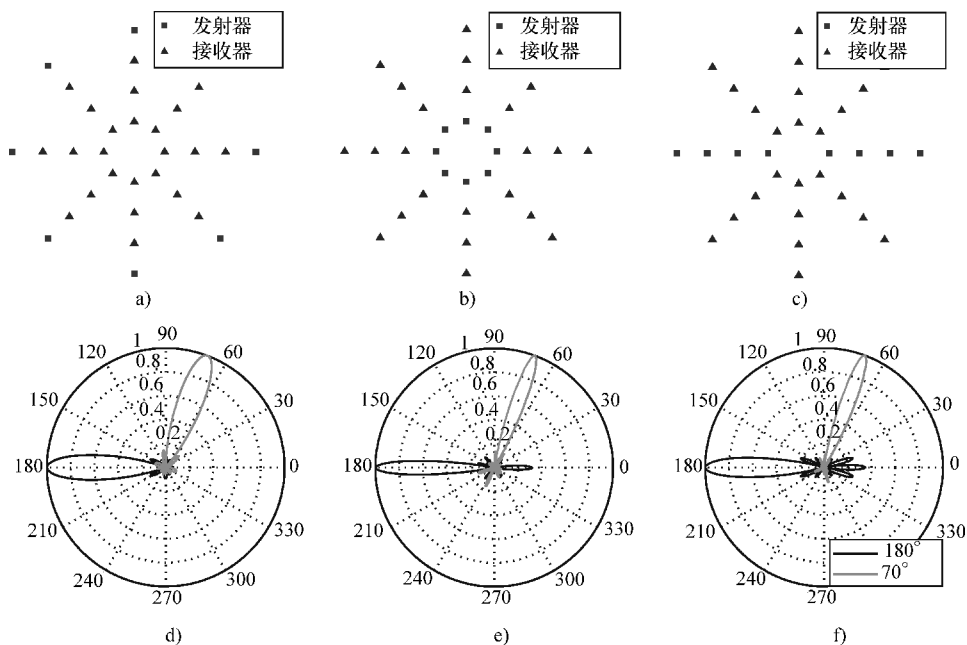


图 7.7

- a) ~ c) 星形阵列发射器和接收器布局图
 d) ~ f) 角度为 70° 和 180° 时的波束指向函数

真结果说明，这种配置在发射线前产生的旁瓣水平最低，而主瓣宽度比在大圆情况下（见图 7.7a）稍宽。请注意，当波阵面在发射器的线端射角发生转向时，可以

观察到最宽的主瓣。然而，宽峰发射器的端射瓣的效果通过倾斜接收机线上的各窄波瓣得到补偿，从而提高了这种结构的整体方位角特性。

表 7.1 三种布局计算的波束方向图参数

波阵面转向角 (°)	小圆 主瓣宽度 (°)	大圆 主瓣宽度 (°)	线性 主瓣宽度 (°)
0	12.97	9.37	12.97
70	12.61	9.01	9.37
90	12.61	9.01	9.37
在 0° ~ 300° 扫描中最严重的参数	12.97	13.33	13.33
	旁瓣水平/dB	旁瓣水平/dB	旁瓣水平/dB
0	-16.87	-17.05	-13.47
70	-16.79	-16.99	-19.24
90	-16.87	-17.05	-18.9
在 0° ~ 300° 扫描中最严重的参数	-16.56	-10.66	-10.09
	回叶水平/dB	回叶水平/dB	回叶水平/dB
0	-13.8	-9.92	-9.23
70	-21.04	-15.37	-17.71
90	-13.87	-9.92	-9.24
在 0° ~ 300° 扫描中最严重的参数	-13.8	-9.92	-9.23

7.3.2 星形阵列成像

在 7.2.1 节中，针对不同的阵列拓扑结构，介绍了模拟阵列的方向性特性。针对单色连续波的激发进行了模拟。然而，在实际的 SHM 应用中，单音脉冲或宽带脉冲利用损伤相关反射的提取时间用于损伤定位。由于激励信号的形状在兰姆波传播和其波束形成的机理中起着至关重要的作用，因此这一部分将模拟在宽带激励信号下的兰姆波传播。经波束形成算法处理后的响应将用来介绍和讨论所选择的二维阵列的性能。

兰姆波是频散的，并且具有多模式。相速度与板厚和激发频率两者的乘积之间的关系可以通过 Rayleigh - Lamb 方程的数值解进行评价。在色散曲线的情况下，可以使用以下关系计算励磁 $g_r(t)$ 引起的结构响应 $g_s(t)$ 。

$$g_r(t) = F^{-1}(g_e(\omega) \cdot G(k, x, \omega)) \quad (7.23)$$

式中， $G(k, x, \omega)$ 是频变传递函数， k 是传播模式的波数， x 是传播距离， F^{-1} 代表傅里叶逆变换 (Xu 和 Giurgiutiu, 2007)。当只有两个基本模式 A_0 和 S_0 都存在的条件下，函数 $G(k, x, \omega)$ 的表达式如下：

$$G(k, x, \omega) = S(\omega)e^{-ik_sx} + A(\omega)e^{-ik_Ax} \quad (7.24)$$

式中, $S(\omega)$ 、 $A(\omega)$ 分别对应于接收到的 S_0 和 A_0 模式的振幅。上述已经表明, 这些随频率变化的振幅与传感器类型、大小及板厚相关 (Xu 和 Giurgiutiu, 2007)。在一定的模拟条件下, 可以假定单一模式传送。如果 $S(\omega)$ 或 $A(\omega)$ 中的一个被设置为 0, 那么就可假定为单一模式传送。

该色散信号评价的方法可用来模拟波在 2mm 厚的铝板中传播。在所提出的方法中, 假定一组点状传感器排成星形阵列, 作为发射器或接收器。另外, 假定点状散射体在阵列的远场中。波传播模拟中通过式 (7.23) 的指导进行, 其中传播路径的长度是等于发射器 - 散射器 - 接收器的距离。为了更加关注分散现象而不是兰姆波的多模性质, 将传递函数系数 $S(\omega)$ 设置为 0。

7.3.2.1 单发射器和多接收器阵列成像

第一个仿真系列涉及的单项设置由单发射器和多接收器 (STMR) 的阵列组成。如图 7.3b 所示, 接收元素按照星形拓扑结构分布, 而发射元素位于阵列的中心。点状散射体位于距离阵列中心 250mm、成 110° 角的位置上。

在这步中共进行了两次模拟: 由频率为 100kHz 正弦信号的 3 个周期组成单音脉冲信号, 经汉宁窗调制后, 可选作激励。在第二次模拟中, 周期数增加到 30。阵列元素的间隔等于 A_0 模式在激发频率下波长的一半。由连续传感器获取的反应通过式 (7.23) 进行评估。这两次模拟快照在假定为远场近似的情况下, 经波束形成器的延迟叠加法处理形成; 所产生的图像如图 7.8a 和 b 所示。从图中可以看出, 长脉冲信号将导致较差的距离分辨率。波束指向图由合成波束形成信号的最大振幅获得。图 7.8c 给出方位角函数, 从图中可以与式 (7.6) 计算出的相同阵列的理论指向特性进行比较, 假设信号为无限单色激励信号。从图中可以观察到所比较的波束方向图基本吻合。但是, 对于 30 周期的励磁信号所获得的响应更接近于理论单色光束图案。这是 30 周期的励磁信号由于相消干涉, 具有较深的最小值。

7.3.2.2 多基成像

在接下来的模拟中, 详细说明了多基设置中的合成孔径概念。多基设置包括多发射器和多接收器 (MTMR), 并且这些发射器和接收器呈星形阵列排列, 如图 7.7c 所示。点状散射体位于距离阵列原点为 250mm, 与阵列成 110° 角的位置。每个发射器 - 接收器对的模拟响应均可形成 8×24 的时间痕迹矩阵。这些快照经过 DAS 算法处理, 再使用式 (7.15), 得到的图像结果如图 7.9a 所示。此图与 7.8a 相比, 可明显看出, 尽管使用了相同的阵列拓扑结构和相同数量的元件, 但本节中的方法获得的结果得到显著改善。对这两个图像进行处理, 找出发生在连续方位角处的最大值, 其波束图如图 7.9b 所示。结果对比表明, 多基成像优于单基之处在于主瓣宽度和距离分辨率方面。

7.3.2.3 有源发射矩阵成像

在接下来的 MTMR (多发射器和多接收器) 系列模拟中, 图 7.7c 所示的星形阵列使用在全面 PA 模式中。在这种模式中, 水平发射阵列的元素使用时移信号,

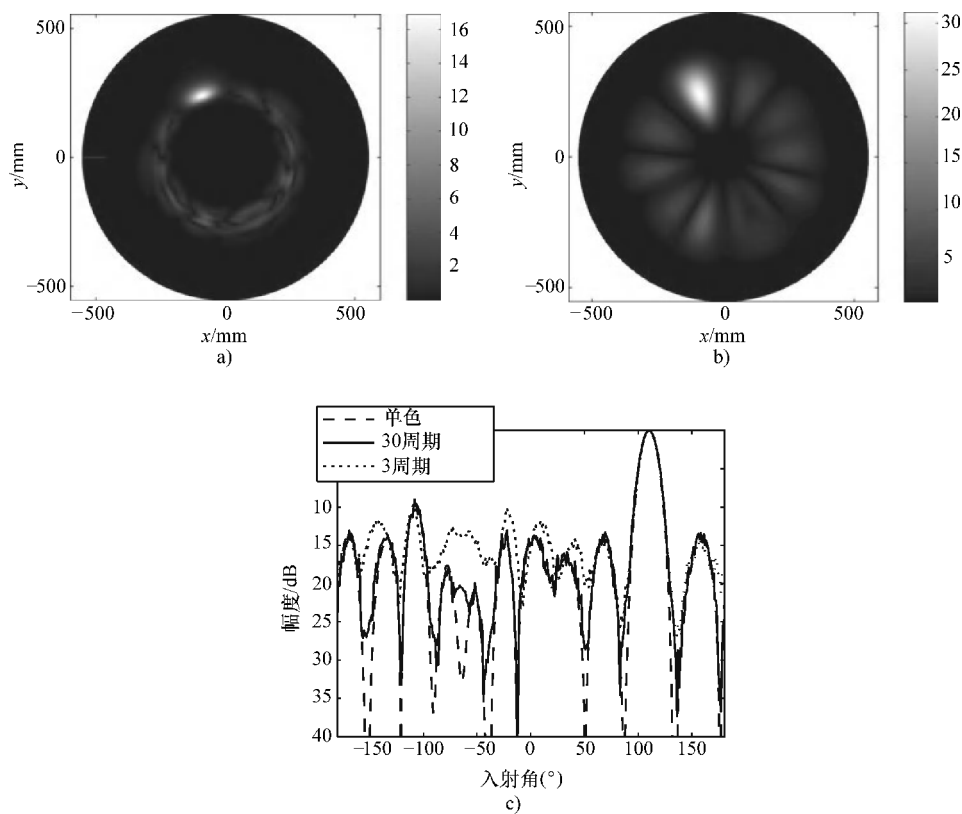


图 7.8 对采用窗口音爆破激励的单 A_0 模式, 在类星 STMR 设置中获得的目标图像由 3 正弦周期 (a) 和 40 正弦周期 (b) 组成。通过音爆破激励和单色激励获得的梁的模式 (c)

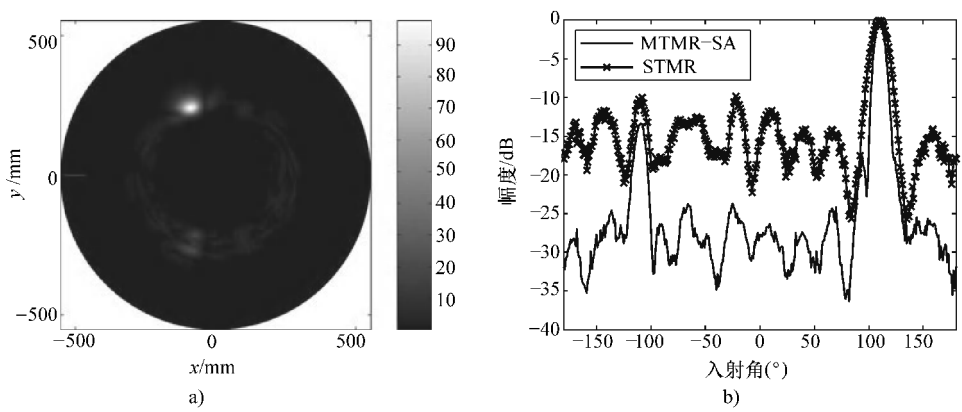


图 7.9

a) MTMR-SA 方法成像图 b) STMR (见图 7.8a) 与 MTMR-SA 波束指向图对比

形成一个平面波扫描 ROI。星形阵列接收到反射信号, 经过处理后获得高分辨率图

像。换言之，传输过程中的聚焦在材料中完成，接收过程中的聚焦在由所捕获快照经 DAS 处理离线执行。

在所提出的模拟中，远场点状散射体的方位和以前一样为 110° 。由于发射阵列是线性的，它产生一个镜像波瓣，传输角度被限制在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围，但应考虑各种角度的扫描步骤。在第一步中，光束以每步增加 10° 的方位角传输，这将产生 19×24 时间迹线的矩阵（19 个方位角和 24 个接收元件）。对所俘获的快照使用相同的分辨率进行处理，其结果如图 7.9a 所示。

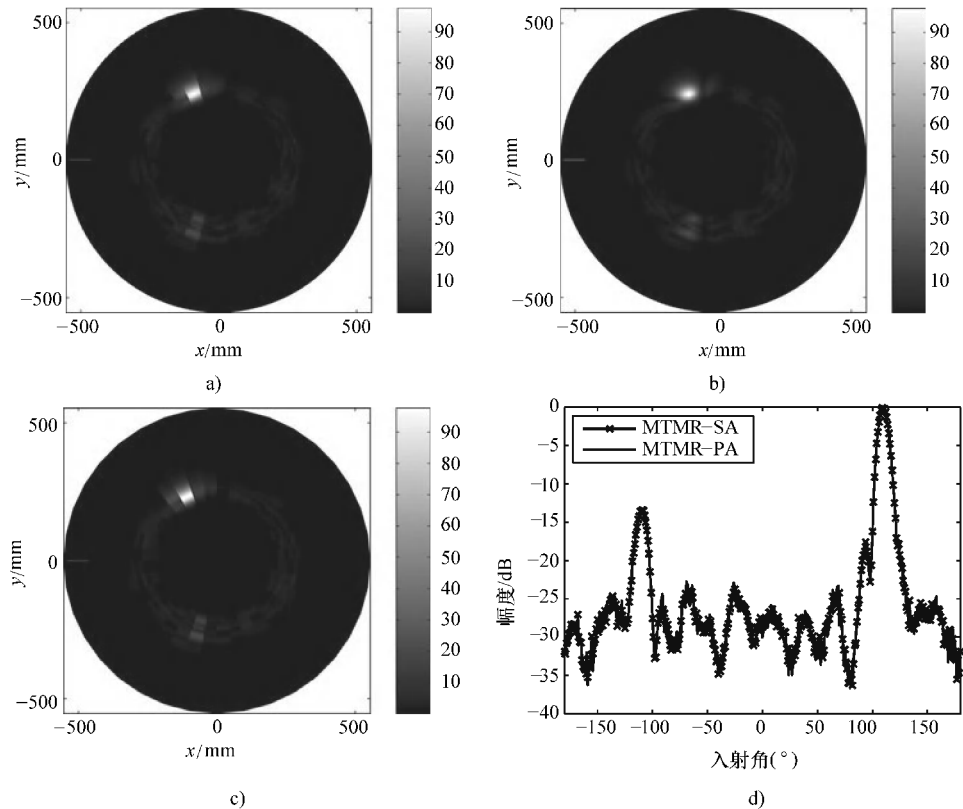


图 7.10 在 MTMR - PA 模式模拟下获得目标图像

a) $10^\circ/10^\circ$ b) $10^\circ/1^\circ$ c) $1^\circ/1^\circ$ d) 扫描步进值为 $1^\circ/1^\circ$ 时使用 MTMR - SA 和 MTMR - PA 方法获取的波束指向图

接着，在接收过程中使用 1° 角分辨率对相同的数据进行了处理，产生的结果如图 7.10b 所示。最后，在传输和接收过程中，用 1° 分辨率进行扫描模拟，由此将产生 181×24 的时间迹线阵列（181 个方位角和 24 个接收元件），结果如图 7.10c 所示。通过图 7.10a、b 和 c 的比较可知，步进值为 10° 时获得的分辨率相当差，如果所获得的数据在接收过程中经过高分辨率处理，分辨率仍不能得到改善；为了获得较为理想的分辨率，需要在传输中选用较小的步进量。

对图 7.10c 和图 7.8a 获得的波束指向图进行比较,如图 7.10d 所示。从图中可以看出,这两个方法中 MTMR-SA 和 MTMR-PA 产生的结果相同。

7.3.3 DORT-CWT 方法的数值验证

为检查 DORT 和 DORT-CWT 方法的性能,进行了数次数值实验,实验报告刊登在 Ambrozinski 等 (2012a)。然而,下面只介绍那些与 DORT-CWT 方法相关的部分。在本节中介绍用于模拟波传播的方法之后,将描述计算反向传播领域的方法。本节最后部分将给出仿真结果。

7.3.3.1 仿真算法

波传播现象通过第 2 章中描述的尖锐界面模型 (LISA/SIM) 的局部交换模拟进行模拟。为进行上述模拟,建立尺寸为 $700\text{mm} \times 700\text{mm} \times 2\text{mm}$ 铝板模型。该铝板模型使用高解析度网格单元,尺寸为 $c=0.5\text{ mm}$ 。模型中有三个人造板材损害:大小为 $10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的缺口,如图 7.11a 记为 R2;一个圆形洞,直径为 12mm ,记为 R0;尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的方形孔,记为 R1。由此产生的结构模型包括大约 1000 万个单元格。为了获取损伤处的后向散射反应,分析时间定为 0.5ms 。在所有模拟中,建立放置在板中心的线性阵列模型。阵列元素数量为 8,传感器的间距为 5mm 。宽带激励信号是中心频率为 100kHz 的 2 个周期正弦波信号经汉宁窗调制形成的。据观察,一个增强型非对称模式 A_0 和一个减弱型可以忽略不计的对称模式 S_0 在模型中激发。从色散曲线位于激励中心频率处的数值计算主导模式的波长为 12.9mm 。在每次模拟中,阵列中的一个元件充当发射器,而其他元件充当接收器,因此,模拟所有元素间反应及构建 TRO 矩阵需要所需分析的数量,就等于在该阵列传感器的数量。分散效果和几何扩展两者均考虑在内。

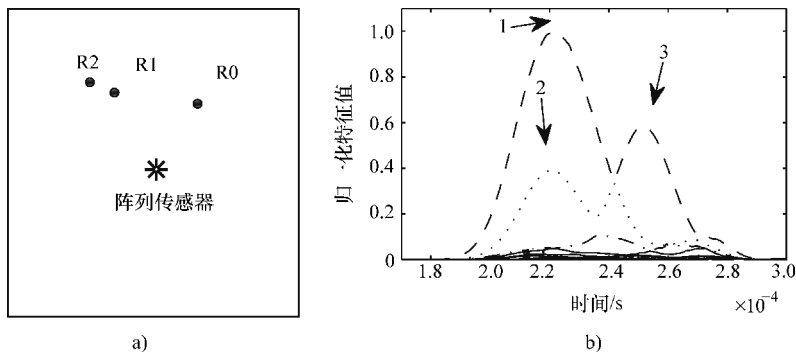


图 7.11

a) 仿真和实验中损伤位置分析 b) 模拟数据经 DORT-CWT 算法处理后的归一化本征值分布 (箭头指向反向传播所用特征值峰值)

7.3.3.2 反向传播数值算法

DORT 和 DORT-CWT 算法的最后一步是最显著的特征向量反向传播,其可以

在实际结构或数值模拟中进行。在本章中,反向传播场的计算基于式(7.22),它定义特征向量和信号之间的关系。这些关系适用于执行器,可使波聚焦在目标上。如果反向传播场以位图的形式展现,像素值 S_{ij} 可以通过空间域的式(7.22)计算得出,作为所有传感器发射信号的总和,如下式所示:

$$S_{ij} = \sum_p A_p \cos(kx_p^{ij} - \phi_p) \quad (7.25)$$

式中, k 为波数, x_p^{ij} 为像素点 S_{ij} 到传感器 p 的距离。波数 k 的值必须通过色散曲线中 $K * K$ 矩阵被对角化的频率计算。使用 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的像素分辨率建立下面各节的反向传播场。

使用此方法仅仅是获得的兰姆波反向传播粗略的表示,因为它只是假定单一频率的激发。然而,实际上,可以使用窄带信号。由于兰姆波的相速度是频率的函数,各种频率分量以不同速度行进,导致信号能量在空间域和时间域的扩展(Wilcox, 2003b)。然而,如下面所说,所提出的表示可以作为调查分析方法性能的足够近似。

7.3.3.3 仿真结果

在模拟场景中,如图7.11a所示建立板和缺陷的模型。使用DORT-CWT方法对元素之间反应的模拟进行了处理,其本征值时间分布如图7.11b所示。从图中可以看出,显著峰的数目等于损伤数目。另外,对应于特征值峰值,分别计算波传播距离所需的时间。波速假定为 A_0 模式角化频率下的群速度。所计算的距离分别为522mm、525mm和595mm,而从所述阵列中心到反射器的往返距离分别是509mm、510mm和602mm;很明显,计算值接近期望值。

对应峰值处的特征向量,如图7.11b箭头所指,经过了数值反向传播算法。由此产生的反向传播场如图7.12a、b和c所示,表明光束指向损伤的方向,图7.12d、e和f所示的极坐标图也证实了这一点。这意味着DORT-CWT方法能够正确地分析损伤问题。

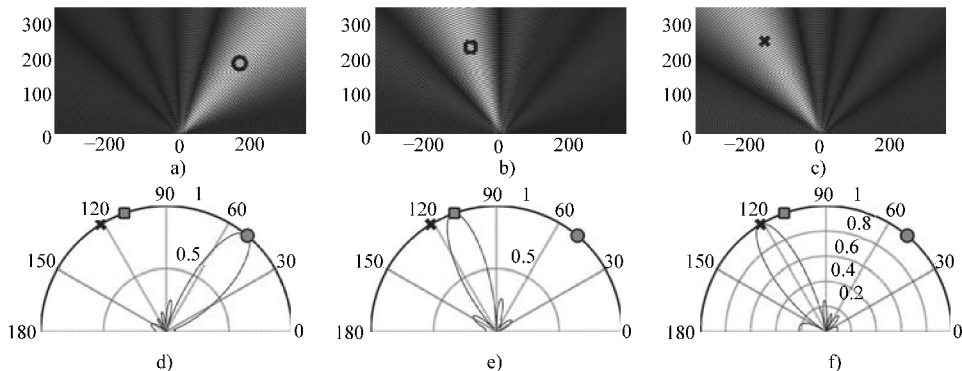


图 7.12 DORT-CWT 方法得到的特征向量反向传播数值计算

a) 损伤位置 R0 b) 损伤位置 R1 c) 损伤位置 R2 光束模式

d)、e) 和 f) 分别对应反向传播场 a)、b) 和 c) 的波束指向图。标记表明损伤位置。

反向传播场的维度是 mm 和方位角单位是 ($^{\circ}$)

7.4 实验结果

本节的实验描述由两部分组成。第一部分，将介绍 MTMR 使用下的成像实例。在这部分的实验中，压电传感器（PZT）的线性阵列用于多基和 PA 传输，而对响应的测量是在非接触方式通过激光扫描多普勒振动计（LSDV）的方法进行的。在第二部分中，使用 PZT 的星形阵列证实聚焦 DORT 成像技术。

7.4.1 实验装置

该实验是在大小为 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的铝板中进行的，如图 7.13a 所示。均匀排列的传感器线性阵列安装在板子中心。该阵列由 8 个 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ PZT 元件组成，型号为 CMAP12（Noliac 公司，丹麦），其以 5mm 的距离间隔开。该结构的传感器响应由板另一侧的激光扫描多普勒振动计获取。激发信号由 3 个正弦波周期组成音调脉冲信号经汉宁窗调制而成。信号发生器选用 PAS-8000（EC 电子公司，波兰），能同时产生 PA 模式中的单元素激发信号和时移信号。

激光扫描点形成于星形阵列，如图 7.13 所示，但是，由于水平线上采集的信号不用于成像，因此对应的发射/接收阵列的拓扑结构如图 7.7c 所示。

非接触式测量技术一个显著优点是它便于测量点网格的修改，这种修改便于分析传感子阵列的各种拓扑结构。然而，这套装置有一个严重的限制——没有考虑振子间散射效应遇到完整的 PZT 元件二维阵列的情况。

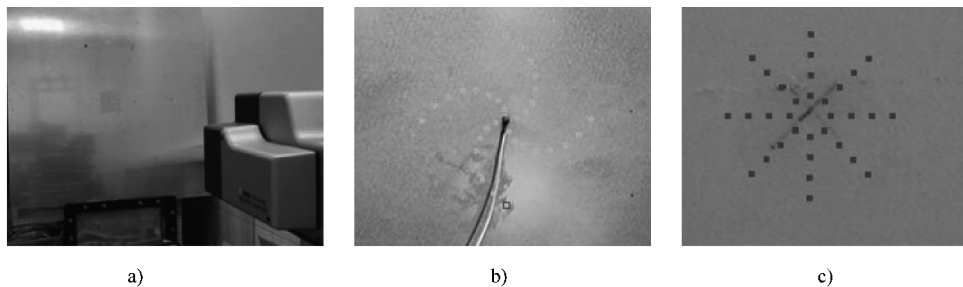


图 7.13

a) 验证 MSI 技术的实验装置 b) STMR 螺旋形结构中应用的激光振动计测量的螺旋形配置
c) MTMR 中应用的星形阵列结构

7.4.2 传感阵列的实验评估

基于 LSDV 测量的方法可用于评估一个任何形状的二维传感阵列，但是，本节仅讨论图 7.14 给出的拓扑结构。在本节中分析所有阵列均包括 32 个传感器。如图 7.14a 所示，星形阵列由 4 个相交成 45° 的线性子阵列组成。在子阵列中，元素间距 d

$=5\text{mm}$, 因此阵列外直径为 40mm 。如图 7.14b 所示的圆形拓扑结构, 由两个同心圆组成。大圆的直径为 25.62mm , 图中所示间距 $d=5\text{mm}$ 。图 7.14c 所示为螺旋形阵列, 由 Yoo 等于 2010 年创建。所述传感器被放置在同心圆上, 相邻同心圆半径差为 5mm , 每个同心圆上安置 4 个传感器, 且传感器相对前一同心圆上对应位置的传感器成 15° 角。传感器的间距从 5.11mm 变化到 8.87mm , 阵列的外直径为 80mm 。

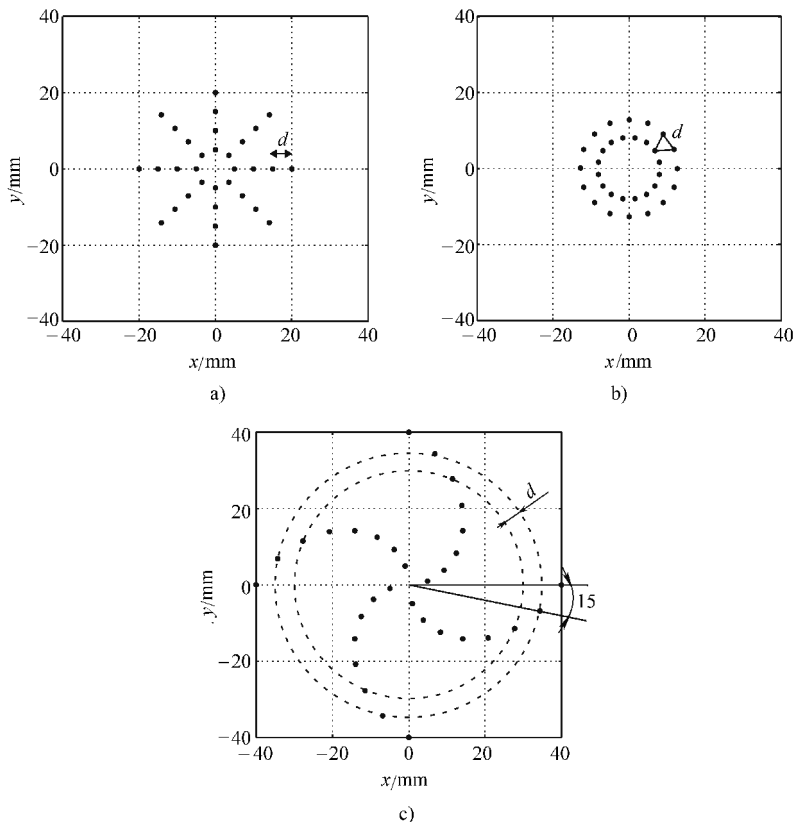


图 7.14 阵列的研究拓扑

a) 星形 b) 圆形 c) 螺旋形

非接触式测量技术, 不仅使传感阵列简易修改后的测量成为可能, 还使测量点转动成为可能。在这种方式中, 对于从一组角度入射的波, 可以评估传感阵列的性能。所有研究的拓扑结构至少具有两条对称的坐标轴, 因此, 波束方向图的评价限于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 其余方向可经过镜像获得。

图 7.13b 所示的该装置获得的信号经过了 DAS 算法处理, 获得的波束方向指向图如图 7.15a、b 和 c 所示; 图 7.15a、b 和 c 为螺旋形、圆形和星形阵列波的入射角度 60° 的情况。

在所有的拓扑结构均可以观察到: 模拟中获得的指向特性与基于该结构的传输函数和实验结果吻合。然而与模拟方法相比: 测量结果没有观察到更高的噪声电平

和信号消除现象。对入射角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的波束指向图进行了分析。从分析中可以看出，螺旋形阵列的主瓣宽度（估计角宽度为 -3dB ）是最窄的，这是因为螺旋形阵列具有最大孔径。同理，圆形阵列具有最小光圈，因此它的主瓣最宽。就最大旁瓣电平值而言，圆形阵列获得最低值，而螺旋形阵列具有最高值。因此，在所研究的拓扑结构中，星形阵列是波束宽度和旁瓣电平之间的折中。从以前的研究中可以发现所选特性估计参数的详细信息（Ambrozinski 等，2012b）。

7.4.3 有效孔径的实验评估

本节所做的第一个实验是评估阵列典型方位角的有效孔径。散射体位于阵列远场中 112° 方位角的位置。在第一步中，采用 MTMR-SA 方法，后续的元素被触发，获取各自的响应。快照的离线成像产生的结果如图 7.16a 所示。

在接下来的实验（MTMR-PA）中，发射阵列元素同时被时移信号激励。扫描范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，步进值为 10° 。所采集的数据用于分辨率为 1° 的成像，结果如图 7.16b 所示。

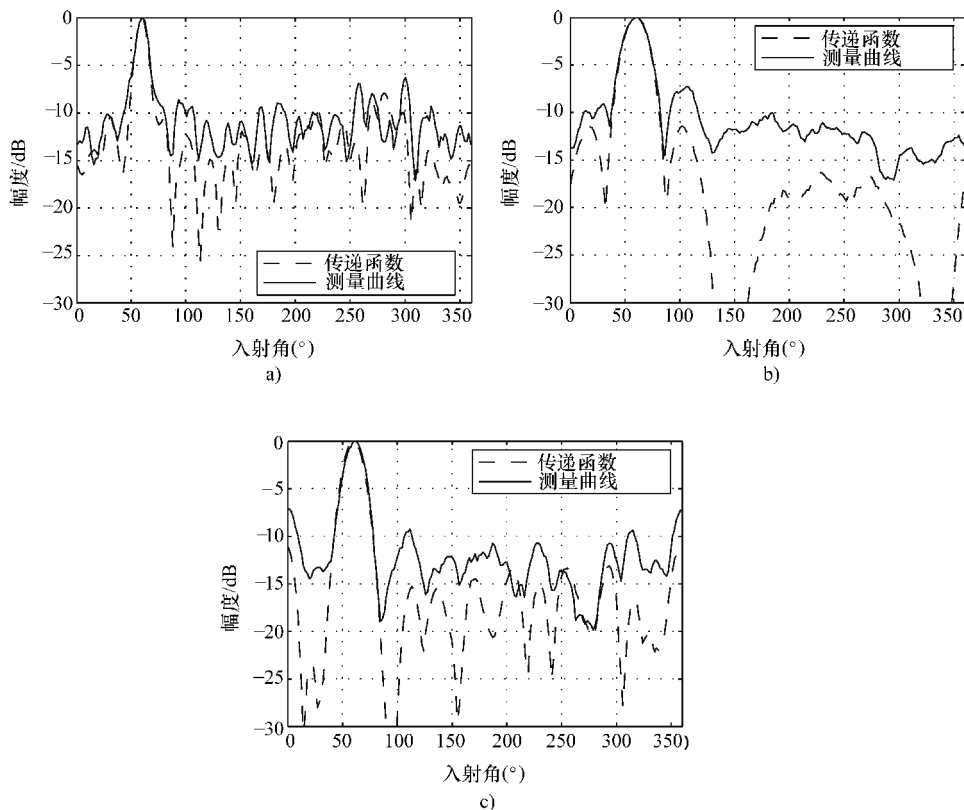


图 7.15 入射角 60° 波的波束指向图评估
a) 星形阵列 b) 圆形阵列 c) 螺旋形阵列

通过结果对比可以看出, MTMR-PA 比 MTMR-SA 分辨率差。这是因为有源传输的图像质量分辨率低的结果。基于 SA 方法获得的图像, 所得到的波束指向图如图 7.16c 所示。两个指向图的比较表明, 模拟结果与实验结果在主瓣宽度方面有较好的一致性。然而, 从实验结果中可以观察到较高的旁瓣电平和噪声电平。

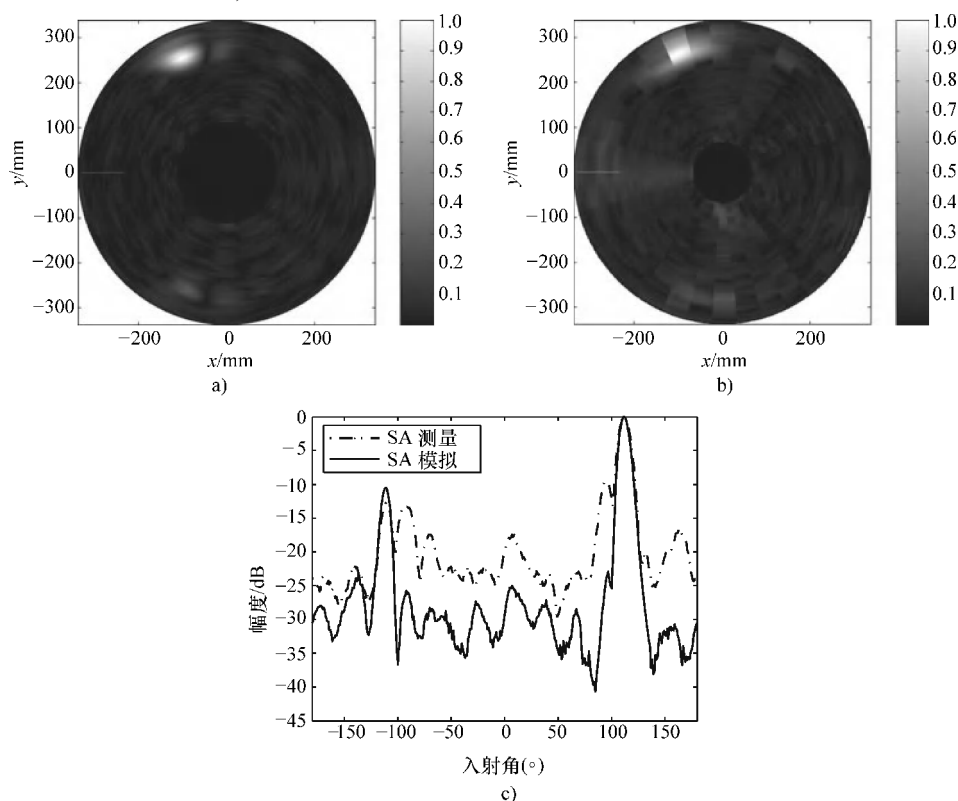


图 7.16

a) MTMR 损伤成像实验结果 b) MTMR-PA 损伤成像实验结果 c) 由实验和模拟数据获得的波束指向对比图

7.4.4 使用合成孔径的损伤成像

在接下来的实验中, 3 个散射体放置在板上如图 7.17a 所示。MTMR-SA 方法作用下的成像结果如图 7.17b 所示。从成像结果中可以观察到, SA 方法可以定位模棱两可的损伤位置, 对于每个反射体, 成像结果中存在相应的高对比度区域。

7.4.5 DORT-CWT 方法的实验验证

由于 DORT-CWT 方法的性能已在模拟中证实: 在铝板上由 8 个传感器的线性阵列上进行了两个系列的实验。同所有做过的实验一样, 第一步, 要记录数组元素间的响应。然而, 第二个步骤中进行的反向传播保持第一个实验系列中的数值。反向传播场的计算, 同上述模拟相同, 使用式 (7.25)。反向传播数值只能得到波传

播的粗略信息；第二个系列实验在传输模式中的阵列操作和 DORT 算法产生的信号中进行。上述波在板结构中的传播研究离不开激光扫描振动计的使用。

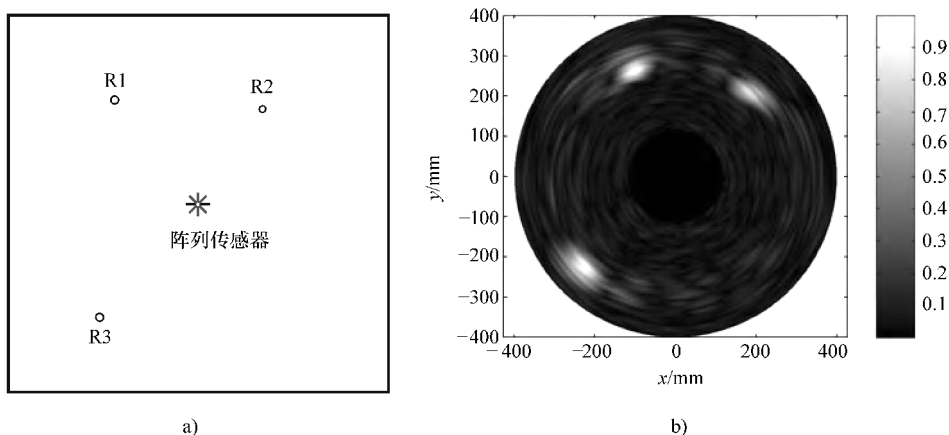


图 7.17

a) 散射点分布图 b) MTMR-SA 成像结果

7.4.5.1 实验装置

本实验使用的铝板尺寸为 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，具有一个尺寸为 $10\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的槽口，如图 7.11a 中 R2 所示。此外，使用蜡纸将两个小块 (R1, R0) 声学耦合到所研究结构。这些附着在板上能模拟后向散射（即损伤）的块，可以转移到不同位置。用蜡纸将由 8 个 CMAP12 PZT (Noliac 公司，丹麦) 方形多层传感器构成的线性阵列附着在板中间。这些传感器的大小为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，间隔为 5mm 。阵列中元素数目 8 是由硬件限制的。PAQ16000 与 PAS8000 的基本版本 (EC 电子公司，波兰) 用于信号生成和数据采集。为获取元素间的响应，选用了 2 周期且频率为 100kHz 的正弦波经汉宁窗调制后的脉冲串。在 2.5MHz 的采样频率下进行数据采集。用于检查板的 Noliac 执行器，能激发增强的不对称模式 A_0 和减弱的不对称模式 S_0 。主模式在频率 100kHz 的波长为 12.9mm 。

7.4.5.2 数值反向传播的实验结果

上述实验获得的信号经过 DORT-CWT 方法进行处理。特征值的时间分布如图 7.18a 所示，峰值如箭头所指。从图中可以观察到，峰值数目等于所研究结构中损伤的数目。反射点距离是通过每个峰值对应的时间和 A_0 模式的群速度来计算。计算得到的距离为 488mm 、 508mm 和 602mm ，所述阵列中心到目标的实际往返距离分别为 482mm 、 509mm 和 603mm ，计算值和理论值基本相符。对图 7.18a 峰值的特征向量进行了数值反向传播计算，如图 7.19 所示，损伤问题迎刃而解。从图 7.19d、e 和 f 中可以看出，波束控制精确度很高。

7.4.5.3 基于激光振动计的反向传播研究

在第二系列验证 DORT-CWT 方法性能的实验中，采取了监测板中的物理反向

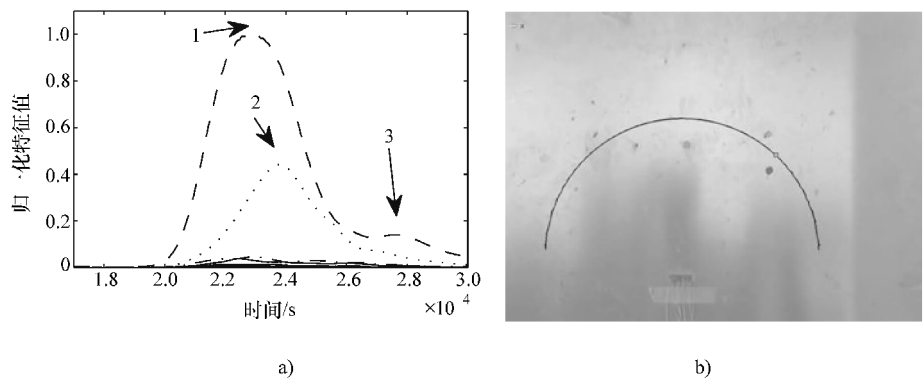


图 7.18

a) 数据经 DORT - CWT 算法处理后的特征值分布箭头指向数值反向传播计算中使用的特征值峰值
b) 用于振动计测量弧形测量点，线性阵列位于弧下

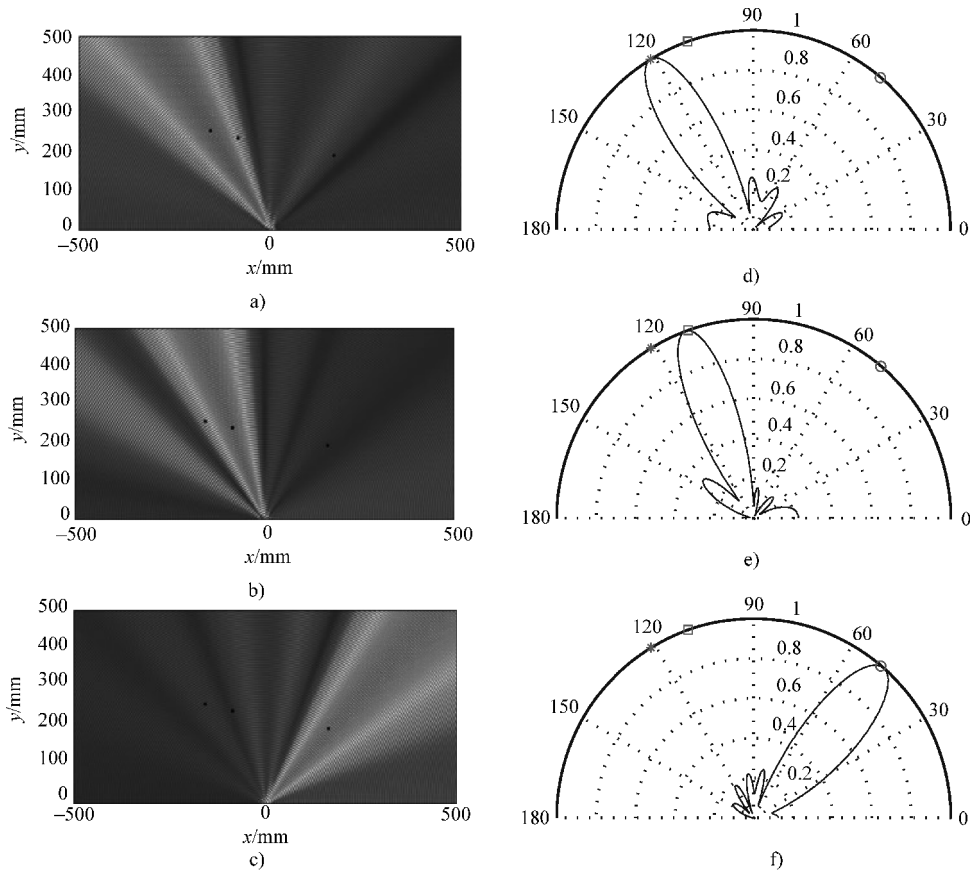


图 7.19

实验中采用 DORT - CWT 方法获得的特征向量的数值逆向传播。集中于损伤的波：
(a) R2；(b) R1 和 (c) R0。梁的模式 (d)、(e) 和 (f) 分别对应于逆向传播
场 (a)、(b) 和 (c)。标记表示损伤的位置。逆向传播的尺寸用毫米表征，梁的方位角用角度表征

传播。本实验仍然采用图 7.11 所示的实验装置, DORT - CWT 方法也仍使用图 7.18 给出的特征值分布。

在实验中, 阵列先测量元素间的响应, 又在传输模式中, 产生相移信号。按照式 (7.22) 计算出每个传感器的相移。窄带脉冲信号是为了在执行反向传播期间使用。在这些实验中, 生成了经汉宁窗调制的 4 周期正弦波阵。中心频率为 100kHz, 等于 $K * K$ 矩阵对角化使用的数值。扫描激光振动计 Polytec PSV - 400 用于监测阵列场。振动计能够进行板平面外表面速度的非接触测量。获取的时间信号点形成圆弧状网格, 如图 7.19b 所示。扫描振动计获得的第一个到达波包的最大值, 用于创建图 7.20 所示的波束指向图。从图 7.20 可以看出转向角度精确度高, 这证明了 DORT - CWT 算法正确地解决了板状结构的损伤问题。

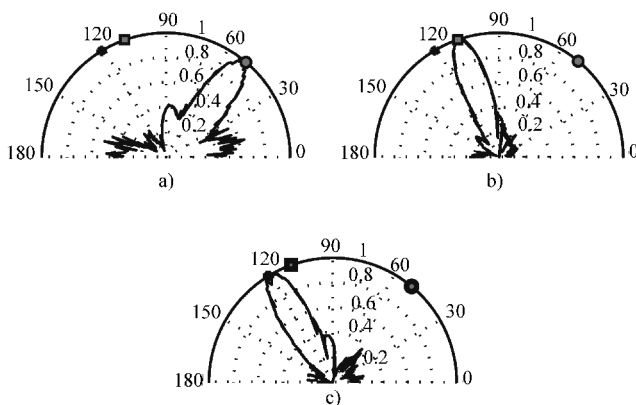


图 7.20 扫描激光振动计监测物理反向传播获得的光束指向图

a) R0 b) R1 c) R2

7.4.6 基于自聚焦发射阵列的损伤成像

基于前面各节描述中的配置, 即如图 7.7c 所示, 建立了星形有源超声相控阵。该阵列由 4 个线性子阵列组成。发射子阵列用于传输模式下激发时移信号, 而接收子阵列用于接收模式下获取该结构的响应。该阵列由 CMAP12 PZT (Noliac 公司, 丹麦) 构建而成。其大小为 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 2\text{mm}$, 子阵列中的元素间隔为 5mm。正如在前面的系统设置, 本系统的数据生成和采集均由 PAS800 与 PAQ16000 完成。所有实验均使用铝板, 如上所述。该阵列放置在板的中央点, 使用油作为耦合剂。在板检查中, 缺口 R2 如图 7.21a 所示。此外, 两个附加块 (即图 7.21 所示 R0 和 R1) 加入到模拟散射中。

本实验的目的是使用自聚焦阵列成像, 因此发射子阵列用来采集元件间的脉冲响应。DORT - CWT 用来计算本征值的时间 - 频率分布, 如图 7.21 所示。在上述分布图所示的特征值峰值用于反向传播计算。在反向计算中需要根据式 (7.22)

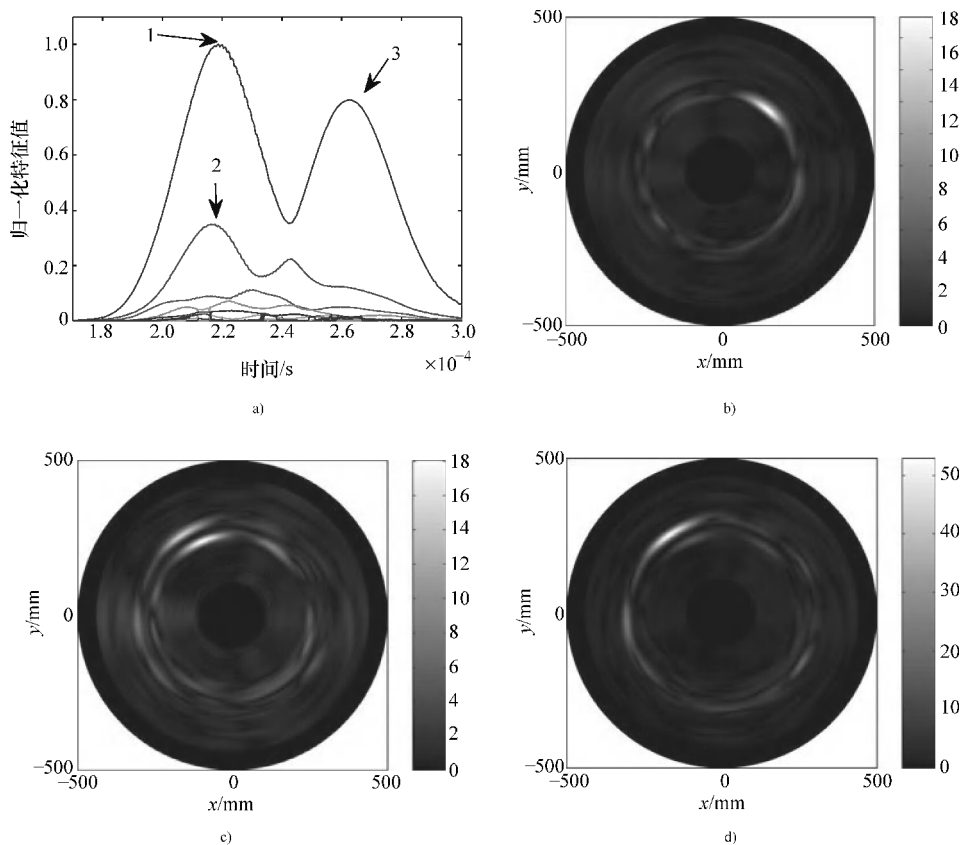


图 7.21

a) 实验中的散射点分布图 b)、c)、d) 当发射子阵列分别在 R0、R1、R2 所示目标方向上发生转向时，通过星形阵列获得的损伤图像

计算发射子阵列随时间的变化。所产生信号的带宽和激发频率与前面实验振动计中涉及的数值相同。当发射子阵列分别在 R0、R1 和 R2 所示目标方向上发生转向时，散射体的反射信号被子阵列获取，最终形成的损伤图像如图 7.21b、c 和 d 所示。随后，信号经过去除色散后应用到快照中，损伤成像就形成了。从图 7.21b、c 和 d 给出的结果可以看出，自聚焦成像能准确定位损伤。此外，在所有图像中可以看出，目标点是最强的。这证明了超声波束在目标点正确地转向。

7.5 讨论

本章概述了兰姆波波束形成的不同方法。首先，单基和多基设置针对模拟数据进行了比较。图 7.8a 和图 7.9a 给出的图像是用拓扑结构几乎相同的阵列获得的，其主要区别是，单基情况下选用额外元素作为发射元件；而多基情况下选择一些已有元素作为发射器。但注意，这些元素不用于响应测量。比较这两种方法获得的图

像，可以清楚地看到，多基方案优于单基。图 7.9a 给出波束图案中可明确看出，在主波束宽度和旁瓣电平方面，MSI 比 STMR 的结果更好。

本章接下来一系列模拟将介绍有源阵列情况下 MSI 概念在传输模式 (MTMR - PA) 下扫描 ROI 操作的可能性。但是该技术的实施需要在设定方位角进行大量传输。图 7.10a 和 b 所示图像通过获得一组 19×24 (19 个传输方位角, 24 个接收元件) 的时间迹线数据构成。虽然大量数据用来创建这些图像, 但这些数据不能复制 MTMR - SA 方法下获得的图像质量, 如图 7.9a 所示。即与 MTMR - SA 中步进值相等时, 才可以获得图 7.9a 所示图像。为了产生图 7.10c 所示的图像, 需要处理 181×24 时间痕迹数据, 并且从图 7.10d 中可以看出, 其波束指向图与 MTMR - SA 技术使用下获取的指向图相同。然而, 为了生成 MTMR - SA 图像, 需使用 8×24 (8 个发射元件, 24 个传感器) 的快照。此外, 在发射和接收过程中, 离线成像可以用任意的分辨率, 仅受信号采样频率的限制。

上述这些模拟结果已在实验中得到证实。例如从图 7.16a 和 b 可以看出, 尽管 MSI 发射 - 接收周期少, 但其所产生的图像比 PA 扫描质量好。实验数据和模拟数据分别经 MSI 处理后, 所得到的波束指向对比图如图 7.16c 所示。两者在主瓣宽度方面有很好的 consistency, 然而, 测量中可以观察到较高的旁瓣和噪声电平。

最后一个实验中, 对板结构 3 个缺陷进行多基设置, 如图 7.17 所示。3 个缺陷使用不同的布局, 如图 7.21 所示。在自聚焦的实验中也利用了这 3 个布局不同的缺陷。对比两种技术的结果可看出, MSI 技术获取的单一图像, 如图 7.17b 所示, 含有所有缺陷信息; 而自聚焦技术有选择性地获取缺陷信息, 如图 7.21b、c、d 所示。

7.6 结论

在本章中提出各种兰姆波波束形成方法; 对合成孔径与单基、自聚焦方法进行了比较。

基于这些结果可总结出, 多基的方法利用多个连续传输的优势, 能够从一系列不同的位置找到目标, 形成高品质的图像。与使用相同阵列拓扑的单基设置相比, 这种技术应用中的主瓣宽度更窄, 旁瓣电平更低。

模拟实验中表明: 在 PA 模式下, 使用有源发射阵列检测结构时, 聚焦可以部分起作用。然而, 为获取高分辨率图像, 需要大量传输接收周期。此外, 有源方法需要能够同时产生时移信号的多信道系统, 而在多基设置中, 仅一个单一的复用输出信道就足够了。

因此, SA 多基的方法中, 数据可以由相对简单的硬件装置来获取, 随后用任意分辨率离线处理即可。可见此方法要优于在 SHM 应用的有源方案。然而, 如果有源阵列使用自聚焦, 可以用来传输散射体上的聚焦光束。以这种方式, 可以获得连续照明散射体的单独图像。

参考文献

- Ambrozinski L, Stepinski T and Uhl T 2011 Self focusing of 2D arrays for SHM of plate-like structures using time reversal operator. In *Structural Health Monitoring Condition-Based Maintenance and Intelligent Structures* (ed. Chang FK). DEStech Publications, Inc., vol. 1, pp. 1119–1127.
- Ambrozinski L, Stepinski T and Uhl T 2012b Experimental comparison of 2D arrays topologies for SHM of planar structures. *Proceedings of SPIE* **8347**, 834717.
- Ambrozinski L, Stepinski T, Packo P and Uhl T 2012a Self-focusing Lamb waves based on the decomposition of the time-reversal operator using time – frequency representation. *Mechanical Systems and Signal Processing* **27**, 337–349.
- Doctor S, Hall T and Reid L 1986 SAFT the evolution of a signal processing technology for ultrasonic testing. *NDT International* **19**(3), 163–167.
- Drinkwater BW and Wilcox PD 2006 Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review. *NDT & E International* **39**(7), 525–541.
- Engholm M and Stepinski T 2010a Direction of arrival estimation of Lamb waves using circular arrays. *Structural Health Monitoring* **10**(5), 467–480.
- Engholm M and Stepinski T 2010b Using 2D arrays for sensing multimodal Lamb waves. *Proceedings of SPIE* **7649**, 764913.
- Fink M 1992 Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **39**(5), 555–566.
- Fink M, Cassereau D, Derode A, Prada C, Roux P, Tanter M, Thomas JL and Wu F 2000 Time-reversed acoustics. *Reports on Progress in Physics* **63**(12), 19–33.
- Giurgiutiu V 2008 *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*. Academic Press.
- Ing R and Fink M 1995 Surface and sub-surface flaws detection using Rayleigh wave time reversal mirrors. *IEEE Ultrasonics Symposium* **1**, 733–736.
- Ing R and Fink M 1996 Time recompression of dispersive Lamb waves using a time reversal mirror-application to flaw detection in thin plates. *IEEE Ultrasonics Symposium* **1**, 659–663.
- Ing R and Fink M 1998 Time-reversed Lamb waves. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **45**(4), 1032–1043.
- Karaman M, Wygant IO, Oralkan O and Khuri-Yakub BT 2009 Minimally redundant 2-D array designs for 3-D medical ultrasound imaging. *IEEE Transactions on Medical Imaging*.
- Kerbrat E, Prada C, Cassereau D and Fink M 2002 Ultrasonic nondestructive testing of scattering media using the decomposition of the time-reversal operator. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **49**(8), 1103–1113.
- Liu L and Yuan FG 2010 A linear mapping technique for dispersion removal of Lamb waves. *Structural Health Monitoring* **9**, 75–86.
- Lockwood GR, Li PC, O'Donnell M and Foster FS 1996 Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*.
- Lockwood GR, Li PC, O'Donnell M and Foster FS 1998 Real-time 3-D ultrasound imaging using sparse synthetic aperture beamforming. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **45**(4), 980–988.
- Michaels JE 2008 Detection, localization and characterization of damage in plates with an in situ array of spatially distributed ultrasonic sensors. *Smart Materials and Structures* **17**(3), 035035.
- Mordant N, Prada C and Fink M 1999 Highly resolved detection and selective focusing in a waveguide using the DORT method. *The Journal of the Acoustical Society of America* **105**(5), 2634–2642.
- Moreau L, Drinkwater B and Wilcox P 2009 Ultrasonic imaging algorithms with limited transmission cycles for rapid nondestructive evaluation. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **56**(9), 1932–1944.
- Prada C and Fink M 1998 Separation of interfering acoustic scattered signals using the invariants of the time-reversal operator. application to Lamb waves characterization. *The Journal of the Acoustical Society of America* **104**(2), 801–807.
- Prada C, Manneville S, Spoliansky D and Fink M 1996 Decomposition of the time reversal operator: Detection and selective focusing on two scatterers. *The Journal of the Acoustical Society of America* **99**(4), 2067–2076.
- Prada C, Wu F and Fink M 1991 The iterative time reversal mirror: A solution to self-focusing in the pulse echo mode. *The Journal of the Acoustical Society of America* **90**(2), 1119–1129.

- Raghavan A and Cesnik CES 2007 Review of guided-wave structural health monitoring. *The Shock and Vibration Digest* **39**(2), 91–114.
- Wilcox P 2003a Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **50**(6), 699–709.
- Wilcox P 2003b A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **50**(4), 419–427.
- Xu B and Giurgiutiu V 2007 Single mode tuning effects on Lamb wave time reversal with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. *Journal of Nondestructive Evaluation* **26**, 123–134.
- Yoo B, Purckar AS, Zhang Y and Pines DJ 2010 Piezoelectric-paint-based two-dimensional phased sensor arrays for structural health monitoring of thin panels. *Smart Materials and Structures* **19**(7), 075017.

第 8 章 模态滤波技术

8.1 引言

模态滤波器由 Meirovitch 和 Baruh 在 1982 年首次引入,他们利用模态滤波器抑制在分布参数结构控制中出现的溢出问题。溢出是能量从受控模式泵入到非受控模式的一种现象。针对溢出现象,他们决定用第 $2n$ 阶控制系统取代 n 个独立控制系统,分别控制系统的每个自由度。他们利用模态滤波器表示出分布式参数系统具有以下缺点:必须知道质量空间分布的功能(这仅适用于简单的几何形状),并对该对象的各点进行振动响应测量。为了避免出现第二个问题,他们提出了一个方法,利用有限数量点上的传感器的测量值进行内插函数。然而,在这种情况下,过滤精度取决于内插的质量。因此,在 20 世纪 90 年代初提出离散模态滤波器(Zhang 等, 1989)。模态滤波器是一个工具,通过绘制从物理空间到模态空间的响应向量(Zhang 等, 1990),提取从系统输出的每个单独模式的模态坐标。假设模态残留 R_{rpp} 是虚构的形态,开始构建第 r 个离散模态滤波器,它对应传递函数 $H(\omega)$ 的第 r 极:

$$R_{rpp} = j \cdot 1 \quad (8.1)$$

然后,确定 1 个自由度的频率响应函数 (FRF) $H_{pp}(\omega)$, 如下式:

$$H_{pp}(\omega) = \frac{R_{rpp}}{j\omega + \lambda_r} + \frac{R_{rpp}^*}{j\omega + \lambda_r^*} \quad (8.2)$$

式中, λ_r 是系统的第 r 极,对于给定的频率范围,上述的 FRF 是由 k 值决定的:

$$H_{pp}(\omega) = [H_{pp}(\omega_1) H_{pp}(\omega_2) \cdots H_{pp}(\omega_k)]^T \quad (8.3)$$

假设采用单激励,测量 N 点的响应信号,实验的 FRF 矩阵可以用 $k \times N$ 矩阵表示:

$$H_{kN}(\omega) = \begin{bmatrix} H_1(\omega_1) & H_2(\omega_1) & \cdots & H_N(\omega_1) \\ H_1(\omega_2) & H_2(\omega_2) & \cdots & H_N(\omega_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(\omega_k) & H_2(\omega_k) & \cdots & H_N(\omega_k) \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

以这种方式形成的 FRF 矩阵可用来确定倒数模态向量矩阵 ψ_p :

$$\psi_p = H_{kN}^+ \cdot H_{pp} \quad (8.5)$$

式中, $+$ 表示一个伪逆矩阵。倒数模态向量应该与所有模态向量正交,除了一个被

滤波器调谐的向量外，正因为那样，可以采用它们将系统响应分解到模态坐标 η_r ：

$$\eta_r(\omega) = \{\psi_r\}^T \cdot \{x(\omega)\} = \left(\frac{\{\phi_r\}^T}{j\omega - \lambda_r} + \{\psi_r\}^T \{\phi_r^*\} \frac{\{\phi_r^*\}^T}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \cdot \{f(\omega)\} \quad (8.6)$$

式中， ψ_r 是第 r 个模态向量， $x(\omega)$ 是系统的响应向量。现在，通过已知的输入测量模态坐标 η_r 来确定所有峰值的 FRF 是可能的，除了第 r 个被滤出外。

这种形式的模态滤波器更加实用，很快就成为了一个非常实用的工具，它还可以用于其他的应用，如柔性结构振动控制、实验和分析模态向量的相关分析以及系统响应中操作力的识别等（Zhang 等，1990）。模态过滤的一种更可能的应用是探测损伤，将在下一节进一步讨论。

8.2 当前发展状况

在用于损伤探测的诸多算法中，有一组是基于振动的方法，即利用在时域和频域下振动加速度数据的方法。这些方法基于对系统振动响应变化的观察，而这些变化一般由损伤发生引起的。这种方法的主要思想是基于模型的诊断，按以下方式定义：给定一个未损伤的特定系统模型，将这个模型与当前状态下物体测量数据模型进行对比。这两种模型之间的差异表明对象属性发生变化（如刚度或质量的下降），这些变化可能是由损伤造成的。在可以应用的方法中，最简单的模型是模态模型，由于它比较容易识别，借助模态分析方法，这种模型可以从响应数据中识别出来。然而在损伤探测时，基于模型诊断的模态应用存在一些局限性和缺点。首先，区分参数变化是由损伤引起的，还是环境（如温度、湿度）变化的结果，就是一个严重问题。对土木工程结构（如桥梁、高架桥、桅杆、高楼大厦等），在很短的时间内温度的变化就可能达到几十摄氏度，结果引起了刚度变化，最终导致模态参数的变化。当对象受热不均时，如当对象的一面暴露在太阳下，而另一面则由于接近水面而保持在一个恒定的温度，这种影响更加明显。这和湿度变化的影响是相似的，混凝土吸收水分导致其质量增加，模态参数发生变化。当然，现有的方法可以消除环境变化对诊断程序正确性的影响。在大多数应用情况下，准备一张表格，将不同环境温度和湿度下的模态参数汇总在这张表格中。对每个对象而言，依据一组实验结果，这个表都是独特且独立的。消除天气条件对监控系统效率影响的一个更加复杂的方法是应用环境滤波器（Peeters 等，2000），它通常是一组从实验数据中得到的自回归滑动平均模型（ARMA）。当以这种方式消除环境变化影响时，对象的任何变化（如在桥上甲板衬另一层沥青）都需要重新测量整组数据，以更新查找表或者环境滤波器。程序自动化的困难进一步限制了基于模型诊断的模态分析。尽管目前许多科学中心自主研发了模态分析程序，但工程师之间完全独立，这在实践中仍然是个问题。这进一步导致一种事实，定期以自然频率、模态阻尼系数

和模态向量的形式对诊断症状进行估计，它们依赖于测试团队的主观评估。不过，还有一种方法，就是采用物体的振动数据和模态模型，除此以外，它还克服了上面列举方法存在的所有问题。这是利用模态滤波在物体上记录数据的优势。

1993 年，Slater 和 Shelley 第一次将模态滤波器用于损伤探测和 SHM。他们开发了一套具有传感和驱动能力的智能 SHM 方法。该方法集成了控制和监测程序，分布于整个结构空间的传感器由一组模态滤波器进行处理，它自动跟踪特定模式的模态坐标和模态参数的轨迹变化（Shelley 等，1992）。自适应模态滤波器被应用于跟踪特定模式的时变行为，以此预测结构系统的健康。自适应模态滤波器对个别传感器的失效和校准偏移并不敏感，并且会自动忽略这些失效的传感器。它可以探测进入系统的扰动和识别失效驱动器的位置。上述方法除有效探测损伤外，还具有自诊断的能力。然而它只应用于主动振动控制系统，这就极大地限制了其实用性。该方法的发明者开发了两种不同的自适应模态滤波器。第一种是实时运转的，但它需要激励力时程的信息。这种转化的框图如图 8.1 所示。

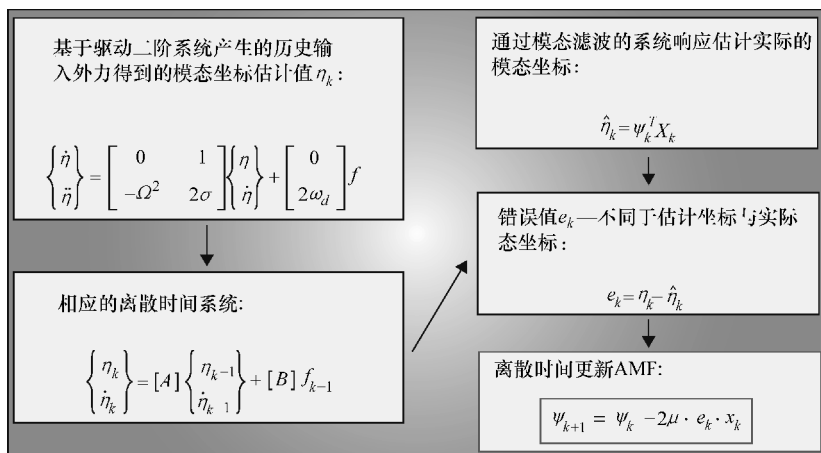


图 8.1 自适应模态滤波器 (AMF) 方案——已知激励力的转化

模态滤波器的更新程序第二种不需要力载荷的测量。它在频域中运行而不是在实际的时间中运行。自适应模态滤波器第二种转化框图如图 8.2 所示。

上述方法在损伤探测方面是相当有效的，它拥有自诊断的能力，但是在作者给出的清单中仅可以应用于主动振动控制系统中。

Gawronski 和 Sawicki 于 2000 年提出了另外一种利用模态滤波器进行损伤探测的方法。他们采用模态范数作为损伤指数，计算出各个测量传感器的位置和每个模式对应的频段。为计算这些范数，需要倒数模态向量矩阵，也就是模态滤波器参数。接着，将所获得的整组模态范数与一个系统参考状态的类似组范数进行对比。该方法允许对损伤进行探测和定位。其框图如图 8.3 所示。

该方法的主要缺点是必须进行大量的计算（每个模式和测量位置均需进行模

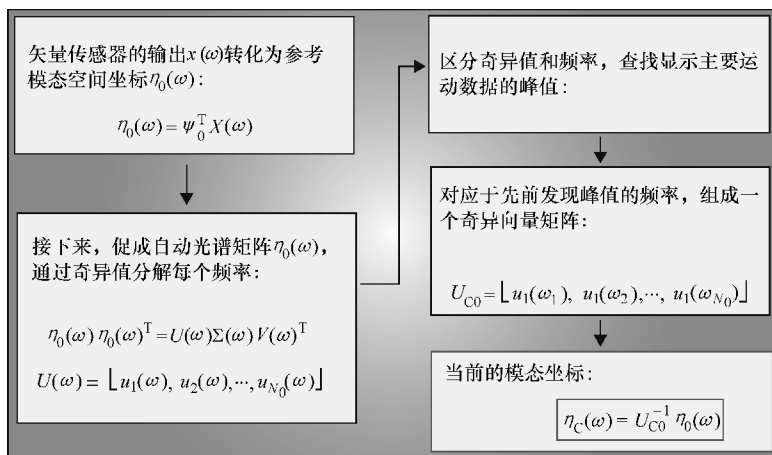


图 8.2 自适应模态滤波器 (AMF) 方案——未知激振力的转化

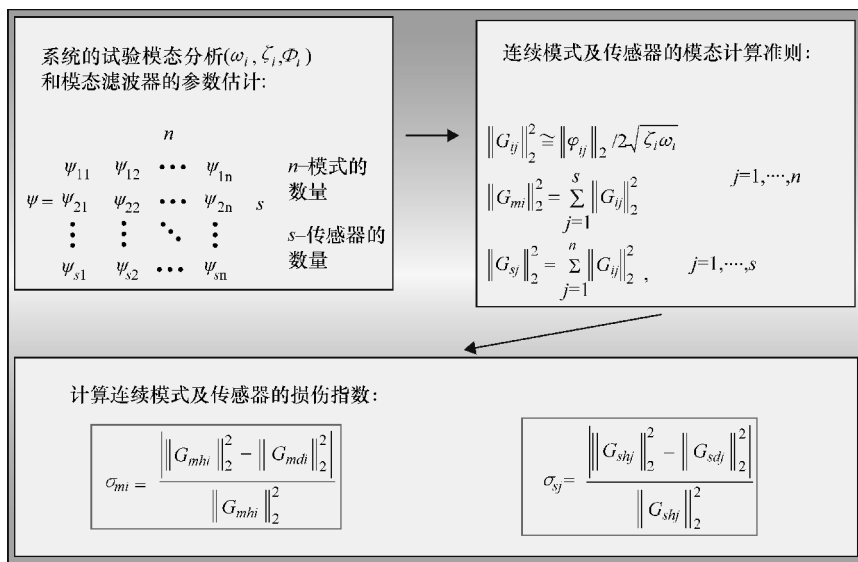


图 8.3 基于模态范数的损伤探测流程图

态范数计算)。

另一组采用模态滤波器探测损伤的应用程序由 El - Ouafi Bahlous 等于 2007 年建立的。所建议的方法需要系统未损伤和当前状态下的振动数据以及利用特定损伤参数的参数化有限元模型。利用当前状态下系统响应的模态过滤计算剩余函数,结果表明其服从正态分布,未损伤状态均值为 0 和损伤状态均值不为 0。为验证残余统计量,提出了广义对数似然比试验。这个试验考虑到损伤探测。接下来,开始损伤定位和识别程序。它基于多灵敏度与否决试验(测试的数量等于参数 θ 的数

量)。损伤诊断的步骤如图 8.4 所示。

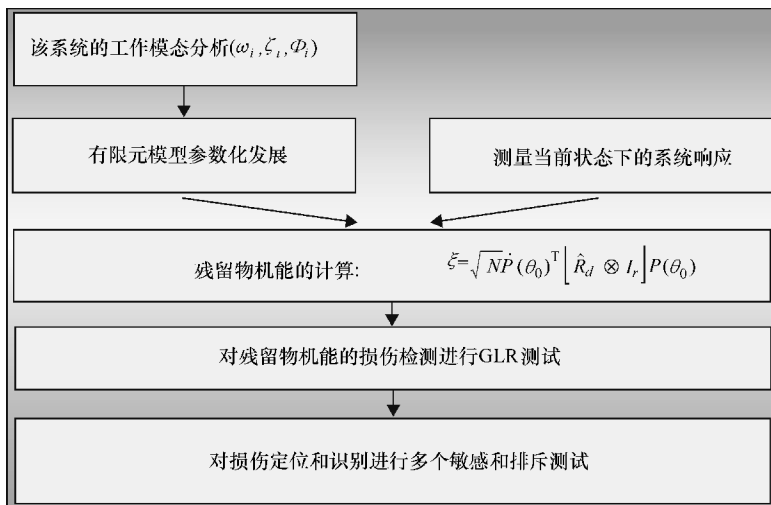


图 8.4 诊断程序框图。GLR—广义对数似然比

此外,这种方法对计算能力要求很高。它最大的劣势就是必须使用有限元模型。而且,不同的模式需对应不同的有限元模型。

Deraemaeker 和 Preumont 于 2006 年提出了在 SHM 中使用模态滤波器的另一种方式。通过一个模态滤波器过滤,一个物体的频率响应函数只有一个峰值与自然频率相对应。当物体刚度和质量发生变化时(当物体发生损伤时出现这种情形),过滤器停止工作,相对于其他过滤器而言,在不完全过滤自然频率的条件下,在输出特性上开始出现其他峰值。另一方面,若整个刚度或质量矩阵的整体变化(由于温度或湿度的变化)不会损坏过滤器,过滤特性仍然有一个峰值,但在频域中稍微有点移动。上述说明的图解如图 8.5 所示。

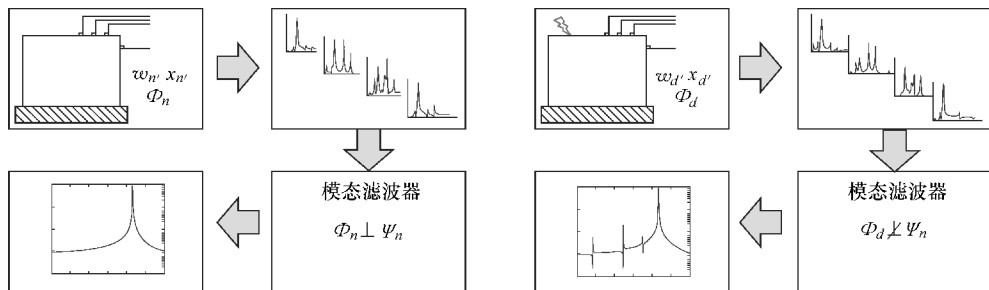


图 8.5 损伤探测和环境影响过滤程序

作者认为这种方法很有发展前景,主要原因如下:

- 1) 计算成本较小(不需要在每次诊断时进行模态分析)。

- 2) 可以自主操作（工程师不需要做模态分析）。
- 3) 环境变化具有鲁棒性（任意温度和湿度）。

存在的唯一问题是模态滤波器对测试数据的处理不够完美，也就是即使是对未损伤物体的测试数据，在自然频率区也有一些小峰值。由于这个原因，仅仅基于峰值存在来探测损伤存在的问题，可能会出现误报。这就是 Mendrok 和 Uhl 于 2010 年提出的另一种数据解释的原因。

Mendrok 和 Uhl 在 2008 年将上述方法扩展到损伤定位，并在 2011 年进行了进一步的描述。通过增加损伤定位来扩展这个方法是基于下面事实：在大多数情况下，损伤仅局部干扰模式形状。这就是许多损伤定位方法采用模式形状作为输入数据的原因。因此，这是可能的，将一个物体划分为若干区域，利用多个传感器对这些区域进行测量，然后建立独立的模态滤波器分别处理这些传感器采集的数据。在没有损伤的区域，模式形状不会发生变化，并且在没有额外峰值输出的情况下，模态滤波器保持工作。当考虑布置在损伤附近的传感器组时，由于损伤影响，模式形状被局部干扰，并且模态滤波器不会完全过滤传感器所测量的数据的特征。这种扩展方法的主体思想如图 8.6 所示。

这种技术是前面方法的扩展，它具有前者所有的优点，而且允许对损伤近似定位。

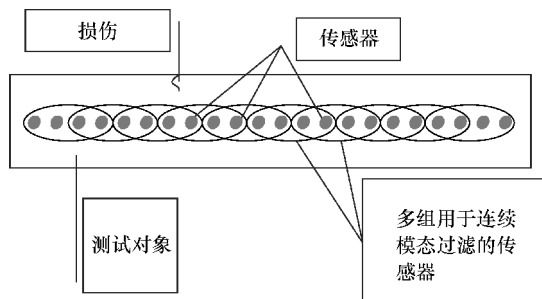


图 8.6 损伤探测和环境影响过滤程序

8.3 方法的制定

本节讲述基于模态滤波器的损伤探测步骤。首先，让我们看一看对损伤物体记录的数据与不同温度下的数据进行模态过滤的差异。考虑一个动态系统，其比例阻尼通过运动方程描述，以矩阵形式给出。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad (8.7)$$

式中， M 、 C 、 K 分别是质量、阻尼和刚度矩阵， $C = c_1 \cdot M + c_2 \cdot K$ (c_1 、 c_2 是实常数)， f 是激励力矢量。

式 (8.7) 给出了系统的模态模型，通过求解下列的广义特征值问题来确定：

$$\left(\left(\frac{s^2 + s \cdot c_1}{s \cdot c_2 + 1} \right) \cdot M + K \right) \cdot X(s) = 0 \quad (8.8)$$

如上一节所述,模态滤波器使用倒数模态向量分解系统响应。它发生的原因是由于第 r 个倒数模态矢量 ψ_r 正交于除了第 r 个以外的所有模态矢量。在大多数情况下,当物体发生损伤时,它的局部刚度将下降。刚度矩阵不同,特征值(自然频率和模态阻尼系数)和特征向量(模态向量)都改变。进一步的事实是,由于通过未损伤物体获得的倒数模态向量不是完全正交于模态向量,结果,模态过滤器不会完全隔离来自系统响应的其他模式的影响。所以,为什么环境的变化,例如温度或湿度的变化,不会影响模态过滤器?现在,让我们想象一下,物体周围温度增加,基于此,物体材料的杨氏模量减少了一个特定的值。如果我们考虑一个理想情况,当整个物体具有相同的温度,并且它是由均匀的物质构成,那么刚度矩阵的变化可以定义如下:

$$K_t = \alpha \cdot K \quad (8.9)$$

式中, K_t 是温度较高的刚度矩阵, α 是刚度变化对温度的相关系数。

通过求解式(8.9),可能得到含有特征值的对角矩阵 Λ 和模态向量矩阵 Φ 。利用这样一个解,未损伤的系统的广义特征值问题可以写成下面的形式:

$$-K \cdot \Phi = M \cdot \Phi \cdot \Lambda \quad (8.10)$$

由于质量矩阵 M 是平方和可逆的,广义特征值问题可以表达为一个标准特征值问题:

$$M^{-1} \cdot (-K) \cdot \Phi = \Phi \cdot \Lambda \quad (8.11)$$

对于在较高温度下的系统,可以形成相同的方程:

$$M^{-1} \cdot (-\alpha \cdot K) \cdot \Phi_t = \Phi_t \cdot \Lambda_t \quad (8.12)$$

式中,系统在较高温度下的模态参数用下标 t 表示。

用式(8.12)除以式(8.11),并进行一些简单的数学运算,可以得到如下:

$$\Lambda_t = \alpha \cdot \Lambda \quad (8.13)$$

将式(8.13)代入式(8.12),并和式(8.11)进行比较,显然:

$$\Phi_t = \Phi \quad (8.14)$$

这就保证模态滤波器的进一步操作,即在滤波特性上没有其他的峰值。

在上一节提出的假设基础上,我们可以采用下列方式制定一个诊断程序:

- 1) 初步测量和分析:在参考状态下监测物体的模态试验与分析。
- 2) 模态过滤公式化:评估参考状态中物体的倒数模态向量。
- 3) 测量当前状态下物体的选择性特性(频率响应函数、互功率谱密度、功率谱密度)。
- 4) 采用模态滤波器过滤参考模型的记录特征。
- 5) 从物体固有频率区域的滤波特性计算损伤指数。

上述第5点提到的损伤指数可以通过以下方式的一种进行计算:

- 振幅差异。

- 包络差异。

$$DI_2 = \int_{\omega_s}^{\omega_f} |x_i(\omega) - x_{ref}(\omega)| d\omega \quad (8.15)$$

式中, ω_s 是分析波段的起始频率, ω_f 是分析波段的截止频率, x_i 是当前状态下的特性, x_{ref} 是参考状态下的特性。

- 散射信号的包络。

$$DI_3 = \int_{\omega_s}^{\omega_f} |x_i(\omega) - x_{ref}(\omega)| d\omega \quad (8.16)$$

- 分散能量。

$$DI_4 = \frac{\int_{\omega_s}^{\omega_f} |x_i(\omega) - x_{ref}(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_s}^{\omega_f} |x_{ref}(\omega)|^2 d\omega} \quad (8.17)$$

DI_4 可以得到最好的结果, 推荐使用该方法计算损伤指数。其诊断程序如图 8.7 所示。

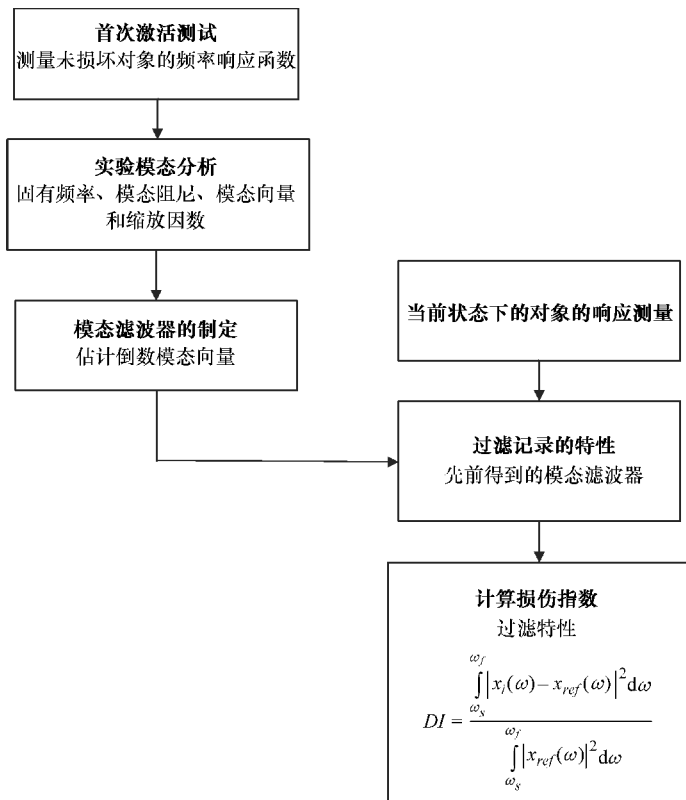


图 8.7 所提出的诊断程序框图

除了被模态滤波器调谐的参数以外, 仅仅计算直接邻近模型固有频率的频域的

损伤指数。在所考虑的5%固有频率，建立了连续的频率间隔带宽。

8.4 方法的数值验证

下一步对该方法进行模拟验证。为验证方法对损伤位置的灵敏度、在连续试验中传感器位置的不准确性、所测量特性的噪声以及环境条件的变化，如温度和湿度，开展大量的试验工作。本节介绍用于模拟的模型，模拟结果以及基于模型的概率探测（MPOD）结果。

8.4.1 用于模拟的模型

建立三种不同的物理系统模型以验证程序。所有模型均采用有限元法（FEM）。第一个模型用来验证损伤位置的灵敏度，在连续试验中传感器位置的不准确性以及所测量特性的噪声。直接使用 MSC. Patran 2008 R1 软件建立有限元模型。它代表在它的自由端支撑一个尺寸为 $200\text{mm} \times 40\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的钢梁。采用 69000 个固体

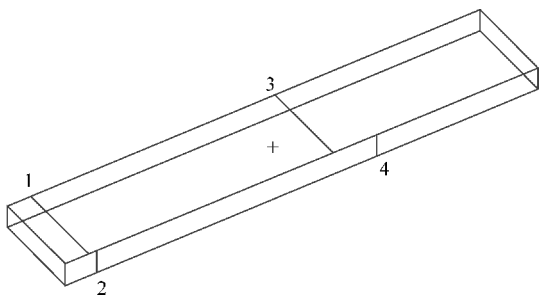


图 8.8 梁模型中的裂纹

单元和 68500 个节点来建模。为试验传感器位置的不准确性，这样密集的网格是需要。为分析损伤位置的影响，在梁的不同位置上建立不连续的有限元网格以模拟 4 条裂纹。为了进一步分析，考虑下列正常模式分析场景：无裂纹的梁（参考状态）；带裂纹的梁，裂纹编号分别为 1、2、3 和 4。图 8.8 给出了裂纹的位置。

用于分析的第二个模型是金属框架，如图 8.9 所示，该模型几何形状复杂、非均质（钢-铝），有理想的边界条件，并包含了热膨胀。这样模拟的主要目的是研究不同温度载荷对模态过滤的影响并与损伤的影响进行比较。也是在 MSC. Patran 中进行数值模拟，共划分了 10000 个 8 节点的六面体单元（节点数量大约为 14000）。为了研究一种损伤架构的行为，用不连续节点模拟水平梁裂纹，以横截面积的 5% 和 10% 作为裂纹的两个阶段。由于杨氏模量随温度而变化，因此温度相关的材料属性被采用。铝的材料性质只适应于水平梁。考虑到温度相关的材料属性，每个设计方案都进行两个阶段：机械热耦合分析得到温度分布，然后通过正常模式分析。接下来分析：环境温度为 20°C 的无裂纹架构（参考状态）、梁上表面有 10% 裂纹的架构、环境温度为 25°C 、 30°C 、 35°C 、 40°C 、 50°C 、 0°C 和 -50°C 时的无裂纹架构、梁上表面加热（30s）到 50°C 的无裂纹架构、右边垂直杆局部加热（30s）到 50°C 的无裂纹架构。

最近，建立了一个铁路桥梁模型，用于分析损伤探测程序的有效性，主要有两个原因：第一点，研究环境湿度如何干扰程序；第二点，验证这样一个复杂的结构将如何工作。CAD 模型以实体结构为基础。这座桥 27m 长，由钢（梁，护栏，钢轨，主板加固），混凝土（主板和人行道），土和本单元（枕木）组成。CAD 模型如图 8.10a 所示。

然后，基于 CAD 模型，利用 MSC. Patran 建立有限元模型。这个模型包括约 28500 个单元、30500 个节点。模型中用到实体、壳和梁单元。有限元模型如图 8.10a 所示。在模型中预制三条裂纹。第一和第二条裂纹为垂直裂纹，第三条为法兰裂纹。裂纹定位是基于线性静态应力分析。裂纹的建模为不连续有限元网格。考虑到湿度的影响，使用不同的材料密度。根据分析，适当调整材料密度。考虑下列正常模式下的分析场景：干燥桥梁无裂纹（基准状态）；微湿的桥梁无裂纹；潮湿的桥梁无裂纹；含有连续编号 1、2 和 3 裂纹的桥梁。

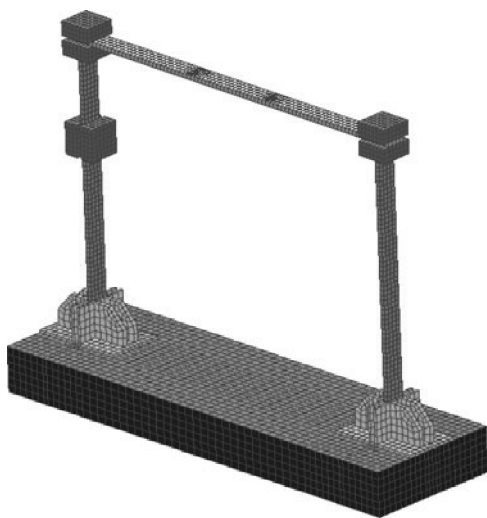


图 8.9 框架的有限元模型

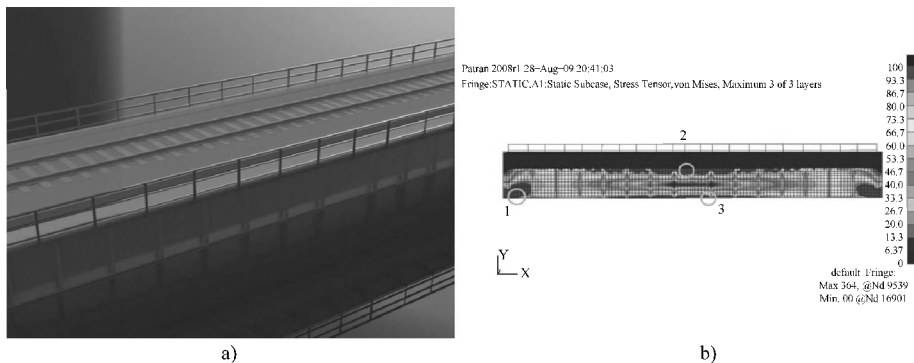


图 8.10

a) 桥梁的三维模型 b) 带有裂纹定位的有限元网格

8.4.2 测试程序

为了测试在前面各节中列出的因素对基于模态滤波器的损伤探测程序的影响，进行如下操作。首先，对参照状态模型开展频率响应函数合成，然后对模型的选定

节点进行合成，这些节点模拟虚拟测量传感器。

基于参考系统的参考模态模型和合成的频率响应函数，计算倒数模态向量——模态滤波器系数。利用这些系数，可以过滤掉参考状态和连续损伤状态一系列频率响应函数。根据式 (8.17) 所得到的结果，计算损伤指数值。

除了一个被模态滤波器调谐的区域外，仅在直接邻近模型固有频率的区域计算损伤指数。连续频率间隔的带宽确定为 5Hz。

8.4.3 分析的结果

本节主要介绍分析结果。为了节省篇幅，只介绍少数模态过滤特性。仅对模态滤波器调谐到的模式形状提出损伤指数值，这种模式对应模拟裂纹是最好的。

第一阶段模拟，检查损伤位置对其可探测性的影响。在梁的模型中引入四个不同位置的裂纹（见图 8.8）。每个裂纹的尺寸占梁横截面积的 5%。另外，在本节中，作者检查模态滤波器应调整的固有频率，以更好地探测预期损伤。表 8.1 中列出了计算连续损伤的最大损伤指数和模态滤波器调谐的自然频率信息。

表 8.1 不同损伤位置的损伤指数

损伤编号	最大损伤指数	模态滤波器编号
1	3.5	7
2	13.5	5
3	12	1
4	810	1

最易探测的损伤是位于梁中间短边处的裂纹 4。裂纹 4 和其他裂纹损伤指数之间最大的差异来自损伤指数计算方法——特性之间差值的平方（见式 (8.17)）。由损伤 3 得到的结果更坏，是由于它比裂纹 4 更浅（面积不变，宽度变大）。对于裂纹 1 和 2 来说，相对比较深的裂纹，其损伤指数值也大。对于裂纹 1 和 2，当滤波器将固有频率调谐到 4、7、9、10 时，损伤指数最高，尤其是固有频率为 7 时，最为明显。这些频率对应着扭转模式和更高的弯曲模式。将模态滤波器 1 调整到固有频率 1，可以很好地探测到裂纹 3 和 4，振动振幅最高值发生在断口区域。经过以上分析可以总结如下：在对裂纹进行探测时，应将所使用的滤波器设置为这样的模式，即损伤区域也是变形最大的区域。这种模拟的模态过滤结果如图 8.11 所示。

为开展下一个验证试验，假设在连续测量中，将传感器对基准位置稍微偏移一点。这些偏移值被设定为光束长度的 1.5%、1% 和 0.5%。假设传感器的位置误差只沿着 x 轴向右或向左偏移，在单次测量中，传感器以恒定的误差值进行定位（如 1%）。考虑 8 个虚拟传感器，对每个不精确的值，有 256 个组合要分析。在传感器偏移值相同的所有情况下，其模态过滤误差都处于类似的水平，并且模态滤波器 1 可获得最高值。表 8.2 选择了最坏的几种情况下，模态滤波精度最差。这些结果与

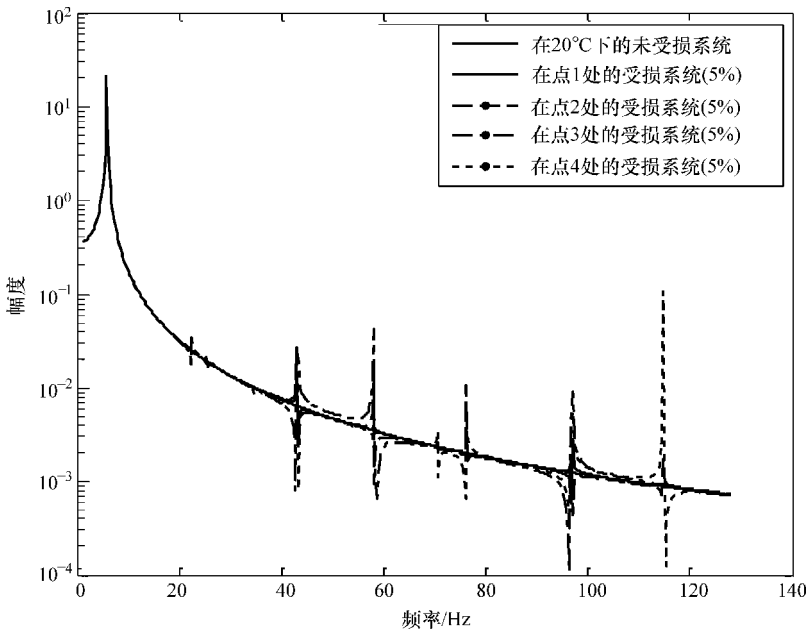


图 8.11 不同位置裂纹的模式过滤结果

损伤 4 进行对比。

表 8.2 传感器定位不正确的损伤指数

模拟方案	最大损伤指数
损伤 4	810
传感器偏移 0.5%	890
传感器偏移 1%	2480
传感器偏移 1.5%	9920

损伤指数的计算值证实，在随后测量中，传感器的位置对模式过滤的结果和方法的有效性有重大的影响。在分析梁的事例中，最小传感器位移提供了可比的指标值，5% 裂纹处最易探测。通过所获得的结果可以得出如下结论：

- 1) 由于该方法依赖于模式形状，它要求传感器位置具有高度的重复性，因此，推荐一个经典的 SHM 系统，在系统中将传感器网络永久地附着在物体上。
- 2) 如果将该方法当作一种无损检测技术，应该对重复放置传感器予以重视。另外，应将这种损伤探测方式的水平提高约 10%，以避免误报。

在模拟研究第三个阶段，测试噪声对模式过滤结果的影响。该模拟测试测量设备所产生的干扰对模式滤波误差的影响。考虑传感器的粘接性能以及电线和记录设备的干扰，整个测量路径的信噪比设置在 40dB，对应记录 0.01% 噪声信号的振幅。为了保证有足够大的误差范围，决定引入一种正态分布噪声，其均值为零，幅值为

5%。表 8.3 将模态过滤器 7 中噪声特性和裂纹 1 损伤指数的值进行对比。

表 8.3 噪声数据的损伤指数

模拟方案	最大损伤指数
损伤 1	3. 5
5% 的噪声数据	0. 39

在这部分模拟的基础上，可以得出这样结论：相关的噪声测量路径不影响所提出的损伤探测方法的操作。在分析损伤探测方法的性能时，最重要的问题之一是它们对外部条件变化的敏感性，特别是环境温度。因此，对环境温度变化对模态过滤结果的影响进行大量的模拟。对具有相同环境温度的整个对象，开展了不同环境温度和两种特殊情况的测试。第一种情况是太阳加热对象的一个部件，而其他部件均处于阴凉处或者被水冷却。在这种情况下，从上面对模拟模型进行加热，可以防止整体升温。第二种特殊情况，采用人工热源加热，使物体的一个部分有温度的变化。表 8.4 显示了各种温度变化的损伤指数值以及 5% 和 10% 损伤的损伤指数值。在以上所有情况，将模态过滤器调整到固有频率 2。

在分析损伤指数值后，可以发现：5% 的损伤的影响大于 5℃ 下温度变化的影响。但是，如果要在更广泛的温度范围内采用这种方法，建议建立模态滤波器库。在这个库中，必须确定各种环境温度的系统参考模型。为了确定库中每 10℃ 指定的过滤器，建议将可识别损伤的最小尺寸增加约 10%。这样一个损伤状态的损伤指数计算值高于温差达到 30℃ 时的值。此外，从顶部加热架构给出一个比损伤状态低的损伤指数值。最差的模拟情况是仅加热架构的垂直杆，温度变化 70℃（环境温度 -50℃）。然而，这两种情况下并不是方法不合格，因为即使采用很小的滤波器也不会发生 70℃ 的温度差，而且局部高温变化应当被探测，当作失效处理。

表 8.4 对温度变化的损伤指数

模 拟 方 案	最大损伤指数
5% 的损伤	5.8×10^6
10% 的损伤	3.6×10^8
环境温度 25℃	2.7×10^5
环境温度 30℃	9.2×10^5
环境温度 35℃	2.5×10^7
环境温度 40℃	15.6×10^7
环境温度 50℃	1.9×10^8
环境温度 0℃	8.8×10^6
环境温度 -50℃	2.3×10^9
上部加热至 50℃	4.5×10^7
右护栏局部加热到 50℃	5.7×10^9

为了检查应用于复杂土木工程结构（真正的结构）的方法，进一步检查湿度对损伤探测方法效率的影响，计算参考模型的模态滤波器系数，参考模型是一个干燥的、无任何损伤的桥。表 8.5 给出了连续引入桥梁的三个裂纹、微湿的桥（相对湿度 99%）和潮湿的桥（强降雨后）的损伤指数值。所有的结果来自于模态过滤器 10。

表 8.5 对桥模拟的损伤指数

模拟方案	最大损伤指数
损伤 1	7210
损伤 2	2.7×10^4
损伤 3	7.3×10^7
微湿的桥	1670
潮湿的桥	3.2×10^9

损伤指数值分析证实了接近支撑的损伤 1 的可探测性最低。为了获得裂纹损伤指数最高值，应考虑将模态滤波器调谐到更高的模式，即损伤 1 中变形更大的区域。考虑湿度变化的影响至关重要，土壤和木材重量变化超过 10%，它是该对象总质量非常重要的一部分。在这个基础上，可以得出这样结论：该方法不适用于由于水分极大地改变其质量的对象。另一方面，对于一个高度复杂的设备，该方法已经显示出探测小尺度损伤的有效性。

8.4.4 基于模型的探测概率

第 3 章已对该方法进行了描述。在下面的研究中，采用信号 - 响应类型进行分析。

为了确定基于模型的损伤探测概率，建立上文所描述的钢 - 铝框架结构有限元模型，如图 8.9 所示。为准备用于 MPOD 分析的数据，在框架顶梁长度大约 3/5 处，用不连续的节点模拟断裂（两个无关联的节点）。考虑八个阶段的损伤，按一定比例将梁的截面积从 6.25% 减到 50%。由于框架顶梁横截面积尺寸为 10mm × 400mm（高 × 宽），损伤深度从 2.5mm 开始，以 2.5mm 的等深逐步增加到 50mm。求解 9 个连续模型（一个无损伤阶段和八个损伤阶段）的特征值问题，合成模型的 20 个选定节点的 FRF。这些节点以及虚拟传感器被均匀布置在顶梁（损伤部位）上。通过加入均值为 0、振幅为噪声特性 5% 的矩形分布噪声以打乱各个传递函数。此外，对于每种损伤情况，对噪声进行七次处理以增加确定 MPOD 的数据量。采用无损伤模型的一组特征数据来估计倒数模态向量。借助于它们的帮助，对与连续损伤阶段对应的另一组数据进行过滤。数据准备的最后阶段是计算模型的损伤指数。在图 8.12 中总共有 63 个值。

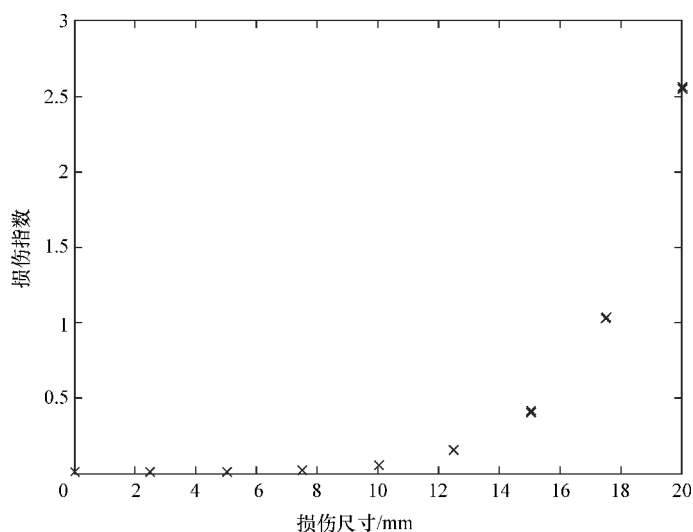


图 8.12 连续模拟的损伤指数值

分析损伤指数值可以看出随着损伤的增加，损伤指数分散性也增加。对于 20mm 的最大损伤，5% 的噪声特性导致 2% 的损伤指数值分散。图 8.13 给出了未损伤模型的损伤指数值，并显示其最小损伤为 2.5mm。

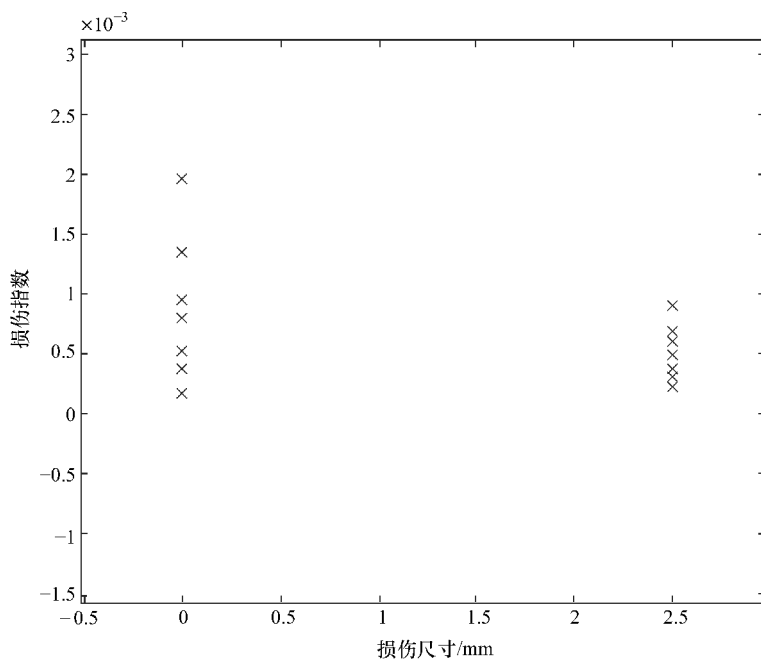


图 8.13 未损伤模型与 2.5mm 损伤的损伤指数

正如我们所看到的，对 2.5mm 损伤而言，由于噪声特性的原因，损伤指数的变化比其值的分散性要小。

在创立 MPOD 曲线的程序中，需用到对应于损伤尺寸的损伤指数值。给出阈值为 0.0014 的信号 - 响应程序，由其生成的曲线如图 8.14 所示。其他阈值在相同的置信区间具有非常相似的曲线，只在 x 轴方向有一定的偏移。分析所得到的结果，允许对测试方法的早期结论进行确认。能探测到的、无误报风险的最小损伤量是刚度变化 10%。非常陡峭的曲线特征和异常狭窄的置信区间都是值得关注的地方。在分析 MPOD 中所获得结果的两种特征证实了这种方法的高效率。

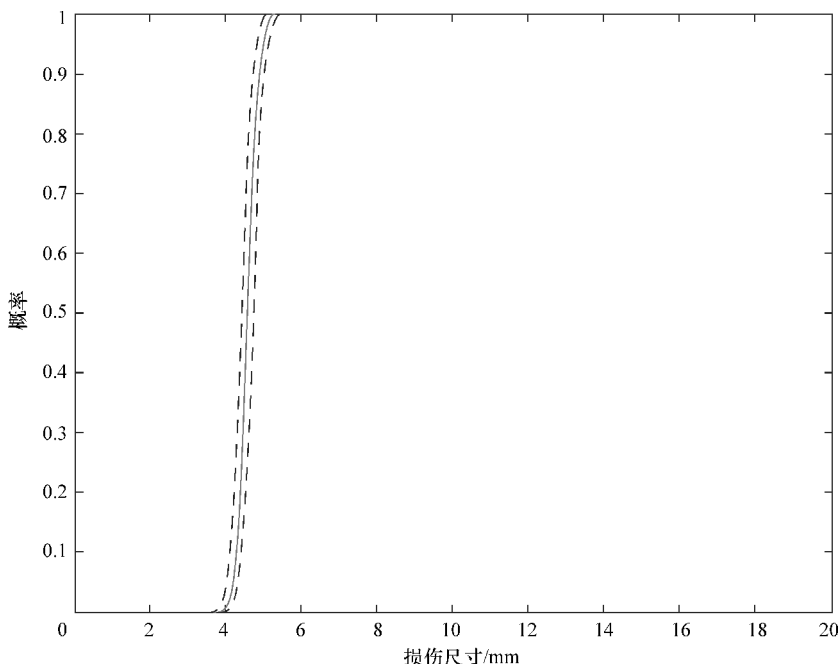


图 8.14 信号 - 响应的 MPOD 曲线

8.5 基于模态过滤的监测系统

在接下来的这一节中，给出基于已知技术的 SHM 系统设计的主要假设。然后，给出测量诊断装置和专有的软件。

8.5.1 主要假设

用于系统设计的主要假设是，系统应当是完全独立的。这意味着潜在的用户应当使用一个完整的诊断程序，而不再需要使用任何其他测量设备或软件。为实现上述要求，设计了 16 通道测量诊断装置 (MDU)，并编写了专用的模态分析和模态

过滤软件。一般来说，由软件和硬件组成的系统按下列三种模式之一进行工作：

- 1) 在动态信号分析模式下操作，其目的是进行模态测试。在这种模式下，为参考结构估计模态滤波器系数。
- 2) 在诊断模式下操作。在这种模式下执行以下操作：振动测量的加速度/位移、选择特性的估计（FRF、PSD）、上述特性的模态过滤、损伤指数计算，最后，过滤特性的可视化。
- 3) 在监测模式下操作。在这种模式下，系统执行的操作和诊断模式下相同，它们都是周期性进行，并且在每次诊断程序结束时，都要向中心装置报告结果。

8.5.2 测量诊断装置

从技术角度看，诊断过程可分为几个基本步骤：同时同步从 16 个通道采集模拟信号（转换成数字域），对测量信号进行数字信号处理以及报告处理结果。测量诊断装置的框图如图 8.15 所示。

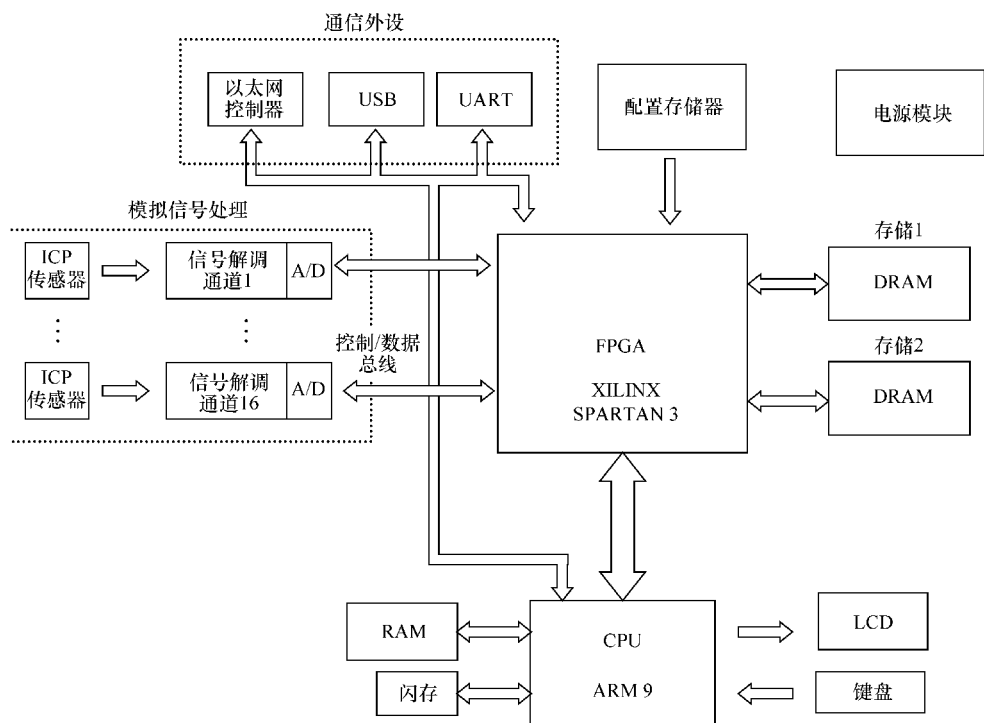


图 8.15 已开发设备的框图

诊断装置包含两个完全独立的、彼此相连的模块（CPU 和 FPGA）。CPU 模块用于控制目的，它通过一些外围设备，如键盘、液晶显示和通信外设，操作用户界面。使用这个界面，在 16 个模拟滤波器的每一个设置增益，或者选择所需的模拟

滤波器、或者启动一个诊断过程都是可能的。FPGA 模块包含所有用于实现数字信号处理的逻辑模块。作为一个可执行命令和发送处理结果（如启动数据处理命令）的外围设备，由 CPU 模块进行监视。在需要对系统进行校准或远程读取处理结果时，可以通过以太网或 USB 进入测量诊断装置。模拟信号处理模块如图 8.16 所示。

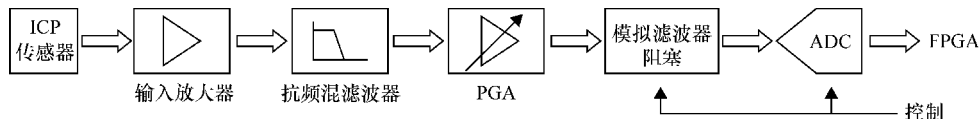


图 8.16 测量电路的模拟部分

输入模拟信号由安装在检查物体上的 ICP 加速度计传感器发出。ICP 信号标准是基于 4 ~ 20mA 电流信号传输标准，其主要优势是能够在 100m 或者更远的距离内传输信号（频带带宽为 1kHz）而不失真。一个完整的设备如图 8.17 所示。



图 8.17 测量诊断装置 (MDFS 16000)

上述装置被命名为 MDFS 16000，其在实验室和工业条件下的测试结果将在本章后面进行陈述。

8.5.3 模态分析和模态过滤软件

为 SHM 系统编写软件的主要目的是估计模态滤波器系数。为这个目的，应用程序提供以下功能：测试对象几何模型的定义，测试点定义（即确定对象几何模型上特殊位置的传感器布置）；执行测量和结果展示（时间历程、PSD、FRF 和相关性）；数据归档；最后通过计算稳态图、估计和可视化所选极点的模式形状、估计模态滤波器系数和过滤结果的可视化，来进行模态分析。在图 8.18 所示的软件图形用户界面中，可实现脉冲模态测试和模式形状的可视化控制。

与模态分析有关的所有计算均由 MATLAB 引擎处理。应用程序提供了在 MATLAB 上调试这些函数的可能性。出于这个原因,对特殊要求的用户,保存 mat 文件夹,这些文件夹包含合适 MATLAB 函数的输入参数。

为了使可视化模式形状更加平滑,刷新频率最少为 30 帧/s。在这样的速度下,使三维模型可视化和生动的有效控制措施在市场上是不存在的。因此,要实现这种控制需要用到 XNA 环境。它所使用的图形加速器可以以 60 帧/s 的速度刷新几何模型的 10000 个点。

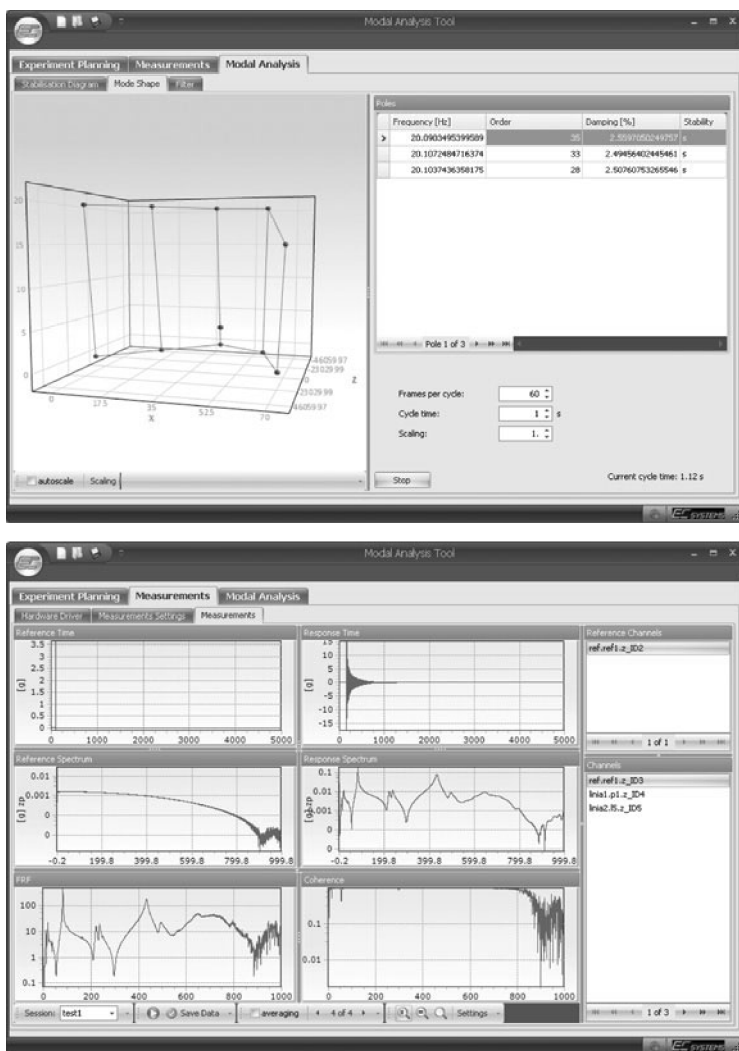


图 8.18 描述软件的用户图形界面

8.6 实验室测试

本节包括 SHM 系统的实验室测试程序、说明和结果。对 POD 结果也进行了展示和讨论。

8.6.1 测试程序

测试对象为铝合金材质的悬臂梁，其尺寸为 $50\text{mm} \times 4\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 。将测试对象沿纵向轴线均分为 9 个测量点，每个测量点间隔为 100mm ，如图 8.19 所示。采样频率为 1024Hz ，记录时间历程长度为 200s 。

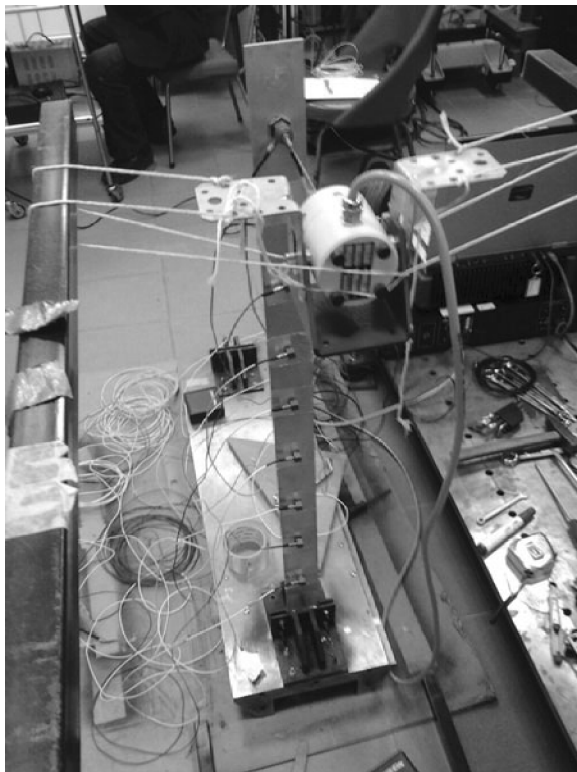


图 8.19 实验站

开展下列测试：

- 1) 20°C 室温下未损伤的梁。
- 2) 20°C 室温下未损伤的梁。
- 3) 20°C 室温下未损伤的梁，安装传感器。
- 4) 31°C 室温下未损伤的梁。

- 5) 20℃室温下损伤的梁（在点 5 处附加 4g 的重量）。
 - 6) 20℃室温下损伤的梁（在点 9 处附加 4g 的重量）。
 - 7) 20℃室温下损伤的梁（在点 5 处附加 15g 的重量）。
 - 8) 20℃室温下损伤的梁（在点 9 处附加 15g 的重量）。
- 所有测试由 MDU 进行。此外，对模态过滤结果进行可视化评估。

8.6.2 实验结果

首先，在参考状态中开展测试工作，然后，在此基础上进行模态分析，并估计固有频率、模态阻尼比和模式形状。表 8.6 显示了所识别的模态参数。

对上一节列出的所有测量情况进行了两种评价。首先，为验证不同激励下方法的稳定性和鲁棒性，在相同条件下开展两次测量。图 8.20 展示了在同样条件下进行的两次测量，并利用式（8.17）计算损伤指数值。

表 8.6 梁的模态参数比较

模式形状编号	自然频率/Hz	模态阻尼系数（%）
1	24.7	0.69
2	68.5	0.39
3	133.8	0.27
4	222.8	0.28
5	331.8	0.24
6	461.2	0.28

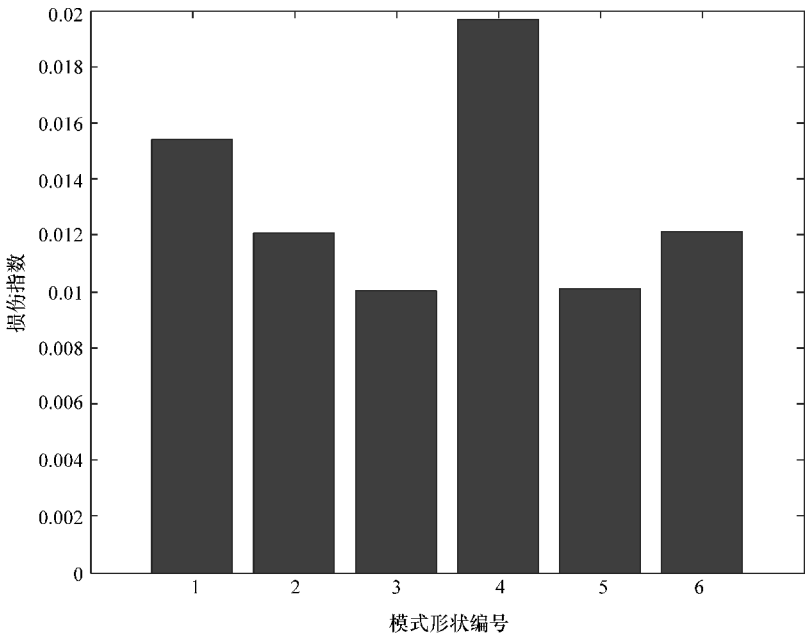


图 8.20 未损伤对象的损伤指数

从图 8.20 可以明显看出，这个方法是很合适的——损伤指数维持在一个非常低的水平。此外，将实验室温度增加 11°C ，并且保持这个温度达 1h。图 8.21 所示为梁在不同温度下的损伤指数值。这种程度的温差对该方法影响较小。当然，土木工程结构环境温度的变化一般超过 11°C ，在设计 SHM 系统期间，所作的假设之一是系统应当配备一个模态滤波器组，收集环境温度每改变 10°C 的参考数据。此处的分析结果连同上文假设表明在环境温度变化的情况下，系统是可靠的。

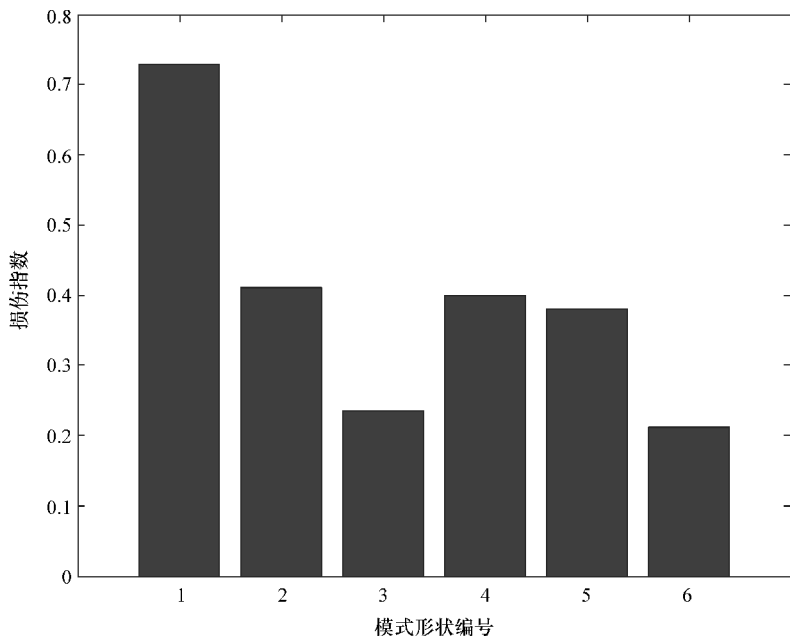


图 8.21 环境温度为 31°C 时的损伤指数

下一阶段的测试工作也是在未损伤的梁上进行，但这一次传感器被取下并可能再次放回同一个位置。图 8.22 显示的是这种情况计算的损伤指数值。

这种情况下计算的损伤指数值虽然有所上升，但是它们仍然维持在一个可接受的水平。另一方面，需要记住的是，传感器在移除后必须立刻装上。在实际的无损探测中，测量时间间隔是很长的，这增大了传感器布置误差的可能性。这里推荐安装永久性的或者嵌入式的传感器网络。

最后一组测试是关于系统的损伤探测。在开始测试之前，将实验室温度冷却至 20°C 的稳定温度。根据传感器重装后得到的数据计算参考模态滤波器系数。通过在横梁上附加质量的形式引入损伤，开展进一步测试工作。横梁的总质量是 0.544kg ，附加质量分别为 3.7g 和 15.5g ，分别占梁质量的 0.68% 和 2.85% 以及 100mm 周边质量（连续测量点之间）的 6.8% 和 28.5% 。第一个附加质量点的位置选择在梁的中间（点 5），第二点的位置邻近梁的紧固端（点 9）。所有损伤情况

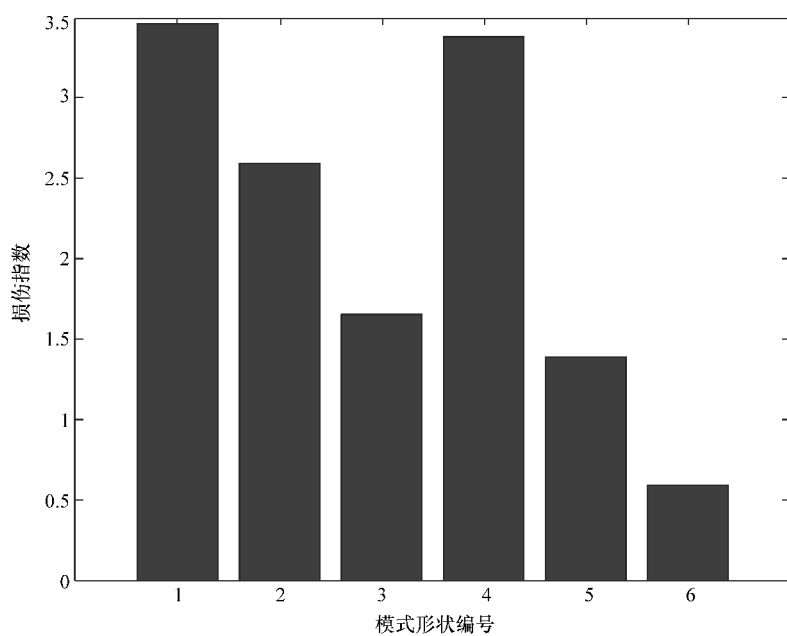


图 8.22 重装传感器的损伤指数

的损伤指数值如图 8.23、图 8.24、图 8.25 和图 8.26 所示。

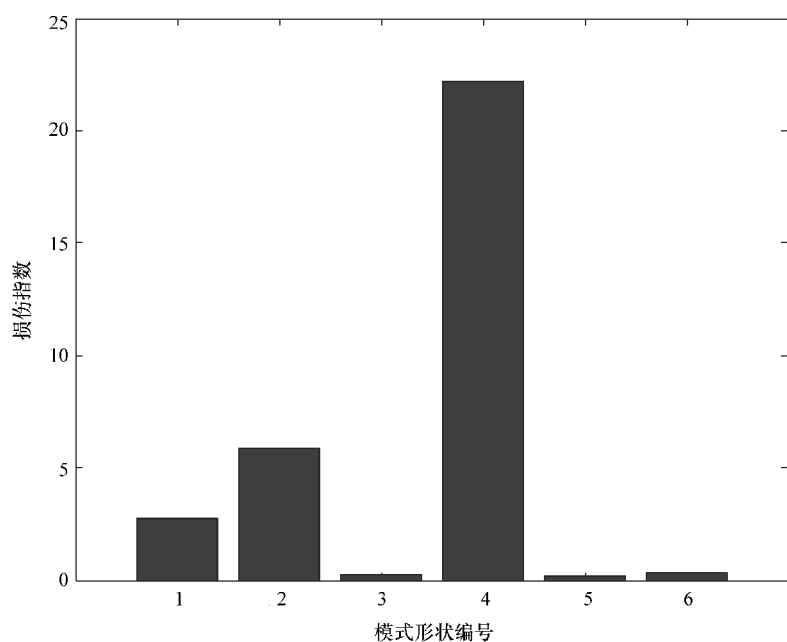


图 8.23 在点 5 附加 3.7g 质量后的损伤指数

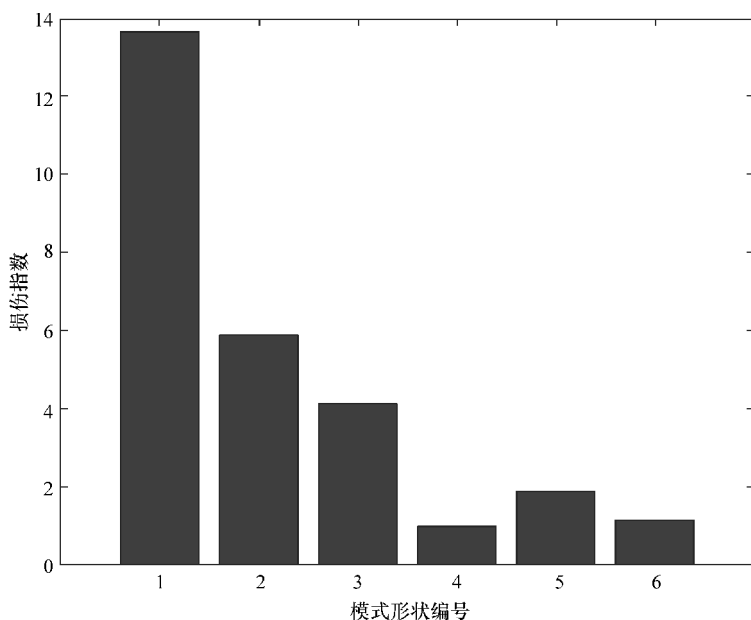


图 8.24 在点 9 附加 3.7g 质量后的损伤指数

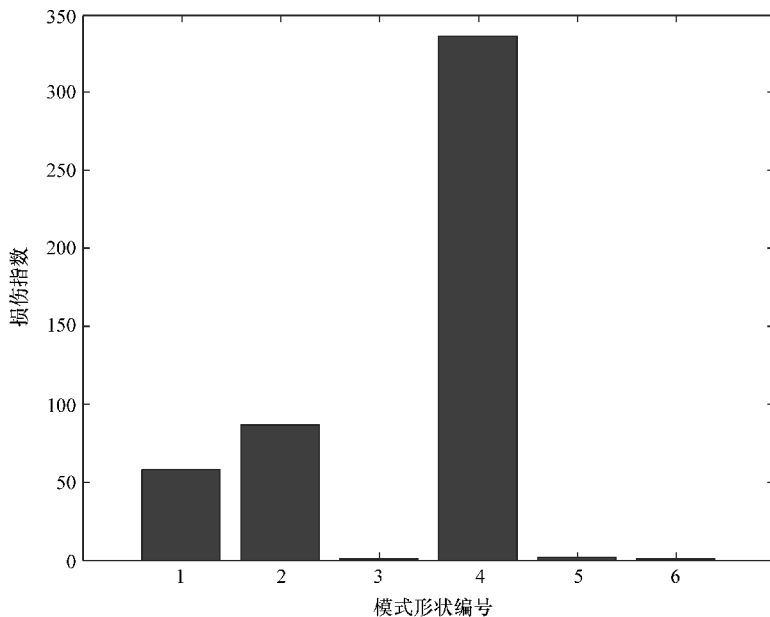


图 8.25 在点 5 附加 15.5g 质量后的损伤指数

从研究的结果可以得出一般性结论：所有损伤情况均可以被恰当探测出来。损伤指数值迅速增大，并且它们比任何一种未损伤梁的情况都大。可以观察到不同损伤位置影响不同的模态滤波器，正如模拟测试所得到的结论，当模态滤波器调谐的

模式形状在损伤位置有最大挠度时，探测能力达到最佳。此外，模态滤波器调谐到模式形状 5 的大损伤情况下的模态滤波特性如图 8.27 所示。

在图 8.27 中，在第 6 和第 4 自然频率附近损伤峰值相当明显。

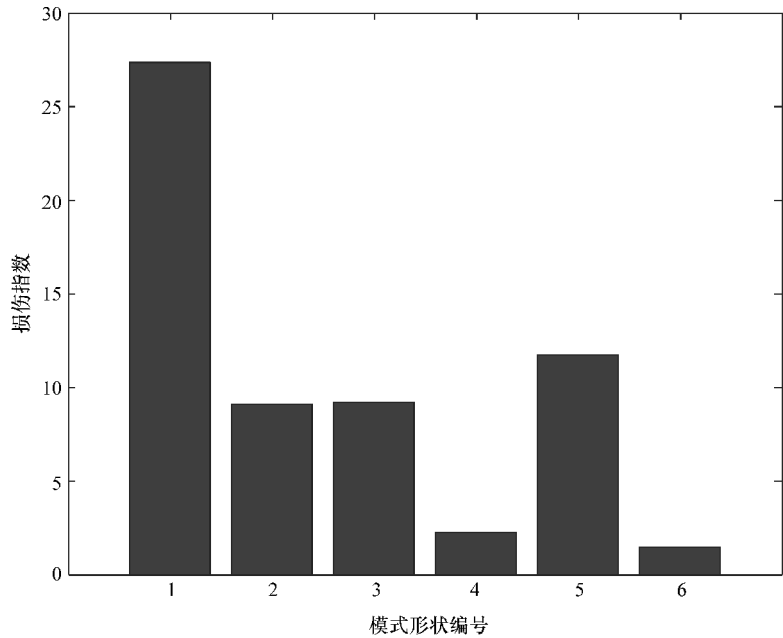


图 8.26 在点 9 附加 15.5g 质量后的损伤指数

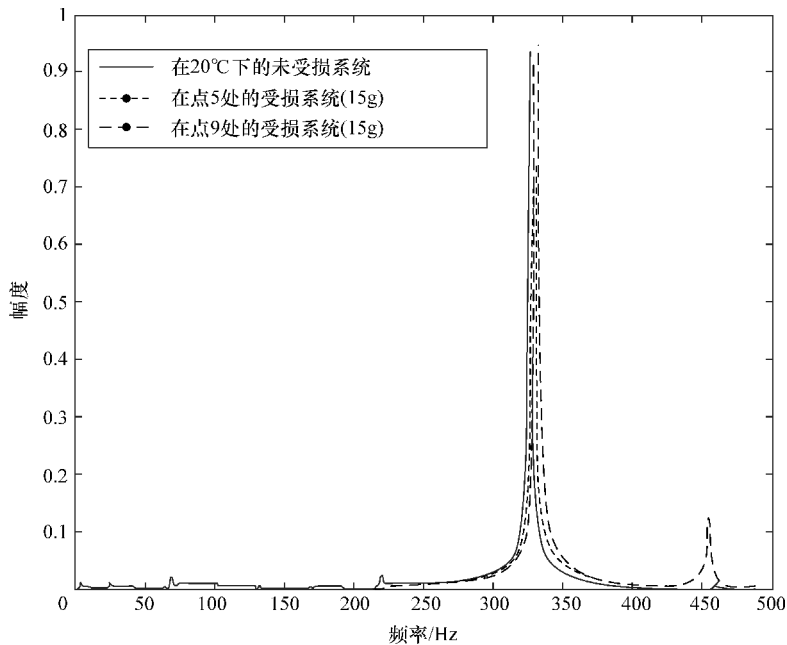


图 8.27 15.5g 附加质量的 FRF 模态过滤

8.6.3 探测分析的概率

本次研究的对象同样为钢-铝框架，其模型用于分析 MPOD。梁的上部分被分为 10 等份，每部分间隔 70mm。测量点从右开始分别标记为点 1、2、3、…、10。在每一个点放一个加速度计，框架传感器布置图如图 8.28 所示。随后，进行一个脉冲测试以估计模态参数和倒数模态向量——模态滤波器系数估计。

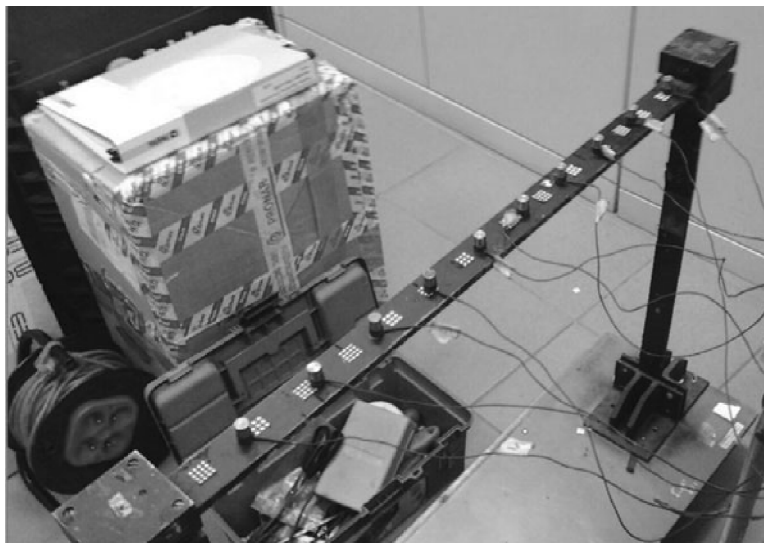


图 8.28 顶梁上的一组加速度计

第二步，将一个电动振动器连接到测试对象上，并用随机信号进行激励。这种激励方法是用来模拟操作条件的。在这些条件下，进行一系列测量以确定 POD。在顶梁的点 3 和点 4 之间刻伤，其深度分别为 0mm、2mm、3mm、4mm、6mm、7mm、9mm、10mm、12mm、13mm、15mm、16mm、19mm、20mm。因此，损伤程度变化范围是梁横截面积的 5% ~ 50%。与未损伤对象一样，对于每一种损伤进行 7 次测量，总共 96 次。接着，为后续的实验计算损伤指数。损伤指数值的比较图如图 8.29 所示。

损伤指数值比人工噪声模拟数据分布更广泛，特别是对大缺陷而言。

为建立 POD 曲线，需将损伤指数值和相应的损伤尺寸输入程序。信号-响应程序由 0.165 阈值触发，生成的曲线如图 8.30 所示。这可能是无误报风险的确定损伤的最小阈值。

接下来，要进行撞击-漏掉分析。当损伤指数阈值为 0.19 时，算法得到收敛，所获得的曲线如图 8.31 所示。通过信号-响应方法获得的 POD 曲线与通过数值分析获得的曲线在形状上非常相似。有趣的是，它显示出对一些比较小尺寸的损伤探

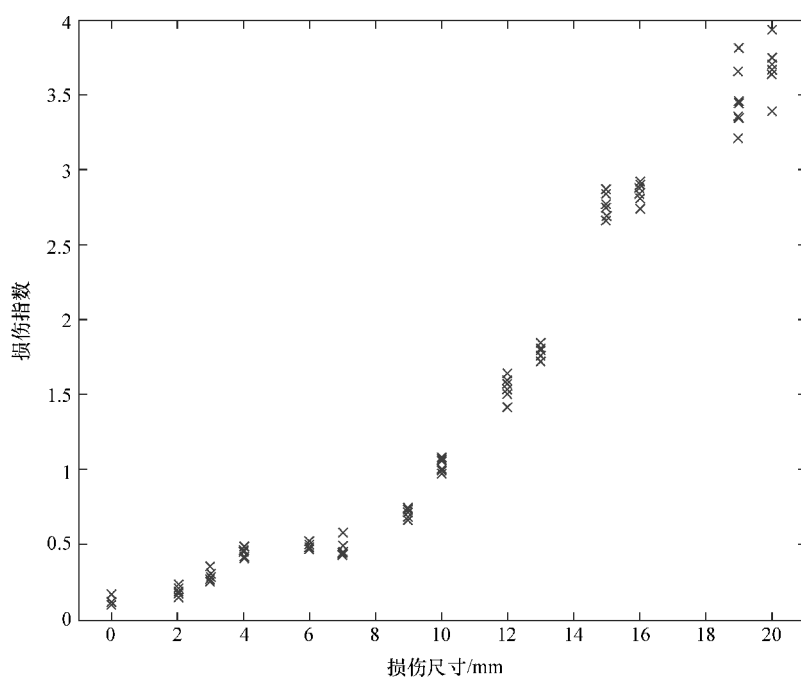


图 8.29 连续测量值的损伤指数

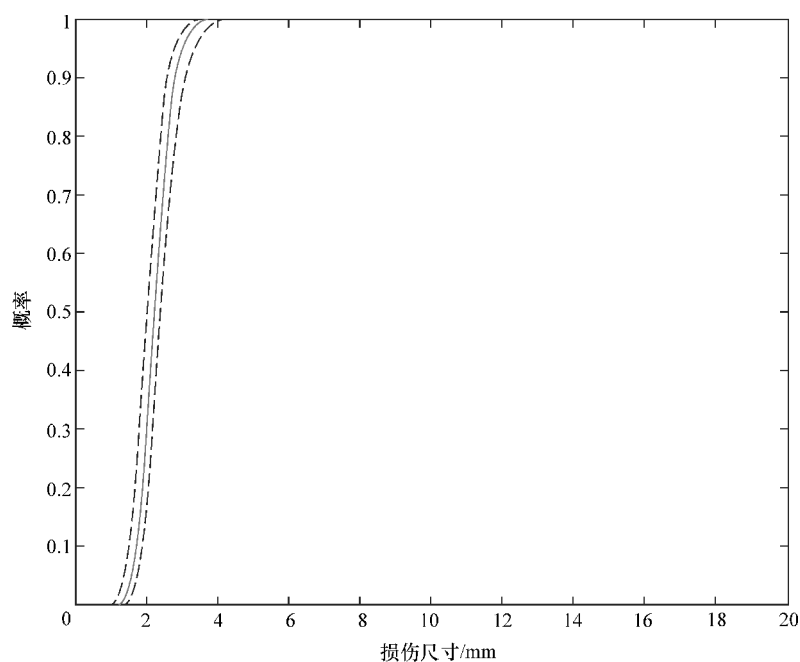


图 8.30 信号 - 响应的 POD 曲线

测结果。同时，曲线的置信区间也与模拟的结果相似，尽管在这种情况下有一点宽。这个事实也说明了损伤指数值的分散性比 MPOD 大。POD 分析表明，对于概率为 1 的测试对象，可以探测到损伤大约从 3.5mm 开始，也就是截面积损失 8.75%。值得注意的是，实验数据也给出一个陡峭的曲线，而且置信区间狭窄。这两种特征均证实了这种方法的高可靠性。撞击 - 漏掉方法获得的 POD 曲线与信号 - 响应方法得到的曲线异常相似。但是它们的置信区间却有很大的差别。

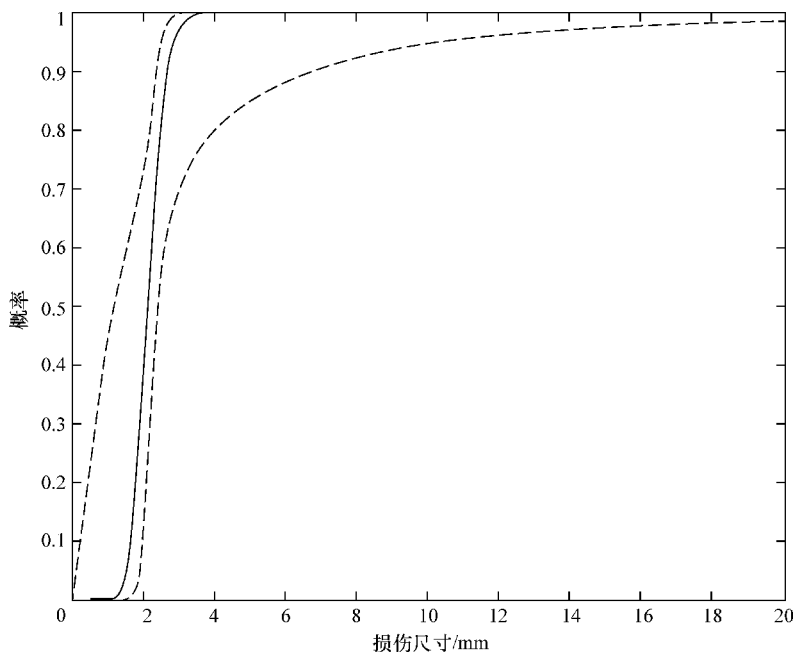


图 8.31 撞击 - 漏掉方法的 POD 曲线

8.7 操作测试

本次测试的最后阶段是应用 SHM 系统对处于运行过程中的真实物体进行损伤探测。这项研究在波兰海乌姆国家高等职业学校进行，研究对象是喷气式战斗机 PZL I 22 Iryda 教练机一侧机翼。对飞机机翼可能的结构变化进行了研究。在测试过程中，飞机停放在机库外，机翼在封闭状态下进行测试，飞机尾部处于空挡位置，油箱也是空的，如图 8.32 所示。

为建立一个参考模型，并估计模态滤波器系数，进行模态冲击试验，其特征如下：翼点的脉冲激励；同时测量机翼前梁均匀分布的 5 点（间隔 1200mm）的振动



图 8.32 测试机翼

加速度；频率设置为 25Hz，分辨率为 0.125Hz。再进行下列测量：

1) 将与参考结构相同的结构上的三次测量值作为基准，每 0.5h 进行一次，以检查程序的稳定性和环境条件对结果的影响。

2) 对机翼加载 1kN 的载荷，然后卸载，在机翼严重变形后进行测量，模拟飞行后的测量。

3) 对测点 5（机翼的末尾）附加 3kg 的质量，进行测量。

4) 对测点 4 附加 3kg 的质量，进行测量。

5) 对测点 3 附加 3kg 的质量，进行测量。

6) 移除多余的质量后进行测量。

首先进行模态分析，以其结果为基础，计算模态滤波器系数，作为测量参考，然后利用在 MPOD 中使用的程序进行诊断测试。在相同的结构中（不除去传感器）进行了连续冲击试验，情形与上述一致。

在测试期间，估计和存储频率响应函数与响应谱。接着，对这些特性进行过滤，将模态过滤的结果用于损伤指数计算。图 8.33 和图 8.34 中给出了所选测试的模态过滤的示例性结果。可以看出，在第 2 和第 3 模式区域，由于结构的变化，引起过滤质量变差。利用质量达到变化的效果是很小的，对于整个机翼质量来说，所使用质量只是一个很小的变化。在第 1 模式区域，可以观察到损伤（附加质量）并不影响过滤精度。将过滤器调谐到更高模式下，附加质量越接近反节点模式，观察到的过滤恶化更强，也就是损伤更易探测。表 8.7 总结了由 MDU 后续测试计算损伤指数。

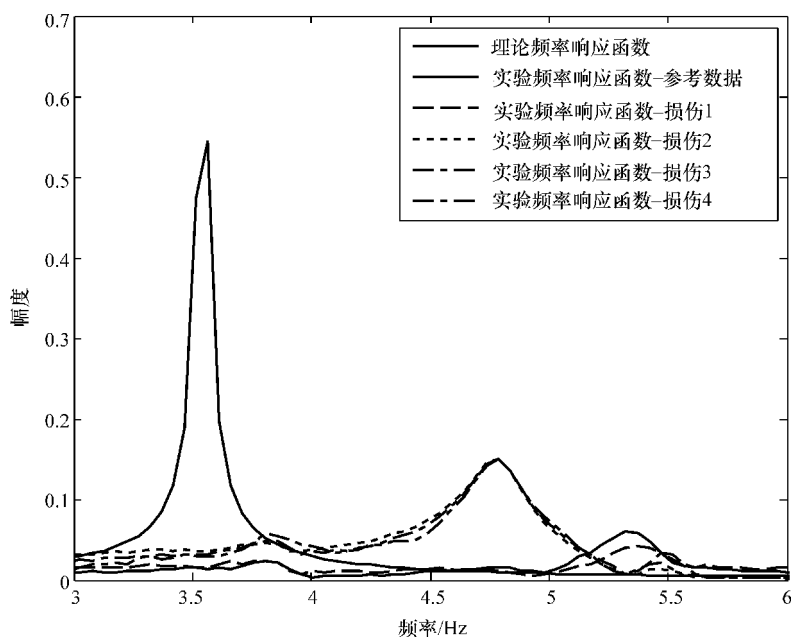


图 8.33 滤波器模式过滤调谐至第 1 模式后测试机翼的频率响应函数 (第 1、第 2 和第 3 模式区域)

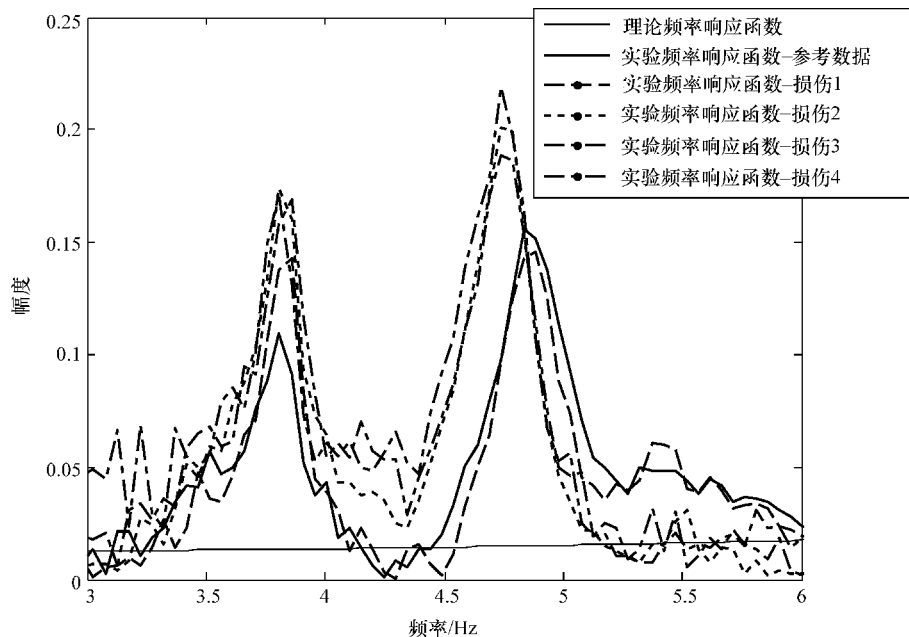


图 8.34 滤波器模式过滤调谐至第 5 模式后测试机翼的频率响应函数 (第 1、第 2 和第 3 模式区域)

表 8.7 损伤指数值

测试方案	损伤指数汇总
未损伤机翼 1	1. 4767
未损伤机翼 2	1. 2110
未损伤机翼 3	0. 8259
施加和减少 1kN 的载荷	1. 0681
在机翼上增加质量: 点 5	5. 5794
在机翼上增加质量: 点 4	4. 2769
在机翼上增加质量: 点 3	4. 3029
所有测量后完好无损	1. 2806

表 8.7 中的值证实了 SHM 系统可应用于真正结构的损伤探测。尽管应用结构的变化相当小，但是系统仍正确地探测到所有的损伤。

8.8 结论

本章主要介绍了模态过滤应用于 SHM。在上述工作的基础上，可以得出以下结论和意见：

- 1) 模态过滤器是一种有效的损伤探测工具，有能力探测对象结构变化，其水平不低于其他基于振动的方法。
- 2) 模态过滤作为一种方法使用，主要基于模式形状，对环境条件（例如温度和湿度）的变化不敏感。
- 3) 所开展的模拟工作表明，模态过滤理论上对外部条件变化不敏感，实际上，受许多因素干扰，如物体材料不均匀、复杂的几何形状、边界条件和不均匀加热等。所有这些因素导致刚度和质量矩阵的不均匀变化，这恰好与理论假设相悖。
- 4) 可能会引起误报的其他因素有：在连续测量中传感器定位不准确，强降雨等引起的结构质量的巨大变化。
- 5) 所进行的试验证实了该方法和 SHM 系统的优点。
- 6) 在结构参数改变 8% ~ 10% 时，MPOD 和 POD 分析允许确定可探测的损伤水平，并且无误报风险。
- 7) 这套系统和方法成功地应用于对实体对象的结构变化探测。

上述方法有待进一步研究与发展，以达到下列目标：

- 1) 使用主成分分析法建立与损伤无关的结构性变化方法，例如桥上行驶的车辆引起的质量变化。
- 2) 为操作模式形状发展新的测量程序，其目的是构建模态滤波器用于数据挖掘。
- 3) 按照 Mendrok 和 Uhl（2011）提出的程序，扩展系统损伤定位的能力。

参考文献

- Deraemaeker A and Preumont A 2006 Vibration-based damage detection using large array sensors and spatial filters. *Mechanical Systems and Signal Processing* 20(7), 1615–1630.
- El-Ouafi Bahlous S, Abdelghani M, Smaoui H and El-Borgi S 2007 Modal filtering and statistical approach to damage detection and diagnosis in structures using ambient vibrations measurements. *Journal of Vibration and Control* 13(3), 281–308.
- Gawronski W and Sawicki J 2000 Structural damage detection using modal norms. *Journal of Sound and Vibration* 229(1), 194–198.
- Meirovitch L and Baruh H 1982 Control of self-adjoint distributed parameter system. *Journal of Guidance Control and Dynamics* 8(6), 60–66.
- Mendrok K and Uhl T 2008 Modal filtration for damage detection and localization. *Proceedings of the Fourth European Workshop on Structural Health Monitoring*. DEStech Publications, Inc., pp. 929–936.
- Mendrok K and Uhl T 2010 The application of modal filters for damage detection. *Smart Structures and Systems* 6(2), 115–134.
- Mendrok K and Uhl T 2011 Experimental verification of the damage localization procedure based on modal filtering. *Structural Health Monitoring* 10(2), 157–171.
- Peeters B, Maeck J and De Roeck G 2000 Dynamic monitoring of the z24-bridge: Separating temperature effects from damage. *Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification and Structural Health Monitoring*. Madrid, Spain, pp. 377–386.
- Shelley S, Freudinger L and R.J.A 1992 Development of an on-line parameter estimation system using the discrete modal filter. *Proceedings of the 10th IMAC*. San Diego, USA, pp. 173–183.
- Slater GL and Shelley SJ 1993 Health monitoring of flexible structures using modal filter concepts. *Proceeding of SPIE* 1917, 997–1008.
- Zhang Q, Allemang RJ and Brown DL 1990 Modal filter: Concept and applications. *Proceedings of the 8th IMAC*. Orlando, USA, pp. 487–496.
- Zhang Q, Shih CY and Allemang RJ 1989 Orthogonality criterion for experimental modal vectors. *Proceedings of the 12th Biennial ASME Conference on Mechanical Vibration and Noise*. Montreal, Canada, pp. 251–258.

第9章 振动红外热成像法

9.1 引言

本章介绍热成像测量技术在无损检测技术（NDT）和结构健康监测（SHM）中的应用；并给出了红外热成像检测的物理原理和分类；重点介绍了振动红外热成像法。概述了测量系统，包括：热成像相机和激励源。此外，还讨论了进行仿真试验的前景。特别是提出了使用显式有限元（FE）对机械热耦合现象进行数值仿真。根据文献来源和作者的经验，可以得出结论：仿真试验与获得的测量结果具有良好的-致性，是开展仿真试验、试验准备和优化的前提。振动红外热成像测量系统硬件和软件部分在本章的第二部分进行描述，该系统由 AGH 科技大学的学者研制开发。通过在实验室复合材料和金属材料样品上开展的测量结果来阐述系统的功能。还研究讨论了测量参数对热响应影响的情况。最后，报告了所研制的测量系统在军用飞机机身和机翼中的测量情况。对与现场测量有关的实际问题也进行了讨论。本章以振动红外热成像法在结构健康监测（SHM）中的应用结束。

9.2 热成像无损检测技术现状

这部分介绍热成像技术的基础以及-在无损检测领域的应用。红外热像仪，顾名思义，与映射物体表面温度分布有关。通常，通过捕捉一个对象发出的红外辐射情况来检测物体表面温度。因此，红外热成像检测是一种非接触式测量方法。起初，热像仪是指接触式测量，而红外热成像法指的是非接触式测量。然而，现在接触式测量技术已过时，热像仪就是指红外热像仪。这个变化主要由于红外探测技术的进步引起的。

在讨论热成像技术在无损检测中的应用前，我们简单回顾一下该技术的基本理论。红外辐射是 $0.78 \sim 1000\mu\text{m}$ 的电磁波，如图 9.1 所示；它是人眼不可见的电磁波谱的一部分。威廉·赫歇尔在 1800 年通过滤光片观测太阳发现了它。在一系列的实验中，赫歇尔通过阳光穿过棱镜，发现可见光谱外温度测量值高于可见光范围内的温度测量值。赫歇尔称这个光谱区域为“发热射线”，后来更名为红外辐射。红外光谱基于不同源和探测器进行划分（Rogalski, 2011）。在表 9.1 中显示了常用的红外光谱的波段。

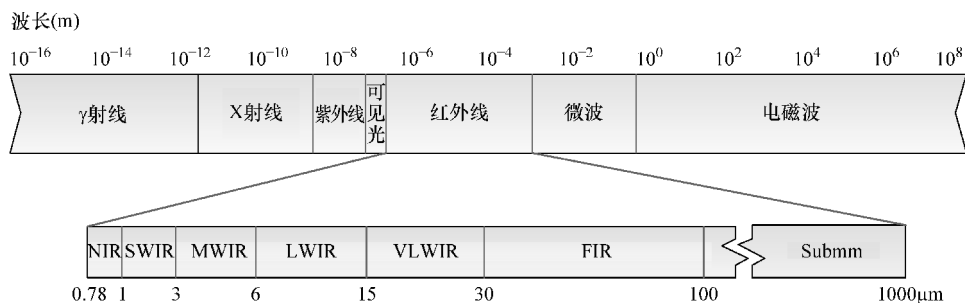


图 9.1 电磁波谱

表 9.1 红外光谱波段

红外区域	波长范围/ μm
近红外 (NIR)	0.78 ~ 1
短波红外 (SWIR)	1 ~ 3
中波红外 (MWIR)	3 ~ 6
长波红外 (LWIR)	6 ~ 15
超长波红外 (VLWIR)	15 ~ 30
远红外 (FIR)	30 ~ 100
次毫米 (Submm)	100 ~ 1000

绝对零度以上的物体都辐射红外波，并随温度升高而增加。这是原子性质所导致的，所有带电粒子的振动，包括原子，都生成电磁波。物体温度越高，振动越快，光谱辐射能量越高（Rogalski，2011）。

一个物体对红外辐射有三种响应方式：吸收、反射和传输辐射。黑体可以吸收所有入射辐射，相反，根据基尔霍夫定律，黑体也是一个理想的辐射器。普朗克定律描述了黑体的辐射特性，作为发射辐射的温度和波长函数（Rogalski，2011）。辐射出射度是辐射通量离开表面一点的密度，其单位为 W/m^2 。在同一温度下发射源的辐射出射度与黑体的出射度间的比值定义为发射率。发射率是一个无量纲参数，它的取值在 0 ~ 1 之间，1 是黑体的发射率。一些常见的工程材料的发射率值见表 9.2。

表 9.2 常见材料发射率值（After Fluke Corporation（2009））

材料名称	发射率
抛光铝	0.05
强氧化铝	0.25
抛光生铁	0.21
毛坯铸铁	0.81
混凝土	0.92
热轧铁	0.77
蚀刻亮铁	0.16

(续)

材料名称	发射率
黑色暗铁	0.97
橡胶	0.93
镀锌钢	0.28
粗糙钢	0.96
薄片轧制钢	0.56

发射率是红外热像仪实际应用的一个重要的因素，影响测量的另一个因素是辐射从发射极到探测器传播的媒介。在大多数情况下，由于气体和存在于大气中的粒子的吸收和散射会使红外热辐射衰弱；这种现象类似于我们熟知的电磁频谱的可见光部分，雨、雾和云可以显著降低能见度。衰减依赖于辐射波长。然而，有部分红外光谱区域衰减较小。这些区域符合中波红外和长波红外的范围，因此该波段在红外热像仪中得到广泛应用。感兴趣的读者可以找到更多有关红外辐射的理论文献 (Maldague, 2001; Minkina 和 Dudzik, 2009; Rogalski, 2011)。

在工程中，主动红外热像仪是基于温度测量的无损检测方法，用于发现结构损伤。这种测试方法通常被称为红外热像仪无损检测 (TNDT)。有几个因素决定红外热像仪测试的可行性和测试性能。在 TNDT 的实际应用中，应考虑以下基本因素：①物体表面发射率；②热扩散率；③耐温性。

物体表面发射率决定了能由红外热像仪检测到的红外辐射的数量。在一些情况下（如抛光的钢或铝组件），表面发射率对 TNDT 应用而言太低了。由红外热像仪测量的红外辐射量太低，导致低热对比度，因而降低其损伤检测的灵敏度。此外，由于该检测方法是基于表面温度分布异常现象的检测，当物体表面发射率不统一时，会影响测量数据分析和损伤特征提取。在这两种情况下的补救措施是涂层表面有一层薄薄的石墨或可洗的黑漆，会在很大程度上提高发射率和涂层面积的均匀。

热扩散率是热导率与密度和比热容的乘积之比。

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \tag{9.1}$$

式中， α 是热扩散率 (m^2s^{-1})； k 是热导率 ($\text{Wm}^{-2}\text{℃}^{-1}$)； ρ 是密度 (kgm^{-3})； c_p 是比热容 ($\text{Jkg}^{-1}\text{℃}^{-1}$)。

热扩散率是对材料热传导快慢的测量。具有高热扩散率的材料（如铝）导热快，由于表面温度变化速度较快，会要求使用高帧率的红外热像仪。另一方面，较低热扩散率的材料（如环氧树脂）传热慢，导致热像无损检测需更长时间。大多数复合材料（如碳纤维增强聚合物）对热扩散率起到媒介作用，适合于热像无损检测技术。

热扩散系数是热导系数、密度与比热容乘积的平方根。

$$\beta = \sqrt{k\rho c_p} \quad (9.2)$$

式中, β 代表热扩散系数 ($\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-\frac{1}{2}}\text{C}^{-1}$)。

热扩散系数是对材料热惰性的衡量。具有高扩散系数的材料 (例如铝) 显示了低温变化响应热激励, 热无损检测存在更多的问题, 原因是低温度的变化难以测量, 尤其是在测量噪声的存在时, 因此高灵敏度的红外热像仪应该用于检验中。较低扩散系数 (如环氧树脂) 会显示出高温变化响应热激励, 这更容易检测, 使得热成像无损检测过程更容易和更有效。

红外热像仪 (通常也称为红外相机) 是用来测量物体红外辐射释放的数量, 并将红外辐射释放的数量通过校准曲线转化成温度值。通过将这个测量的温度值映射成不同的颜色, 形成让人容易解读的影像。红外热像仪的构造原理类似于数码相机。它的主要部件有: ①红外探测器; ②一个将热辐射投影到红外辐射探测的镜头; ③一个必要的电子信号处理软件设备 (FLIR Systems, 2012)。一个红外探测器通常是一个微米像素级 (对红外波长敏感的不同材料) 的焦平面阵列 (FPA)。焦平面阵列 (FPA) 探测器主要分为两大类: 热探测器和量子探测器。热探测器主要为半导体型微测辐射热计, 不需要冷却, 但与光子探测器相比响应迟钝、灵敏度较低。而量子探测器具有很好的信噪比和一个非常快的响应速度, 但需合适的低温环境。冷却通常通过斯特林循环制冷或液态氮冷却系统实现。这使得量子探测器比热探测器昂贵得多。基于量子探测器的红外热像仪比基于热探测器的红外热像仪更庞大、更重, 因此不太方便使用。量子探测器通常由近红外光谱范围的硅材料; 短波红外范围的 PbS、InGaAs; 中波红外范围的 InSb、PbSe、PtSi; 长波红外范围的 HgCdTe (MCT) 等材料制成 (FLIR Systems, 2012; Rogalski, 2011)。用于红外系统的光学组件需要特别的关注。通常, 玻璃在红外区域超过 $2.5\mu\text{m}$ 范围不传输辐射, 因此红外相机镜头通常是由硅 (Si) 和锗 (Ge) 材料做成。硅镜头用于中波红外范围, 锗镜头用于长波红外范围。此外, 这两种材料有很好的机械性能 (FLIR Systems, 2012)。

近年来已经开发了许多不同的损伤检测方法并在不同的技术领域中得以应用 (Balageas 等, 2006; Inman 等, 2005; Staszewski 等, 2004)。这些方法的成功往往取决于三个主要因素, 即①提供了简单可解释的结果; ②必要时使用基准参考数据 (无损状态测量结果); ③实现的成本较低和复杂程度较小。热成像无损检测这一技术在三个方面尤为有利。热成像检测技术可分为两种, 即被动与主动的方法, 如图 9.2 所示。

被动式热成像检测依赖于温度测量而不引入任何外部激励。该方法通常用于定性检测, 并为潜在异常现象提供全局信息; 主要应用于漏电检测、建筑热量损失检测、电站监测等。除了工程应用, 被动式热像检测广泛应用在医药方面, 如皮肤温度映射。

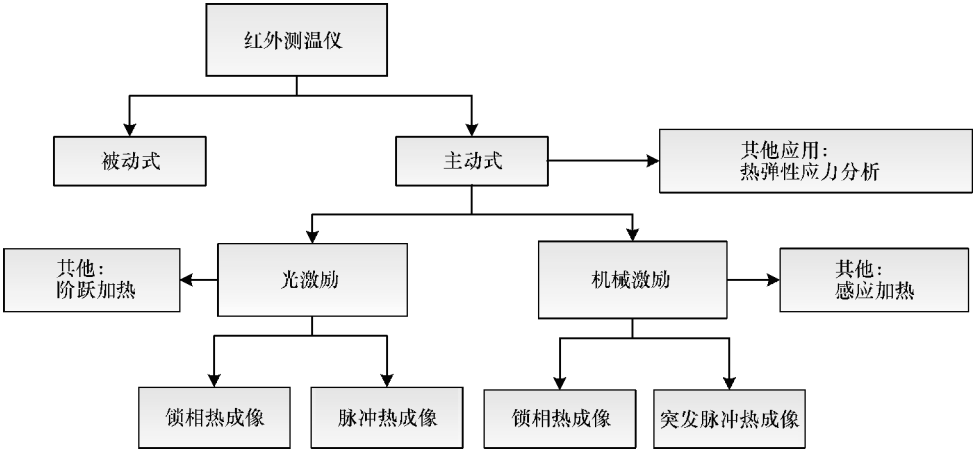


图 9.2 红外热像仪的分类技术

主动式热成像检测需要从外源到测量对象进行能量交换。能量的传递有两种方式：外部激励或内部激励。对于激励的测量方案如图 9.3 所示，外部激励的主动式热成像检测（见图 9.3a）可用在反射模式中（角度范围为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ）和传输模式中（角度范围为 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ ）。

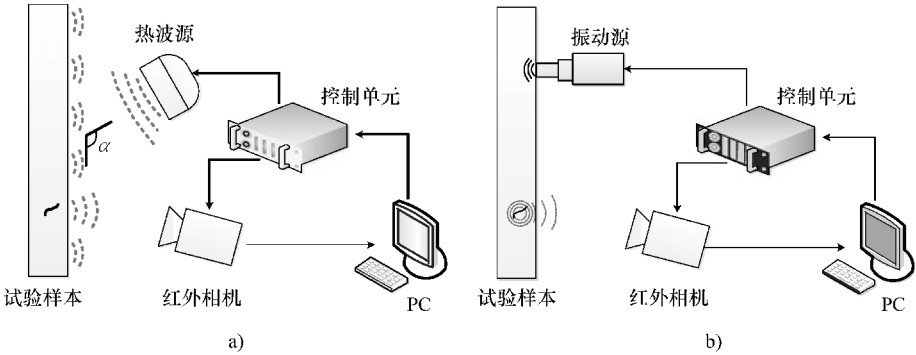


图 9.3 主动式红外热像仪的两个基本原理图
a) 外部激励的变化 b) 内部激励的变化

能量可以通过卤素、红外辐射、闪光灯发送，对其表面加热。常用的三种不同的激励方式如下：

- 1) 脉冲热成像是最常用的激励类型。热激励作为一个脉冲传递到测量对象，如图 9.4a 所示。脉冲持续时间根据被检试件的热性能选择，可以从几毫秒到几秒钟不同。该方法简单适用，检验时间较短。在冷却阶段提取诊断信息；由于缺陷引起的热扩散不同，通过表面温度分布的异常可判断结构性缺陷。
- 2) 如图 9.4b 所示，锁相热成像是基于周期性地对被检结构进行加热。由红

外热像仪获取数据，并根据激励频率提取相位和振幅信息进行分析。通过调制频率可以研究材料缺陷的深度信息（Breitenstein 等，2010；Maldague，2001；Wu 和 Busse，1998）。锁相热成像的主要优势是，它能够测量非常弱的温度信号。然而，微弱信号测量的代价是较长的检测时间。可以通过改变调制频率检测材料不同深度的情况。

3) 阶跃热成像检测的热激励是一个阶跃函数（见图 9.4c），通常使用一个红外灯。该方法可以应用于涂层厚度评价或多层结构的检验（Maldague，2001）。

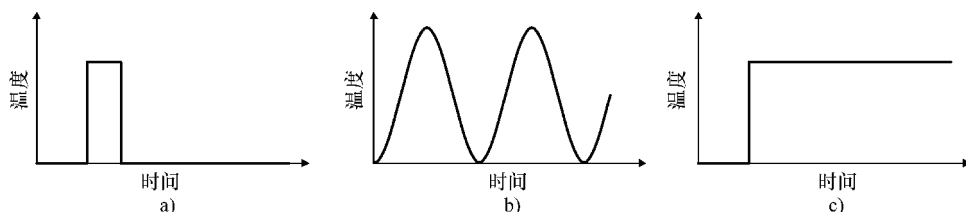


图 9.4 由外部激发的主动式热成像技术的激励类型

a) 脉冲加热 b) 周期（锁相）加热 c) 阶跃加热

内部激励的主动式热成像检测是利用振动或感应物体内部发热。振动热成像法其效率在检测方法中具有独特的优势。该方法最初是由 Hennecke 等在 1980 年提出的，但在 20 年后才由 Favro 等普及。在文献中，振动热成像法也称为超声红外热成像、声学热成像、弹性波激励热成像。

该方法在首次提出后很长时间才得到普及，由很多因素造成，最重要的是可用于测量的高品质、便宜的红外相机的出现。振动热成像检测是主动式红外热成像检测的一种，使用机械振动进行热激励。其操作原理如下：周期性应力波在被检试件中传输时，在不连续处（如分层、疲劳裂纹等）会产生能量耗散，将机械能转化成热能发热。不同于其他热成像检测方法，振动热成像检测中的热源是缺陷本身，因而更容易识别出缺陷。不连续处发热后传导到表面，由红外热像仪采集到表面的温度变化。通常使用 MWIR 波段的热像仪来检测。振动红外热成像检测的工作原理见图 9.3b。

振动热成像检测用了两种不同的机械激励方式：

1) 类似于脉冲热成像检测，脉冲式振动激励热成像检测是最常应用的激励类型。在超声波频率范围内短振动机械激励作用到测量对象，如图 9.5a 所示。振动的持续时间通常是几分之一秒，其优点与脉冲热成像检测类似。

2) 如图 9.5b 所示，锁相振动热成像检测是以周期性方式将振动能量加载到被检对象。这个测量的优势配置类似于上面描述的锁相热成像检测。

通常通过超声波设备进行振动热成像技术的激励，它包括三个元件：①转换器——一个朗之万（Langevin）式夹紧的螺栓传感器，包含在两个金属件间的压电陶瓷（这个配置允许大功率窄频带运行）；②升压器——金属件（通常是铝或钛合

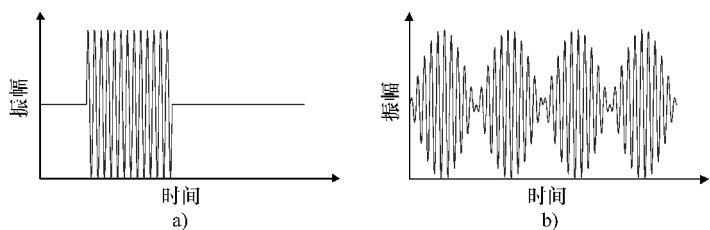


图 9.5 由内部激发的主动热成像技术的激励类型
a) 脉冲信号 b) 调制信号

金)，用于夹紧整个超声波装配并放大振幅；③超声波发生器——一个接触到检查结构的部件，进一步放大振动振幅。一个典型的励磁装置如图 9.6 所示，这些部件固有频率的合理匹配是能否有效运行的关键。这个配置是典型的超声波焊接设备。机械激励也可以通过一个电磁振动器或磁致伸缩换能器实现，但并不常用。

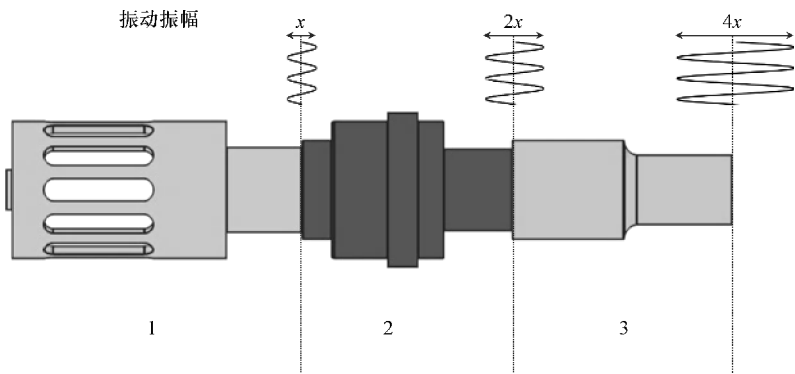


图 9.6 典型的超声激励源
1—转换器 2—升压器 3—超声波发生器

振动热成像检测最初由 Hennecke 等研究，考虑使用测试对象谐振频率激励。然而，如图 9.6 所示的超声波设备，由于其专用的窄带操作频率设计，不适于在此使用。Han 等（2004，2002）提出使用非线性耦合，在超声波发生器和测试对象间产生锤击效应并丰富了激励的频谱。然而，缺乏可重复的、非线性激励是限制该方法的主要问题。Holland（2007）展示了使用由线性调频信号驱动压电堆栈获得宽带激励的可行性。然而，该方法产生的可传递给测量对象的能量较小。超声波焊接机是针对高振幅操作设计的，在压电堆栈没有额外的波导时是难以实现的。振动热成像检测激励源的设计仍有改进空间。

尽管在过去的几年中有许多相关研究工作，振动能量在缺陷处的耗散机理尚未完全了解。应变、压力、熵和温度场之间的交互作用在材料上，产生复杂的热-力学响应，并反映到测量的温度场结果上。其物理关系如图 9.7 所示。在振动热成像

检测中可能的发热机制如下：

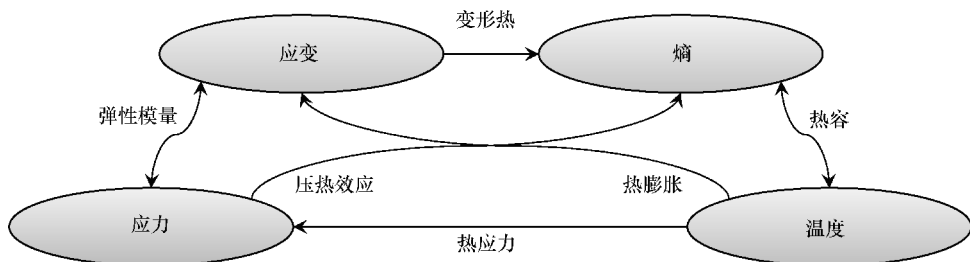


图 9.7 在不同的域相关的物理现象 (After Tinder (2008))

1) 摩擦发热是振动热成像检测中发热的主要来源 (Homma 等, 2006; Mabrouki 等, 2009; Mian 等, 2004; Renshaw, 2009; Denshaw 等, 2008, 2011; Rothenfusser 和 Homma, 2005)。机械振动在试样中传递, 引起裂纹 (或分层) 面的微凸体的相对运动。在这些微凸体的接触和摩擦过程中, 总是伴随着热量的生成。功率耗散的过程中, 即生成的摩擦热, 是与剪应力与滑动速率成正比的。

$$P_{fr} = \tau \cdot \dot{\gamma} \quad (9.3)$$

式中, τ 是摩擦力表面的剪应力, $\dot{\gamma}$ 是滑动速率。

由于表面的粗糙, 在微观层面摩擦也可能在摩擦表面微凸体诱发塑性形变 (Mabrouki 等, 2010; Renshaw 等, 2011)。然而, 由于塑性区在裂纹表面成形, 而不是在裂纹尖端, 该测试依然为无损的。然而, 一些学者认为在塑性区的衰减强于摩擦区, 是损伤区域能量耗散的主要原因。

2) 塑性发热出现于超出材料的屈服应力时。不可逆的塑性流导致内部熵数量的增加和非弹性的热消散。由于在机械激励过程中, 振动产生的应力不大可能达到材料的屈服强度, 因此振动热成像检测被认为是无损的。然而, 裂纹尖端的特定位置存在更高的应力集中。裂纹尖端的发散应力场是根据经典线性断裂力学理论。在现实中, 裂纹尖端的应力场更复杂, 取决于材料的残余应力及宏观和微观的裂纹形状。为了支持振动热成像检测属于无损测试 (Homma 等, 2006; Renshaw, 2009; Renshaw 等, 2011), Tsoi 和 Rajic 已经表明, 在铝样品中, 目前没有证据表明在振动热成像检测中的振动引起了裂纹增长。

3) 材料阻尼在应力集中区产生大量的热量。根据材料应力 - 应变的滞后回线, 在周期性振动加载过程中会产生大量的能量耗散。在许多材料中这种影响是可以忽略的, 但在聚合物和复合材料聚合物中有很大的影响。

4) 热弹性效应是指弹性材料温度和外加应力的关系。材料接触弹性变形表明了应力和温度的变化成正比 (Harwood 和 Cummings, 1991)。其基本理论的关系是

$$\Delta \varepsilon = \frac{(1 - 2\nu) \Delta \sigma}{E} + 3\alpha \Delta T \quad (9.4)$$

式中， $\Delta\varepsilon$ 是主应变的变化， $\Delta\sigma$ 是第一应力不变量的变化， ν 是泊松比， ΔT 是温度的变化， α 是热膨胀系数， E 是杨氏模量。在某些情况下热弹性效应比较显著，已应用于热弹性应力分析工程中（Harwood 和 Cummings，1991）。然而，在振动热成像检测中通常为平均的测量数据。这是由于高频振动激励的使用，与红外热像仪的整合周期相比其振动周期更短（Renshaw 等，2011）。

振动热成像检测是一种先进的热无损检测技术，与传统的热无损检测方法相比有许多优点。在下面几节中将会介绍该方法是对现有的无损检测方法的补充，它在不同的应用领域提供了更优的性能。然而，如果要优于工业的应用方法，还需要解决测量的一些可重复性与可靠性问题。

9.3 振动热成像检测系统的发展

AGH 科技大学机电一体化和机器人系的研究小组在振动热成像检测方面进行研究，其研究范围为结构技术现状的工程监测和寿命评估。这部分阐述了振动热成像在开发项目范围内测试系统的技术细节，以便于其后续分析。

成熟的热成像检测系统的基本组件如图 9.8 所示，这个系统的组成部分有：①红外热像仪；②超声波信号发生器和放大器；③超声波激励源；④用于测量控制、数据采集和信号处理的计算机。

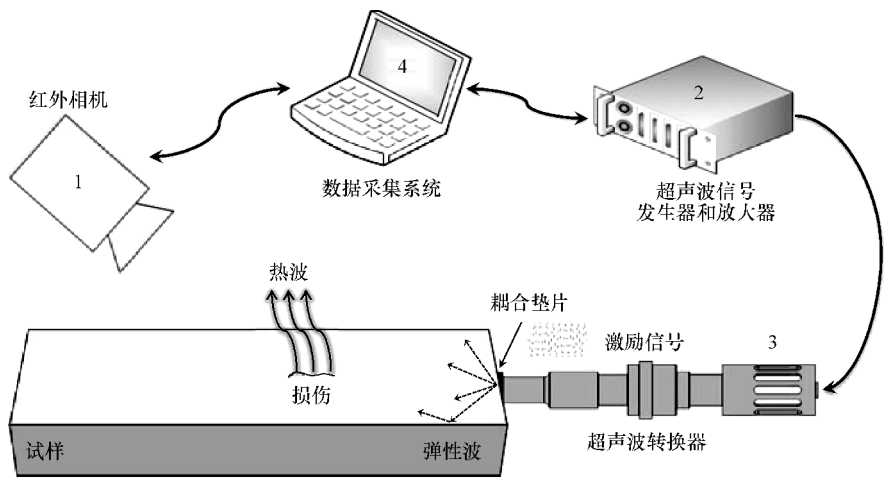


图 9.8 振动热成像检测原理图

测量系统有两种形式，如图 9.9 所示。这两种形式都包含了上述四个基本组件，但超声激励装置固定器的设计不同。第一种形式如图 9.9a 所示，是为实验使用设计的固定系统。轴承结构由轻铝结构组成，超声激励由气动压机系统和夹具组成。第二个形式如图 9.9b 所示，是可实地测量的移动系统。在这种情况下的轴承

结构为了用一个手柄简单方便操作，已经将超声激励装置减少到一个夹具。

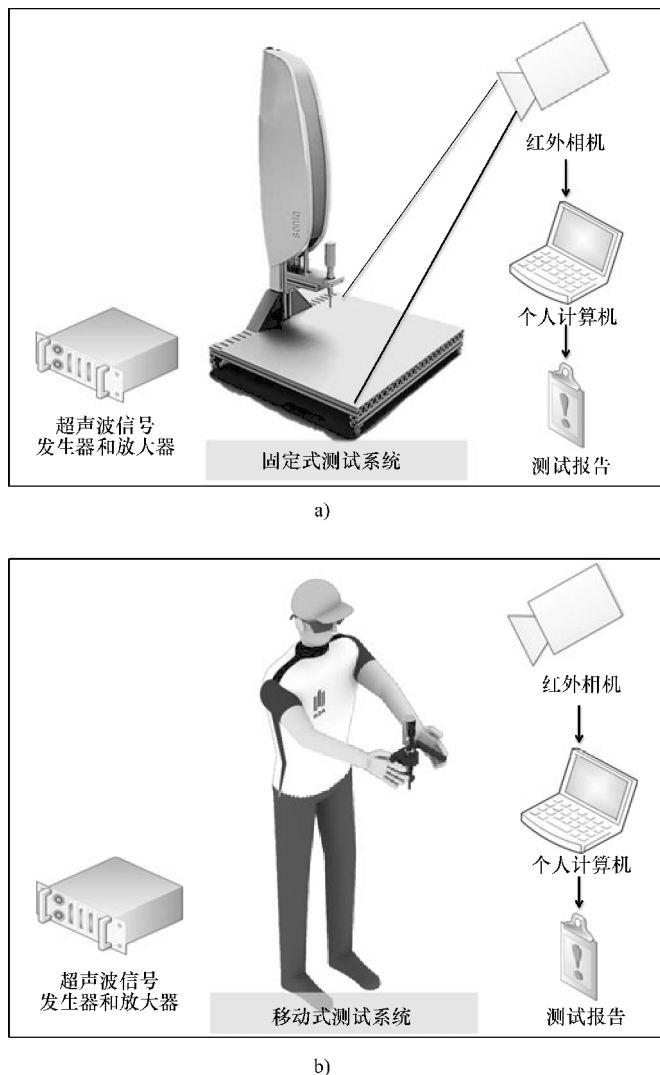


图 9.9 诊断系统开发的两种形式

a) 固定式 b) 移动式

测量系统各局部构件主要技术参数在下面做简短介绍。通过大量文献阅读及样机的初始数据和实验研究，规定了详细的参数。

1) 红外热像仪是一个高性能、制冷型探测器 MWIR 相机。其主要规格见表 9.3。

2) 为了满足热成像检测技术的特殊需求，研究团队与当地电子系统制造商密切合作研制了超声波信号发生器和放大器，超声激励系统的正确操作需要高电压和

高功率输出。信号发生器必须配备一个频率调谐电路来匹配传感器装配的工作共振频率。此外，红外相机的无缝操作需设计出适当的触发输出。锁定测量配置触发器输出是必要的。软件层的信号发生器和放大器的所有参数是可控的。原型设计的主要参数见表 9.4。

3) 超声波激励源是一个典型的超声波焊接设备，其设置在前面已经讨论了，如图 9.6 所示。测量设置用了两个频率——20kHz 和 35kHz。激励源可以安装在气动压机系统上或在一个手柄上来进行实地测量。

4) 测量控制、数据采集和信号处理的软件设计是测量系统的一个重要的部分。该软件允许对红外热像仪和超声波发生器的参数进行控制。软件可实现手动或遵循设定的典型操作模式进行操作。测量能通过软件来设置和触发。热成像序列的获取和后期处理可用点线分析、影像相减和分化等主要方法。表面温度分布的异常现象可用三维像素强度图或检测对象热影像的叠加图来观察。经报告验证，此软件可用于重复测量任务。程序窗口的典型截图如图 9.10 所示。

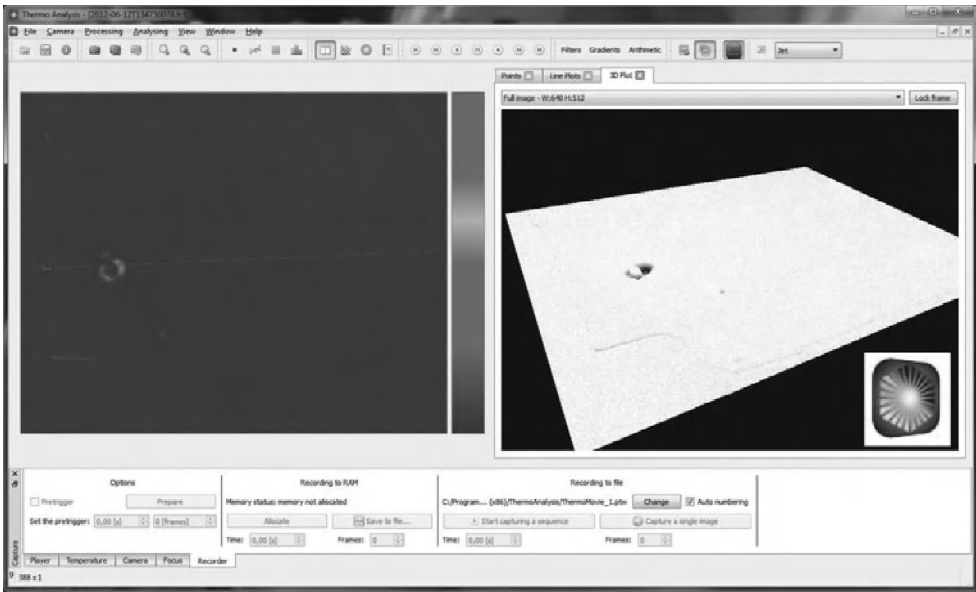


图 9.10 热分析软件的主窗口（MONIT SHM LLC 2012）

表 9.3 红外相机的规格

传感器类型	InSb
传感器分辨率	320 × 256
频谱范围	2.5 ~ 5 μm
热灵敏度（NETD）	< 25 mK
接口	USB, CameraLink, GigE

表 9.4 超声波放大器规格

频率范围	20 ~ 50kHz
输出功率	1.5kW
触发输入输出	TTL
通信接口	USB (MATLAB, C/C++ 库)
输出信号	连续的、突发的、已调制的

9.4 虚拟测试

本节介绍振动热成像检测的数值模拟，并给出有关问题的基本信息和计算复合板冲击损伤的例子。

振动热成像检测虚拟仿真对于更好地理解该方法是重要的，而且可能会引起效率的改善。通过振动热成像技术测试的数值模拟，允许设计者评估该设计结构中检测某些缺陷类型和尺寸的能力，并据此选择安全系数制定相应的维护计划时间表。虚拟损伤检测允许维护工程师在进行实际的物理测试之前自定义测试设置和参数。这样可以有效地降低成本，特别是许多测试在较远或不易到达的位置。可信的虚拟测试程序的高效性和可靠性将与最终收益，以及降低其实施成本有很大关系。

缺陷虚拟检测涉及计算力学和实验测试等领域。计算力学的工具可重现测量背后的物理现象，同时实验测试为计算模型提供必要的参数。由于存在强非线性（接触和摩擦）、高频激励（通常在 20 ~ 40kHz 的范围内）及机械和热场之间的耦合，数值模拟的问题是相当复杂的。所有这些因素导致计算时间较长和计算模型复杂等问题（例如，热和摩擦的参数，裂纹的残余应力等）。

目前，在振动热成像检测的数值模拟方面已完成的工作包括：通过单一谐波和无序超声波激励在疲劳裂纹周围产生热的效率研究（Han 等，2005，2006），金属板裂缝检测（Han 等，2009；Mabrouki 等，2009，2010；Plum 和 Ummenhofer，2010；Saboktakin 等，2010）和复合材料疲劳损伤的检测（Mian 等，2004）。不同的模型假定不同的热生成机制和不同的模型参数来重制实验数据。最常见的假设是，摩擦能量耗散在所观察的温度场上具有显性效应。迄今为止的计算研究，只考虑有限规模和简化几何的材料样品。大规模的振动热成像检测虚拟仿真中存在的问题之一是在高频率下的热机械耦合问题需要很高要求的计算能力。另外，更重要的因素是振动热成像检测中观察结果背后的物理机理的理解。只有识别和理解了这种机理，才能建造一个可信的计算模型。在理解这个问题的过程中，我们能够对测得的数据获得一个可靠的定性。不过，这个领域的很多研究都正在进行，这种情况可能会在不久的将来改变。

作为一个振动热成像检测虚拟仿真的例子，讨论碳纤维复合材料板勉强可见冲

击损伤（BVID）的检测问题（Pieczonka 等，2012）。

被检试件是 $[0_3/90_3]_s$ 厚度的层铺的矩形复合板，如图 9.11a 所示。板的尺寸是 $120\text{mm} \times 420\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，如图 9.11b 所示。试板是由纤维含量 61.5% 的密封 Texipreg HS160/REM 碳/环氧预浸料制成的层压板。测试之前用超声波 C 扫描层压板，对试样进行质量评估，排除其存在的制造缺陷。

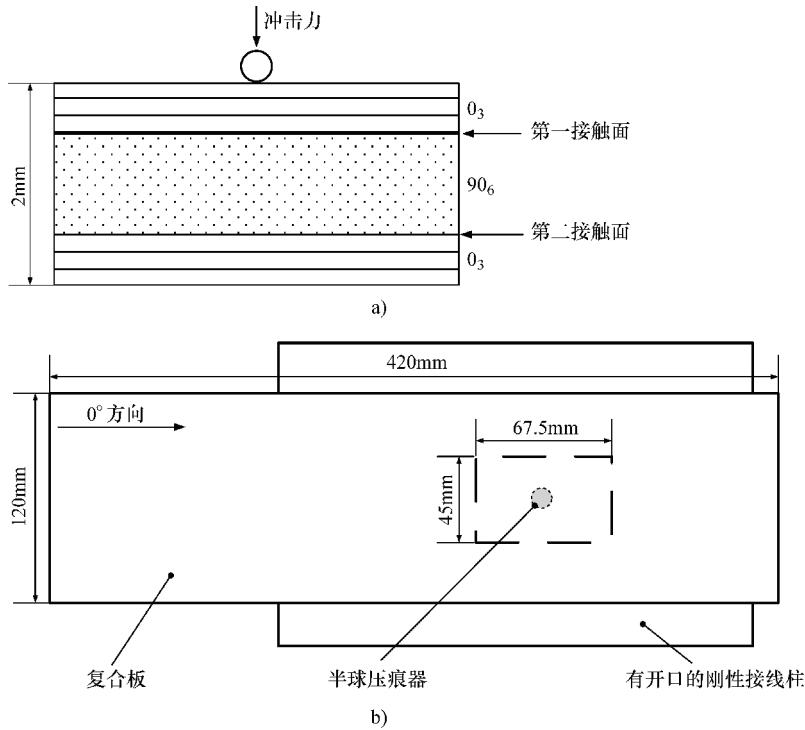


图 9.11

a) 层压图结构的细节 b) 冲击试验设置

使用的落锤冲击试验塔对复合板造成冲击损害。在靠近板的主对称轴相邻位置的两点冲击。两点之间的距离大约是 12mm 。在试验过程中，复合试样放在矩形开口 $45\text{mm} \times 67.5\text{mm}$ 的简支钢板上（见图 9.11）。第一次冲击的能量为 3.9J ，第二次冲击的能量为 6J ，如图 9.12 所示。

检测板内的损伤特征使用了三种不同的方法：振动热成像法，超声 C 扫描测试和增强渗透 X 射线照相（PEXR）。所有这三种方法所揭示的冲击损伤的程度是相当一致的，如图 9.13 所示。进行振动热成像技术测试所使用的测试系统是上一节中所描述的固定形式。超声波励磁装置运行频率是 35kHz 且只有最大输出能量的 30%。激励施加在热像仪视场之外。超声波发生器和试板之间没有连接，同时超声波激励装置功率较低，因此板的表面不存在被损坏的风险。红外相机记录板的

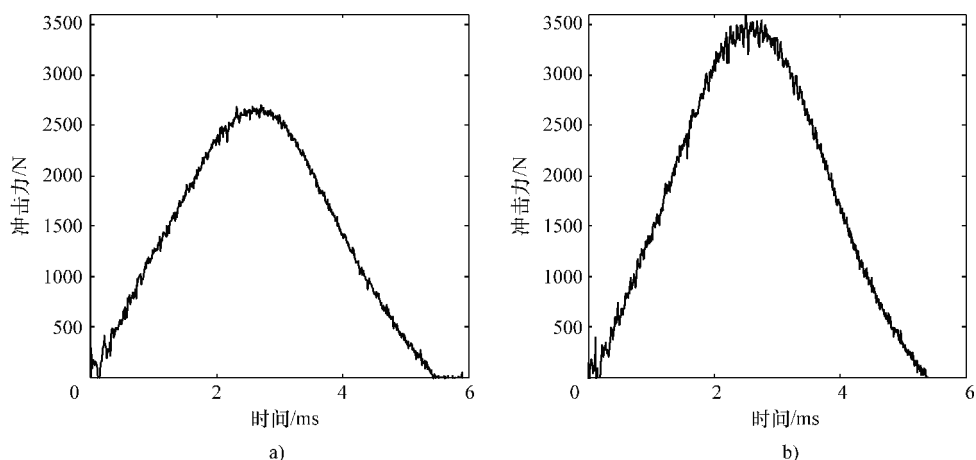


图 9.12 实验的冲击力

a) 第一次冲击力 (3.9J) b) 第二次冲击力 (6J)

底表面的温度变化,即受激励表面的相反侧。被检试板表面不需要进行任何特殊处理,整个测量时间小于1min。如图9.13c所示,超声波激励引入到板中0.5s后的,差分红外热像图显示温度上升。冲击的主要损伤模式与预期一样,大量的分层出现在 90° 和受影响侧最远的 0° 之间的界面层。其他断裂现象包括在 0° 界面层的基体拉伸裂纹和 90° 界面层中央的基体剪切裂纹。

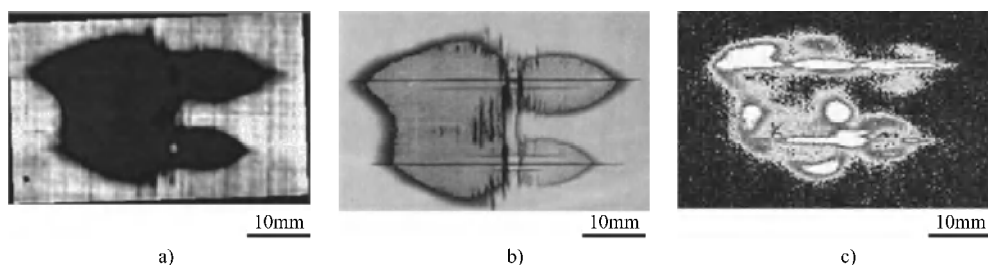


图 9.13 板中损伤识别的手段

a) 超声 C 扫描 b) 增强渗透 X 射线照相 c) 振动热成像法

通过高频率下的热机械耦合仿真重现了振动热成像检测技术。这次测试选定了一个精确的时间积分有限元法。该方法非常适用于非线性强、动态复杂的模拟仿真的分析。使用了商业化的 LS - Dyna 有限元求解器 (利弗莫尔软件技术公司 (LSTC) 2012a)。假定模型中占主导地位的热生成机制是摩擦能量耗散。正如前面提到的,摩擦能量耗散率是摩擦应力和滑动速率的乘积。假定每一个接触表面上的热释放的能量是相同的。由于测量的短持续时间和样品与环境之间的低温度差,没有对测试样品与环境之间的对流和辐射的热交换建模。

有限元模型的测量设置准备使用 LS – PrePost 有限元预处理器（利弗莫尔软件技术公司（LSTC）2012b）。有限元模型由三个主要部分组成：①刚性材料；②复合板 $[0_3/90_3]_s$ 序列堆叠层；③刚性圆筒模拟超声波发生器，如图 9.14 所示。整个模型包括大约 260000 个节点，202000 个实体六面体元素，其中 900 个刚性元素。整个板层有四个元素（每 3 层一个固定的元素）能够再现所需的铺层序列。

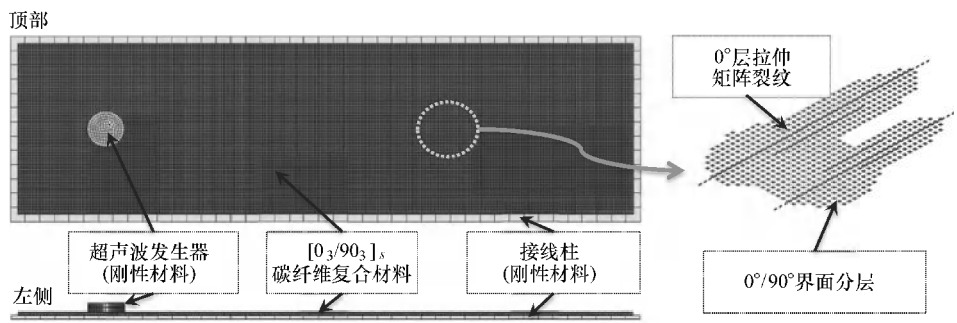


图 9.14 虚拟仿真模型和损伤的细节

建模时把在 0°/90°接口处和在 0°层基体拉伸裂缝的分层程度看成面对面的热接触面积。如上所述，基于 NDT 测试得到分层的形状和大小。假定在数值模型中，摩擦功完全转化为热量，进入的接触面（主站和从站）的部分是相等的。LS – Dyna 摩擦是基于库仑模型的。本次分析中，模型中的所有接触段的静摩擦系数值为 0.3，动摩擦系数的值为 0.25。摩擦系数的分配值是从有限的文献数据基础上得到的（Chand 和 Fahim，2000；Gay 等，2002）。

接触面发生滑动时切向力大于摩擦力。摩擦特性取决于接触表面的特点，如表面粗糙度或温度和负载条件，法向力和相对速度。复合板弹性的横向同性和热性能应用数值如表 9.5 中所给出。由于没有从制造商那里获得关于热复合材料的性能信息，因此，测试的复合板的热性能参数估计建立在文献综述的基础上（Gay 等，2002）。

表 9.5 复合材料的弹性及热性能

质量密度	$\rho = 1.6 \text{ gcm}^{-3}$
弹性常数	$E_1 = 93.7 \text{ GPa}$, $E_1 = 7.45 \text{ GPa}$ $G_{12} = G_{23} = G_{31} = 3.97 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0.261$, $\nu_{21} = 0.0208$
热膨胀系数	$\alpha_1 = -0.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_2 = 28.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
导热系数	$k_1 = 25 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $k_2 = 6 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
比热	$c_p = 700 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

数值模型的边界条件被指定为最理想方式的实验装置。在所有自由度上安装了精确的标杆，在复合板和标杆间有指定的接触边界。模仿超声波发生器，在除 z 方

向的所有自由度上安装刚性气缸（即正常的复合板）。气缸在 z 方向的转化通过正弦位移边界条件来实施。振动的振幅设置为 $5\mu\text{m}$ ，频率设置为 35kHz 。耦合场的热机械分析执行将会持续 0.2s 。机械部件的时间步长设置为 50ns ，热部件时间步长设置为 $100\mu\text{s}$ 。关于超声波在结构中传播，由于更慢的动态热现象，热时间步长会远大于机械时间步长。Crank – Nicolson 时间积分法将应用于求解传热方程。

图 9.15 给出了在三个不同时间步长的情况下，实验和数值模拟的温度分布的比较。图 9.15 中，在最上面的图像是来自于热成像相机的图像，底部的图像代表仿真结果。在实验中，热像图由记录序列中的所有其他帧减去记录的第一帧得到的。由于损坏处的能量消耗，分析板的温度上升是可以接受的。从数据处理的结果可以看出，在时间为 0s 图像上的温度是分布均匀的。在时间等于 0.1s 时，可以看出在实验数据和仿真结果中，只有基体裂纹的热像图是可见的。在时间等于 0.2s 时，实测数据与仿真结果中，整个剥离面积是可见的。在热像图中裂纹显现时间和分层显现时间之间存在的延迟被定义为热波源从近表面分层到达物体表面所需的时间。模拟结果与实验的趋势相匹配。然而，受损区域的 0.2s 后的最大温度上升等于实验测量的 0.1K ，而在数值模拟的等效温度上升等于 0.06K 。

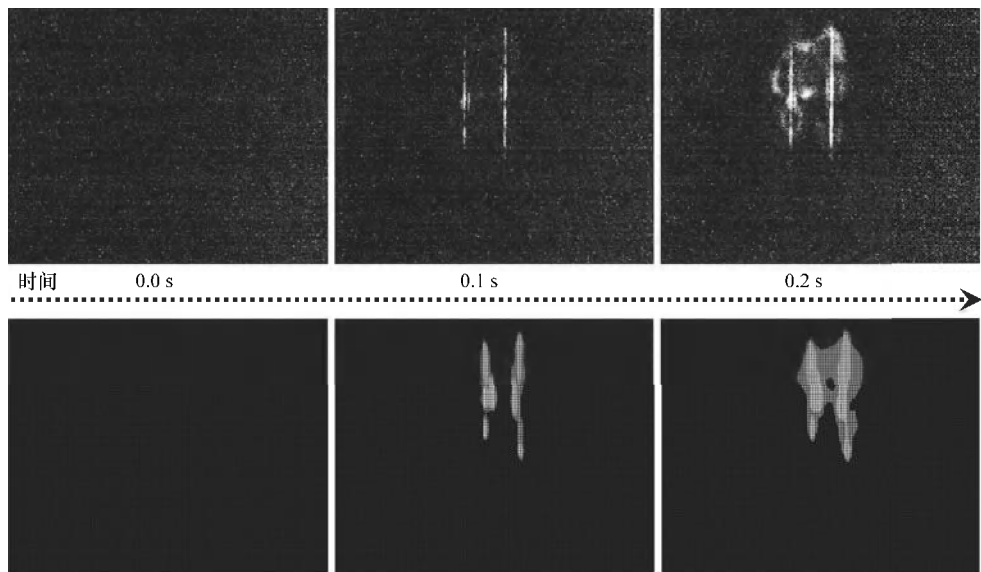


图 9.15 实验比较所得表面温度分布（顶行）和数值（底行）

损坏区域的响应测量和数值仿真之间的差异可以归因于几个因素。产生热量的唯一机制是摩擦生热，而目前碳纤维复合材料不包含黏弹性材料的阻尼的研究。在文献综述中看复合板的主要热性能有很大的不确定性程度。目前的调查所用的材料无法查到精确的摩擦系数。简化方式模拟的分层和裂缝的有限元网格不连续（双节点），假定热摩擦接触在相对面之间。分层和裂纹面都是理想的平面，这个假设

不符合现实。同时有一定摩擦因素的影响。尽管有这些差异，仿真结果是非常令人满意的。

9.5 实验室测试

本节开展实验测试是为了验证振动热成像检测的测试系统，并通过研究执行参数对测试的影响来揭示振动热成像检测中最重要的影响因素。

已经分别使用固定和移动版本的成熟的测试系统对金属材料 and 复合试样进行了大量的实验室测试，以验证系统组件并讨论测量参数。在实际工作条件下进行损伤检测之前，使用已知缺陷的标准试样验证硬件平台和软件程序。以下对系统的主要参数进行了研究，来验证损坏处的散热量的依赖因素：

- 1) 激励时间。
- 2) 超声激励源和被检体之间的接触力。
- 3) 超声波转换器的功率。

本实验设计是为了分析上述三个参数对被测热信号的影响。选择一种三级全因子设计进行分析。设计通常用于因子筛选分析。采样点的数目等于 k^n ， k 是参数的个数（因数）和 n 是参数水平的数量。在本案例分析中，必须设计 $3^3 = 27$ 个参数配置获得测试结果。图 9.16 描述了该设计。表 9.6 总结了实验中使用的参数值。

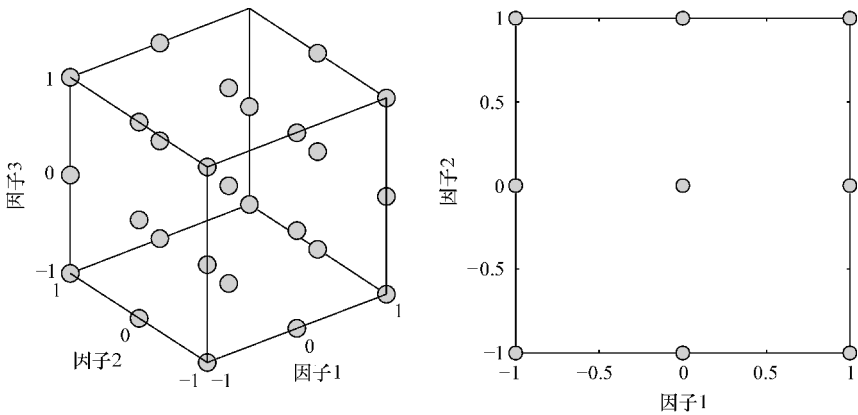


图 9.16 三个因子的三级全因子设计

表 9.6 试验设计中所用参数值

参数	级别	级别	级别
	低级	中级	高级
时间/s	0.1	0.5	1
力/N	50	250	500
功率 (%)	30	60	100

如图 9.17a 所示, 该测试试样是碳环氧预浸料板。样板受到低速冲击作用, 冲击点附近的基体和纤维产生裂纹。用 35kHz 激励源在固定测试系统进行振动热成像检测。红外相机的视场位于缺陷所在的试样右上角。激励作用在板左下角, 即对角线上远离损害的位置。这个激励位置要在红外热像仪相机的视场之外。测量装置如图 9.17a 所示。

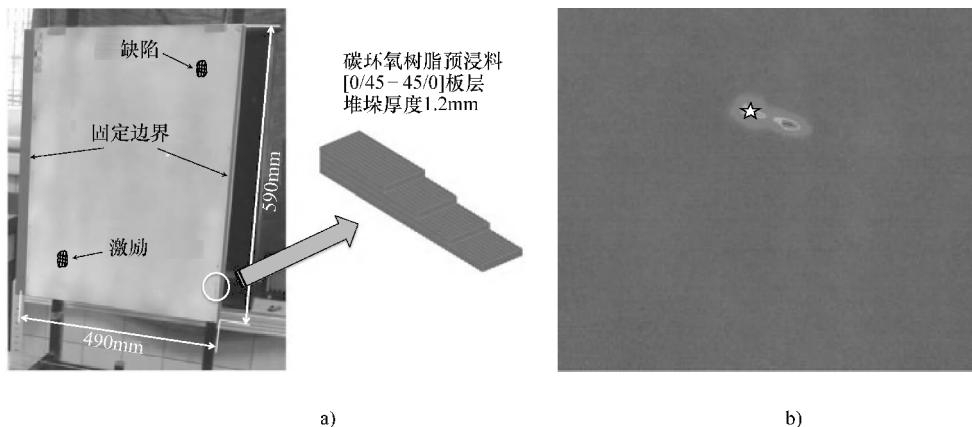


图 9.17

a) 分析试样 b) 实验结果

图 9.17b 是通过振动热成像技术测试获得一个试样受损区域的热像图。用星形标记标明位置, 随后进行比较。软件包中的图像处理技术实现了后续的分析。热像图处理的应用可以用来估计测试试样缺陷的大小和定位。

根据准备好的实验计划对试样进行实验。主要性能指标是受损区域中的一个已选择点的最高温度增长 (图 9.17b 标有星形的点)。振动热成像检测的质量由结构性缺陷处生成的热量决定。缺陷处振动能量耗散越多, 热像图的对比效果越好。因而评估损伤参数更容易。

在试验计划中的所有实验测量, 都根据以下四个主要的步骤进行:

- 1) 试样参考环境温度相对稳定 (21℃)。
- 2) 超声激励和用红外热像仪相机的数据采集同步开始。
- 3) 热像图收集 10s。
- 4) 已获得图像序列的后处理。

通过分析实验结果, 以确定影响热响应的最重要的因素。这三个工艺参数的一阶效应已计算出, 结果如图 9.18 所示。可以看出, 所有考虑的参数对热信号的测量都有影响。最重要的因素是超声波转换器的功率。可以直观地看出, 在损伤处热耗散的量应该与传递给结构机械能的成正比。

激励持续时间的影响同样如此。超声激励时间越长, 传递到试样的能量越多, 因而在伤害处消散的能量更多。超声发射源和试件之间的接触压力是一个有趣的因

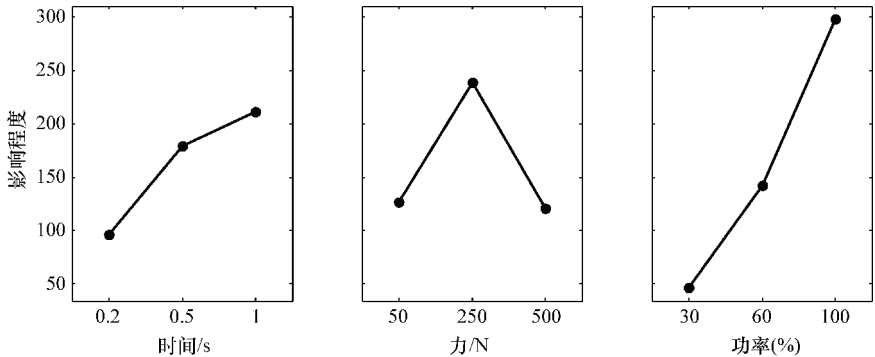


图 9.18 测量参数的主要效应分析

数。此参数是代表超声能量转换器产生的能量转移到测试样品的转移量。图 9.18 可以看出，当力在 50 ~ 250N 时，实测热信号增加，当力从 250N 增加到 500N 时，实测热信号减少。如果超声转换器和被检试件之间的接触压力太低，可能会发生锤击的效果。因为超声转换器尖端离开试样的表面，超声能量不能有效地传递，结果可能会损坏试样。如果接触压力过高时，试样表面有可能损坏且超声转换器的振动受限，使样品激励效果变差。若施加很大的力，超声波转换器内压电陶瓷层阻滞力可能被超出，而不会发生振动。尤其对于低功耗操作这是很重要的。因此，在超声转换器和被检物体之间应施加最佳的力，使它们耦合最好，热效应最显著。分析所有的情况，最佳的接触力是 250N 左右。

根据文献调查，适当的超声波的组装和测试样品之间的耦合确实是一个重要的测量参数（Lick 等，2007；Shepard 等，2004）。之前提到的，某些耦合衬垫和耦合压力的配置可能产生声混杂现象（Han，2004；Han 等，2002）。

总之，通过验证可以说，所设计的振动热成像检测系统完全实现了检测功能。在复合材料试样上进行的初步测试，揭示了它对测得的热响应的测量参数具有最大的影响。超声波转换器的操作功率、机械激励持续时间和接触力均发现对测得的热响应有影响。有几个方面需要进一步的实验。特别是，存在一个使试样可以局部损坏的操作功率的最大值。相同配置的振动热成像检测系统的励磁装置，用于对超声波转换器的塑料材料进行塑化，可以形成持久的联结。显然这在无损检测应用中无需研究。然而，这个特定的测试配置很难评估最大的功率级。另外一个方面是在样品和超声转换器之间确定一个最佳的接触力。从该方法在这个阶段的发展看，这些问题会仍然值得研究。

9.6 现场测量

本节描述了一些采用振动热成像检测系统进行实地测试获得的结果，并讨论了一些振动热成像检测的实用性。

已经完成了一个米格 29 喷气式战斗机的机身和机翼面板实地测量,如图 9.19a 所示。使用移动式的振动热成像检测系统进行测试。使用 35kHz 工作频率的超声波装置激发该结构且使用一个 Cedip 银 420M 红外相机获得热像图序列。图 9.19b 所示为实验装置。

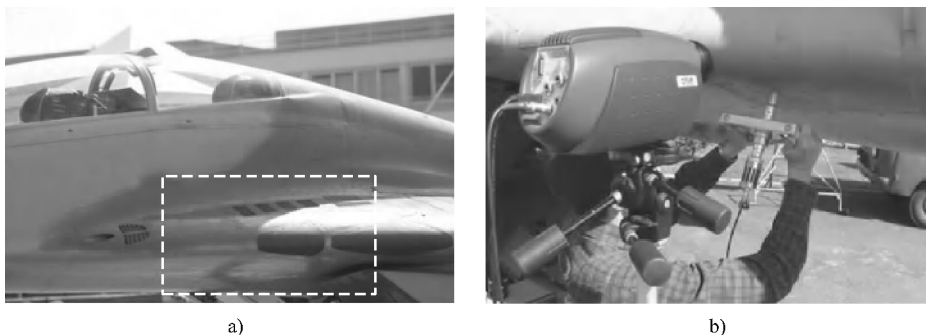


图 9.19

a) 米格 29 机身的测量部分 b) 实验装置

本测试的主要目标之一是识别可能存在于机身面板的松散的铆钉。测试是直接 在飞机上进行的。运用 500ms 超声激励,记录了总时长 5s 的热像图序列。图 9.20a 提供了一个由开发软件得到的典范测量结果。该图像是一块热变化可识别的面板的热基线标识的叠加图片,铆钉位于周围的区域。图 9.20b 表示与背景温度的变化 (虚线) 相比,在所标识的区域 (实线) 的温度变化。超声波激励施加后间隔 1.2s,可以清楚地看出,在受损区域温度迅速发生变化;在完好的区域,温度保持不变。

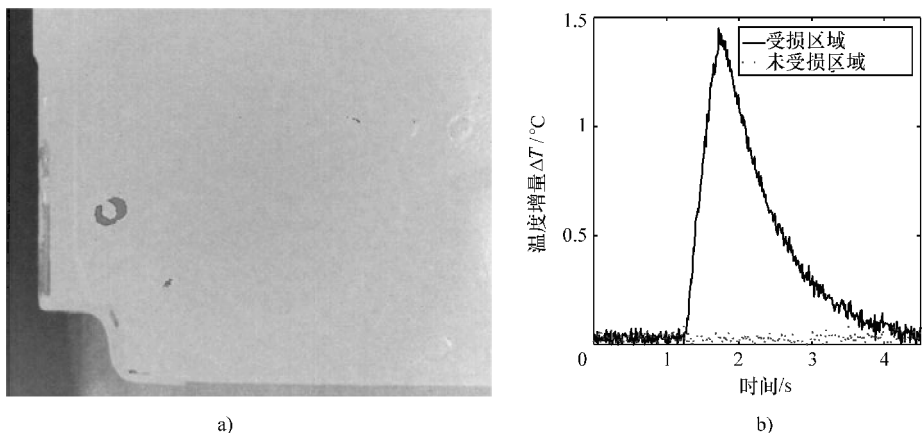


图 9.20 实验结果

a) 识别松散铆钉 b) 松散铆钉的温度变化 (实线) 和面板健康部分 (虚线)

图 9.21 展示了一个有关选择适当的激励位置的问题。图 9.21a 所示为飞机机身上三个不同面板上的同一个位置。激励作用于红外相机视场的右上角。从图 9.21b 中可以看出, 能量传递只能在激励发生的结构面板内, 无法跨越连接点。在这种情况下, 需要在多个位置上进行激励, 以获得所需的结果。

我们提出的例子只是一个粗放型测试实验活动的摘录, 它是为了评估振动热成像技术在实际工作条件下的可行性。并已经证明该方法可用于许多应用, 如检测闭合裂纹、分层或铆钉松动 (Aymerich 等, 2010; Pieczonka 等, 2012; Szwedo 等, 2012)。它被证实适用于复合材料、金属和陶瓷组件。总结上一节中所提到的问题, 现场测试同样重要。特别是, 需要权衡在缺陷处产生的热量和局部结构损坏来选择合适的激励能量。应慎重选择在积聚结构上的激励位置, 以使超声波能量传递到所有需要检测的结构部件。或者, 可以分别对上述几个位置分别激励并获取检测结果。

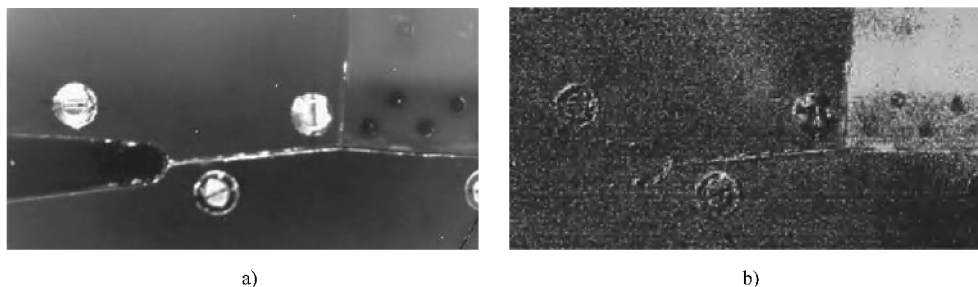


图 9.21 实验结果

a) 基准线图像 b) 面板连接的温度变化区域

9.7 概要和结论

振动热成像检测是一个非常有前途且迅速发展的热无损检测方法。与传统的热无损检测方法相比, 它有很多优点: 它是一种黑暗环境下可执行的现场检测方法 (通常热源就是缺陷本身); 它提供了很短的测试时间且需要很少精力去准备测试, 并且它还可以检测光激励热成像无法检测的封闭裂缝和分层缺陷。在工业应用中, 振动热成像检测主要关心的问题仍是可重复性和可靠性。振动激励源的可重复性是影响检测可重复性的主要因素。在实验室环境中虽然可以通过控制激励参数实现, 但在现场测试中却不太容易做到。测量的可靠性也与激励有关。频率和激励源的位置影响缺陷中的热量消散。由于缺乏对在不同情况下热产生背后的物理现象的理解, 在确切缺陷处热量消散的确切数量值无法预先得到。

通过实验结果表明, 振动热成像检测在许多工业和研究应用有巨大的潜力。测量系统的配置非常灵活, 可以很容易地适应一个特定的应用。从完成的实验和文献

调查中看,该方法的主要应用领域有以下几个方面:

- 1) 在金属和复合材料裂缝。
- 2) 复合材料分层。
- 3) 焊接接头缺陷。
- 4) 铆钉和螺栓连接的松动。

振动热成像技术的实用性优点有:

- 1) 无损、非接触。
- 2) 短测量时间(通常只要几秒即可获得令人满意的结果)。
- 3) 从热像图处理中可以检测确定,并对缺陷的定位和尺寸进行评估。
- 4) 结果容易解释。

作者只是把振动热成像检测当作现有的无损检测方法一个有价值的补充,而不是替代品,它可以帮助提高工程结构的安全。

参考文献

- AGH-UST 2012 <http://krim.agh.edu.pl/> (last accessed 5 October 2012).
- Aymerich F, Pieczonka L, Jenal RB, Staszewski WJ, Uhl T and Szewdo M 2010 Comparative study of image-based impact damage detection in composite materials. *Proceedings of the 5th European Workshop on Structural Health Monitoring* (eds. Casciati F and Giordano M). Sorrento, Italy. DEStech Publications, Inc., pp. 547–553.
- Balageas D, Fritzen CP and Güemes A 2006 *Structural Health Monitoring*. Wiley-ISTE.
- Bovsunovsky A 2004 The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials. *Engineering Fracture Mechanics* **71**(16–17), 2271–2281.
- Breitenstein O, Warta W and Langenkamp M 2010 *Lock-in Thermography*, vol. 10 of *Springer Series in Advanced Microelectronics*. Springer.
- Chand N and Fahim M 2000 *An Introduction to Tribology of FRP Materials*. Allied Publishers Pvt. Ltd.
- Favro LD, Han X, Ouyang Z, Sun G and Thomas RL 2001 Sonic IR imaging of cracks and delaminations. *Analytical Sciences* **17**, 451–453.
- FLIR Systems 2012 *The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals*. FLIR AB.
- Fluke Corporation 2009 Emissivity values of common materials. Technical report 905, Fluke Corporation.
- Gay D, Hoa SV and Tsai SW 2002 *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press.
- Han X 2004 Acoustic chaos for enhanced detectability of cracks by sonic infrared imaging. *Journal of Applied Physics* **95**(7), 3792.
- Han X, Ajanahalli A, Newaz G and Favro LD 2009 Modeling to predict sonic IR detectability of defects in metals. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* **28**, 467–472.
- Han X, Islam S, Newaz G, Favro LD and Thomas RL 2005 Finite-element modeling of acoustic chaos to sonic infrared imaging. *Journal of Applied Physics* **98**(1), 014907.
- Han X, Islam S, Newaz G, Favro LD and Thomas RL 2006 Finite element modeling of the heating of cracks during sonic infrared imaging. *Journal of Applied Physics* **99**(7), 074905.
- Han X, Li W, Zeng Z, Favro LD and Thomas RL 2002 Acoustic chaos and sonic infrared imaging. *Applied Physics Letters* **81**(17), 3188.
- Harwood N and Cummings W 1991 *Thermoelastic Stress Analysis*. Taylor & Francis.
- Henneke EG, Reifsnider KL and Stinchcomb WW 1986 Vibrothermography: Investigation and development of a new nondestructive evaluation technique. Technical report, U. S. Army Research Office, ARO 18787.5-MS.
- Holland SD 2007 First measurements from a new broadband vibrothermography measurement system. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* **26**, 478–483.
- Homma C, Rothenfusser MJ, Baumann J and Shannon R 2006 Study of the heat generation mechanism in acoustic thermography. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* **25**, 566–574.
- Inman DJ, Farrar CR, Lopes Junior V and Steffen Junior V 2005 *Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, 1st edn. John Wiley & Sons, Ltd.

- Lick KE, Wong CH and Chen JC 2007 Determination of the minimum energy required for sonic-IR detection. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* **26**, 515–523.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC) 2012a <http://www.lstc.com/lsppl/> (last accessed 5 October 2012).
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC) 2012b <http://www.lstc.com/products/lstc-dyna> (last accessed 5 October 2012).
- Mabrouki F, Thomas M, Genest M and Fahr A 2009 Frictional heating model for efficient use of vibrothermography. *NDT & E International* **42**(5), 345–352.
- Mabrouki F, Thomas M, Genest M and Fahr A 2010 Numerical modeling of vibrothermography based on plastic deformation. *NDT & E International* **43**(6), 476–483.
- Maldague XPV 2001 *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Mian A, Newaz G, Han X, Mahmood T and Saha C 2004 Response of sub-surface fatigue damage under sonic load a computational study. *Composites Science and Technology* **64**(9), 1115–1122.
- Minkina W and Dudzik S 2009 *Infrared Thermography Errors and Uncertainties*. John Wiley & Sons, Ltd.
- MONIT Project 2012 <http://www.monit.pw.edu.pl/index.php/eng/> (last accessed 5 October 2012).
- MONIT SHM LLC. 2012 <http://www.monitshm.pl/> (last accessed 5 October 2012).
- Pieczonka L, Aymerich F, Brozek G, Szewdo M, Staszewski WJ and Uhl T 2012 Modelling and numerical simulations of vibrothermography for impact damage detection in composites structures. *Structural Control and Health Monitoring* DOI: 10.1002/stc.1483.
- Plum R and Ummenhofer T 2010 Structural-thermal FE simulation of vibration and heat generation of cracked steel plates due to ultrasound excitation used for vibrothermography. *10th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*. Québec, Canada.
- Reifsnider KL, Henneke EG and Stinchcomb WW 1980 The mechanics of vibrothermography. In *Mechanics of Nondestructive Testing* (ed. Stinchcomb W). Plenum Press, pp. 249–276.
- Renshaw J 2009 *The mechanics of defect detection in vibrothermography*. PhD thesis, Iowa State University.
- Renshaw J, Chen JC, Holland SD and Thompson RB 2011 The sources of heat generation in vibrothermography. *NDT & E International* **44**(8), 736–739.
- Renshaw J, Holland SD and Thompson RB 2008 Measurement of crack opening stresses and crack closure stress profiles from heat generation in vibrating cracks. *Applied Physics Letters* **93**(8), 081914.
- Rogalski A 2011 *Infrared Detectors*, 2nd edn. CRC Press.
- Rothenfusser MJ and Homma C 2005 acoustic thermography: vibrational modes of cracks and the mechanism of heat generation. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation* **24**, 624–632.
- Saboktakin A, Ibarra-Castaneda C, Bendada A and Maldague XPV 2010 Finite element analysis of heat generation in ultrasonic thermography. *10th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*. Québec, Canada.
- Shepard SM, Ahmed T and Lhota JR 2004 Experimental considerations in vibrothermography. *Proceedings of SPIE* **5405**, 332–335.
- Staszewski WJ, Boller C and Tomlinson GR 2004 *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Szewdo M, Piezonka L and Uhl T 2012 Application of vibrothermography in nondestructive testing of structures. *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- Tinder RF 2008 *Tensor Properties of Solids*. Morgan & Claypool.
- Tsoi KA and Rajic N 2004 Effect of sonic thermographic inspection on fatigue crack growth in an Al alloy. Technical report, Australian Government Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation.
- Wu D and Busse G 1998 Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials. *Revue Générale de Thermique* **37**(8), 693–703.

第 10 章 基于视觉的监测系统

10.1 引言

结构健康监测 (SHM) 涉及了传感器的集成、数据传输和处理, 以及为检测、定位和评估结构内部损伤而进行的分析, 损伤可以导致结构在当前或未来失效。SHM 可分为两类: 局部法和全局法。后者应用于能够观察到的结构几何形状的全局变化中。SHM 中的损伤定义为材料性能或者影响结构整体性能的几何形状的变化。损伤扩展在一定程度上降低了结构的刚度, 改变了其静态和动态特性。

最常用的损伤检测方法是基于损伤引起的动态特性的变化 (Kohut 和 Kurowski, 2005, 2006)。基于振动的损伤识别方法可分为基于模型的识别方法和不基于模型的识别方法。基于模型的识别方法通过比较基于有限元 (FE) 理论模型和受损结构测量获得的实验数据进行损伤识别 (Perera 和 Ruiz, 2008; Jaishi 和 Rex, 2006)。更新后的模型与原始模型相关联, 能提供损伤迹象及损伤位置和严重程度的信息。基于非模型的损伤探测方法, 应用信号处理算法分析在时域和频域以及时频域的结构的响应信号。固有频率的改变 (Cawley 和 Adams, 1979), 子结构模态保证准则 (MAC) 的改变 (West, 1984), 坐标模态保证准则的改变 (COMAC) (Lieven 和 Ewins, 1988), 模态应变能的改变 (Guan 和 Karbhari, 2008; Salehiet 等, 2009) 和模态曲率的改变 (Pandy 等, 1991) 作为定位损伤的指标。然而, 获取动态数据需要的设备, 例如激光振动计, 安装和维护昂贵, 同时难以自动化。此外, 大型结构的激励可能极其昂贵和困难。静态配置文件的收集需要更少的努力, 这使得基于挠度形状改变的损伤检测方法更具吸引力。

在大多数的这些方法中, 对于正确的损伤检测和定位来说, 从多个测量点获得的密集采样挠度曲线是必要的。当结构变得更加复杂时, 需要更多的传感器, 成本的增加可能是更显著的。有时, 由于环境条件或几何约束, 在结构上附加传感器非常具有挑战性。非接触实验技术作为这些技术的替代品已得到开发。例如, Jang 等 (2007) 提出利用计算机视觉技术来捕获结构的静态变形曲线的例子, 然后采用剖面分析方法来检测损伤位置。相对来说, 视觉系统可以是一个很好的接触型传感器的替代品, 具有使用简单、准确、低成本的特点, 且可用于振动和变形测量的通用工具。

如今, 利用数字图像相关法测量物体的位移、应力和应变, 提高了视觉系统的可用性。目前市场上提供视觉测量系统的现存最重要的公司包括: 相关性解决方

案、GOM、LIMESSE Messtechnik 软件、Dantec 动力学和 Metris (Krypton 9000) (Schmidt 等, 2003; Tyson, 2000)。

本章提到的基于视觉方法专门用于土木工程结构的面内位移场的测量。通过结构的两幅图像获得挠度曲线：一幅是参考图像，一幅是加载后采集的图像。

该方法的原理是通过归一化互相关系数来计算对象点的位移。梁在载荷下的挠度曲线过程的分析，使得该方法应用基于应变能或挠度曲率的各种损伤检测、定位和评估方法成为可能。为了增加该方法的灵活性和准确性，引入了图像配准技术。结构图像的透视畸变通过单应性映射移除，它允许物体的两幅图像来自空间上两个不同的点。为了计算两幅图像匹配特性的对应关系，引入了标记检测、形状滤波和亚像素角点检测技术。

相对于现有的系统，目前正在研发和提出的视觉系统有许多新颖的特点。第一，专门用于大型土木工程结构。它有两个基本操作模式。像其他商用系统一样，它可以作为熟练用户的手动测量装置。另一方面，它还是用于结构长期监测的全自动测量系统的一部分。该方法使得从空间两个不同的点采集结构图像成为可能，没有必要使用昂贵的定位设备。此外，如果被分析的结构具有高度的随机纹理，即使没有一组特殊标记点，这个方法也可以应用。该系统可以用便宜的数码单反相机操作，进一步降低了系统安装在物体上的成本。

10.2 当前发展现状

20 世纪 80 年代末期，利用数字图像相关法计算位移、挠度和应变的光学测量技术被引入实验力学中。该方法的基本原理是计算变形前后两幅图像之间的相似程度，最终获得被分析对象的位移场。在 Chu 等 (1985) 的文章中，作者利用相关系数的计算描述了试件的变形测量方法。这里提出了第一个实验室测试结果，检测了试件的刚体位移和变形。作者还开发了一种通过两个相机的立体视觉系统获得图像的三维运动和变形测量方法。

在 Tiwari 等 (2007) 的文章中，提出了超高速摄像系统的应用，应用数字图像相关法的非接触测量技术广泛应用于众多领域，如实验力学、材料科学、生产过程的质量控制和诊断 (Budzik 等, 2010; Wiczorkowski 等, 2010)，甚至应用在精细工艺中 (Gancarczyk 和 Gancarczyk, 2010)。如今，该方法被用于动态和静态测量。近年来发展了许多应用，例如，通过测量机械和热引起的应力和变形的 IC 封装可靠性分析 (Teo 和 Xue 2007)，检查各向异性金属板的力学性能 (Rossi 等, 2008)，焊接接头的结构分析 (Sierra 等, 2008)，用高分辨率测量低级别应变场来分析耐火浇注料的力学性能测量 (Robert 等, 2007)，以及生物组织的力学性能测试 (Cheng 等, 2007; Schmidt 等, 2002) 等。科学家们研究了由机械 (Berfield 等, 2007) 和热 (Li 等, 2008) 引起的纳米和微尺度变形过程的实验分析方法。

相关方法用于样品断裂过程的测试 (Helm, 2008; Rethore 等, 2005; Roux 和 Hild, 2006), 快速图像传感器的发展使得相关系数法能用于动力学现象的测量。在现有的应用中, 有分析物体的冲击试验过程和利用数字散斑相关 (DSC) 测量表面振动 (Fujun 和 Xiaoyuan, 2006) 的系统, 其中图像被投影到被测物体表面上。其他的应用领域包括: 用于网络胶版印刷的实时印刷缺陷检测 (Shankar 等, 2009), 用于岩土工程离心模型试验的基于位移测量的图像分析系统 (Zhang 等, 2009), 电子散斑相关的粗糙度测量和机械轮廓测定 (Spagnolo 等, 1997)。

单应性变换 (Hartley 和 Zisserman, 2004; Kosetska 等, 2004) 已经广泛应用于计算机图像处理和分析方法以及其他科学技术领域。单应性的第一个应用是立体视觉系统。该变换 (Loop 和 Zhengyou, 1999) 用于校正相机登记过的图像, 以使每个图像的极坐标点映射到无限远的理想点。映射减少了相应搜索问题的复杂性。许多已经开发了应用程序的例子, 如为了准备 OCR 系统的分析而进行的文本文档和图形符号投影失真的校正 (Zhu 等, 2008), 或根据平面方向投影的图像形状控制, 其中图像投影到投影仪的增强现实技术系统 (Borkowski 等, 2003) 中。

接下来的单应性的广泛应用是拼接技术 (Behrens 等, 2011; Brown 和 Lowe, 2003; Scoleri 等, 2005), 一种能把多个登记照片连接成一幅全景图像的方法。该拼接技术用于医学图像的处理 (Behrens 等, 2011), 手写采集系统 (Zhang 和 He, 2007), 以及为了区分背景和前景的视频序列分析 (Mei 等, 2005)。单应性映射用于从物体、车辆、建筑和其他建筑场景图像中制作模型的过程 (Infantino 和 Chella, 2001; Liebowitz 和 Zisserman, 1998)。也有基于单应性的多相机跟踪系统方法 (Benhimane 和 Malis, 2007), 该方法的实现包括建筑物监控系统 (Eshel 和 Moses, 2008), 体育比赛中球员运动的跟踪 (Iwase 和 Saito, 2002) 以及与尺度和相机方向无关的对象跟踪方法 (如轿车、人) (Park 和 Trivedi, 2007)。Fang 等 (2002) 研究了一种基于单应性映射的移动机器人控制和导航方法, 该变换还用于三维运动和结构重建问题中 (Kosetska 等, 2004)。

10.3 数字图像相关法的挠度测量

基于视觉方法的面内结构挠度测量方法由以下步骤组成 (Kohut 等, 2008, 2011; Uhl 等, 2009, 2011): 系统校准、选定平面的校正和挠度曲线测量。

第一步, 计算尺度系数, 它是用于重新调整所计算位移的度量单位。校准通过专门制造的校准模式或认证的长度标准进行。为了消除图像中由镜头缺陷带来的光学畸变, 相机的固有参数也需进行完整校准。

第二步, 分析结构的两幅登记图像: 第一幅是参考图像, 第二幅是加载后采集的图像。假设可以采集空间上物体的不同点的连续照片。从相机光轴垂直结构平面的点处采集参考图像, 但是采集图像用的相机的位置和方向是任意的。采集的图像

会有所失真，所以计算挠度前必须转换，进行结构平面的校正。在结构表面设置一个矩形标记，当结构加载变形时它与结构共面且不移动。该标记通过图像分析算法自动检测和匹配。单应性矩阵 H 通过该组对应的标记计算并进行图像映射变换。利用数字图像相关法计算参考图像和挠度曲线过程。结构图像分成多个部分，也就是强度图形。通过归一化互相关（NCC）系数分析获得两幅图像上每个图形的位置，利用结构的参考图像和被分析图像之间图形位置的不同来计算该点的位移。该算法进行所有点的计算以获得全场挠度曲线。此外，系统如果检查到最大挠度值超过阈值，将给用户发送信息。

测量后的挠度曲线可以分析损伤的检测和定位，系统通过基于小波变换的方法实现损伤检测和定位。研究的测量技术的概况如图 10.1 所示。

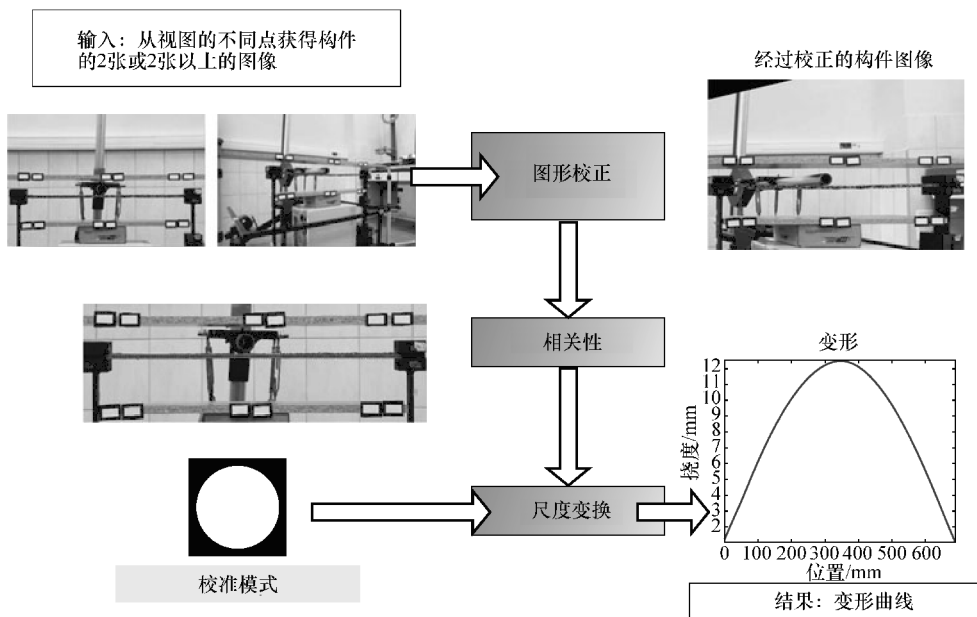


图 10.1 所研究测量方法的主要步骤

通常来说，二维数字图像相关法由以下三个步骤组成：试件准备，加载前后对象的图像采集，为获得位移场而进行的采集图像的处理。结构表面应该有与表面同步发生变形的随机灰度强度分布。散斑图可以是自然纹理或人为特殊附加在结构上的或喷涂的随机强度图。加载时物体表面应保持在同一平面上，离面位移可以忽略不计。数字图像相关法的基本原理是跟踪或匹配变形前后采集的两幅图像之间的相同图像块（Uhl 等，2009，2011）。为了计算结构点的位移，在参考图像选择以一点为中心的方形或矩形像素的参考子区，用来匹配变形后相应位置的子区图像。假设物体的形变非常小，在参考图像上以一个像素子区的中心位置为中心的搜索窗口

只进行一个局部搜索。为了评估参考图像块和变形后图像搜索区域的相似度,应用了互相关(CC)准则或差方和(SSD)准则(Kosetska等,2004)。通过寻找搜索窗口中的相关系数函数的峰值位置进行匹配。参考子区中心位置和变形图像子区中心位置的差值为该给定点的位移。式(10.1)给出了所研究方法中作为相关标准的NCC系数,该系数有更好的鲁棒性且对现场照明的变化不敏感。

$$NCC(u, v) = \frac{\sum_{xy} (f_n(x, y) - \bar{f}_n) (f_d(x - u, y - v) - \bar{f}_d)}{\sqrt{\sum_{xy} (f_n(x, y) - \bar{f}_n)^2 \sum_{xy} (f_d(x - u, y - v) - \bar{f}_d)^2}} \quad (10.1)$$

式中, $f_n(x, y)$ 是参考图像 (x, y) 像素点的强度值; $\bar{f}_n$ 是变形前强度的平均值; $f_d(x - u, y - v)$ 是图像变形后 (x, y) 处的强度值; $\bar{f}_d$ 是变形后强度的平均值; x, y 是参考图像的位置; u, v 是两幅图像之间的位移。

在挠度的测量过程中,未加载的参考图像分为随机散斑强度图形。每个图形利用NCC系数与加载结构图像的相应像素子区匹配。通过两幅图像模式的不同位置计算矢量位移。该方法对每个感兴趣的点给出被分析对象的完整挠度过程。相关系数计算像素网格上每个整数像素位置。当引入亚像素方法时,部分测量的精度提高到了0.01~0.1像素。所开发的算法用相关系数给出整数像素位置,然后拟合二次多项式带入到相邻的四个像素中。相关系数最大值的新亚像素位置是拟合的抛物线达到其最大值的点。挠度测量的总体结构如图10.2所示。

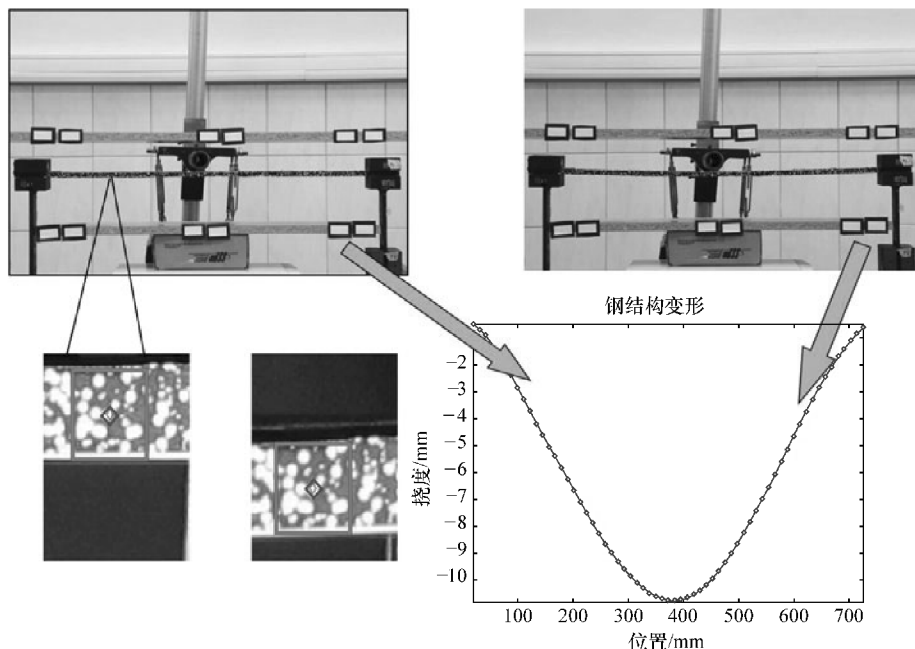


图 10.2 数字图像相关应用于挠度测量。NCC 系数计算灰度图的位移

10.4 图像配准和平面矫正

图像配准 (Zitova 和 Flusser, 2003) 是应用于两个或更多的图像叠加的方法, 这种技术经常用于遥感、医学或制图学中。图像配准技术主要分为四个子集: 多视角分析、多时相分析、多模态分析、场景模型配准。所有的图像配准技术包括四个步骤: 特征检测、特征匹配、单应性矩阵的估计和图像变换。在这项工作中, 单应性映射 (Hartley 和 Zisserman, 2004) 是为了减少图像的投影畸变, 以使来自不同位置的结构图像的挠度过程得以测量。单应性是平面上两组点之间的映射 (见图 10.3)。如果共面点的位置是在齐次坐标上给出的, 单应性就可以用一个 3×3 的矩阵 H 表示。一般来说, 矩阵 H 代表了完整的平面投影变换, 由相似度 (平移、旋转和缩放比例)、仿射和投影变换组成。单应性保持了共线性、顺序性以及点和线的入射角。

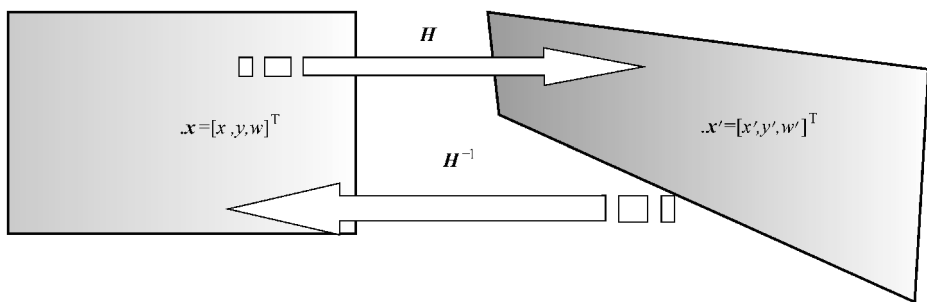


图 10.3 单应性映射将平面上的一组点变换为平面上另一组不同的点

结构的参考图像上点的同质坐标表示为 $\mathbf{x} = [x, y, w]^T$, 投影畸变图像上相应点的同质坐标表示为 $\mathbf{x}' = [x', y', w']^T$ 。投影畸变图像上共面点与参考图像相应点的映射变换表示为

$$\mathbf{x} = H\mathbf{x}' \quad (10.2)$$

式中, 单应性变换矩阵表示为

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (10.3)$$

在式(10.3)中, 矩阵元素 h_{13} 和 h_{23} 代表平移, 而矩阵元素左上方的 2×2 子矩

阵都与旋转、剪切变换和缩放比例有关。矩阵 $\mathbf{H}$ 的第三行包含有投影和投影非均匀缩减。 $\mathbf{H}$ 的归一化形式的最后一个元素总是等于 1。单应性矩阵 $\mathbf{H}$ 通过一组对应点的线性最小二乘算法进行计算 (Hartley 和 Zisserman, 2004)。式 (10.2) 可以转换为不同的形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0}^T & -w'\mathbf{x}^T & y'\mathbf{x}^T \\ w'\mathbf{x}^T & \mathbf{0}^T & -x'\mathbf{x}^T \\ -y'\mathbf{x}^T & x'\mathbf{x}^T & \mathbf{0}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^1 \\ h^2 \\ h^3 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (10.4)$$

这里, h^j 代表 $\mathbf{H}$ 矩阵中的第 j 行。矩阵 $\mathbf{H}$ 的计算所需的两个方程从两个相应的点获取。从 n 对对应点中, 建立一个 $n \times 9$ 的矩阵 $\mathbf{A}$, 满足式 (10.5):

$$\mathbf{A}\mathbf{h} = \mathbf{0} \quad (10.5)$$

如果四对点中的三对都不共线, 那么四对共面的对应点对于矩阵 $\mathbf{H}$ 的计算是必要和充分的。在实际图像数据中存在噪声, 因此需要更多组的对应点, 式 (10.5) 通过最小二乘法来计算。在最小二乘法中, 数据的归一化是重要的步骤 (Hartley 和 Zisserman, 2004)。这就需要改善最小二乘法系统方程的条件数并且减少真实解的发散。Hartley 和 Zisserman (2004) 提出了归一化并进行了应用。数据点的归一化矩阵表示为

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_s \mathbf{T}_t \quad (10.6)$$

$$\mathbf{T}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\bar{x} \\ 0 & -\bar{y} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10.7)$$

$$\mathbf{T}_s = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{d(x)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{d(x)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10.8)$$

矩阵的设置如下: ①点的平移, 使其重心点移到原点; ②点的按比例缩放, 使其离原点的平均距离 $d(x)$ 等于两点的平方根。同一幅图像的两组点具有不同的归一化矩阵。单应性矩阵计算后必须非规格化。当所有的图像点由单应性映射变换后, 结构平面得到了校正。应用双三次样条插值, 实验室建立的图像校正后的结果如图 10.4 所示。

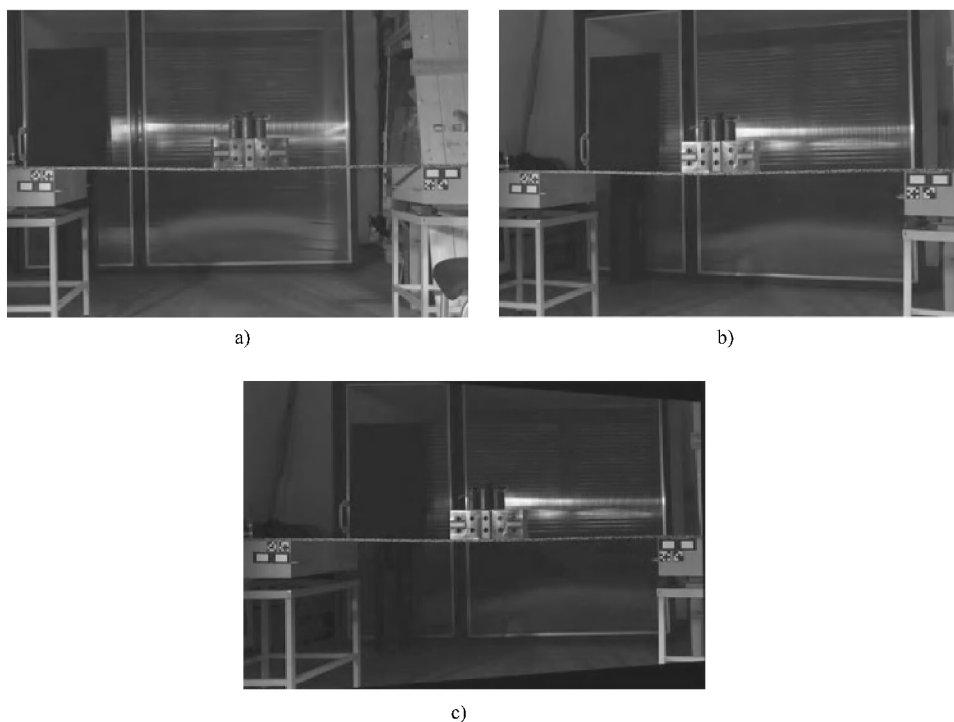


图 10.4 图像校正

- a) 参考图像 b) 投影畸变采集的挠度帧图像
c) 通过单应性矩阵计算的共面矩形标记位置来校正图像

10.5 自动特征检测和匹配

标记检测和匹配算法是为了提高单映射计算的自动化水平。两幅图像的矩形集通过二值化图像处理、轮廓检测和滤波进行识别。采用亚像素精度的 Harris 角点检测方法提取图像中单应性计算相对应的点、矩形的顶点 (Harris 和 Stephens, 1988)。标记的位置在极坐标参照系下表示并且相对于质心分类。二值化图像 I 的分辨率 $M \times N$ 由两种像素区域组成 (Gonzales 和 Woods, 2002): 前景 A 和背景 B , A 和 B 定义为

$$A = \{(x, y) : 0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N \wedge I(x, y) = 1\} \quad (10.9)$$

$$B = \{(x, y) : 0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N \wedge I(x, y) = 0\} \quad (10.10)$$

D_8 表示像素 $p_i = (x, y)$ 的 8 邻域。二值化图像上前景区域 A 的闭合轮廓 (或边界) 是一个像素集合, 定义如下:

$$\text{contour} = \{p_{i=1,2 \dots N} \in A : (\forall p_i \exists p_i \in (B \wedge D_8(p_i)) \wedge p_i = p_N)\} \quad (10.11)$$

该算法的第一步是将灰度图像转换为二值化图像。阈值通过交互式分析灰度直方图的峰值获得，并且能够适应光强变化。接下来的步骤中，检测包围所有前景对象的边界。该轮廓被转换为链多边形表示，只有逼近轮廓的线元素的终点存储在链多边形中。该边界通过形函数滤波，其对于凸形、用户定义的区域、宽高比和四边形相邻两边的角度范围的矩形轮廓响应最强。该方法如图 10.5 所示。

假设围绕相机的光轴周围和采集参考图像的相机坐标系没有发生旋转。首先计算一组标记顶点的质心，计算出的点作为极坐标系的原点，所有的点在该坐标系中进行表示。然后进行点排序，点的极坐标角度和离原点的径向距离是传递给排序算法的比较函数的一组输入距离输入给比较函数传递到排序算法中。在结构的两个图像上进行每组标记点的排序。

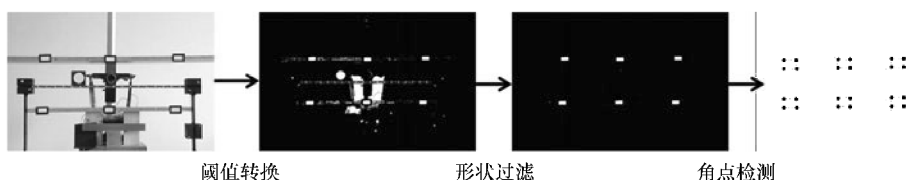


图 10.5 实验室设置图像的矩形检测算法

量程系数 $\alpha_{mm/p_{ix}}$ 由已知的几何尺寸的现场对象计算得到， $\alpha_{mm/p_{ix}}$ 的值可由平面的圆形或矩形标记或已标定的长度标准得到。系统采用两种不同方法进行量程校准：第一个利用二值化图像的校准模式，第二个引入 Hough 变换进行圆的检测和高精度的椭圆拟合技术。在第一个方法中，使用一个已知直径 (D_{mm}) 的圆形的强度图像。图像图形的直径 ($D_{p_{ix}}$) 利用二值化图像区域分析技术 (Gonzales 和 Woods, 2002) 计算。比例系数 $\alpha_{mm/p_{ix}}$ 包含大约 1mm 像素的数量信息，并且可以推导出：

$$\alpha_{mm/p_{ix}} = \frac{D_{mm}}{D_{p_{ix}}} \quad (10.12)$$

量程校准引入 Hough 变换进行圆的检测和高精度椭圆拟合技术，Hough 变换是一种对特定的几何对象的图像检测方法。在已经研究的方法中，Hough 变换用于圆形检测。用户指定半径的圆通过迭代过程检测。前面步骤中识别的圆的轮廓点利用最小二乘法拟合成椭圆，在椭圆拟合过程中得到新的圆心和半径值。

10.5.1 基于挠度变形的损伤检测和定位

近年来，发展了许多基于挠度形状变化分析的损伤检测方法。Jang 等 (2007) 提出一种应变损伤定位向量 (DLV) 的方法，即 DLV 和静态应变测量相结合的方法。Guo 和 Li (2011) 应用应变能和证据推理进行损伤检测。证据理论提出了识别结构损伤的位置。然后利用结构模态应变能量量化结构损伤程度。Chen 等 (2005) 研究出一种损伤识别方法，该方法使用有限的试验基于灰度系统理论的静态位移。在他们的工作中，定义了挠度曲线的灰度关联系数并用于定位结构的损伤。Patsias

和 Staszewski (2002) 提出基于光学测量的小波变换方法应用于损伤检测中, 计算损伤模式和近似函数的连续小波变换 (CWT) 系数, 并由此通过它们的差异获得可靠的损伤指数。另外, Li 等 (2011) 提出一个基于分形理论和小波包变换的新的损伤识别方法, 梁的损伤位置由出现在估计的分形维数 (FD) 轮廓大的波动决定, 损伤程度通过基于损伤指数的 FD 来估计。Rahmatalla 和 Eun (2010) 提出基于弯曲曲率分布和沿结构梁单元约束力的损伤检测方法。

基于视觉方法的挠度曲线过程可用于损伤检测和定位, 系统中应用的裂纹检测方法基于对挠度曲率变化的分析得出。为了检测曲率的不连续性, 应用了 CWT。一个给定信号 $y(x)$ 的 CWT 可表示为

$$W_y(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} y(x) \psi^* \left(\frac{x-u}{s} \right) dx \quad (10.13)$$

式中, 函数 $\psi(x)$ 被称为母小波。函数可以有实数或复数值, 并用于创建小波族 $\psi_{u,s}(x)$, 用于 CWT 的信号分解。隶属于小波族的任意函数表示为

$$\psi_{u,s}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{x-u}{s} \right) \quad (10.14)$$

式中, s 和 u 分别是小波的缩放和移位, 小波族由母小波上的拉伸和转移的副本组成。 $W_y(u, s)$ 为小波系数, 是通过移位 u 给出信号相邻空间点变量来衡量给定的 s 尺度内容的频率。式 (10.14) 中的比例因子用来归一化每个小波的能量。

小波变换属于非平稳信号的分析, 可用于获取空间与时间信号的信息。通过检测传感器信号的变化和不连续性, 小波变换可以应用于损伤检测和定位。由视觉系统测量的挠度曲线过程进行 CWT。二维 $W_y(u, s)$ 函数的最大值或最大的变化值携带了关于损伤位置的信息。此外, CWT 幅值点对应了裂纹位置, 与此点的刚度的减少成比例。

损伤检测中小波分析的最重要特性是消失矩。如果小波是 k 次正交多项式, 则有 n 阶消失矩 (Rucka 和 Wilde, 2006):

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^k \psi(x) dx, k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (10.15)$$

Mallat 证明了小波有 n 阶消失矩, 定义函数:

$$\psi(x) = (-1)^n \frac{d^n \theta(x)}{dx^n} \quad (10.16)$$

具有 n 阶消失矩的小波是函数 $\theta(x)$ 的 n 阶导数。因此, CWT 可以理解为一个多尺度微分算子:

$$W_y(u, s) = s^n \frac{d^n}{du^n} (y * \theta_s)(u) \quad (10.17)$$

$$\theta_s(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \theta \left(\frac{-x}{s} \right) \quad (10.18)$$

式 (10.17) 中的卷积可以解释为信号 y 的平均值。因此, 信号 y 的连续小波

变换的计算等效于平均信号的 n 阶导数计算。该方法比用位移信号的二阶导数的曲率直接数值计算更少受到噪声的影响。小波应用于裂纹检测的类型依赖于它的消失矩。选择的小波产生一个连续小波变换的信号，其中大多数系数尽可能为零，只有对应于损伤位置的系数有较大值。任何一个消失矩数大于或等于 2 的小波均能应用于损伤定位 (Rucka 和 Wilde, 2006)。文献报道了 Gauss、Haar、Gabor、Symlet 和 Coiflet 用于 SHM 系统中，系统中应用了高斯小波族。文献研究和数值实验证明，小波的应用方便了检测对应于裂纹位置的连续小波变换信号的极值。

10.6 软件工具开发

开发的软件 (见图 10.6) 使用数码单反相机实现结构挠度测量的远程图像采集，并且提供了图像处理和视觉算法来计算挠度曲线过程。有两种操作模式可供选择：在线和离线。在第一种情况下，用户指定日期和测量数量，然后系统将自动工作，进行图像采集和挠度测量。离线模式提供了其他设备或以前远程登记的图像的分析。现场查看可以实时改变相机参数。软件已经内置了特殊校准模式的相机标定和比例系数计算的工。浏览器模块实现了挠度曲线计算的可视化，数据以流行的格式自动存储，如 PDF、Excel 电子表格或 HTML。软件的另外一个功能是，当检测到超过挠度最大允许值时，通过邮件向客户发送警报。

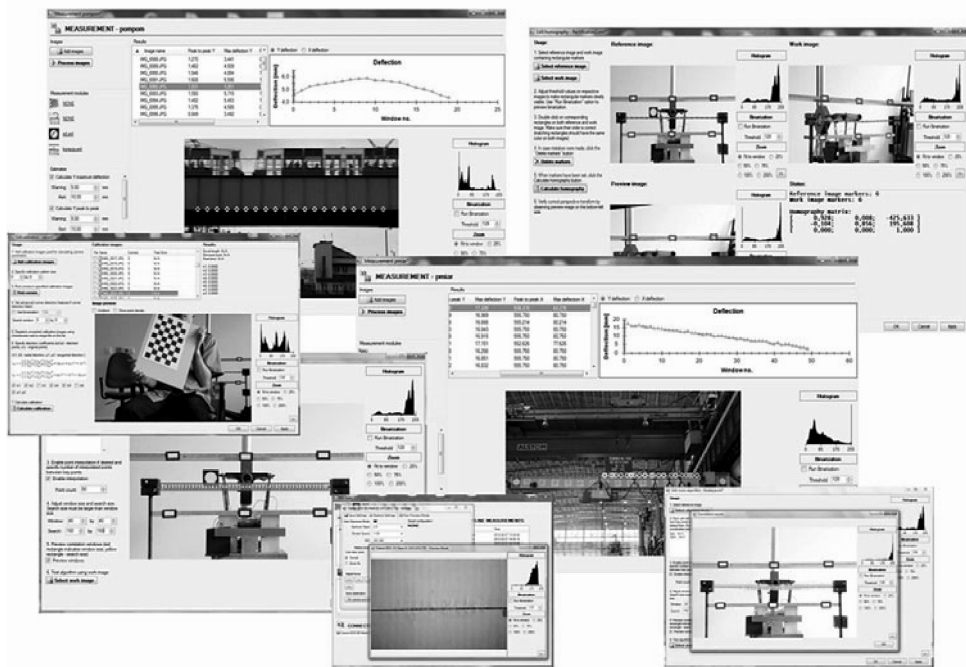


图 10.6 基于结构挠度测量开发的视觉系统软件

10.7 方法的数值研究

数值模拟方法的主要目标是在相机成像传感器和结构的平面平行并且图像经过校正的情况下,进行单应性矩阵元素和挠度曲线的不确定性分析,以及挠度测量的不确定性评估。由结构模型和相机系统组成的虚拟实验室设备已经开展了一系列的数值测试 (Kohut 等, 2012a)。

10.7.1 视觉测量系统的数值模型

该模型场景在 MATLAB 编程环境中实现,包括针孔相机和虚拟结构。相机采集的图像被建模为以相机的坐标系统原点为中心的中心投影。相机有一组已知的内部和外部参数 ($\mathbf{R}$, $\mathbf{T}$), 图像平面上的场景的均匀三维点投影由式 (10.19) 给出。传感器分辨率为 21.1 百万像素, 四个不同焦距 ($f = 12\text{mm}$ 、 35mm 、 50mm 、 80mm) 镜头的虚拟相机进行模拟, 每个焦距与相机和结构之间的参考距离有关, 总结见表 10.1。

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & s_\theta & u_0 \\ 0 & s_y & \nu_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10.19)$$

表 10.1 模拟的与结构的参考距离相关的焦距

焦距/mm	参考距离/mm
12	500
35	1200
50	1400
80	2500

结构模型由加载点集中作用力的简支梁和需校正的与梁平面共面的一组标记点组成。在 MATLAB 中由一维欧拉梁单元构建梁的有限元模型。模拟的钢梁长为 800mm , 截面积为 500mm^2 , 杨氏模量为 $2.01 \times 10^5 \text{MPa}$, 结构加载点力的幅值为 1000N , 6 个标记点集的位置相对于所述结构对称 (见图 10.7)。

10.7.2 方法的不确定性研究

对下列情况下所测量的梁的挠度变化进行分析: ①相机与结构的距离以及相对于结构平面的法向量和光轴的角度变化; ②相机焦距的变化; ③相机关于结构进行“轨道”运动, 例如相机总是在光轴指向结构的椭圆形路径运动 (见图 10.8)。

不确定性考虑了模拟中 6 个标记的所有角坐标。正态概率分布函数描述的随机

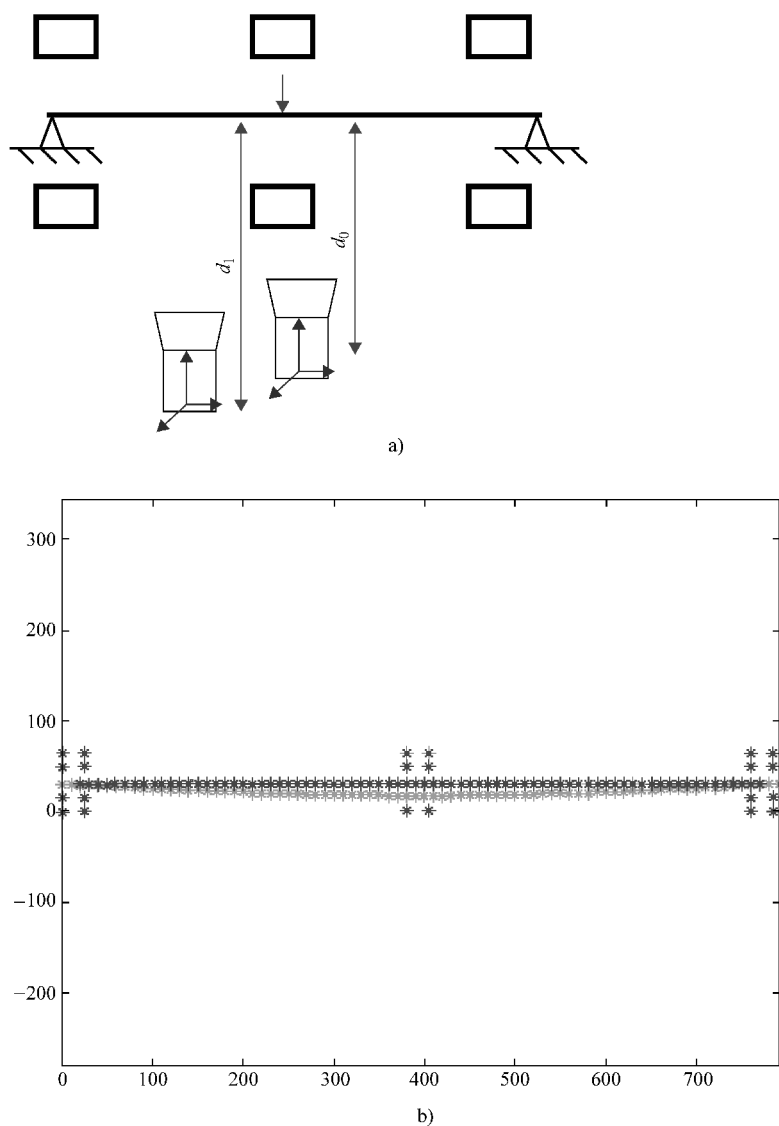


图 10.7 实验室建立的虚拟模型

- a) 模拟中相机设置的模型：结构上距离 d_0 （参考）和 d_1 处的两个针孔投影机
b) 虚拟结构平面

噪声添加到角点的垂直和水平坐标的名义值上。对于每个研究案例，假设 4 个标准差附加在角点标记位置，如 0.05、0.5、1、1.5，都以像素为单位。

在接下来的讨论中，模拟实验中将用到以下符号：每次测量系列将被指定为 $fXdY$ ，其中， X 是焦距（mm）， Y 是给定焦距的参考距离（mm）。例如， $f50d1800$ 指的是由焦距 50mm，参考距离 1800mm 虚拟相机采集的图像。

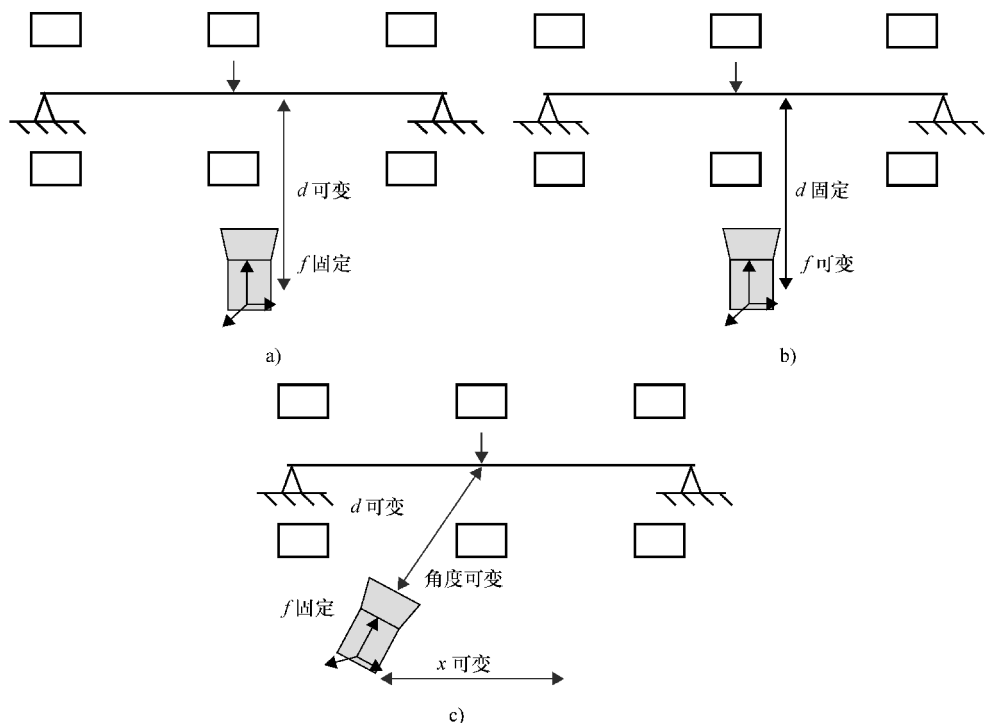


图 10.8 虚拟场景

- a) 第一个模拟——相机距离的变化 b) 第二个模拟——焦距的变化
c) 第三个模拟——相机绕结构的轨道运行

首先分析的是相机和结构的距离的变化（见图 10.8a）。图 10.9a 表示焦距为 50mm 时所研究的梁的静挠度（从端点开始）的最大标准差。忽略绘制曲线的小波动，发现输入和输出标准差的线性关系。图 10.9b 表示了沿着梁方向定位的所有测量点的挠度曲线示例，并且定义了静态变形标准差和 0.5 像素的输入标准差之间的关系。标准差最小值的曲线和相机距离的最小变化有关。然而，沿着梁的最坏和最好情况下测量的这些参数的比率随着焦距的增加而减小。

第二个分析处理的是从 12mm 到 80mm 间隔的不同焦距的不确定性传播评估。在模拟中，相机的位置和方向是固定的（见图 10.8b）。另外，假设标记角位置的标准差不同：从 0.05 像素到 1.0 像素。

图 10.10a 表示了焦距检测范围计算的所述梁的静挠度（从端点起）最大标准差。图 10.10b 表示了沿着梁定位所有测量点的一组曲线示例，定义了输入标准差为 0.5 像素的静态变形的标准差示例。曲线标准差的最小值与最大焦距有关。沿着梁的最坏和最好情况下测量的这些参数的比率随着焦距的增加而减小。

最后的数值实验（见图 10.8c）处理的是相机轨道围绕物体旋转情况下的不确定性传播。相机在圆形路径上运动，同时，相机光轴和垂直于结构平面的夹角是变

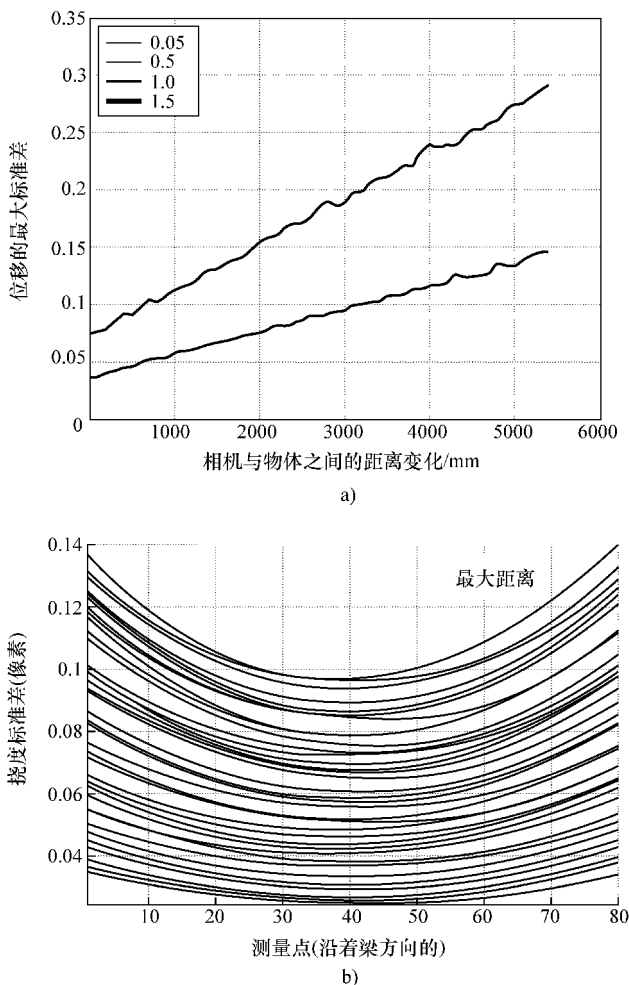


图 10.9 随距离变化的挠度测量的不确定度测试

a) 供参考的静挠度的最大标准差 b) 沿梁方向测量的静挠度的标准差

化的，因此，光轴总是指向梁的中心。实验中内部参数是固定的。假定角点标记计算位置的标准差范围从 0.05 像素到 1.0 像素。

图 10.11 给出所研究梁的所有参考示例中所有测量点的静挠度的最大标准差。

图 10.12 表示所有沿着梁的所有测量点定位的曲线组，定义了所有参考示例中输入标准差为 0.5 像素的静态变形的标准差。

图 10.13 显示了当所有引用案例的输入标准差增加及选择平行于位移的相机时，静态变形最大标准差的输出结果如何演化。选择的任何一个案例中，发现输入和输出标准差之间呈线性关系。

研究表明，在所有的输入噪声中，挠度的标准差小于拐角位置的标准差。对输

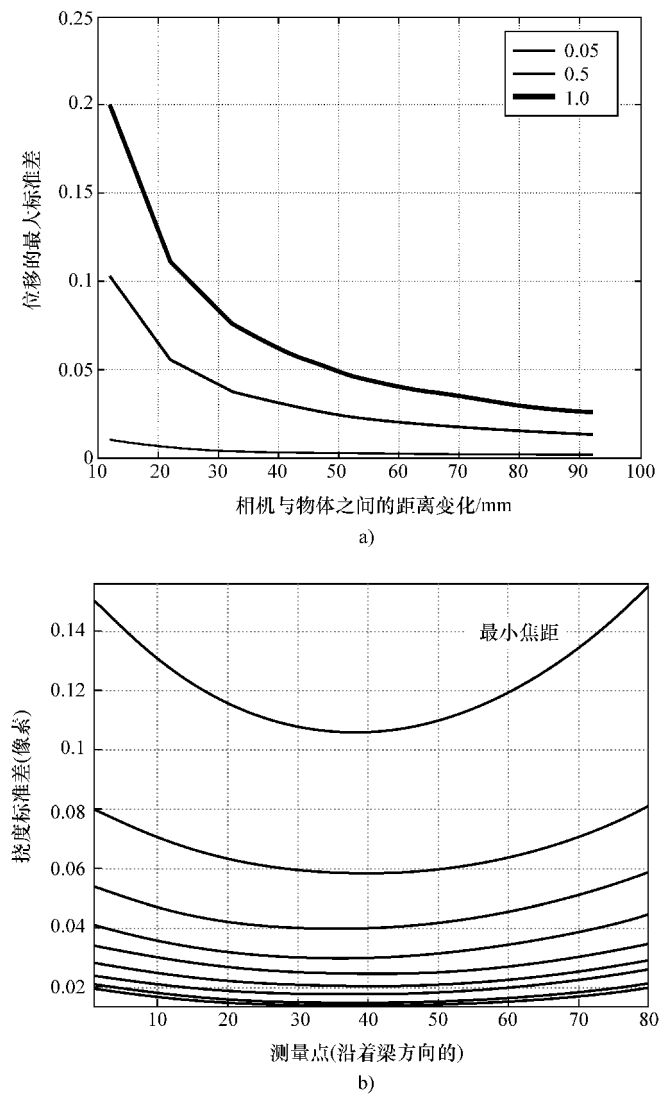


图 10.10 随焦距变化的挠度测量的不确定度测试

a) 供参考的静挠度的最大标准差 b) 沿梁方向测量的静挠度的标准差

入的噪声影响最大的是梁端点处。这是合理的，因为这些都是点的最小位移，并且它们的测量容易受到图像噪声的干扰。

在所选择的测量点中，焦距为 12mm 时发现了最大的挠度标准差。然而，其他情况下，施加在对应坐标点的噪声影响已经无关紧要了。对于所有考虑焦距的情况下，每个测量点挠度的标准差是相机平行位移的函数。例如，如果相机相对于中心位置移动 -100mm 的距离，梁左侧的点的标准差要比右侧的标准差大。但是，梁两侧端点所测量的挠度最大变化是常数，与相机位移无关。

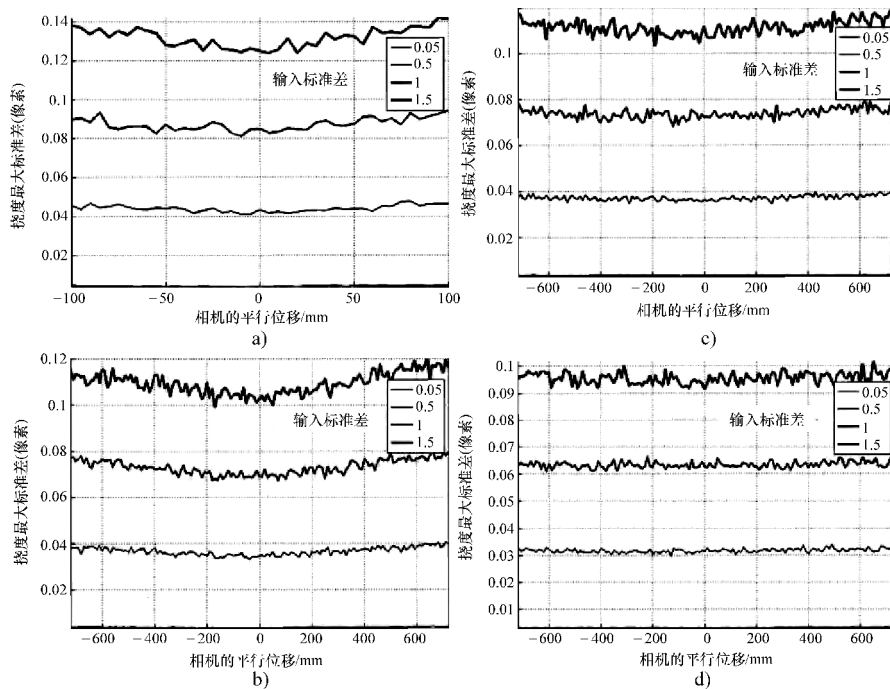


图 10.11 沿相机轨道运行的挠度测量不确定度。供参考的静挠度的最大标准差

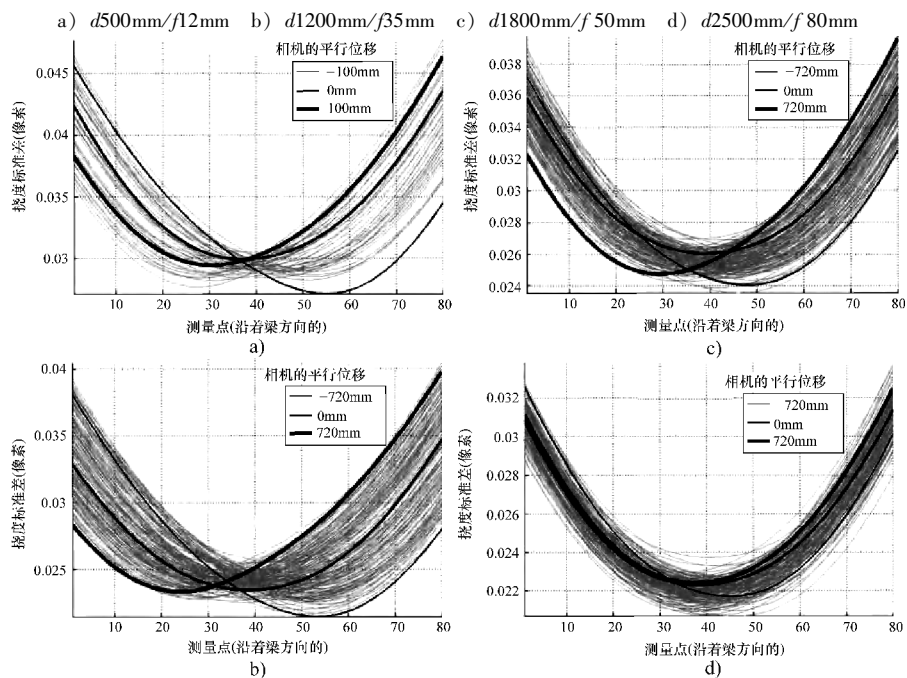


图 10.12 供参考的静挠度的最大标准差

a) $d500\text{mm}/f12\text{mm}$ b) $d1200\text{mm}/f35\text{mm}$ c) $d1800\text{mm}/f50\text{mm}$ d) $d2500\text{mm}/f80\text{mm}$

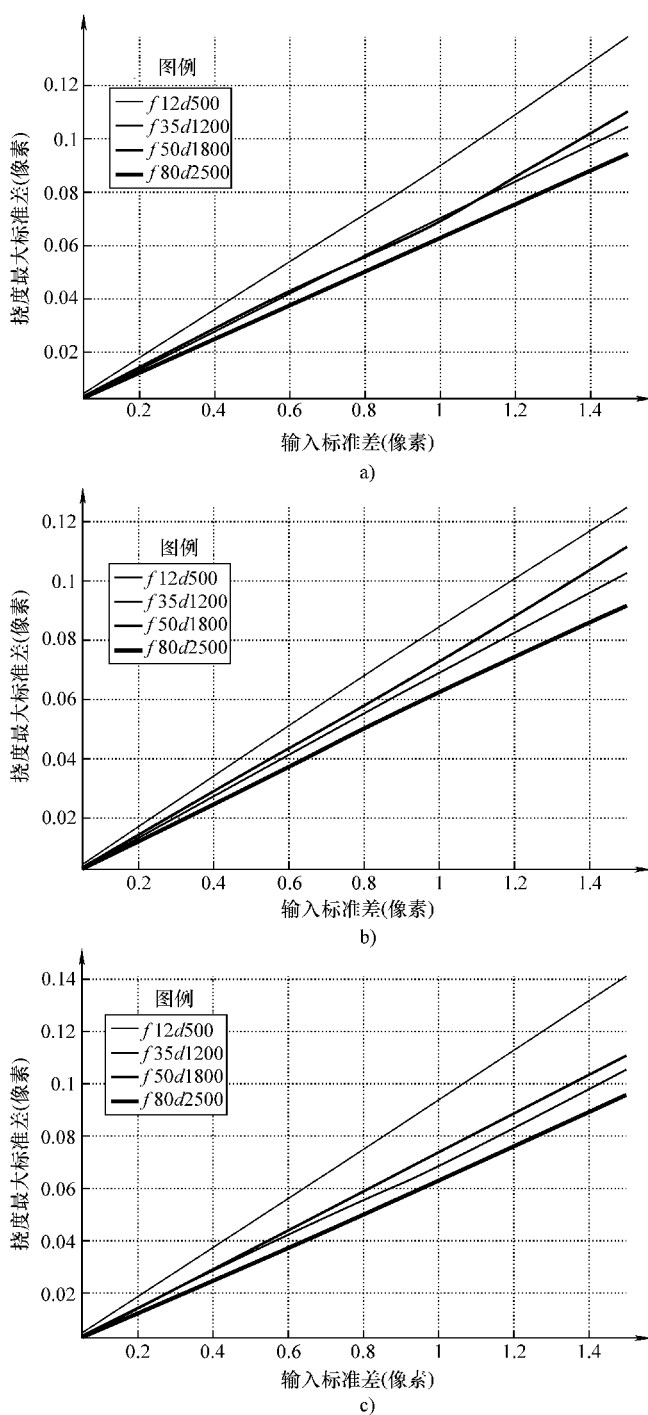


图 10.13 对于平行位移的静态变形的最大标准差的输出结果
a) 100mm b) 0mm c) 100mm

10.7.3 基于概率模型的损伤探测

在接下来的测试中，进行了基于概率模型的损伤检测。实验的主要目的是证明视觉测量方法的能力，它基于挠度曲线变化的分析来检测由裂纹形成的结构失效。实验包括结构的数学建模和上一小节描述的相机系统。将裂纹建模为 FE 的局部刚度下降（见图 10.14）。对两端支撑的梁进行了研究。

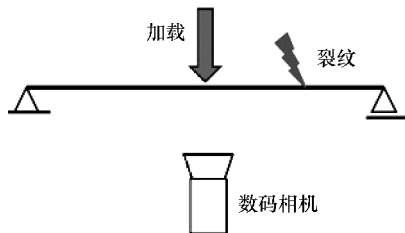


图 10.14 用于数值研究的梁的模型

裂纹位置通过多层分解 CWT 系数的分析检测。数值分析涉及噪声、裂纹位置和对算法性能影响的严重程度。POD 曲线在数值数据的基础上进行计算，进而进行 POD 的撞击 - 漏掉法分析。

在初步试验中，研究了系统对相应刚度下降的不同值检测裂纹的能力。损伤检测和定位从第一个梁的支撑点 680mm 距离的裂纹处进行。对应于刚度下降 5%、10%、15% 处进行裂纹严重程度的三个值测试。负载点作用于结构的中间。相关测量的噪声水平模拟误差的标准差等于 0.05 像素。在所有分析的情况下，损伤都能被准确的检测和定位。所获得的 CWT 曲线如图 10.15 所示。

在接下来的实验中对增加噪声的影响进行了研究。对刚度减少值为 15% 的一个值进行测试。裂纹位置和梁的负载均同于前一种情况。噪声标准差从 0.005 像素到 0.05 像素的增加不影响损伤检测算法。大于 0.5 像素的噪声值对方法的性能造成不利影响，测量中没遇到精心制造的光学的使用。图像由分辨率为 5616×3744 的 Canon EOS 5D Mark II 相机拍摄，其噪声标准差范围从 0.008 像素到 0.05 像素。图像噪声增加值的挠度信号的 CWT 结果如图 10.16 所示。

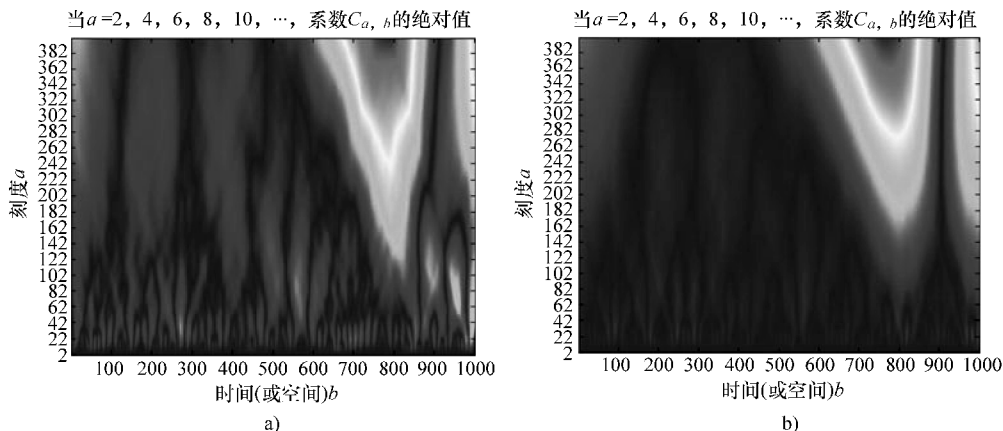


图 10.15 梁损伤增加的 CWT 曲线

a) 5% b) 10%

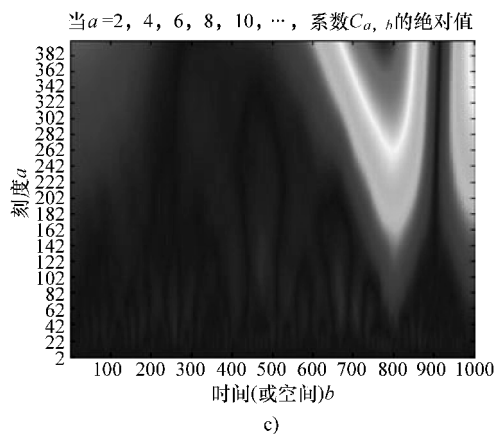


图 10.15 梁损伤增加的 CWT 曲线 (续)
c) 15%

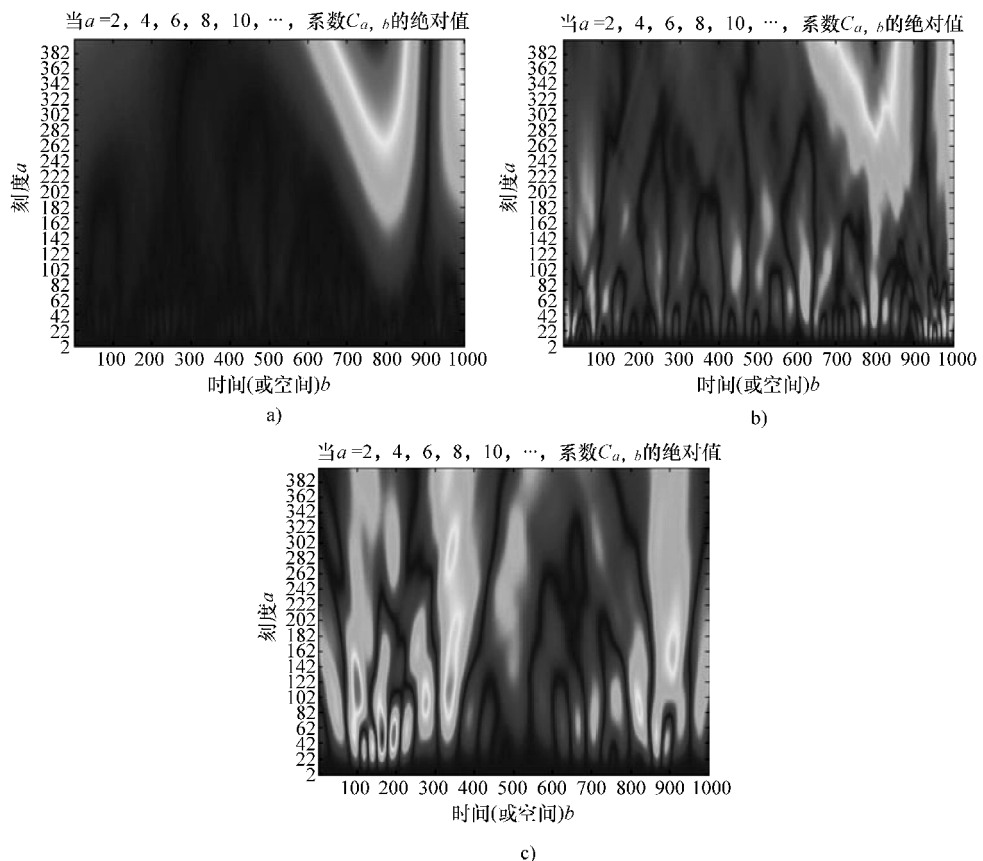


图 10.16 测量噪声的不同值的 CWT 曲线
a) 0.005 像素 b) 0.05 像素 c) 0.5 像素

POD 曲线在数值模拟的数据基础上计算，曲线绘制了图像噪声等于 0.005 像素和 0.05 像素的两个不同值的标准差（见图 10.17）。

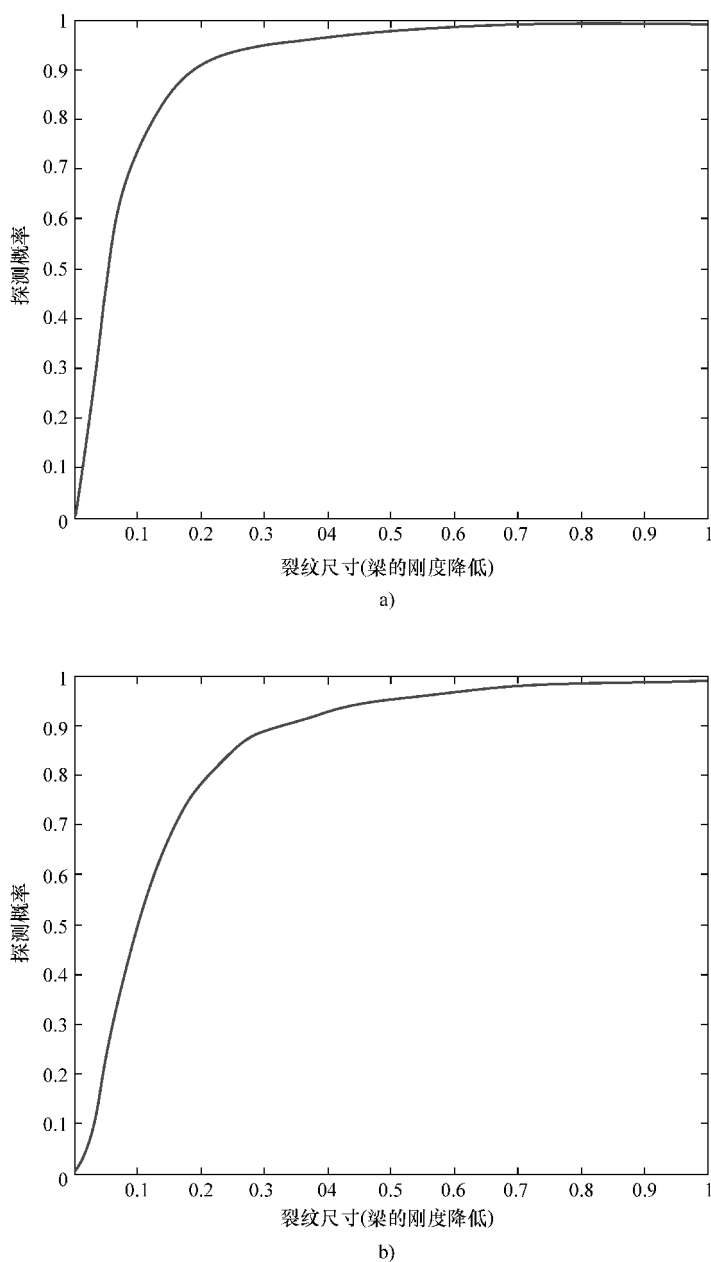


图 10.17 针对输入图像噪声值不同标准差的基于模型的 POD 曲线
a) 0.005 像素 b) 0.05 像素

10.8 方法的实验室研究

该方法的实验室研究是为了证明使用该系统样机的数值试验获得的结果。对参考相机的图像和应用校正后采集的图像进行了挠度测量的不确定度分析。POD 把梁试件扩展的裂纹模拟为切口的增加深度。此外,该方法的准确度通过使用视觉算法与来自激光跟踪仪获得的数据计算出的结果进行比较而计算。

实验室装置由一个长度为 1.8m、截面积为 $50\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的铝梁组成 (见图 10.18c)。梁的两端固定,负载集中作用于重心点。随机灰度图放置在结构的测量平面上。用于单应性矩阵计算的一组必要的矩形标记放置于共面的梁平面上。结构的图像由两个 Canon 5D Mark II 数码相机获取,该数码相机图像分辨率为 21.1 百万像素,镜头为变焦距 $f=50\text{mm}$ 的 Canon 24~70mm f/2.8L。第一个相机的光轴,参考相机的方向垂直于结构平面。第二个相机相对第一个相机进行平移和旋转,用来计算图像校正后的挠度场 (见图 10.18a 和 b)。

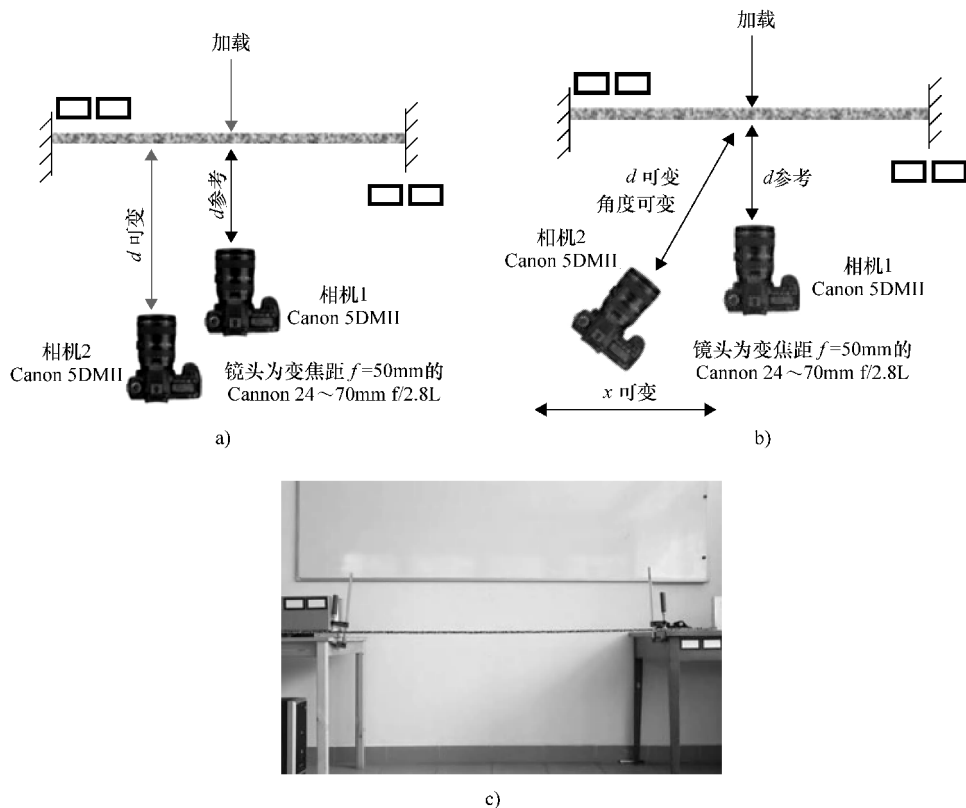


图 10.18 实验室设置

a) 第一个实验测试 b) 第二个实验测试 c) 所研究的梁

10.8.1 实验室设置方法的测试

在第一个实验中，相机沿着结构周围椭圆形的路径移动，同时它的光轴旋转以使它指向结构的中心。相机和物体的距离值，以及对应的光轴和垂直于物体平面之间的角度值见表 10.2。在第二个实验中，相机远离物体，但其光轴的方向不变（见表 10.2）。在这两种情况下，相机焦距都是固定的（ $f = 50\text{mm}$ ）。

表 10.2 两个实验情况下的距离及光轴和垂直结构平面方向的角度

实验室测试 1	实验室测试 2
距离 d 和对应角度 $\alpha/\text{mm}, (^{\circ})$	相机的距离 d/mm
2800, 0	2800
2750, 5	3000
2750, 10	3400
2700, 15	3700
2600, 20	4000
2500, 30	
2400, 35	
2200, 45	

实验室设置的实验方法证明了数值试验获得的结果。在相机绕着结构运动时，位移测量的特征是梁左侧点的标准差值更大。计算的不确定性不仅是噪声数据的单应性计算的结果，还来自于与镜头结构有关的现象，如景深或径向和切向畸变。关于相机和结构间距离的变化，如预期的那样，标准差随着距离增加。标准差的最大值小于 0.18 像素。实验已证实沿着梁长度方向测量的标准差的平均值、最大值和最小值为常数，与相机光轴和垂直于该结构平面方向的角度无关。这些参数随着相机和结构之间的距离而增加（见图 10.19、图 10.20 和图 10.21）。

10.8.2 实验室研究方法的探测概率

实验室装置由长为 800mm、截面积为 40mm × 5mm 的铝梁组成（见图 10.22）。梁两端被支撑起来，负载集中作用于重心点。梁的损伤通过切割垂直于其最大尺寸的梁来模拟。切口深度值从 2mm 增加到 20mm。用于图像采集的相机与之前的研究一样。由该方法计算的挠度过程通过 CWT，并用于损伤检测和定位（见图 10.23）。

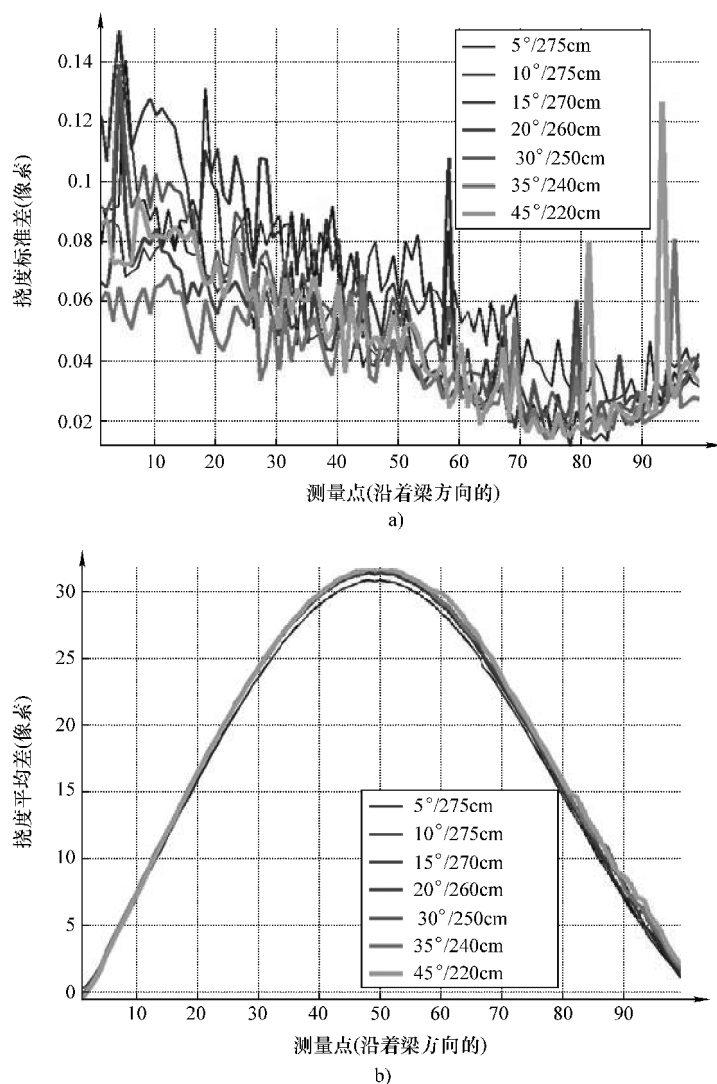


图 10.19

- a) 对于相机方位不同角度的沿着梁方向测量的静挠度标准差
- b) 对于相机方位不同角度的沿着梁方向测量的静挠度平均差

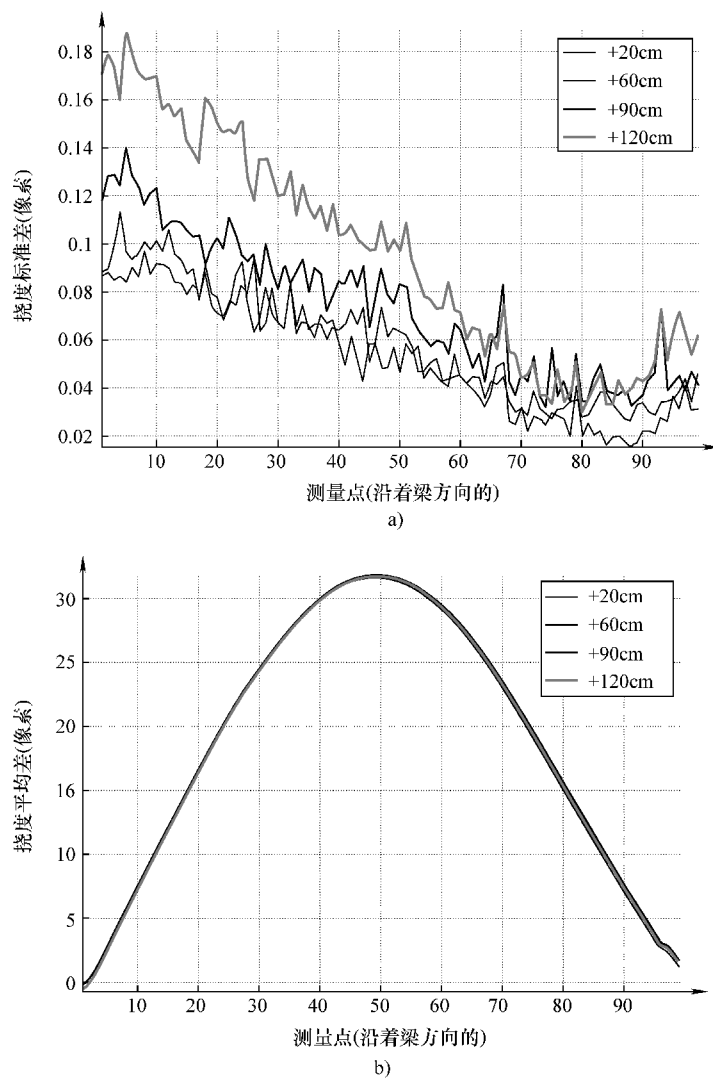


图 10.20

- a) 沿着梁方向的从相机到物体的不同距离测量的静挠度标准差
b) 沿着梁方向的从相机到物体的不同距离测量的静挠度平均差

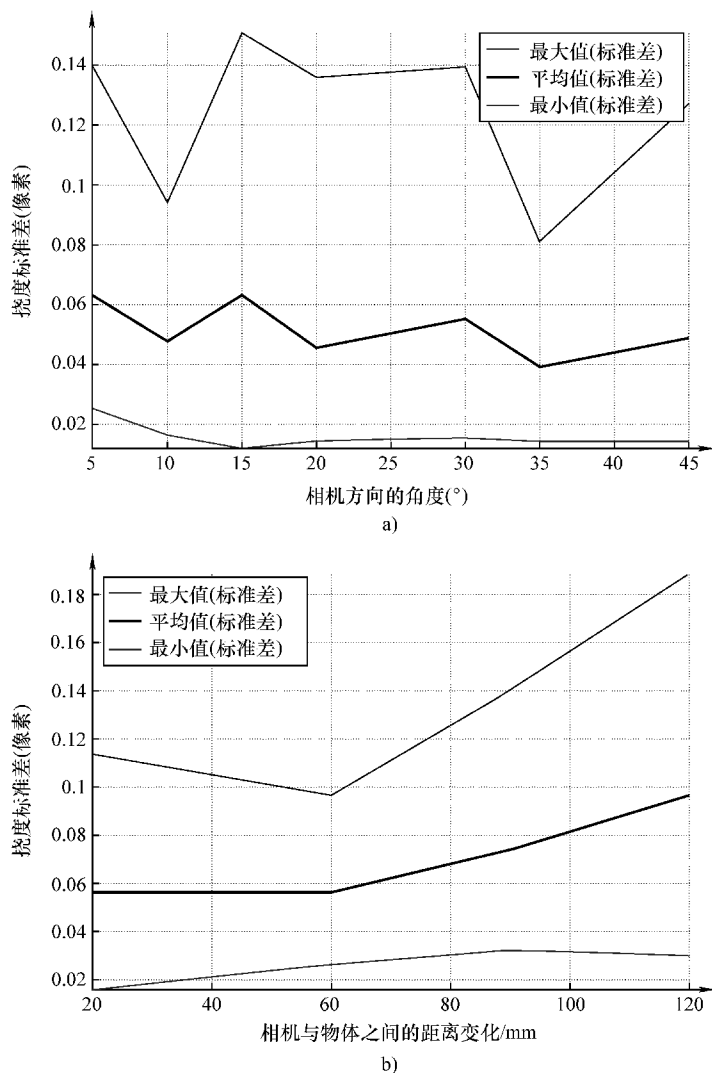


图 10.21 静挠度标准差的分布

a) 相对于结构的不同相机方向 b) 从相机到物体的不同距离

所开发的视觉系统能正确地检测和定位长度大于或等于 4mm 的损伤。损伤的定位假定当且仅当损伤计算位置和真实位置相差小于 5mm 是准确的。根据观察，对应于裂纹位置的小波系数随着裂纹长度单调递增。图 10.24 展示了裂纹长度增加值的 CWT 系数曲线。对于给定尺度层提出了 CWT 系数。随着裂纹长度增加可以观察到 CWT 的幅值增加。

基于实验室实验数据计算的 POD 曲线如图 10.25 所示。

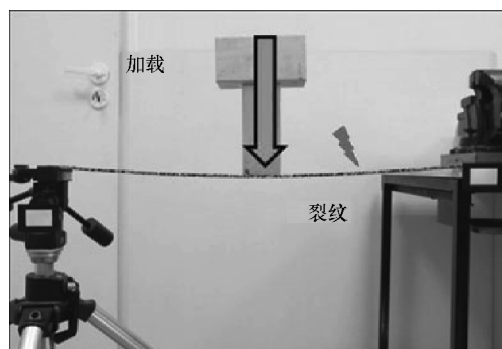


图 10.22 负载和模拟裂纹位置的实验室设置图

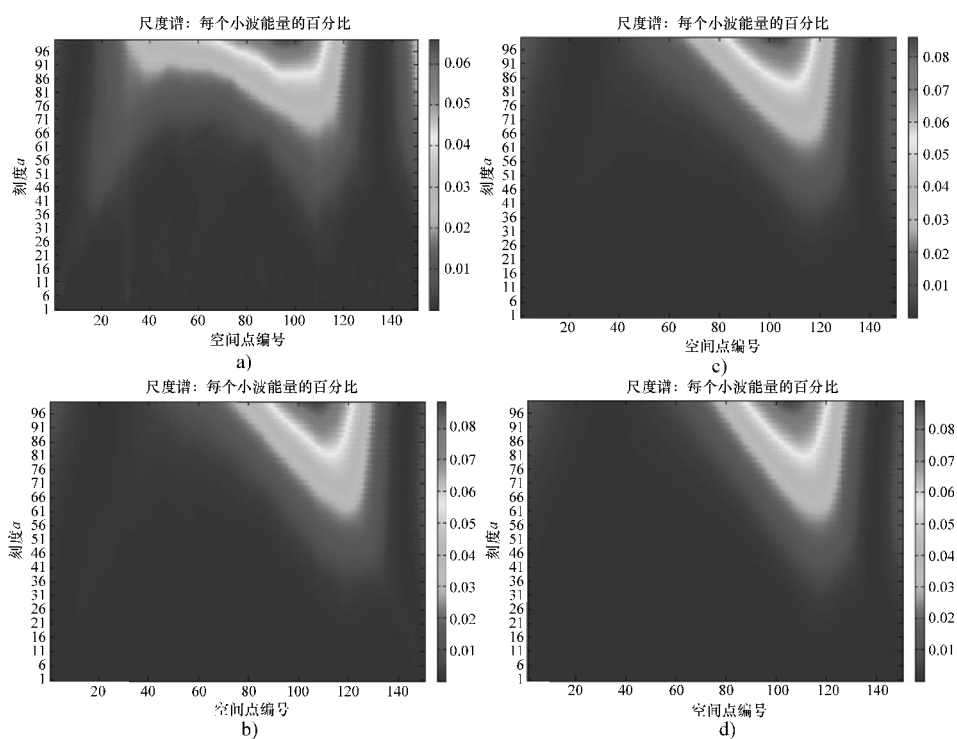


图 10.23 不同裂纹长度的损伤探测结果

a) 4mm b) 8mm c) 12mm d) 20mm

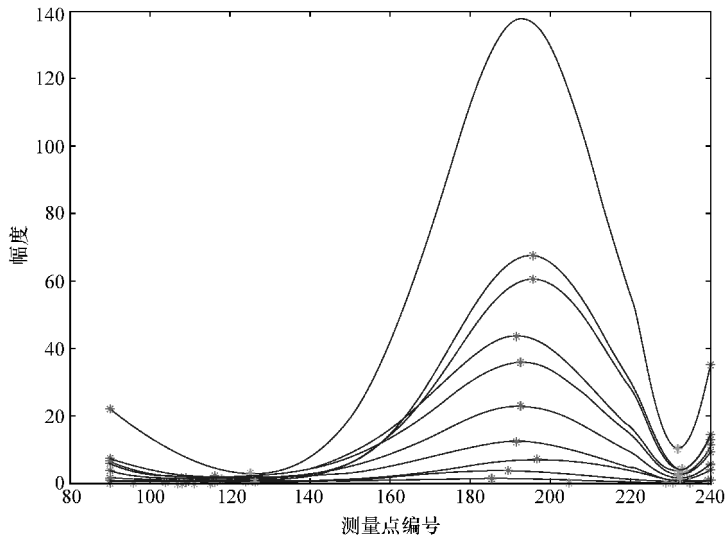


图 10.24 给定的分级尺度的 CWT 系数曲线。该曲线最大值对应于裂纹位置。
裂纹长度从 2mm 增加到 20mm

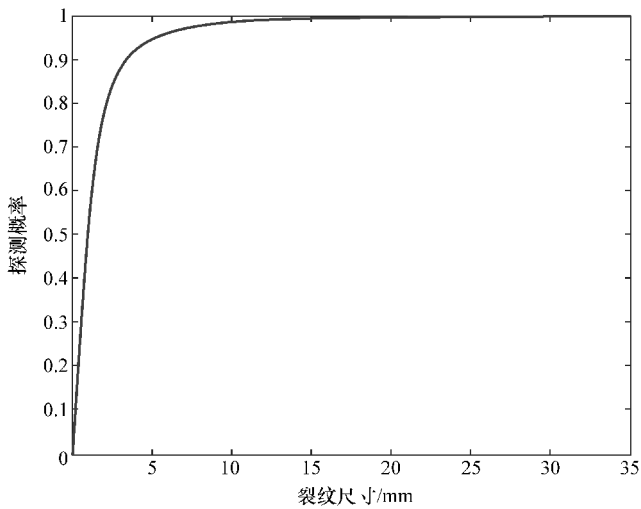


图 10.25 所开发测量系统的 POD 曲线

10.8.3 开发方法的精度研究

实验室实验由长度为 1.8m、截面积为 50mm × 10mm 的铝梁组成（见图 10.26）。梁两端固定。随机灰度图放置在梁的测量平面上。梁的负载作用于其长度的中间位置的重心点。用于单应性矩阵计算的一组必要的矩形标记放置于共面的梁平面上。结构的图像由两个 Canon 5D Mark II 数码相机获取，该数码相机图像分辨率为 21.1 百万像素，镜头为变焦距 $f=50\text{mm}$ 的 Cannon 24 ~ 70mm f/2.8L。相机的位置在空间上固定。其中一个相机光轴垂直于结构的平面。用该相机获取参考图像。第二个相机相对于第一个平移和旋转，用来计算图像校正后的挠度场。参考相机和梁之间的距离 d_0 是 2539.307mm，第二个相机和梁之间的距离 d_1 是 2527.408mm，第一个相机和第二个相机光轴的夹角是 16.67°。现场用 1kW 功率的照明系统照明。

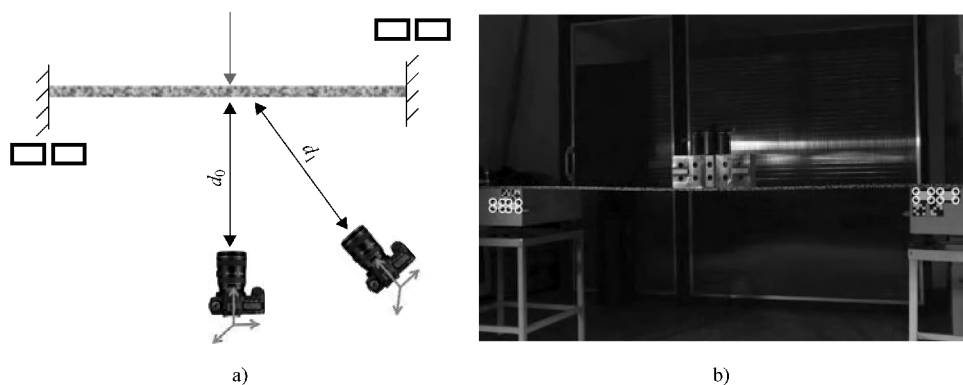


图 10.26 精度分析的实验室

a) 实验室安装示意图 b) 实验室安装拍摄的相机之一

为了证明所述光学系统进行的测量正确，与使用徕卡激光跟踪仪获得的结果进行了比较。应用了徕卡 LTD 860 模型。系统在 Kraków 大学坐标计量实验室使用，该实验室按照 ISO 17025 标准建立的公认的校准实验室。使用的激光跟踪仪是经过认证的设备，其精度持续监测。测量点的最大允许的误差为 0.025mm。测量使用了自动定心技术。每隔一定距离在梁前部平面钻一个直径 4mm 的锥形孔。首先测量梁在没有负载的情况（参考测量），然后测量加载后的情况。作为测量单点的结果，获得 x 、 y 、 z 坐标。通过变形前后对应点的坐标不同给出挠度值。

10.8.3.1 结论

表 10.3 显示了两个系统的梁挠度测量的比较。表明了光学系统通过安装在垂直于梁前平面的相机的测量结果。

表 10.3 两个系统进行的梁挠度测量结果比较

点编号	光学系统		徕卡激光跟踪仪	
	挠度/mm	不确定度/mm	挠度/mm	不确定度/mm
1	0.027	0.004	0.096	0.015
2	0.682	0.004	0.634	0.021
3	2.162	0.004	2.127	0.007
4	4.259	0.004	4.249	0.007
5	6.622	0.003	6.584	0.008
6	8.965	0.002	9.001	0.014
7	11.047	0.003	11.129	0.012
8	12.672	0.001	12.606	0.027
9	13.505	0.002	13.433	0.009
10	13.494	0.003	13.464	0.026
11	12.615	0.001	12.524	0.018
12	11.006	0.001	11.019	0.008
13	8.802	0.001	8.627	0.019
14	6.213	0.001	6.239	0.004
15	3.762	0.001	3.861	0.022
16	1.730	0.001	1.884	0.009
17	0.424	0.001	0.468	0.021
18	0.000	0.000	0.051	0.009

光学系统和徕卡激光跟踪仪的最大差值为 0.174mm，最小为 0.010mm，平均差为 0.063mm（见图 10.27）。

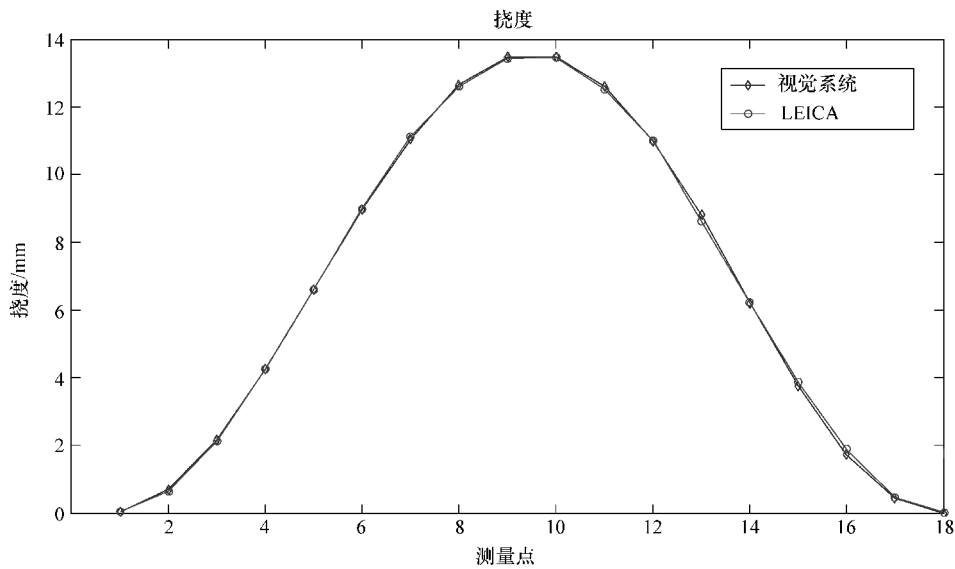


图 10.27 挠度测量结果（相机垂直于梁的前平面）

第二个相机（应用校正后）的结果相似（见图 10.28）。在这种配置的光学系统和徕卡激光跟踪仪之间最大差值为 0.149mm，最小为 0.002mm，平均差为 0.064mm。

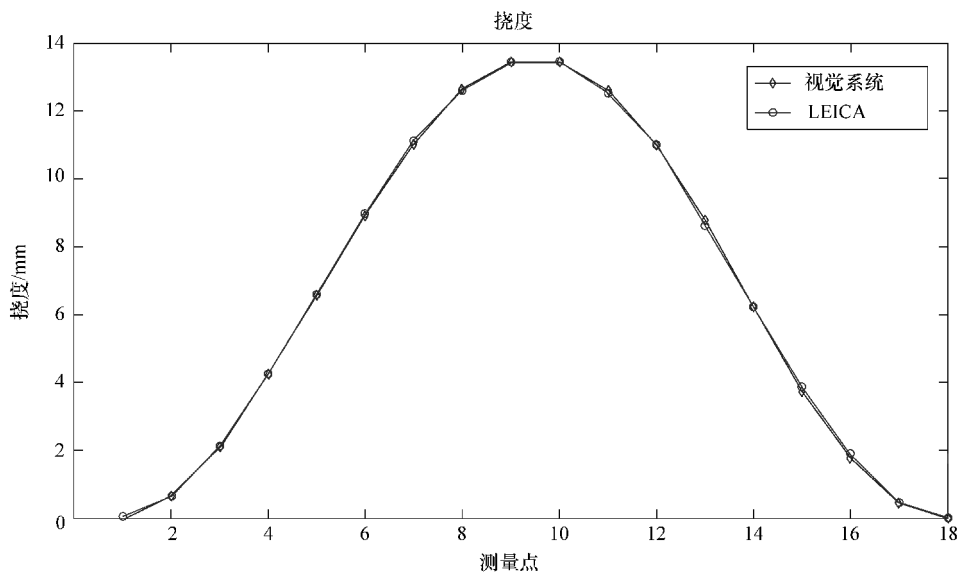


图 10.28 挠度测量的结果（校正后）

前面的段落展示了通过建立的光学系统获得的挠度值与徕卡激光跟踪仪计量设备给出的数据相比较的结果，证明了其精度，并且持续地监测中。在此基础上，可以假设所描述的光学系统的正确性。研究结果还表明相机光轴不垂直于被测物体的测量结果与垂直情况下几乎相等。这意味着可能从被测物体和相机的不同位置和角度进行测量。

10.9 方法的关键研究和评价

Kohut 等（2012b）已经提出了基于视觉的土木工程结构面内挠度测量和状态监测方法。为了评估所提到的方法，研究了电车高架桥的挠度，并与干涉雷达测得的数据结果进行比较。

10.9.1 电车高架桥挠度监测

测量涉及监测一段长为 28m 的高架桥段（见图 10.29）。用来确定尺度系数的随机形状的测量标记以及三个校正图案组成的白色圆圈和黑色十字架附着在被测物体的表面。使用两个 Canon EOS 5D Mark II 单反相机进行测量。相机放置在离物体 24.6m 的位置。第一个相机配备 Canon EF 24 ~ 70mmf/2.8L 的镜头，工作焦距为 70mm。相机视野为 13.5m。第二个相机配有长焦镜头（Canon EF 100 ~ 400mm

f/4.5 ~ 5.6L), 工作焦距为 400mm, 该相机用于监测 2.32m 长的结构较小片段。被测物体表面与光轴之间的夹角是 7°。此外, 使用干涉雷达 IBIS-S 进行连续挠度测量。现场试验的目的是为了在有轨电车的载荷下记录结构的挠度。图 10.29 显示了被测物体。图 10.30 说明了选定系统单元的测量安装图。

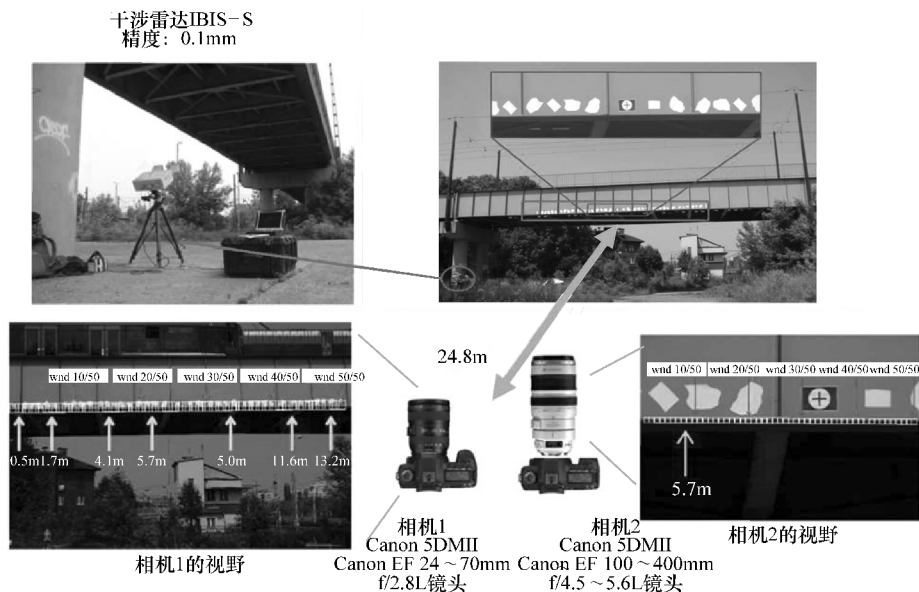


图 10.29 在运行于高架桥中的有轨电车载荷作用下, 监测一段高架桥偏移量的测量计划。图中还展示了雷达干涉仪、两种带不同类型镜头的 Canon EOS 5D Mark II 型数字相机以及相应的视场

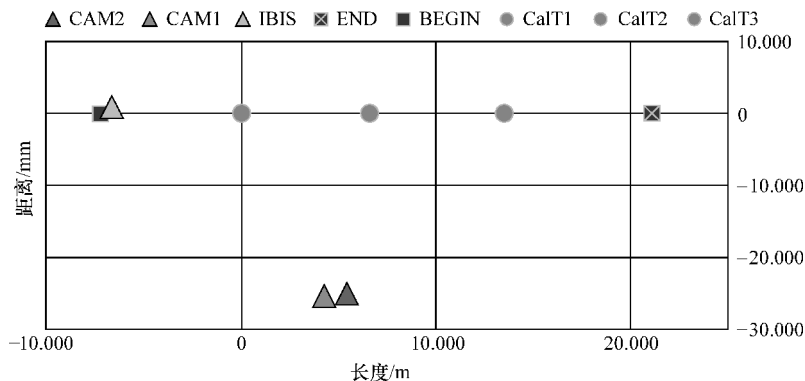


图 10.30 选定系统的单元的测量装置图 (IBIS—干涉雷达; CAM1、CAM2—视觉系统的两个相机; CalT1、CalT2、CalT3—校准标记)

相关函数值测定使用相关窗口 120 × 120 像素的 400mm 镜头相机拍摄的照片和相关窗口 80 × 80 像素的 70mm 镜头相机拍摄的照片。

分析了位于结构核心部分 7 个点的跨度的位移。作为两种类型的测量参考, 点

的位置相对于第一个校准目标进行编号和估计 (CalT1)。当电车经过时对两个系统进行测量。由于雷达记录数据的频率 (100Hz)，为了比较结果，研究了平均 0.25s 间隔点的位移信息。在基于视觉方法的情况下，中间挠度值在时间上进行插值。比较每点挠度的最大值。结果共收集了 8 路电车通过时的情况。用两种方法计算每次通过的最大挠度值，以及两种方法的差异。此外，计算了每组的最小和最大位移值。两种技术之间的最小差值为 0.08mm，而最大差值达到 0.99mm。选定电车经过的测量结果收集在表 10.4 和表 10.5 中。表 10.4 列出了两种方法用于所有测量点的位移测量之间的差值。表 10.5 表示两个系统获得的位移差值的平均值和标准差。

表 10.4 两个系统进行的梁挠度测量的结果比较。挠度差值 (mm)

时间/s	测量点/m						
	-0.464	1.664	4.064	5.664	8.964	11.564	13.164
1.750	-0.550	-0.550	-0.665	-0.490	-0.269	-0.122	0.072
2.000	-0.221	-0.041	-0.254	-0.123	-0.151	-0.275	-0.201
2.250	-0.093	0.104	-0.320	-0.057	0.124	-0.168	-0.339
2.500	0.383	0.194	-0.102	0.027	0.175	0.119	-0.261
2.750	0.364	-0.089	0.111	-0.047	0.204	0.141	-0.269
3.000	0.088	-0.127	-0.284	-0.173	0.144	0.026	-0.385

表 10.5 由 IBIS - S 干涉雷达和基于视觉方法测量的差值的平均值和标准差。
所有分析的车辆通道获得的结果。挠度差值 (mm)

时间/s	测量点/m						
	-0.464	1.664	4.064	5.664	8.964	11.564	13.164
平均值/mm	-0.393	-0.162	-0.082	0.157	0.615	0.99	0.894
标准差/mm	0.420	0.401	0.279	0.318	0.365	0.455	0.572

图 10.31 显示了一辆采样电车经过时最大挠度时刻的高架桥形状。给出了两种方法得到的结果，以及它们之间的差异。图 10.32a 和 b 呈现了时域中同辆电车经过跨度上两个选定点时的挠度。这些结果也是使用这两种技术得到的。

通过现场测试来确定提出的基于视觉技术的测量土木工程结构挠度的适用性。视觉系统测量的结果与干涉雷达登记点位移数据进行匹配。视觉技术和雷达之间的最小差值为 0.08mm，而最

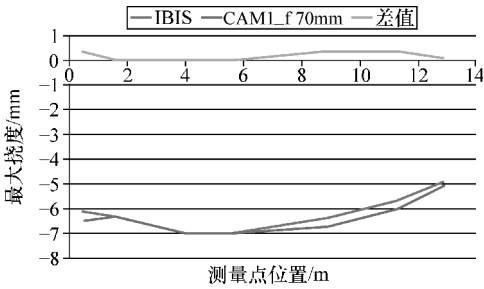


图 10.31 示例电车经过时最大挠度时刻的高架桥形状，两种方法获得结果以及差别

大差值为 0.99mm。该方法可以应用于像桥梁、天桥、烟囱、高架桥、梁、天花板、大厅、桅杆、风力发电机、建筑物、机器和设备的结构中。所提出的方法的主要优点是测量简单, 仅用一个采集装置就能获得密集的挠度场, 应用常用的数码相机可以从空间中不同的点进行简单的图像采集过程, 以及测量结果的快速和容易分析及解释。

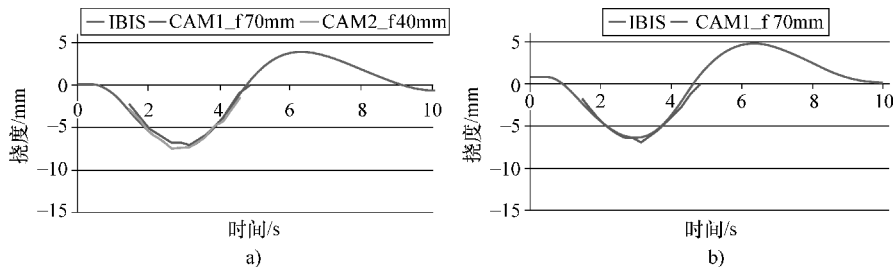


图 10.32 时域中呈现的同辆电车经过跨度上两个选定点的位移

a) 三种方法测量的跨度上离起点 5.7m 点的挠度 b) 离跨度起点 9.0m 点的挠度

10.10 结论

视觉系统能够通过分析结构的几何性质变化, 例如挠度曲线的形状, 进行结构的静态状态监测。图像配准技术的引入提高了该方法的灵活性、通用性和准确性。本章介绍的面内位移挠度测量能在检测中得到不同角度点的结构图像。开发的标记检测和匹配技术使得该方法在自动视觉状态诊断系统的应用成为可能, 该结构可以在其日常监测中应用。此外, 开发的方法可以用于用户友好的软件, 允许检测中快速地评估结构状态。系统采用易获得的相机作为结构的静态和准静态测量中的测量传感器。该方法可以用于噪声纹理或材料的天然纹理形式以及特殊标记可用情况下的结构。该系统能在没有应用主动光学方法的情况下提供高测量密度。

参考文献

- Behrens A, Bommers M, Stehle T, Leonhardt S and Aach T 2011 Real-time image composition of bladder mosaics in fluorescence endoscopy. *Computer Science Research and Development* **26**(102), 51–64.
- Benhimane S and Malis E 2007 Homography-based 2D visual tracking and servoing. *International Journal of Robotic Research* **26**(7), 661–676.
- Berfield T, Patel J, Shimmmin R, Braun P, Lambros J and Sottos N 2007 Micro- and nanoscale deformation measurement of surface and internal planes via digital image correlation. *Experimental Mechanics* **47**, 51–62.
- Borkowski S, Riff O and Crowley J 2003 Projecting rectified images in an augmented environment. *IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems*. Nice, France, pp. 1–8.
- Brown M and Lowe DG 2003 Recognising panoramas. *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE Computer Society, vol. 2, pp. 1218–1225.
- Budzik B, Grzelka M and Oleksy M 2010 Evaluation of silicone mould accuracy with use of optical measurements. *Measurement Automation & Monitoring* **1**, 18–19.
- Cawley P and Adams R 1979 The location of defects in structures from measurements of natural frequencies. *Journal*

- of *Strain Analysis* **14**, 49–57.
- Chen X, Zhu H and Chen C 2005 Structural damage identification using test static databased on grey system theory. *Journal of Zhejiang University Science* **6**(5), 790–796.
- Cheng T, Dai C and Ran R 2007 Viscoelastic properties of human tympanic membrane. *Annals of Biomedical Engineering* **35**, 305–314.
- Chu T, Ranson W and Sutton M 1985 Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics* **25**, 232–244.
- Eshel R and Moses Y 2008 Homography based multiple camera detection and tracking of people in a dense crowd *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2008*. Anchorage, USA, pp. 1–8.
- Fang Y, Dawson D, Dixon W and de Queiroz M 2002 Homography-based visual servoing of wheeled mobile robots. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*. Las Vegas, USA, vol. 3, pp. 2866–2871.
- Fujun Y and Xiaoyuan H 2006 Digital speckle projection for vibration measurement by applying digital image correlation method. *Key Engineering Material* **326–328**, 99–102.
- Gancarczyk J and Gancarczyk T 2010 Non-invasive museum object inspection by VIS photography, UV fluorescence and IR reflectography. *Measurement, Automation & Monitoring* **3**, 268–271.
- Gonzales R and Woods R 2002 *Digital Image Processing*. Prentice Hall.
- Guan H and Karbhari V 2008 Improved damage detection method based on element modal strain damage index using sparse measurement. *Journal of Sound and Vibration* **309**, 455–494.
- Guo HJ and Li Z 2011 Structural damage detection based on strain energy and evidence theory. *Journal of Applied Mechanics and Materials* **48–49**, 1122–1125.
- Harris C and Stephens M 1988 *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*. Manchester, UK, pp. 147–151.
- Hartley R and Zisserman R 2004 *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press.
- Helm J 2008 Digital image correlation for specimens with multiple growing cracks. *Experimental Mechanics* **48**, 753–762.
- Infantino I and Chella A 2001 Architectural scenes reconstruction from uncalibrated photos and map based model knowledge. *Proceedings of the 7th Congress of the Italian Association for Artificial Intelligence on Advances in Artificial Intelligence*. Springer pp. 356–361.
- Iwase S and Saito H 2002 Tracking soccer players based on homography among multiple views. *Visual Communications and Image Processing* **50–51**, 283–292.
- Jaishi B and Rex W 2006 Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual. *Journal of Sound and Vibration* **290**, 369–387.
- Jang S, Sim S and Spencer B 2007 Structural damage detection using static strain data. *Proceedings of the World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology*. Chongqing and Nanjing, China, pp. 286–291.
- Kohut P, Holak K and Martowicz A 2012a An uncertainty propagation in developed vision based measurement system aided by numerical and experimental tests. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* **50**, 1049–1061.
- Kohut P, Holak K and Uhl T 2008 Application of image correlation for SHM of steel structures *Structural Health Monitoring 2008: Proceedings of the Fourth European Workshop*. DEStech Publications, Inc., pp. 1257–1264.
- Kohut P, Holak K and Uhl T 2011 Prototype of the vision system for deflection measurements. *Diagnostyka* **4**, 3–11.
- Kohut P, Holak K, Uhl T, Krupinski K, Owerko T and Kuras P 2012b Structure's condition monitoring based on optical measurements. *Key Engineering Materials* **518**, 338–349.
- Kohut P and Kurowski P 2005 The integration of vision based measurement system and modal analysis for detection and localization of damage. *The International Journal of Ingenium* **4**, 391–398.
- Kohut P and Kurowski P 2006 The integration of vision system and modal analysis for SHM applications *Proceeding of IMAC-XXIV*, St Louis, USA, pp. 1–8.
- Kosetska Y, Ma Y, Sastry S and Soatto S 2004 *An Invitation to 3D Computer Vision*. Springer.
- Li H, Yong H, Ou J and Bao Y 2011 Fractal dimension-based damage detection method for beams with a uniform cross-section. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **26**(3), 190–206.
- Li W, Sutton M, Li X and Schreier H 2008 Full-field thermal deformation measurements in a scanning electron microscope by 2D digital image correlation. *Experimental Mechanics* **48**, 635–646.
- Liebowitz D and Zisserman A 1998 Metric rectification for perspective images of planes. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Santa Barbara, USA, pp. 482–488.
- Lieven N and Ewins D 1988 Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC). *Proceedings of the Sixth International Modal Analysis Conference*. Kissimmee, USA, pp. 690–695.
- Loop C and Zhengyou Z 1999 Computing rectifying homographies for stereo vision. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Fort Collins, USA, vol. 1.

- Mei X, Mahesh R and Shaohua K 2005 Video background retrieval using mosaic images. *IEEE International Conference on Acoustics*. Philadelphia, USA, vol. 2, pp. 441–444.
- Pandy A, Biswas M and Samman M 1991 Damage detection from changes in curvature mode shapes. *Journal of Sound and Vibration* **145**, 321–332.
- Park S and Trivedi M 2007 Homography-based analysis of people and vehicle activities in crowded scenes. *Proceedings of the Eighth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, IEEE Computer Society, p. 51.
- Patsias S and Staszewski WJ 2002 Damage detection using optical measurements and wavelets. *Structural Health Monitoring* **1**(1), 5–22.
- Perera R and Ruiz A 2008 A multi-stage FE updating procedure for damage identification in large scale structures based on multi-objective evolutionary optimization. *Mechanical Systems and Signal Processing* **22**, 970–991.
- Rahmatalla S and Eun H 2010 A damage detection approach based on the distribution of constraint forces predicted from measured flexural strain. *Smart Materials and Structures* **19**(10), 105–116.
- Rethore J, Gravoil A, Morestin F and Combescure A 2005 Estimation of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation and an interaction integral. *International Journal of Fracture* **132**, 65–79.
- Robert L, Nazaret F, Cutard T and Ortu J 2007 Use of 3-D digital image correlation to characterize the mechanical behavior of a fiber reinforced refractory castable. *Experimental Mechanics* **47**, 761–773.
- Rossi M, Broggiato G and Papalini S 2008 Application of digital image correlation to the study of planar anisotropy of sheet metals at large strains. *Meccanica* **43**, 185–199.
- Roux S and Hild F 2006 Stress intensity factor measurements from digital image correlation post-processing and integrated approaches. *International Journal of Fracture* **140**, 141–157.
- Rucka M and Wilde K 2006 Crack identification using wavelets on experimental static deflection profiles. *Engineering Structures* **28**, 279–288.
- Salehi M, Ziaei-Rad S, Ghayour M and Vaziri-Zanjani M 2010 A structural damage detection technique based on measured frequency response functions. *Contemporary Engineering Sciences* **3**(5–8), 215–226.
- Schmidt T, Tyson J and Galanulis K 2003 Full-field dynamic displacement and strain measurement using advanced 3D image correlation photogrammetry. *Experimental Techniques* **27**, 41–44.
- Schmidt T, Tyson J, Shahinpoor M and Galanulis K 2002 Biomechanics deformation and strain measurements with 3D image correlation. *Experimental Techniques* **26**, 39–42.
- Scoleri T, Chojnacki W and Brooks M 2005 A multiobjective parameter estimator for image mosaicing. *Proceedings of IEEE International Symposium of Signal Processing and its Applications*, pp. 551–554.
- Shankar N, Ravi N and Zhong Z 2009 A real-time print-defect detection system for web offset printing. *Measurement* **42**(5), 645–652.
- Sierra G, Wattrisse B and Bordreui I C 2008 Structural analysis of steel to aluminium welded overlap joint by digital image correlation. *Experimental Mechanics* **48**, 213–223.
- Spagnolo G, Paoletti I D, Paoletti A and Ambrosini D 1997 Roughness measurement by electronic speckle correlation and mechanical profilometry. *Measurement* **20**(4), 243–249.
- Teo L and Xue M 2007 A novel method to study strain-induced delamination in plastic IC packages using a digital image correlation tool. *9th Electronics Packaging Technology Conference*. Singapore, pp. 576–581.
- Tiwari V and Sutton, M. and McNeill S 2007 Assessment of high speed imaging systems for 2D and 3D deformation measurements: Methodology development and validation. *Experimental Mechanics* **47**, 561–579.
- Tyson J 2000 Non-contact full-field strain measurement with 3D ESPI. *Sensors* **17**, 62–70.
- Uhl T, Kohut P and Holak K 2009 Image correlation and homography mapping in optical deflection measurement. *Structural Health Monitoring 2008: Proceedings of the Fourth European Workshop*. Shaker Publishing pp. 191–200.
- Uhl T, Kohut P, Holak K and Krupinski K 2011 Vision based condition assessment of structures. *Journal of Physics Conference Series* **305**, 1–10.
- West M 1984 Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen. *Proceedings of the Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*. Palm Springs, USA, pp. 1–6.
- Wicczorkowski M, Koteras R and Znaniecki P 2010 Use of optical scanner for car body quality control. *Measurement Automation & Monitoring* **1**, 40–41.
- Zhang G, Hu Y and Jian-Min Z 2009 New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests. *Measurement* **42**(1), 87–96.
- Zhang Z and He LW 2007 Whiteboard scanning and image enhancement. *Digital Signal Processing*. **17**(2), 414–432.
- Zhu Y, Dai R, Xiao B and Wang C 2008 Perspective rectification of camera-based document images using local linear structure. *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing*. New York, USA, pp. 451–452.
- Zitova B and Flusser J 2003 Image registration methods: A survey. *Image and Vision Computing* **21**, 977–1000.

Copyright©2013 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Advanced Structural Damage Detection: From Theory To Engineering Applications >, ISBN: 978 - 1 - 118 - 42298 - 4, by Tadeusz Stepinski, Tadeusz Uhl, Wieslaw Staszewski, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01 - 2013 - 7266 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进的结构损伤检测理论与应用/ (波) 斯蒂芬斯基 (Stepinski, T.) 等主编; 丁克勤等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Advanced structural damage detection: from theory to engineering applications

ISBN 978-7-111-48258-1

I. ①先… II. ①斯…②丁… III. ①无损检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 237096 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张俊红 责任编辑: 闫洪庆

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18 印张 · 359 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-48258-1

定价: 99.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

本书特色

本书由本领域的技术专家编写,为学生、工程师和其他技术人员提供了各种监测技术的最新进展,以及其在结构健康监测(SHM)中应用的全面回顾。本书提供了各种结构健康监测(SHM)技术的理论原理和可行性研究结果,对本领域的深入研究与发展具有重要的价值。

- 采用一种跨学科的方法,对主要结构健康监测(SHM)技术进行了全面回顾。

- 给出了不同类型结构损伤探测的实例研究结果和监测技术的实际应用。

- 给出了一系列新颖的数据处理算法。

- 验证了真实的操作原型。

为中华崛起传播智慧

地址:北京市百万庄大街22号

邮政编码:100037

电话服务

社服务中心:010-88361066

销售一部:010-68326294

销售二部:010-88379649

读者购书热线:010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎张俊红

国际电气工程先进技术译丛

- 《先进的结构损伤检测理论与应用》
- 《电机建模、状态监测与故障诊断》
- 《应用于电力电子技术的变压器和电感——理论、设计与应用》
- 《风能气象学》
- 《电机传动系统控制》
- 《风力发电机组技术与应用》
- 《电动汽车技术、政策与市场》
- 《风力发电工程指南》
- 《磁悬浮轴承——理论、设计及旋转机械应用》
- 《碳捕获与封存》
- 《可再生能源系统：100%可再生能源解决方案的选择与模型》
- 《机电系统中的传感器与驱动器——设计与应用》
- 《风能原理、风资源分析及风电场经济性》
- 《移动设备的电源管理》
- 《电气测量原理与应用》
- 《基于MATLAB的线性控制系统分析与设计（原书第5版）》（含1CD）
- 《大功率变频器及交流传动》

WILEY

Copies of this book sold without
a Wiley Sticker on the cover are
unauthorized and illegal

上架指导 工业技术 / 机械 / 机电检测

ISBN 978-7-111-48258-1



定价：99.00元