



旋转机械故障诊断 若干关键技术 研究及应用

刘晓波 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

旋转机械故障诊断 若干关键技术研究及应用

刘晓波 著



机械工业出版社

本书对水轮发电机组和风机典型故障的机理进行了分析和总结。应用小波分析方法提取了旋转机械三类常见故障以及叶片裂纹故障的特征,并通过实例分析说明运用小波分析方法可以较好地诊断旋转机械故障,且把小波和聚类分析相结合对旋转机械典型故障进行了诊断,进而实现了在故障类层次上的模糊模式识别的自动诊断方法。采用 Visual C++ 语言和 Access 数据库工具开发了功能完善、运行速度快、操作简单、界面友好的水轮发电机组故障诊断系统(HGSFDS)和风机在线状态监测与故障诊断系统(FDMS),并给出了系统运行实例。本书的研究成果对旋转机械故障诊断理论与应用的发展具有积极的促进作用。

本书可作为机械、冶金、矿业、化工、能源等领域从事机械设备监测和故障诊断、设备维修和管理的工程技术人员以及高校教师、研究生进行科研、教学和学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

旋转机械故障诊断若干关键技术研究及应用/刘晓波著. —北京:机械工业出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-111-39132-6

I. ①旋… II. ①刘… III. ①旋转机构—故障诊断 IV. ①TH210. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 150861 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:沈红 责任编辑:沈红 高依楠

版式设计:霍永明 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)

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.25 印张·222 千字

0 001—2 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-39132-6

定价:29.00 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

策划编辑(010) 88379778

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着现代化生产的发展，对大功率旋转机械的需求量越来越大，因而对设备的可靠性要求也越来越高。旋转机械是机械设备的的重要组成部分，如鼓风机、空气压缩机、航空发动机、汽轮发电机、水轮发电机等，被广泛地应用于机械、冶金、矿业、化工、航空、能源等行业。它的安全运行直接关系到企业的正常生产，一旦在运行中出现了故障，就可能导致整个生产无法正常进行，甚至关键设备的损坏。既可能危及人身安全，也会造成重大的社会、经济损失。

旋转机械设备故障诊断是依靠设备在运行过程中，伴随故障必然产生的振动、噪声、温度、压力等物理量的变化来判断和识别设备的工作状态和故障，对故障的危害进行早期预报、识别，降低事故的发生率、做到预知维修、降低维修费用、减少维修时间，增加运行时间、保证可靠地高效地发挥设备应有的功能。应用故障诊断技术对机械设备进行监测和诊断，可及时发现设备的故障和预防设备恶性事故的发生，从而避免人员的伤亡和重大的经济损失。

本书以水轮发电机组和风机为对象研究旋转机械状态监测和故障诊断若干关键技术，对水轮发电机组和风机典型故障的机理进行分析，总结了旋转机械振动故障的特征和识别。从工程应用角度出发，研究了小波变换的意义，通过将小波分析方法与传统信号分析进行深入比较，体现小波分析不同于传统信号分析方法的良好时频分析性能，应用小波分析方法提取了旋转机械三类常见故障以及叶片裂纹故障的特征，并通过实例分析说明运用小波分析方法可以较好地诊断旋转机械故障。把小波和聚类分析相结合对旋转机械典型故障进行诊断，对提高故障诊断准确率做了有益的尝试；把粗糙集约简和神经网络相结合对旋转机械故障知识进行识别，消除了冗余成分，提高了诊断速度。以机组振动信号的频率成分结构、频率幅值和测点表现特征，利用典型故障频谱在频率结构方面的信息和测点表现，建立了具有通用性一般结论的水轮发电机组振动故障原因征兆模糊关系。并在此基础上，运用核函数对矩阵变换结果进行聚类分析，实现了在故障类层次上的模糊模式识别的自动诊断方法。为了充分体现表征机组运行状态和稳定性的多种信息进行故障诊断，对基于知识的诊断系统进行了系统研究。针对故障诊断经验知识模糊性的特点，采用了加权模糊逻辑推理进行多种信息的融合。为了建立知识库管理机制，结合故障征兆表示方法，研究了基于数据库的知识库建立和维护机制，为诊断知识的交流，修改及运用提供了一条新思路。研究了基于 ADO 数据库访问技术的诊断推理控制策略，简化了诊断系统的推理，提高了诊断效率，也为建立具有大容量知识的专家系统提供了一种有效的方法。采用 Visual C++ 语言和 Access 数据库工具开发了功能完善、运行速度快、操作简单、界面友好的水轮发电机组故障诊断系统（HGSFDS）和风机在线状态监测与故障诊断系统（FDMS）。FDMS 系统采用基于 C/S 模式的状态监测与故障诊断系统和基于 B/S 模式的 Web 子系统。还介绍了系统的结构和各个模块的功能

IV

及特点，并给出了系统运行实例，结果表明：系统能够满足故障诊断的有效性和实用性要求。本书的内容为作者十余年来的研究成果，研究所取得的成果对旋转机械故障诊断理论与应用的发展具有积极的促进作用。

感谢清华大学褚福磊教授、华中科技大学黄其柏教授对本文内容的修改意见。感谢我 10 余年来指导的研究生，正是他们做了大量的工作，才使本书成稿。感谢南昌航空大学学术文库专项基金资助。

由于时间仓促，且作者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，在此诚恳地欢迎广大读者提出批评和指正。

刘晓波

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 旋转机械在线监测与故障诊断的研究意义	1
1.2 故障诊断技术的发展概况	2
1.3 故障诊断的方法与技术	4
第 2 章 旋转机械振动故障机理研究	7
2.1 旋转机械振动故障的特点	7
2.2 旋转机械振动故障的特征和识别	9
第 3 章 信号分析方法及旋转机械故障分析实验设计	31
3.1 信号分析方法	31
3.2 旋转机械故障分析实验设计	38
第 4 章 基于小波分析技术的旋转机械故障分析	43
4.1 几类常见故障的特征提取	43
4.2 叶片裂纹故障特征提取	50
第 5 章 基于小波和聚类分析相结合的旋转机械故障诊断	56
5.1 聚类分析	56
5.2 基于小波和聚类分析相结合的转子故障诊断	60
第 6 章 基于粗糙集和神经网络的旋转机械故障知识识别	65
6.1 知识系统的构建	65
6.2 粗糙集属性约简	73
6.3 数据化知识识别	80
第 7 章 基于模糊聚类分析的自动诊	

断	87
---------	----

7.1 水轮发电机组振动特征分析	87
7.2 模糊诊断方法	89
7.3 基于核函数的聚类理论与方法	91
7.4 基于核函数聚类分析的综合自动诊断	93

第 8 章 基于知识的故障诊断方法研究	96
8.1 故障诊断专家系统	96
8.2 诊断知识的表示	96
8.3 诊断系统的模糊推理与控制策略	100
8.4 基于数据库的知识库管理系统	104

第 9 章 旋转机械状态监测与故障诊断硬件系统设计	109
9.1 中小型水轮发电机组状态监测与故障诊断硬件系统设计	109
9.2 风机状态监测与故障诊断硬件系统设计	114
9.3 PCI-1713 卡编程方法的选取	115
9.4 PCI-1713 卡的测试	116

第 10 章 旋转机械状态监测与故障诊断系统应用研究	118
10.1 水轮发电机组故障诊断系统 (HGSFDS)	118
10.2 基于网络的风机在线状态监测和故障诊断系统 (FMDS)	125

参考文献	135
------------	-----

第 1 章 绪 论

1.1 旋转机械在线监测与故障诊断的研究意义

随着科学技术的进步，机械设备的工作性能不断提升，自动化程度和生产效率也越来越高；同时其组成和结构也日趋复杂，集成化程度不断提高。一旦设备的某个部分或某一环节在运行中出现了故障，就可能导致整个生产流程无法正常进行，进而会造成巨大的社会、经济损失，甚至会危及人身安全。例如：英国 CEGB 公司的 55 万 kW 和 60 万 kW 发电机组因故障停机而造成的发电损失每年达 750 万英镑。日本海南电厂的一台 600MW 超临界火力发电机组进行超速实验时，因机组轴承失效和临界转速下降引起机组共振，造成机毁事故，直接经济损失达 45 亿日元。1985 年大同电厂 2 号机组联轴器螺栓断裂；1988 年秦岭电厂 5 号机组主轴断裂，这两次事故的损失均达亿元。因此，如何有效地避免和预防机器设备出现故障，杜绝重大事故的发生，提高大型机电设备运行的安全性和可靠性，就成为人们越来越关心和重视的问题。

由于我国水电资源丰富，所以水电建设发展迅速。进入 20 世纪 90 年代以来，每年的水电装机容量都在 300 万 kW 以上。到 2004 年我国的水电装机已突破 1 亿 kW。随着水轮发电机装机容量的增多及其结构的日趋复杂，随之而产生的水电机组的安全、稳定性问题也日益突出。机组振动、摆度、水压力脉动等是衡量机组运行稳定性的重要指标，它们不仅影响机组的性能和寿命，而且直接影响机组的安全运行。许多电厂（特别是中小型水电厂）自投入运行以来，一直沿用人工读数等传统测试方法对机组振动、摆度进行测量。由于测量精度低，不能及时掌握、分析机组振动等的运行状态，发生事故和故障后也不能及时报警。

设备故障诊断的意义主要表现为降低事故的发生率、降低维修费用、减少维修时间，增加运行时间、保证可靠高效地发挥设备应有的功能。它依靠设备在运行过程中，伴随故障必然产生的振动、噪声、温度、压力等物理量的变化来判断和识别设备的工作状态和故障，这样可以对故障的危害进行早期预报、识别，进而做到预知维修，保证了设备安全、稳定、长周期、满负荷优质运行，也避免了“过剩维修”造成的不经济、不合理现象。应用故障诊断技术对机械设备进行监测和诊断，可以及时发现设备的故障和预防设备恶性事故的发生，从而避免人员的伤亡、环境的污染和重大的经济损失。据资料介绍，应用故障诊断技术可以减少事故发生率的 75%，降低设备维修费用的 25% ~ 50%。如果全国企业普遍开展设备故障诊断，改善设备维修方式，一年的经济效益就可达几十亿，因此故障诊断技术在工业生产中占据着越来越重要的地位。

旋转机械是机械设备的重要组成部分，如机械、冶金、矿业、化工、石油、航空、电力等行业的鼓风机、空气压缩机、航空发动机、汽轮发电机、水轮发电机等都是典型的旋转机械。这类机械是企业的核心设备，它们主要由转子、支撑转子的轴承、定子或机器壳体、联轴器组成，此外还有齿轮传动件、叶轮叶片、密封等。由于旋转机械转子、轴承、壳体、联轴器、密封和基础等部分的结构及加工和安装方面的缺陷，使机器在运行时产生振动，过大

的振动又往往是机器损坏的主要原因。又由于振动这个参量比起其他状态参量（如润滑油或内部流体的温度、压力、流量或发电机的电流等）更能直接地、快速准确地反映机器运行状态，利用振动信号对设备进行诊断，也就成为设备故障诊断中最有效、最常用的方法之一。机械设备和结构系统在运行过程中的振动及其特征信息是反映系统整体变化规律的主要信号，通过各种动态测试仪器拾取、记录、分析动态信号，是进行系统状态监测和故障诊断的主要途径。英国故障诊断专家 Thomas 认为，若进行旋转机械振动量的监测，其利润和成本之比可高达 17:1，因此，无论从安全的角度还是从经济效益出发，通过在线监测旋转机械的振动参量，对其进行状态和故障振动监测，就显得十分重要。

在线监测是运用现代测试技术，测量和监视伴随设备运行的振动、噪声、温度、压力、流量等参量，并利用信号分析与数据处理技术，对这些参量的模拟或数字信息进行分析处理，进而建立动态信号与设备故障之间的联系，再通过模式识别等识别方法判断系统的工况状态。它不影响生产系统的正常运行，有助于进行预知维修和预知管理。

长期以来，以统计理论为基础依据的有一定主观色彩的按计划定期进行小修、中修、大修的定期计划维修体制，对风机和水轮发电机组的正常运转发挥了极其重要的作用，且至今仍然是占压倒性的设备维修体制。从可靠性的角度来说，计划定期维修体制有其必要性，但是生产实践有大量事例说明这种维护体制较普遍地存在着过维修和不足维修，即维修的代价仍然十分昂贵。风机和水轮发电机组迫切要求提高维修的针对性，降低设备维护的代价，使设备的安全性、可靠性更高、更好。因此，建立适合风机和水轮发电机组的实时在线监测及故障诊断系统正成为新的趋势和方向。对重要的运行参数进行及时分析、对有关性能指标进行及时评估，对机组故障进行及时预测预报和原因分析，是保证机组安全运行的重要措施，这对提高风机和水轮发电机组运行效率有着十分重要的意义。

1.2 故障诊断技术的发展概况

现代设备的状态监测与故障诊断技术的研究，是由航天、军事工业的需要而发展起来的。自 1961 年阿波罗计划实施后，发生了一系列由设备故障酿成的悲剧，引起了美国军方和政府有关部门的重视。1967 年，在美国宇航局（NASA）的倡导下创立的机械故障预防小组（MFPG, Machinery Fault Prevention Group）和 20 世纪 70 年代初英国成立的以 R. A. Collacott 博士为首的机械保健中心（Mechanical Health Monitoring Center）等机构就开始有组织、有计划地对机械故障诊断技术进行专题研究。由于故障诊断技术的应用产生了巨大的经济、社会效益，从而得到迅速发展。

设备状态监测与故障诊断技术的发展和在不同国家和地区不尽相同。欧洲其他国家的研究虽不具有英、美的广泛性，但在某一方面却具有特色或占有领先地位，如瑞典 SPM 仪器公司的轴承监测技术、丹麦 B&K 公司的传感器制造技术等。日本在军事、航空等方面的研究没有英、美各国优势，但它将状态监测与故障诊断技术的研究充分应用在民用工业（如钢铁、化工、铁路等行业）中，并具有明显优势。日本密切注视世界各国的动向，努力发展自己的诊断技术，且特别注重研制本国的诊断仪器。

我国对设备状态监测和故障诊断技术的认识、研究和应用相对较晚，1979 年以前，一些大学和科研单位结合教学和有关设备诊断技术的研究课题，开始进行设备状态监测和故障

诊断技术的理论研究及小范围的工程实际应用研究。经过三十多年的发展,我国的设备状态监测和故障诊断技术水平同发达国家的差距已大大缩短,并在某些方面,如计算机监测与诊断软件开发等,完全可以满足实际生产的需要,且达到世界先进水平。目前,许多科研单位和大专院校已经陆续开发研制了数十套离线或在线状态监测与故障诊断系统,并在工业生产中发挥了巨大的作用。

故障诊断技术发展到今天,已成为一门独立的跨学科的综合信息处理技术。它是以可靠性理论、信息论、控制论和系统论为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象的特殊规律而逐步形成的一门新兴学科。

1.2.1 水轮发电机组故障诊断技术的研究现状

水电机组的转速较低,其故障机理具有特殊性,尤其是水力振动、气蚀等引起的故障,其机理及表现形式还没有研究透彻;而且水轮机组的结构与汽轮机组差别较大。在大多情况下,水轮发电机组的故障率远没有汽轮发电机组大,且一般不会造成像汽轮发电机组故障那样严重的后果,这使得人们对水电机组的安全运行没有给予足够的重视。国内外所做的研究大部分是集中在火电系统,因此对于汽轮发电机组的故障诊断系统开发得较多,技术上也较成熟,而针对水轮发电机组的故障诊断系统却较少。

在水电设备的故障诊断方面,目前国内外已取得了一些成功的尝试,如国外公司产品包括加拿大 FES 公司的“水轮发电机局部放电分析仪”、日本日立公司研制的“水力发电设备状态监测系统”、日本东京电力公司和东芝公司共同研究开发的“抽水蓄能发电机组自动监视系统”、瑞士 VM 公司研制的“发电机气隙监测装置”等,还有俄罗斯研制的水轮发电机专家诊断系统(ESCONT)能对机组振动和定子绕组热固性绝缘状态进行监测和评估,德国申克公司的 Vibrocontrol 4000 系统主要用于水轮机振动的监测和分析,加拿大 VibroSystem 公司的 AGMS 和 ZOOM2000 系统,分别用于监测发电机气隙和水轮发电机组的振动,以及瑞士 VIBRO—METER 公司的 VM600 系统、美国本特利·内达华公司的 Hydro VU 系统、德国西门子公司的 Scard 系统等。

近年来,由于水电站计算机监控系统的推广,国内水电机组的状态监测与故障诊断技术亦被提到了议事日程,且先后在三门峡、潘家口、黄龙滩、隔河岩等电站得以实施,并取得了一定的经验,为今后综合状态监测与诊断系统的研究奠定了一定的基础。

国内有清华大学开发的水轮机组运行稳定性跟踪分析系统(PSTA—1),该系统是在对机组振动机理研究的基础上对机组运行状态进行在线监测、报警、分析和诊断;华中理工大学研制的水轮发电机组状态监测、诊断及综合试验分析系统及 HSJ 型系列多功能水力机械监测分析系统;北京英华达公司的 EN—8000 系统等。

1.2.2 风机故障诊断技术的研究现状

风机广泛用于工厂、矿井、隧道、冷却塔、建筑物的通风、排尘和冷却;锅炉和工业炉窑的通风和引风。风机的性能参数主要有流量、压力、功率、效率和转速;另外,噪声和振动的大小也是风机的主要技术指标。随着机械工业的发展,风机设备的结构越来越复杂,功能越来越完善,自动化程度也越来越高,各子系统的关系也越来越密切,一旦设备的某个部分在运转过程中出现故障,就很可能中断生产,造成巨大的经济损失,甚至带来灾难性的后

果。目前,国内外都对风机故障诊断技术展开了积极的研究。

从故障诊断技术的各分支技术来看,美国占有领先地位,美国的许多权威机构如美国机械工程师学会(ASME)、美国宇航局(NASA)等都参与了这一领域的研究,且投入了大量的资金;不少的高校和企业也都设立了诊断技术研究中心,美国的一些公司如 Bentley、HP、Scientific-Atalanta 等,它们的检测产品基本上代表了当今诊断技术的最高水平,不仅具有完善的监测功能,而且具有较高的诊断功能,在军事、化工等方面具有广泛的应用;其他一些国家故障诊断技术方面的发展和应用也是各有特色、各具优势,如英国在摩擦诊断方面、丹麦在振声诊断方面等。

我国的故障诊断技术发展于 20 世纪 70 年代末,目前,我国在一些特定设备的诊断研究方面很有特色,形成了一批自己的监测诊断产品。西安交大、华中科技大学、哈尔滨工业大学、南京理工大学等高校的研究成果较为先进,如西安交通大学研制的“大型旋转机械计算机状态监测系统及故障诊断系统 RMMD”、华中科技大学开发出的“汽轮机工况监测和诊断系统 KBTGMD”、哈尔滨工业大学的“微计算机化机组状态监视与故障诊断专家系统 MMMDES”、南京理工大学 CIMS 研究所承担的国防科工委长春 FMS 实验中心检测监控系统的研制任务等。综合我国系统设备诊断技术的现状,其应用主要集中在化工、电力、冶金、矿井等行业。

从 20 世纪 70 年代至今,我国的设备诊断技术从早期偏重故障机理与诊断方法的研究发展到今天的故障诊断专家系统,许多学者为此做了有益的工作,但我们也看到目前我国水电机组和风机运行状态在线监测系统仍然存在监测点少、功能单一、缺乏系统性和综合性等问题,这将严重妨碍水电机组和风机状态信息的集中和综合,妨碍了从单一诊断向综合诊断的过渡。对于如何实现水电机组和风机状态信息的系统监测,确定出水电机组和风机状态监测系统的结构模式,仍然有许多问题需要研究。同时,诊断技术所诊断的故障也比较单一,尚不能综合利用各类监测装置的信息以提高诊断能力。因此,研制能够系统运用各机组状态监测数据,具有自动知识获取能力且能进行高速推理的水电机组和风机状态在线监测与故障诊断专家系统,已经成为今后研究开发的一个主要方向。

1.3 故障诊断的方法与技术

设备故障诊断方法可简单地划分为传统诊断方法、数学诊断方法及智能诊断方法。传统诊断方法包括振动检测技术、油液分析技术、噪声检测技术、红外测温技术、声发射技术以及无损检测技术等。数学诊断方法包括基于贝叶斯决策判别以及基于线形与非线形判别函数的故障诊断法、模糊诊断原理、灰色系统诊断法、故障树诊断法、小波分析法以及混沌分析与分形几何法等。智能诊断方法包括模糊逻辑、专家系统、神经网络、支持向量机、进化计算方法等。

设备故障诊断技术是一种了解和掌握设备在使用过程中的状态,确定其整体或局部是否正常,可以在早期发现故障及其原因,并能预报故障发展趋势的技术。设备故障诊断技术发展至今,已成为一门独立的跨学科的综合信息处理技术,设备故障诊断技术主要包括三个基本环节:故障信息检测、信号分析处理、故障诊断。

1.3.1 故障信息检测

设备故障诊断技术属于信息技术范畴，其诊断依据是被诊断对象所表征的一切有用信息。没有信息，故障诊断就无从谈起。对设备来说，主要通过传感器（如振动传感器、压力传感器等）来采集信息，因此传感器的类型、性能和质量、安装方法以及位置往往是决定诊断信息是否会失真或遗漏的关键。

在故障信息检测方面，国内在传感器设计方面已趋成熟，也有批量生产。但在传感器材料、生产工艺以及可靠性、长期稳定性方面与国外相比尚存在较大差距。故障信息检测与传感器技术的发展趋势是高可靠性与长期稳定性的检测与传感技术，固定植入式和介入式检测与传感技术，故障信息遥测技术，振动测量用光纤传感技术，声发射技术。传感器技术将继续是状态监测和故障诊断的重要内容。随着微电子技术、光电技术和精密机械加工技术的发展与传统的传感器技术相结合，传感器将向微型化、多参数化、数字化、实用化方向发展。

1.3.2 信号分析处理

由传感器获得的信息往往是杂乱的，其特征不明显、不直观，很难加以判别。信号分析处理的目的是把采集的信号通过一定的方法进行变换处理，从不同的角度获取最敏感、最直观、最有用的特征信息。分析处理方法的选择、结果的准确性以及表示的直观性都会对诊断的结论产生较大影响。

信号的分析处理提取故障特征是故障诊断的核心，对于确诊故障起着十分重要的作用。在故障诊断学科的发展过程中，最关键同时又是最困难的问题就是对信号的分析处理提取故障特征，它直接关系到故障诊断的准确性和故障早期预报的可靠性。深入研究设备故障的信息，分析处理并获取故障的特征信息，是故障诊断学科今后发展的重要方向。

在信号处理领域正朝着非线性、非平稳信号处理及其特征提取研究，包括小波分析、支持向量机、希尔伯特-黄变换、经验模式分解（EMD）、盲源分离法，周期平稳（Cyclostationary）信号处理、故障特征提取方法，微弱故障信号的提取理论等方向发展。

1.3.3 故障诊断

故障诊断包括对设备运行状态的识别、判断和预报。它充分利用信号分析处理所提供的特征信息参数，运用故障诊断知识和经验，对设备状态进行识别、判断，并对其发展趋势进行预测、预报，为设备维修决策提供技术依据。

在诊断理论、方法和技术方面，面向设备的故障诊断正朝着人工智能理论及系统，基于 Internet 的分布式智能状态监测与故障诊断技术及系统，基于行为与基于知识的诊断理论及其应用研究，多代理（Multi agent）诊断理论、方法及应用研究，多变量、非线性系统建模、预报、辨识与控制研究，人工智能技术应用基础研究（包括 GA、模拟退火算法、神经网络、数据融合）等方向发展；由于每种方法都有其适用范围，在故障诊断方面总有其局限性，为了提高故障诊断准确性和效率，通过将两种或两种以上的故障诊断方法进行优势集成已逐渐成为故障诊断领域的发展趋势。

1.3.4 故障诊断技术的发展趋势

目前故障诊断技术已取得了较大发展,但由于设备结构复杂,集成化程度高导致的设备故障的复杂性以及故障原因与征兆之间关系的复杂性,使故障诊断具有一种探索性过程的特点。所以在设备故障诊断中仍存在以下一些不容乐观的问题:

1) 诊断方法重理论推导,轻实践检验,或理论与实践没有有机结合。新的诊断方法往往是不完善的,即使理论推导正确也要经过实践的检验。由于故障诊断的复杂性,诊断方法应该不断经过实验、改进、再实验,最后完善的过程。现有方法有很多经不起实践检验,往往是基于理想的软件仿真所判断的结果,这和真实的转子或实验台诊断不能相比,在一定程度上掩盖了某些方法误诊率高的缺点。

2) 诊断中运用手段单一,难于揭示复杂的故障规律。故障诊断过程必不可少的内容有信号检测、信号处理、特征提取、故障确认。在旋转机械故障诊断中,监测信号一般使用振动信号,而振动信号的分析一般采用以 FFT 为核心的信号处理方法,也就是通常所说的频谱分析方法,提取 1 倍频、1/2 倍频、2 倍频等特征,然后通过这些特征和故障间的关系,采用模糊和神经网络来确认故障。频谱分析方法要求信号是平稳的,而当机械设备出现故障时,所测得的信号就包含了大量的非平稳信号成分。对非平稳信号也可以进行频谱分析,然而分析的结果是在整个被分析时间段上的平均,不能反映信号突变的细节,难以揭示复杂的故障规律。

3) 诊断的准确率还不是很高。据国内外公开文献报道,现有工程用故障诊断软件的故障诊断的正确率还不高,对故障的误诊可能直接影响运行人员的操作,有时更会延误时机,这在很大程度上限制了故障诊断软件的工程应用。

故障诊断技术是随着当代前沿科学的发展而发展的。其发展趋势应是传感器的精密化、多维化,诊断理论、诊断模型的多元化,诊断技术的智能化,具体表现在以下几个方面:

① 采用现代信号处理方法。如小波分析、支持向量机、希尔伯特—黄变换、经验模式分解(EMD)、盲源分离法、联合时频分析、维纳分布等时频分析法将信号同时变换到时域和频域,对非稳态信号的处理获得了较好的效果。

② 与现代智能方法的融合。随着智能技术的不断发展,采用各种智能方法以及多种智能方法的综合,对机组实施状态的智能监测和故障的智能诊断,将是机组监测与诊断技术的最终目标。

③ 与多传感器信息的融合。为了对水电机组的运行状态有整体的、全面的了解,必须对机组进行全方位、多角度的监测。因此,可采用多个传感器同时对机组的多个参数进行监测,然后按照一定的方法对这些信息进行融合处理。

④ 诊断系统将由集中式向分布式、网络化方向发展,利用各种通信手段将故障诊断系统与数据采样系统结合起来组成网络,有利于对机组的管理,减少设备投资,提高系统利用率,并与企业的 MIS 系统相连接,进一步促进企业管理现代化。

第2章 旋转机械振动故障机理研究

2.1 旋转机械振动故障的特点

2.1.1 水轮发电机组振动故障的特点

根据振动诱发原因，水轮机组的振动原因分为三类：机械、电磁、水力脉动。电气及机械的缺陷引起机组振动的机理是由于电磁及机械所产生的激励力的频率与机组转动的频率形成共振致使机组振动，因此在振动理论中可将电磁及机械引起的振动归为激励力的作用，由这类原因引起振动的重要特征是振动频率等于转频或转频的整数倍。而水力脉动所引起的振动是机组振动的主要原因（其也是由于作用于转轮上的激励力所引起的振动），其表示形式如下：

① 水流绕流叶片引起的水力脉动。它包括由于工况不好引起的和叶形不好引起的两种情况。这是最主要、也是最常遇到的激振原因。转频、叶频及导叶频率三个系列的压力脉动均属此类。

② 卡门涡，它只在叶片形状及尺寸不适当时才易出现。

③ 尾水管涡带，该形式多发生在螺旋桨式水轮机及转桨式水轮机螺旋桨工况下。

④ 蜗壳进水不均匀，流道不对称。

⑤ 其他。如由上述原因激发的其他水力脉动等。原理也是由于上述原因所引起的频率与机组转动频率形成共振而产生振动。

水轮发电机组振动故障的特点还表现在以下几个方面：

1) 水轮发电机组振动故障的渐变性和耗损性。水轮发电机组的转速与其他旋转机械的转速相比明显较低，因此水轮发电机组振动故障的发展一般属于渐变性或耗损性故障，有磨损和疲劳特征，突发的恶性事故较少。如水轮机部件因空化或泥沙磨损等原因导致的振动，这是水轮发电机组振动故障的一个主要特点。正是由于故障的发展有一个从量变到质变的渐进过程，使得利用状态监测和趋势分析技术，捕捉事故征兆，早期预警，防范故障变得相对容易和准确。

2) 水轮发电机组振动故障的复杂多样性。水轮发电机组是一个涉及机械、电磁和水力的复杂系统。在机组运行中，除了机械因素外，还有电磁和水力因素的影响，使得机组某些部件产生振动，而且机械、电磁、水力这三者在机组运行中是相互影响的。因此，机组振动可能是机械、电磁、水力三者中的某一个因素引起的单一振动，也可能是几种因素共同作用的耦合振动，振动机理比较复杂，直观判断和简单的测试手段有时还很难找到主导性故障原因。

3) 水轮发电机组振动故障的特殊性。整个水电站的设计、施工受地理位置、地质状况和经济技术等多方面的影响，因此每个水电站都是专门设计的。同时水电机组运行条件还会受到电网、水温、气候和现场安装等诸多因素的影响，有些影响是不可预知的。这就使得不

同电站，甚至同一电站的不同机组的振动情况很不一样，特殊案例比比皆是。这对通用型故障诊断系统的研究是一个极大的挑战。

为了讨论问题的方便，通常根据水轮发电机组主要三类振源所导致的不同类型的振动分别进行分析研究。

1. 机械原因引起的振动

机组转动部件因不平衡、弯曲或部件脱落等原因造成的振动。

机组对中不良、法兰连接不紧或固定件松动所引起的振动。

机组固定部件与转动部件产生碰摩所引起的振动。

导轴承间隙过大或推力轴承调整不良等原因而引起转子的不稳定运动等。

机械原因引起的振动的机理，振动的各种特征以及对机组的影响都和一般旋转机械的振动没有本质上的差别。值得注意的是，大中型水轮发电机组一般是立轴的，从理论上讲各部导轴承不承受静载荷，轴颈无静偏心，这与一般卧轴的旋转机械不同，所以有些情况不能照搬。

2. 水力原因引起的振动

由于设计或制造的原因，导叶或叶片的出口边产生卡门涡，引起中频和高压脉动，其振动频率与导叶或叶片数有关。

叶片进口水流冲角太大，导致叶片头部脱流，形成叶道涡和二次流，引起高频和中频压力脉动，压力脉动的频率为叶片数的倍数。

叶片出口流速的圆周分量过大，在尾水管内产生强烈的旋涡流动，引起低频压力脉动，压力脉动的频率一般为 $1/6 \sim 1/3$ 转频。

由于转轮止漏装置中的压力脉动，其脉动频率接近转频；在小负荷工况下，许多机组存在一个小负荷振动区，其振动频率略高于转频。

其他一些偶然因素引起的水力共振，如阀门、调速器的液压系统等。

水轮发电机组水力振动的特点是水力振动随工况而变化，当机组的工作水头不变时，水力振动的幅值随流量或负荷的改变而变化；在同样的负荷下，水头的不同水力振动也不一样：在某些条件下，相同的水头和流量的情况下，机组的气蚀系数不同，水力振动也不同。这就使得趋势分析变得比较困难。水电机组水力振动的另一个特点是模型与原型机组之间的换算关系难以确定。当模型和原型相似时，在相应的工况点运行，性能的静态值是可以换算的，如水轮机的效率。而动态值的测量却并非如此，即使是水力相似的系统。在模型水轮机上进行压力脉动测量时，测量的结果是模型和整个试验台系统的特性。通常，力的作用和它的响应之间可以用一种换算关系表达。一座模型试验台只有一个唯一的换算关系，它将产生唯一一种与激振力有关的响应。如果这种换算关系不是唯一的，那么就可能出现激振力的放大或衰减，从而产生与激振不同的响应。由模型的动态响应来预测原型的动态响应，必须确定模型和原型之间的换算关系。通常，水流通道的动态模拟应包括引水管、尾水管和所有有关的边界条件，这实际上是很难达到的。这就使得通过实验室的模型试验来确定原型的水力振动变得比较困难。

3. 电磁力引起的机组振动

发电机定子和转子间气隙不均匀。

转子及磁极线圈匝间短路。

发电机转子主极磁场对定子几何中心不对称等。

这些作用力不但引起发电机转动部分的振动，也将激起发电机定子及支承等固定部件的振动。

2.1.2 风机振动故障的特点

风机构成部件有叶轮、转子轴、轴承、密封、联轴器、定子或机器壳体等。风机的主要功能是由旋转部件来完成的，转子是其最主要的部件，旋转机械发生故障的主要特征是机器伴有异常的振动和噪声，其振动信号从幅域、频域和时域反映了机器的故障信息。了解风机在故障状态下的振动特点和机理，对监测机器的运行状态和提高诊断故障的准确率非常重要，风机运行过程中常见故障为转子不平衡、不对中、碰摩、松动、油膜涡动及振荡，轴裂纹，失稳，喘振与旋转失速等。

2.2 旋转机械振动故障的特征和识别

2.2.1 水轮发电机组振动故障的特征和识别

故障机理的研究中，为了掌握故障征兆参数与故障原因之间的对应关系，据此建立起故障样本数据库，并作为系统诊断知识的有效来源。因此，认识并把握机组振动故障的特点和识别方法是故障诊断研究工作的首要任务。

1. 转子不平衡

由于转子部件质量偏心或转子部件出现脱落缺损造成的故障，它是机组最常见的故障。这种不平衡的惯性力可用式（2-1）计算：

$$R_0 = mr_c \omega^2 \tag{2-1}$$

式中 R_0 ——不平衡离心惯性力；
 m ——偏心质量；
 r_c ——偏心质量质心与转轴的距离；
 ω ——转子的角速度。

因此，水轮机组运行时就会产生不平衡的离心力。实践表明，不平衡所引起的离心力远比不平衡磁拉力小，但它容易扩大定子和转子间隙的不均匀程度。例如，定子某一部位向内腔突出时，转子离心力方向与定子向内腔突出部位相遇，会扩大不平衡磁拉力。

转子质量不平衡引起的振动，其特征是以转频为主振幅，对机组转速变化较敏感，振幅与转速的二次方成正比；机组水平方向振动较大；转子的轴心轨迹为圆或椭圆。而且，不平衡的离心惯性力越大，机组振动越剧烈。振动幅值的变化与不平衡产生的原因有关。

1) 发电机转子不平衡。根据发电机的大小，磁极的质量约为2270 ~ 4540kg，凸极低速发电机的平衡质量是根据转子的速度和质量决定的，一般需要9 ~ 68kg（20 ~ 150lb）的平衡质量，在进行磁极更换检修时，当无法精确称量磁极质量时，将导致发电机转子不平衡。其特征是在上、下机架产生转频（1倍）的振动，而且上、下机架导轴承的相位不变。由于这种初始的不平衡，在运行初期机组的振动就处于较高的水平（图2-1a）。

另外，大中型水轮机组的主轴的尺寸比较大，由于其材质不均、毛坯有缺陷、加工和安

装误差、结构设计不合理等原因,也会造成初始不平衡。

2) 涡轮叶片不平衡。严重的气蚀或水流中的泥沙等颗粒对轮叶的不均匀磨损导致涡轮叶片金属缺失,不均匀的焊接修理或是石块进入涡轮叶片之间都可以引起涡轮叶片不平衡。这种不平衡为渐变不平衡,其振动特征是在运行初期的机组振动较低,但随着时间的推移,振动幅值将逐步升高(图 2-1b)。

3) 转子部件脱落与转子质量偏心引起的不平衡的故障机理是相同的。但转子部件缺损的故障特征是在机组运行过程中振动会突然发生变化而后趋于稳定,振动的幅值一般有较明显的增大(图 2-1c)。

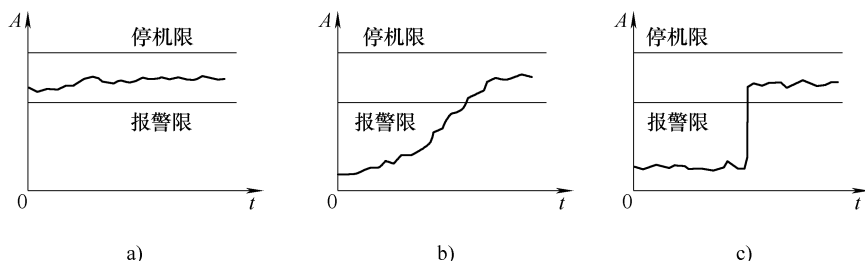


图 2-1 几种不同性质不平衡的振幅变化趋势

a) 初始不平衡 b) 渐变不平衡 c) 转子部件脱落

2. 转子不对中

由不对中导致的水轮发电机组的振动是很常见的故障。机组通常由法兰连接主轴和发电机轴,轴系用来传递运动和转矩。转子不对中则是指这两转轴的轴线不在同一条直线上,许多轴承的不对中是由于轴承磨损和漏水封闭的侵蚀造成过大的间隙而形成的。具有不对中故障的转子系统,在其运转过程中将产生一系列对机组有害的动态响应,例如引起机组的振动、联轴器的偏转、轴承的磨损和油膜的失稳、轴的挠曲变形等,危害极大。

常见的轴系不对中有 3 种情况(图 2-2):平行不对中、角度不对中、综合不对中。

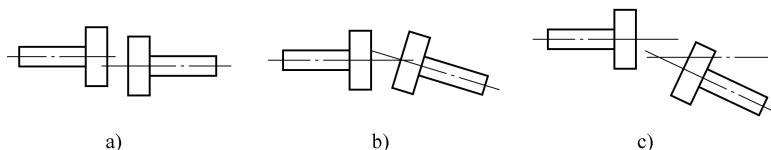


图 2-2 转子不对中的三种形式

a) 平行不对中 b) 角度不对中 c) 综合不对中

产生转子不对中故障的原因是多方面的,主要原因如下:

1) 制造误差。在联轴器加工过程中,端面与轴心线不垂直或端面螺栓孔的圆心线与轴颈不同心。

2) 安装及其他影响。在排除了加工误差引起的不对中后,实际上可以将不对中分为冷态不对中和热态不对中两种情况,其中冷态不对中主要是指在室温下由于安装误差造成的对中不良,热态不对中指机组在运行过程中由于高温等因素造成的不对中,其主要原因包括基础受热不均;机组各部件的热膨胀变形和扭曲变形;机组热膨胀时由于滑动表面的摩擦力及导向键磨损引起轴承座的倾斜;由于转子的挠性和质量分配不均匀,转子在安装之后产生原始弯曲,进而影响对中;地基下沉不均。上述热变形的影响,导致转子轴颈中心在轴承中的

位置发生变化。一旦轴颈与轴承的相对位置发生改变，轴承油膜的特性会随之发生改变，而且会导致在联轴器处产生附加弯矩。

在水轮发电机组中，法兰连接的转子对中不良时，由于强制连接所产生的力矩，不仅使转子发生弯曲变形，而且随转子轴线平行位移或轴线位移的状态不同，其变形和受力情况也不一样，如图 2-3 所示。

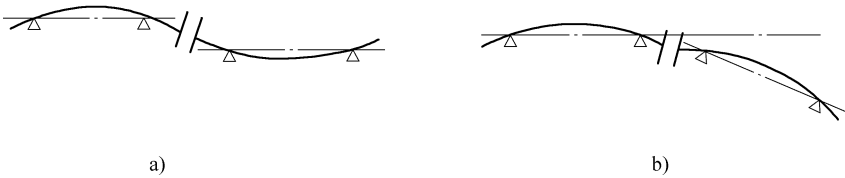


图 2-3 刚性联轴器（法兰）连接不对中
a) 轴线平行位移 b) 轴线角度位移

用刚性联轴器连接的转子不对中时，转子往往是既有轴线平行位移，又有轴线角度位移的综合状态，转子所受的力既有径向交变力，又有轴向交变力。

弯曲变形的转子，由于转轴内阻现象以及转轴表面与旋转体内表面之间的摩擦而产生的相对滑动，使转子产生自激旋转振动，而且当主动转子按一定转速转动时，从动转子的转速会产生周期性变动，每转一周变动两次，因而其振动频率为转子转动频率的 2 倍。

转子所受的轴向交变力如图 2-4 所示，其振动特征频率为转子的转动频率。

因此，转子不对中故障的基本振动征兆如下：

- 1) 振动信号的时域波形为畸变的正弦波。
- 2) 径向振动信号频谱图中，以 1 倍频和 2 倍频分量为主，轴系不对中越严重，其 2 倍频分量所占的比例就越大，多数情况超过 1 倍频分量。
- 3) 轴向振动的频率以转频为主。
- 4) 振动对负荷的变化比较敏感，一般振动幅值随负荷的增加而升高。

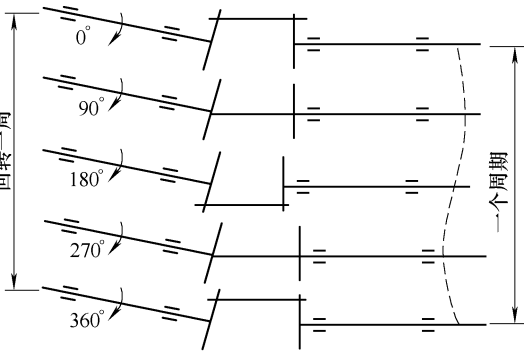


图 2-4 转子不对中的轴向振动

3. 转子弓形弯曲

转子质量不平衡是由于转子各横截面的质心连线与其几何中心线存在偏差，而转子弓形弯曲是指各横截面的几何中心连线与旋转轴线不重合（图 2-5），两者都会使转子产生偏心质量，从而使转子产生不平衡振动。弯曲转子具有与质量不平衡转子相似的振动特征，所不同的是弯曲转子在转子两端产生的锥形运动在轴向有较大的工频振动。

另外，转轴弯曲时，由于弯曲产生的弹力和转子不平衡力所产生的离心力相位不同，两者之间会有所抵消，即在某个转速上，转子的振幅会产生一个“低谷”。

转子弓形弯曲的原因有设计制造缺陷（转子结构不合理、材质性能不均匀），转轴长期停放不当、热态停机时未及时盘车或遭凉水急冷，升速过快或局部碰摩产生温升致使转子热变形不均匀等。

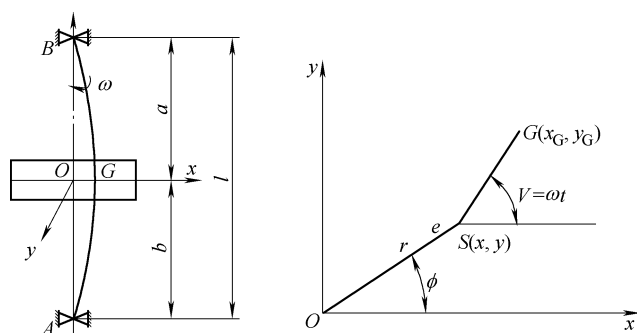


图 2-5 转子轴系弓状回旋图

4. 气蚀剥蚀

当液体内部压力下降到一定限度时，液体本身将发生变化，在局部形成气泡，而后在压力升高时，气泡重新凝聚、溃灭、消失，这一过程称为气蚀。水轮机产生气蚀的主要原因在于水流的流速、方向、金属的性质、检修的工艺和运行时间等因素。

水轮机是利用叶片两面的压差将水的动能转换为机械能的。如果叶片背面压力最低点小于水温的汽化压力，水就会汽化，产生大量的水蒸气而形成气泡，当这种气泡进入通流部件表面的高压区时急剧地破灭，形成局部水击，造成气蚀破坏，使局部金属表面逐渐疲劳剥落。特别是因冶炼、铸造、加工以及安装等因素而产生的微小夹渣、气孔、凸凹不平、划痕、焊疤等缺陷处，在气蚀的作用下，上述这些部位首先疲劳剥落，产生了微小的孔坑，而后该处水流的流态就产生了微小的变化——细微的脱流或旋涡，加速了该处的磨损与气蚀，使凹坑沿水流方向越变越长并加宽而呈椭圆状，进而加速了材质的破坏。

另外，当压力降低后，由于液体对气体的溶解度降低，空气被析出，析出的空气与金属表面发生氧化作用，使金属表面产生化学破坏。

由于气蚀破坏剧烈，使金属的个别质点剥落，在金属表面形成蜂窝状，而蜂窝状部分由于金属不均匀而存在大量的微电池，这些微电池就引起了电化腐蚀。

当气泡凝缩引起局部湿度升高，金属表面的湿度不均，这样在冷和热之间形成热电偶，产生电位差，发生电解作用，使金属表面遭受破坏。

若按气蚀发生的部位分类，有翼形气蚀、空腔气蚀、局部气蚀和间隙气蚀四种。通常混流式水轮机的气蚀多为翼形气蚀，间隙气蚀和局部气蚀居次要作用；轴流式水轮机中以间隙气蚀、局部气蚀较为普遍，其次是翼形气蚀；切击式水轮机由于在大气压力下运行，相比之下气蚀程度较轻。间隙气蚀在高水头水轮机中特别剧烈。

发生气蚀时，机组将产生以下一些征兆：

1) 局部温升。伴随着金属表面破坏（实际为金属变形）和气泡压缩，都将发生瞬间局部温升，可达 $200 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。

2) 金属腐蚀。气蚀过程中液流通过真空区时，从液体中析出的氧气作用在金属表面，从而引起化学腐蚀。

3) 噪声。气蚀过程中，由于气泡凝结和空泡被压缩破灭，不管在液流中，还是发生在金属表面，都将产生声波，作为噪声传出去，这种噪声的频谱约为 $10 \sim 12$ 万 Hz。

4) 振动。在气泡凝结和破灭时，伴随着压力局部瞬时升高和液流对流道壁上的冲击，

必将引起水轮机的振动,尤其在液流中有较大的气泡空间时更易出现。不恒定的气蚀过程还可能包含脉动作用力,如果这种脉动作用力的某一频率分量与机组的某一部件的自振频率一致,就会引起共振。水轮机运行中叶片产生的振动,原因之一就是由气蚀引起的,这种振动的频率高达几百到几千 Hz。

气蚀的测试与诊断有两个途径:一是从气蚀的表征入手,如测量尾水管的脉动压力、机组振动和噪声等。二是从气蚀的后果入手,如气蚀会造成叶片的磨蚀损坏,水轮机效率下降等。

5. 进水流道水流不均匀所引起的振动

水流流经水轮机蜗壳、转轮及尾水管等过流部件时,由于这些过流部件设计制造误差或水流工况的变化,形成水流脱流及不对称的水流作用力矩。当然,气蚀、转轮水力不平衡,压力水管中的压力脉动等原因,也会引起水流脱流,产生涡旋,形成涡流作用在转轮上从而引起机组振动。下面进一步分析水流流经上述过流部件时的不均匀性及对机组的影响。

(1) 蜗壳中的不均匀流场 由于水工建筑物如导流墩等的影响,在某些工况下进水不均匀,造成旋涡进入蜗壳,这些分散的小旋涡可能汇集成较大的涡带进入转轮而引起振动。不管按等速度矩还是等速度规律设计的蜗壳,蜗壳中的实际水流是不均匀的,即使是完全包角蜗壳,蜗壳中径向流速的不均匀度也达 20%。这种不均匀流动引起振动的情况在低水头电站中较多,振频为 $f = nz_1/60$, z_1 为转轮叶片数, n 为机组转速,一般属于中频振动,有时和发电机上架的自振频率相同,使机组产生共振。

(2) 导叶后的不均匀流场 导叶所造成的水流不均匀,会引起导叶出水边处边界层脱流,形成涡带,进入转轮引起振动。但由导叶叶栅造成的导叶出口水流不均匀,对不同比转速水轮机的影响则不同。对于低比转速水轮机来说,因水轮机转轮十分靠近导叶出水边,故影响较大。对于高比转速水轮机来说,因导叶出水边距转轮进水边距离较大,水流在这一流中已渐趋均匀,故影响较小。导叶后的水流不均匀性作用在转轮上水流扰动频率为 $f = nz_1/60$, z_1 为导水叶片数, n 为机组转速。

6. 卡门涡列

当水流绕流导叶或者转轮叶片时,在其尾部产生脱流涡旋,该脱流涡旋的流态与水流速度和绕流体的截面形状及尺寸有关。随水流速增大脱流边界层向紊流发展,最后在叶片尾部形成紊流交叉涡列,即卡门涡列。当脱流流体在绕导叶或者转轮叶片产生卡门涡列时,由于压力场的变化,其合力大小及方向均随着时间发生周期性变化,较明显的是垂直于流向的交叉侧向力,即不平衡的侧向力。该力作用于金属弹性体叶片上,产生微幅或大幅振荡,如果这个振动频率与叶片体系自振频率相近,则可能发生卡门涡频与叶片频率的共振,激起较大幅度的振动。

钝柱体产生卡门涡列时的绕流旋涡脱流的频率可写为

$$f = S \frac{v}{d} \quad (2-2)$$

式中 v ——接近绕流体前的速度,对转轮叶片应为相对速度;

S ——斯特罗哈数,实验证得约为 0.18 ~ 22;

d ——垂直于液流方向,流体形成脱流尾迹处的最大宽度(图 2-6)。

据上述公式,在已知流速和叶片厚度的情况下,可以计算出涡流的频率。

因此当机组发生卡门涡列振动时,可以通过改变 d 值大小(叶片尾部厚度),从而改变卡门涡列振频,达到消振、减振目的。

这种涡列的发生,取决于液流中放置物体的形状,它的频率由流速决定,同时因为卡门涡列的形成与流速和绕体尾部的断面形状和尺寸有关,故其振幅随过流量增加而明显增大。因此,这种振动是在水流速度达到某值,形成共振条件时才发生的。在真机运行中,只有在一定负荷下才能发生这种振动。所以,要防止这种现象,可以修改转轮叶片形状或采取转轮叶片间加装支柱,改变转轮叶片的固有频率等方法。

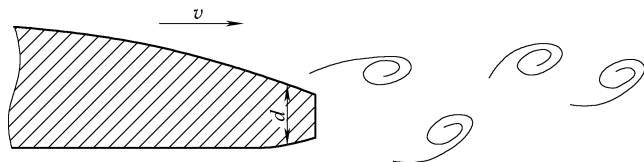


图 2-6 卡门涡列

7. 转轮止漏环(迷宫环)的压力脉动

因水轮机主轴的挠曲、偏磨、安装偏心或旋转产生的涡动运动,可能出现转轮与转轮室不在同一轴线上的情况;或者迷宫止漏的零部件加工安装不精确,转轮质量不均匀造成的动静不平衡等,都会使运行中出现迷宫间隙不均;另外,轴承间隙不当,机组刚度差,也可能产生上、下迷宫梳齿间隙偏斜。

这种迷宫间隙过小或结构不合理,都可导致水力脉动。如图 2-7 所示,转轮 R 与转轮室 I 之间的微小间隙为 G ,供给转轮的液流一部分通过此间隙流进转轮背面的空腔 B ,此液流即为产生振动的根源。漏水量与圆周上的间隙大小成比例。如果转轮处于偏心位置,则点 a 处的流量最小,间隙压降增加,产生侧向力,致使间隙中水的压力脉动造成转轮振动。中高水头混流式水轮机的止漏环前后压差很大,容易在间隙中造成较大的压力脉动和转动部分的自激振动。

若一个经过平衡了的水轮机转轮工作起来后可能由于某种扰动发生偏离,致使 a 间隙变小, c 间隙变大,造成 a 间隙处压力 p_a 加大, c 间隙处压力 p_c 变小,即 $p_a > p_c$ 。同时,液流拖动转轮加快旋转的切向力也成为 $p_a > p_c$ 。

在平面图上将各力向转轮中心简化,得

$$X = p_a - p_c \quad (2-3)$$

$$Y = p'_a - p'_c \quad (2-4)$$

$$M = \frac{p'_a + p'_c}{2} D_1 \quad (2-5)$$

同时考虑到此时转轮有偏心使离心力 W 与 X 反方向,合力方向促使向点 b 靠近。运转中可以见到, a 靠近使 b 靠近, c 靠近,这样逐渐循环,方向正好和转轮转动方向相同,这就是弓状回旋。

迷宫密封中的流体激振力所引起的机器振动频率,往往表现为低于 2 倍转速的亚异步振

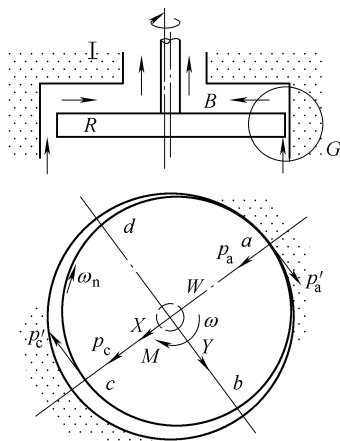


图 2-7 简化的迷宫间隙模型

动。许多机器的振动还与机组的负荷与转速有关，在操作时存在一个与转速、负荷等因素密切相关的“阈值”，当机器运行到这个值时，只要很小的转速或负荷的变化，就可能导致机器强烈振动，使原来运行稳定的转子运行不稳定，或是机器在低负荷下运行稳定，在高负荷下运行不稳定。

迷宫密封水流涡动有如下故障特征：

- 1) 涡动频率一般为 0.6 ~ 0.9 倍工频。
- 2) 轴心轨迹椭圆形，正进动。
- 3) 强振时有可能激发转子的一阶自振频率，表现为自激振动。
- 4) 转速和负荷存在一个“阈值”，在这个值附近可导致强烈振动。
- 5) 强振时的主频为转子的一阶固有频率，频带较宽。
- 6) 振动的再现性强。
- 7) 一般在转子不平衡、不对中、偏心时易发生。

目前，在日本、美国等发达国家一般不采用梳齿密封结构的密封环，特别在下止漏密封中一般多用台阶式，外迷宫间隙通常较大，这种间隙匹配有利于减少压力腔中的水力不平衡，而漏水量又不太大，有利于机组稳定运行。

8. 尾水管低频涡带

在正常运行状态下，混流式水轮发电机组转轮出流的方向大致是轴向的。与此相比，负荷增大时（或水头增高时）出流的旋转与转速方向相反，负荷变小时（或水头减小时）出流的旋转成分与转速方向一致。因此，在尾水管中附近某一边界内形成旋转水流，尾水压力低时（尾水位低时），其中心部位变成低压，形成空洞。虽然在超负荷时，这个涡心大都是比较稳定的，但是在部分负荷下，其变成龙卷状，在尾水管内摆动旋转，在尾水管壁能听到沙沙声。

涡带形状及尾水管压力脉动情况均与水轮机运行工况有很大的关系。空载和小负荷时，死水区几乎充满整个尾水管，压力脉动很小；当负荷为 30% ~ 40% 时，涡带稍有偏心，并呈螺旋形，压力脉动较大；负荷增大到 40% ~ 50% 时，涡带严重偏心，螺旋形，压力脉动更大；继续增大负荷到 70% ~ 75%，涡带同心，压力脉动很小，运行无扰动；到 75% ~ 85%，无涡带，无压力脉动，运行稳定；满负荷或超负荷时，涡带在紧靠工作轮后收缩，有很小的压力脉动。

涡带的旋转频率也就是压力脉动的频率。实践表明，尾水管中压力脉动频率随机组转速 n 的增加近似为线性关系，转速是影响脉动频率的主要参数，一般文献上仅取转速作为决定压力脉动频率的唯一参数，其经验公式为

$$f = \frac{n}{60b} \quad \text{或} \quad u = \frac{f}{f_0} = \frac{60f}{n} \quad (2-6)$$

式中 b ——系数，可取 2 ~ 6；

f ——涡带压力脉动频率（Hz）；

f_0 ——机组转频（Hz）；

n ——机组转速（r/min）；

u ——比例系数。通常在 1/2 ~ 1/6 之间，具体值可以通过模型实验来测出。

u 压力脉动的程度可用相对振幅表示：

$$A = \frac{\Delta H}{H} \quad (2-7)$$

式中 A ——相对振幅；

ΔH ——全振幅。

尾水管涡带引起的周期性水压力脉动的主要特征与影响如下：

- 1) 引起尾水管的振动，严重时造成尾水管里衬的破坏。
- 2) 引起水轮机顶盖和推力轴承的垂直振动。
- 3) 尾水管的压力波动传到压力水管时，将可能引起压力水管的振动。
- 4) 尾水管涡带的压力脉动可达当时水头的 3% ~ 5% 或更大，从而导致功率的水力波动。
- 5) 强烈的涡带会引起厂房的振动。

这种现象一旦加剧，就会造成压力钢管振动（与压力钢管共振时）、电站厂房振动以及电力摆动。作为减少旋转水流的对策，可在尾水管中安装补气管。有时在尾水管中安装导流翼片。

9. 机组的电气振动

水轮发电机组电磁振动可分为两类：一类是转频振动，其频率为转频或其整倍数；另一类为极频振动，大的或异常的极频振动都是以共振的形式出现的。大直径水轮发电机组主要振源之一，是由于定子内腔和转子外圆之间气隙不均匀，在定子和转子之间产生不平衡磁拉力，从而对转子和定子形成转频激扰力。产生极频振动的原因有分瓣定子合缝间隙大，比较多见；定子分数槽次谐波磁动势，振动幅值随负载电流增大而增大；定子并联支路内环流产生的磁动势；负序电流引起的反转磁动势；定子不圆、机座合缝不好。

水轮发电机组电磁振动可分为两类：转频振动和极频振动。

(1) 转频振动 转频振动主要是机械缺陷造成的。其频率为转频或转频的整数倍 (k)，即

$$f_z = \frac{kn}{60} \quad k = (1, 2, 3, \dots) \quad (2-8)$$

大直径水轮发电机组主要振源之一是定子内腔和转子外圆间气隙不均匀，在定子和转子间产生不平衡磁拉力，从而对转子和定子形成转频激扰力。

定子和转子气隙不均的原因如下：

- 1) 转子外圆不圆，有的磁极突出。
- 2) 定子内腔和转子外缘均为圆形，但转子、定子非同心。
- 3) 转子动、静不平衡。
- 4) 转子各磁极电气参数相差较大或局部颈间短路。

转频振动特征是振动随励磁电流增大而增大，且上机架处振动较为明显。

(2) 极频振动 极频振动是由两种磁场及其相互作用而产生的。其振动频率为

$$f_j = \frac{3000}{60}k = 50k \quad k = (1, 2, 3, \dots) \quad (2-9)$$

产生 100Hz 极频振动的主要原因如下：

- 1) 定子分数槽次谐波磁动势，振动幅值随负载电流增大而增大。

当采用分数槽绕组时,某些发电机的磁动势和力波谱可能很宽,某些谐波可能引起定子共振或倍频共振,从而引起定子铁心和其他部件产生明显甚至剧烈的振动。在这种状态下长期运行,会使定子线圈和其他结构部件受到损伤,甚至发生重大事故。

这种振动随定子电流增大而增大,振幅与电流几乎呈线性关系,且上机架处振动较为明显。

2) 定子并联支路内环流产生的磁动势。

并联支路有两种布置方式,一种是分布布置,另一种是集中布置。

集中布置的优点是,若定子或转子间气隙不均匀,则各支路内感应电动势不一样,支路之间就有环流通过,环流所产生的磁场将力图使气隙不均匀磁场恢复平衡。因此使局部不平衡磁拉力降低,铁心局部过热不严重,所以水轮发电机的并联支路都采用此法。

支路集中布置时,由于定、转子间的气隙均匀,在支路中所引起的环流将产生一系列不对称的次谐波磁动势,从而使铁心振动加大。

3) 负序电流引起的反转磁动势。

当定子三相负载不对称时,绕组会产生负序电流,它产生一个极对数与主磁极相同而旋转方向相反的磁场,它与主磁场叠加产生一个空间阶数为零的磁场,使定子铁心作驻波式的振动。

4) 定子不圆,机座合缝不好。

定子由于加工、组装等各种原因稍为扁圆形,气隙就可能出现幅值为 ΔA_j 的 j 次谐波磁导和磁场。附加磁场的频率为 f_1 ,附加磁场与主波磁场相互作用将使频率为 $2f_1 = 100\text{Hz}$ 。

5) 定子铁心组合缝松动或定子铁心松动。

这种原因引起的振动,其特征为,振动随机组转速变化较明显,且当机组加上一定负荷后,其振幅又随时间增长而减小;因定子铁心组合缝松动所引起的振动,其频率一般为电流频率的 2 倍。

6) 定子绕组固定不良。

在较高电气负荷和电磁负荷作用下使绕组及机组产生振动。其特点为,振动随转速,负荷运行工况变化而变化,上机架处振动亦较为明显,但不会出现加上某一负荷后其振动随时间增长而减小的情况。

2.2.2 风机常见故障的产生原因和振动特征

1. 转子不平衡

转子轴心周围质量分布不均,质心不在轴线上而产生附加惯性力或力偶的现象称为转子不平衡。分为初始不平衡、渐变不平衡、突发不平衡三种类型,原因分别在于转子材质不均,制造、安装过程产生误差,工作过程中输送气体介质夹带的附属物粘附在叶轮表面。实际的转子不平衡量沿着转子轴、叶轮轴向和径向的分布是任意的、随机的,当转子以工作转速旋转时,形成了一个分布的离心惯性力系,其引起的振动超过一定限值,机器就出现了不平衡故障。

设转子的质量为 M ,偏心质量为 m ,偏心距为 e ,如果转子的质心到两轴承连心线的垂直距离不为零,具有挠度为 a ,如图 2-8 所示。

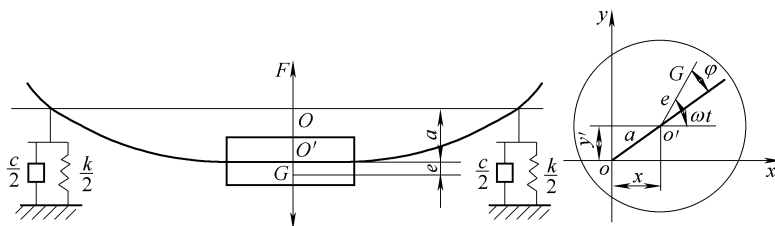


图 2-8 转子的力学模型

一个具有偏心质量的转子，设偏心质量集中在 G 点，考虑到外阻尼的作用，转子以角速度 ω 转动时，其轴心 o' 的运动微分方程为

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = me\omega^2 \cos\omega t \quad (2-10)$$

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + ky = me\omega^2 \sin\omega t \quad (2-11)$$

令 $z = x + iy$ ，它的复数形式运动方程是

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + \omega_n^2 z = e\omega^2 e^{i\omega t} \quad (2-12)$$

设其特解为

$$z = |A| e^{i(\omega t - \theta)}$$

代入得

$$(\omega_n^2 - \omega^2 + 2n\omega i) |A| = e\omega^2 e^{i\theta} \quad (2-13)$$

因

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$

故有

$$(\omega_n^2 - \omega^2) |A| = e\omega^2 \cos \theta$$

$$2n\omega |A| = e\omega^2 \sin \theta \quad (2-14)$$

解出 $|A|$ 和 θ

$$|A| = \frac{e(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2n/\omega_n)^2 (\omega/\omega_n)^2}} \quad (2-15)$$

$$\tan \theta = \frac{(2n/\omega_n)(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (2-16)$$

令 $\lambda = \omega/\omega_n$ ， $\omega_n^2 = k/M$ ， $2n = c/M$ ， $\xi = m/\omega_n$

有

$$|A| = \frac{me}{M} \times \frac{\lambda^2}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4\xi^2 \lambda^2}} \quad (2-17)$$

$$\tan \theta = 2\xi\lambda/(1 - \lambda^2) \quad (2-18)$$

实际上，因为转子运转时轴在各个方向的弯曲刚度有差别，尤其是轴承在各个方向的支撑刚度不同，因此当转子发生质量不平衡时，在 x 方向和 y 方向不仅是振幅不相同，而且相位差也不是 90° ，所有转子运行时的轴心轨迹并不是圆，而是一个椭圆。

转子不平衡故障的主要振动特征如下：

- 1) 振动的时域波形近似为正弦波，如图 2-9 所示。
- 2) 频谱图中，谐波能量集中于基频，并且会出现较小的高次谐波，使整个频谱呈所谓的“枫树形”，如图 2-10 所示。
- 3) 当 $\omega < \omega_n$ 时，即在临界转速以下，振幅随着转速的增加而增大；当 $\omega > \omega_n$ 后，即在

临界转速以上，转速增加时振幅趋于一个较小的稳定值；当 ω 接近于 ω_n 时，及转速接近临界转速时，发生共振，振幅具有最大峰值。振动幅值对转速的变化很敏感，如图 2-11 所示。

- 4) 对轴心轨迹进行观察，其进动特征为同步正进动。
- 5) 转子的轴心轨迹是椭圆。
- 6) 转子振动的强烈程度对转子的运行转速变化很敏感。
- 7) 初始不平衡的向量域稳定在某一允许范围内（图 2-12a）、渐变不平衡的向量域逐渐变化（图 2-12b）、突发不平衡向量域在某一时刻从 t_0 突变到 t_1 （图 2-12c）。

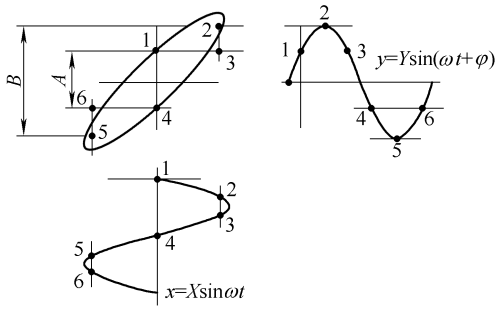


图 2-9 转子不平衡的轴心轨迹

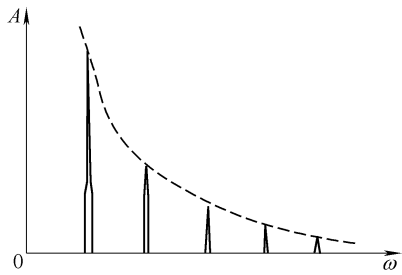


图 2-10 转子不平衡故障谱图

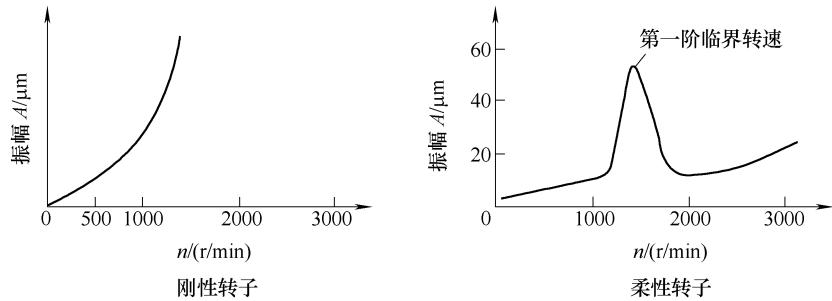


图 2-11 转子不平衡的主要特征

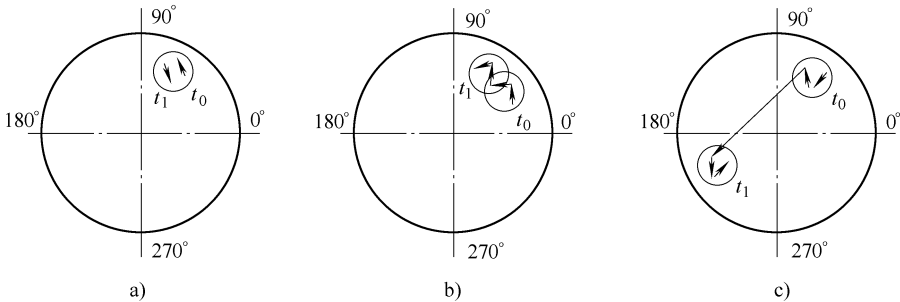


图 2-12 转子不平衡的向量域

a) 初始不平衡 b) 渐变不平衡 c) 突发不平衡

2. 转子不对中

机组中每个转子都是通过联轴器相互连接形成轴系，彼此传递运动和转矩的。机器工作时各转子轴线之间产生平行位移、轴线角度位移等对变化误差，把这些称为转子不对中。其

产生原因为，轴弯曲产生预负荷或轴承座安装不正确、工作状态下热膨胀、轴中心线偏置。不对中会造成转子附加弯矩及在轴承中的附加负荷，致使轴承间负荷重新分配，甚至导致轴承损坏，引起机器强烈振动。

(1) 转子不对中的类型 如图 2-13 所示，转子不对中包括轴承不对中和轴系不对中两种情况。轴颈在轴承中偏斜称为轴承不对中，轴承不对中本身不会产生振动，它主要影响到油膜性能和阻尼。在转子不平衡的情况下，由于轴承不对中对不平衡力的反作用，会出现工频振动。

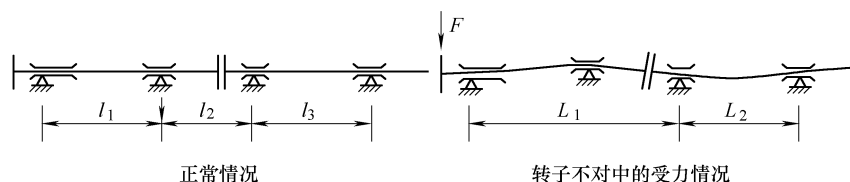


图 2-13 转子不对中示意图

机组各转子之间用联轴器连接时，如不处在同一直线上，就称为轴系不对中。通常所讲的不对中多指轴系不对中。造成轴系不对中的原因有安装误差、管道应变影响、温度变化热变形、基础沉降不均等。由于不对中，将导致轴向、径向交变力，引起轴向振动和径向振动，由于不对中引起的振动会随不对中严重程度的增加而增大。不对中是非常普遍的故障，即使采用自动调位轴承和可调节联轴器也难以使轴系及轴承绝对对中。当对中超差过大时，会对设备造成一系列有害的影响，如联轴器咬死、轴承碰摩、油膜失稳、轴挠曲变形增大等，严重时将造成灾难性事故。

如图 2-14 所示，轴系不对中一般可分为以下 3 种情况：

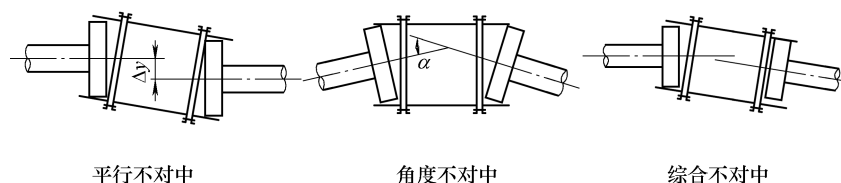


图 2-14 齿式联轴器转子不对中形式

- 1) 轴线平行位移，称为平行不对中。
- 2) 轴线交叉成一角度，称为角度不对中。
- 3) 轴线位移且交叉，称为综合不对中。

(2) 转子不对中的故障机理 大型高速旋转机械常用齿式联轴器、中、小设备多用固定式刚性联轴器，不同类型联轴器及不同类型的不对中情况、振动特征不尽相同，在此分别加以说明。

1) 齿式联轴器连接不对中的振动机理。

齿式联轴器由两个具有外齿环的半联轴器和具有内齿环的中间齿套组成，两个半联轴器分别与主动轴和被动轴连接。这种联轴器具有一定的对中调节能力，因此常在大型旋转设备上采用。在其对中状态良好的情况下，内、外齿套之间只有传递转矩的周向力。当轴系对中超差时，齿式联轴器内外齿面的接触情况发生变化，从而使中间齿套发生相对倾斜，在传递

运动和转矩时,将会产生附加的径向力和轴向力,引发相应的振动,这就是不对中故障振动的原因。

① 平行不对中。

联轴器的中间齿套与半联轴器组成移动副,不能相对转动。当转子轴线之间存在径向位移时,中间齿套与半联轴器间会产生滑动而作平面圆周运动,中间齿套的中心沿着以径向位移 y 为直径作圆周运动,如图 2-15 所示。

如图 2-16 所示,设 A 为主动转子的轴心投影, B 为从动转子的轴心投影, K 为中间齿套的轴心, AK 为中间齿套与主动轴的连线, BK 为中间齿套与从动轴的连线, AK 垂直于 BK , 设 AB 长为 D , K 点坐标为 (x, y) , 取 θ 为自变量, 则有

$$x = D \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} D \sin 2\theta \quad (2-19)$$

$$y = D \cos \theta \cos \theta - \frac{1}{2} D = \frac{1}{2} D \cos 2\theta \quad (2-20)$$

对 θ 求导, 得

$$dx = D \cos 2\theta d\theta \quad (2-21)$$

$$dy = -D \sin 2\theta d\theta \quad (2-22)$$

K 点的线速度为

$$V_K = \sqrt{(dx/dt)^2 + (dy/dt)^2} = D d\theta/dt \quad (2-23)$$

由于中间套平面运动的角速度 $d\theta/dt$ 等于转轴的角速度, 即 $d\theta/dt = \omega$, 所以 K 点绕圆周中心运动的角速度 ω_K 为

$$\omega_K = 2V_K/D = 2\omega \quad (2-24)$$

式中 V_K ——点 K 的线速度。

由式 (2-10) 可知, K 点的转动速度为转子角速度的 2 倍, 因此当转子高速转动时, 就会产生很大的离心力, 激励转子产生径向振动, 其振动频率为转子工频的 2 倍。此外由于不对中而引起的振动有时还包含有大量的谐波分量, 但最主要的还是 2 倍频分量。

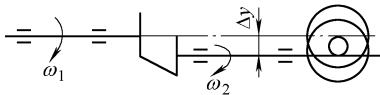


图 2-15 联轴器平行不对中

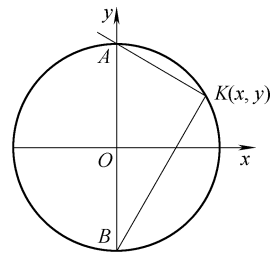


图 2-16 联轴器齿套运动分析

② 偏角不对中。

当转子轴线之间存在偏角位移时,如图 2-17 所示,从动转子与主动转子的角速度是不同的。从动转子的角速度为

$$\omega_2 = \omega_1 \cos \alpha / (1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi_1) \quad (2-25)$$

式中 ω_1, ω_2 ——主动转子和从动转子的角速度;

α ——从动转子的偏斜角；

φ_1 ——从动转子的转角。

从动转子每转动一周其转速变化两次，如图 2-18 所示，变化范围为

$$\omega_1 \cos \alpha \leq \omega_2 \leq \omega_1 / \cos \alpha \quad (2-26)$$

偏角不对中使联轴器附加一个弯矩，弯矩的作用是力图减小两轴中心的偏角。转轴每旋转一周，弯矩作用方向交变一次，因此，不对中增加了转子的轴向力，使转子产生工频振动。

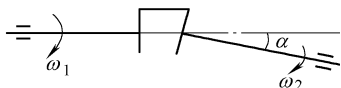


图 2-17 联轴器偏角不对中

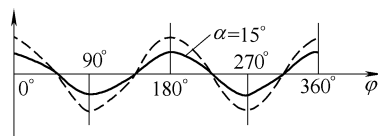


图 2-18 转速比的变化曲线

③ 综合不对中。

在实际生产中，轴系转子之间的对中情况往往是既有平行位移不对中，又有角度不对中的综合不对中，因而转子振动的机理是两者的综合结果。当转子既有平行位移不对中又有角度不对中时，其动态特性比较复杂。激振频率为角频率的 2 倍；激振力的大小随速度而变化，其大小和综合不对中量 Δy 、 $\Delta \alpha$ 、安装距离 ΔL 以及中间齿套质量 m 等有关。联轴器两侧同一方向的激振力之间的相位差在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围。其他故障物理特性也介于轴线平行不对中和角度不对中之间。

同时齿式联轴器由于所产生的附加轴向力以及转子偏角的作用，从动转子以每旋转一周为周期，在轴向往复运动一次，因而转子轴向振动的频率与角频率相同，如图 2-17 所示。

2) 刚性联轴器连接转子不对中的故障机理。

刚性联轴器连接的转子对中不良时，由于强制连接所产生的力矩，不仅使转子发生弯曲变形，而且随转子轴线平行位移或轴线角度位移的状态不同，其变形和受力情况也不一样，如图 2-19 所示。

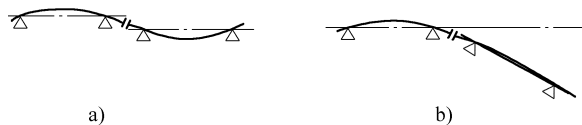


图 2-19 刚性联轴器连接不对中的情况

a) 轴线平行位移 b) 轴线角度位移

用刚性联轴器连接的转子不对中时，转子往往是既有轴线平行位移，又有轴角度位移的综合状态，转子所受的力既有径向交变力，又有轴向交变力。弯曲变形的转子由于转轴内阻现象以及转轴表面与旋转体内表面之间的摩擦而产生的相对滑动，使转子产生自激旋转振动，而且当主动转子按一定转速旋转时，从动转子的转速会产生周期性变动，每转动一周变动两次，因而其振动频率为转子振动频率的 2 倍。

3) 轴承不对中的故障机理。

轴承不对中实际上反映的是轴承坐标高和左右位置的偏差。由于结构上的原因，轴承在水平方向和垂直方向上具有不同的刚度和阻尼，不对中的存在加大了这种差别。虽然油膜既

有弹性又有阻尼，能够在一定程度上弥补不对中的影响，但不对中过大时，会使轴承的工作条件改变，在转子上产生附加的力和力矩，甚至使转子失稳或产生碰摩。

轴承不对中同时又使轴颈中心和平衡位置发生变化，使轴系的载荷重新分配，负荷大的轴承油膜呈现非线性，在一定条件下出现高次谐波振动；负荷较轻的轴承易引起油膜涡动进而导致油膜振荡。支撑负荷的变化还会使轴承的临界转速和振型发生改变。

工程中常用的齿式联轴器连接不对中的转子系统，其振动主要特征如下：

- ① 故障的特征频率为其基频的 2 倍。
- ② 由不对中故障产生的对转子的激励力随转速的升高而加大，因此，高速旋转机械应更加注重转子的对中要求。
- ③ 激励力与不对中量成正比，随不对中量的增加，激励力呈线性增大。
- ④ 联轴器同一侧相互垂直的两个方向，2 倍频的相位差是基频的 2 倍；联轴器两侧同一方向的相位在平行位移不对中时为 0° ，在角位移不对中时为 180° ，综合位移不对中为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。
- ⑤ 轴系转子在不对中情况下，中间齿套的轴心线相对于联轴器的轴心线产生相对运动，在平行位移不对中时的旋转轮廓为一圆柱体，角位移不对中时为一双锥体，综合位移不对中时是介于二者之间的形状。旋转体的旋转范围由不对中量决定。
- ⑥ 轴系具有过大的不对中量时，会由于联轴器不符合其运动条件而使转子在运动中产生巨大的附加径向力和附加轴向力，使转子产生异常振动，轴承过早损坏，对转子系统具有较大的破坏性。

3. 碰摩

动静碰摩振动是指转子在高速旋转的情况下，大轴局部表面与静止部件如汽封、轴封等发生摩擦，使该部位的转子表面温度急剧上升，与周围金属产生温差，引起转子热弯曲，当金属膨胀所引起的热应力超过材料的屈服极限时，转子产生塑性变形，引起永久弯曲。

(1) 单盘转子系统摩擦振动机理 单盘转子阻尼系统的特性方程为

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f\sin \omega t \quad (2-27)$$

可得方程的解

$$v = \frac{e\cos(\omega t - \alpha)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_k}\right)^2\right]^2 + \frac{4\omega\varepsilon}{\omega_k^2}}} \quad (2-28)$$

式中 m ——转子质量；
 c ——阻尼系数；
 e ——偏心。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2\omega\varepsilon}{\omega_k^2 - \omega^2}\right) \quad (2-29)$$

且 $\omega^2 = \frac{k}{m}$, $\varepsilon = \frac{2c}{m}$

1) 临界转速前的摩擦振动。

临界转速前，即 $\omega \leq \omega_k$ ，转子的动挠度 y 随着转速成平方地增加，一旦动平衡或起动前存在的原始弯曲所引起的动挠度超过机组预留的径向间隙时，就会发生动静摩擦，摩擦点逐

渐积聚热量,产生新的热弯曲。从式(2-21)可知,此时摩擦高位与转子质量偏心间的相角差 $\alpha \leq 90^\circ$ 或将近 0° ,说明该热弯曲与转子原来的偏心方向一致,相互叠加。偏心引起摩擦,摩擦热弯曲进一步加大偏心,形成恶性循环,可以在短时间内使动挠度大大增加;另一方面,由于摩擦高位与转子质量偏心间的相角差是随转速的升高而增大的,转子质量偏心方向是恒定的,相角的变化意味着摩擦点的变化,摩擦点的变化将障碍摩擦点热量的积聚,减缓转子的热弯曲。

2) 大于临界转速范围的摩擦振动。

大于临界转速范围时,即 $\omega > \omega_k$,从式(2-22)可知,此时摩擦高位与转子质量偏心间的相角差 $\alpha > 90^\circ$,随转速的上升,转子的动挠度(不平衡响应)将减小, α 趋于 180° ,使摩擦产生的热弯曲与转子原来的偏心方向相反,摩擦产生的热弯曲有抵消原始不平衡的趋势,使转子的动挠度减小,动挠度的变小又将减轻摩擦,形成良性循环。

(2) 实际转子系统摩擦振动机理的分析 实际转子系统通常由多级叶轮组成,其摩擦可能发生在转子的中部,也可能发生在转子的两端,发生在转子中部的摩擦弯轴振动具有单盘转子系统摩擦弯轴的机理。

发生在转子两端的摩擦弯轴振动,在转子第一临界转速以下机理同上,但在转子第一临界转速以上的摩擦弯轴需分两个区段来分析,一段是一阶振型未消退而二阶振型尚未起主振型区间,其机理同单盘转子的分析;另一段是一阶振型基本消除,二阶振型起主导作用的阶段,其摩擦弯轴振动的机理似乎有悖于传统的摩擦弯轴振动机理,因为此阶段转子两端动挠度随转速的增加而增加,摩擦高位与转子质量偏心间的相角差 $\alpha \leq 90^\circ$,其实不然,因为摩擦点发生在转子的两端,只要将临界转速理解为转子第二临界转速,一切皆符合摩擦弯轴振动的机理。

(3) 现场转轴摩擦部位的判别 摩擦弯轴部位的判别类同于转子不平衡质量部位的判别,所不同的是不平衡部位的判别用的是机组工作转速下的基频振动,而摩擦弯轴部位的判别所用的是机组某一转速运行时振动的变化量,即当转子两端振动同向分量增加较大、反向分量增加较小时,其摩擦弯轴应在转子的中部;反之,当转子两端振动反向分量明显增加、同向分量增加不多时,摩擦弯轴应在转子的两端;两者同时变化时,其摩擦弯轴可能是转子的某一段。

动静碰摩有下列的特征:

1) 热弯曲将产生新的不平衡力,因此振动信号的主频是工频,但是由于受到冲击和一些非线性因素的影响,也会出现少量分频、倍频和高频成分。

2) 摩擦时振动的幅值和相位都具有波动特性。幅值波动一般为 $30 \sim 40 \mu\text{m}$,有时只有 $15 \sim 25 \mu\text{m}$ 。

3) 摩擦严重时,振幅和相位不再波动,振幅会急剧增大。

4) 振幅波动和不稳定持续很长时间。

5) 降速过临界时的振动一般较正常升速时大得多。

6) 发生碰摩时,由于转子产生热弯曲,转子中心必然会偏离原来的中心线,引起轴颈的静态位置发生变化,可以从间隙电压变化图中看出。

7) 额定转速没有发生碰摩时,振动高点滞后于不平衡质量点一个与机组转速相关的固定角度;碰摩发生时,转轴与静子的接触点必定是高点,高点侧局部加热使得转子要向高点

方向弯曲，从而在反转向位置产生一个附加的不平衡质量，它与转子原有不平衡质量合成后的新的不平衡质量要逆转一个角度。高点滞后于不平衡质量点的角度是固定不变的，不平衡质量的逆转使得高点也要同时逆转，这样就造成了碰摩过程中振动相位的连续变化。

4. 松动

风机转子支撑系统，在轴承套和壳体之间的配合具有较大的间隙或配合过盈不足的情况下，如图 2-20 所示，轴承套因为受到转子离心力的作用，将会沿着圆周方向产生周期变形，从而导致轴承的几何参数发生改变而影响油膜的稳定性；如果轴承座的螺栓紧固不牢，因为结合面上出现间隙，系统就会产生不连续位移。

图 2-21 是一个典型的转子支撑系统，设支撑系统的右端轴承出现配合松动，间隙量是 Δ 。如果不考虑转轴的质量，可以把间隙 Δ 折算到圆盘上记做 C_0 。那么，转子的运动方程可记为

$$m\ddot{x} + k\dot{x} = F(x) + Q_x \tag{2-30}$$
$$F(x) = \begin{cases} kC_0 & (x > C_0) \\ kx & (-C_0 < X < C_0) \\ -kC_0 & (x < -C_0) \end{cases} \tag{2-31}$$

式中 x ——圆盘质心位移；
 Q_x ——作用于圆盘的外力；
 k ——转子支撑刚度；
 m ——圆盘质量。

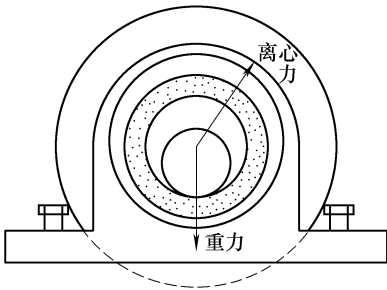


图 2-20 机械松动

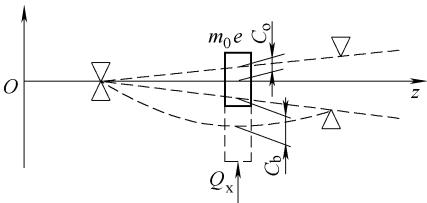


图 2-21 具有机械松动的转子支撑系统

转子弹性恢复力如图所示。进行谐波分析，设

$$Q_x = \sum_{n=0}^N Q_{xn} e^{in\omega t} \quad (n = 1, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, 1, 2, 3, \dots, n) \tag{2-32}$$

无量纲化，设转子静变形

$$C_b = mg/R \tag{2-33}$$

转子固有频率

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2-34}$$

转速比

$$\lambda = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2-35)$$

转子偏心率

$$\alpha = \frac{e}{C_b} \quad (2-36)$$

间隙比

$$\beta = \frac{C_0}{C_b} \quad (2-37)$$

将式 (2-32) 代入式 (2-30) 求解, 可以得出以下结论:

1) 当 $\lambda = 0.75$ 时, 转子系统会不会进入非线性状态和转子偏心率 α 与转速比 λ 相关。如果 α 及 λ 比较小时, 转子的振动响应就会小于转子的静变形, 那么这个时候转子支撑松动对转子的运行状态影响比较小。

2) 当 $\lambda = 0.792$ 时, 假定 $\alpha = 0.7$, $\beta = 0.5$, 降落在非线性区域内, 转子支撑系统就是一个非线性系统, 振动响应除基频以外, 还会包含 2 倍频、3 倍频等的高频谐波。

3) 当 $\lambda = 0.75 \sim 2$ 时, 若 $\alpha = 0.7$, $\beta = 0.5$, 则转子支撑系统为非线性系统, 基频振幅随转速比 λ 而变化。当 $\lambda < 1$ 时, 转子支撑松动的振动较大, 稳定性较大; 而当 $\lambda > 1$ 时, 转子支撑松动的振动反而较小, 但是一定条件下可能会发生 $1/2$, $1/4$ 等偶分数次谐波的共振现象。会不会出现共振现象和转子偏心率 α 与转速比 λ 有关。

转子支承部件松动的特征: ①时域波形存在基频、分频和高次谐波叠加成分。②频域谱含有基频和分频, 并常伴有倍频成分。③振动信号轴心轨迹紊乱。④存在壳体剧烈振动现象。

5. 油膜涡动及振荡

转子轴颈在滑动轴承内做高速旋转运动的同时, 随着运动楔入轴颈与轴承之间的油膜压力发生周期性变化, 迫使转子轴心绕某个平衡点作椭圆轨迹的公转运动, 这个现象称为涡动。当涡动的激励力为油膜力时, 涡动是稳定的, 其涡动角速度是转运角速度的 $0.43 \sim 0.48$, 所以又称为半速涡动。当油膜涡动的频率接近转子轴系中某个自振动频率时, 引发大幅度的共振现象。油膜对转子的作用力包括由转轴旋转引起的切向力以及油膜对转子的挤压力, 其中涡动力会引起转子的涡动, 称为油膜涡动, 当这涡动力频率与转子固有频率接近时, 就会引起油膜振荡。油膜涡动和油膜振荡都是因为轴承的膜力学特性导致的自激振动。

设转子以角速度 Ω 转动, 转子轴颈中心 O' 偏离轴承中心 O , 轴颈和轴承的间隙沿周向是不均匀的。润滑油被轴颈带动, 顺着转动方向较宽的间隙流进较窄的间隙而形成油楔, 对轴颈有挤压作用。当润滑油从较窄的间隙流到较宽的间隙时, 因出现空穴而对轴颈有负压力。轴承的全部油膜对轴颈的总压力 F 位于挤压的一侧并朝向轴颈中心 O' , 将 F 力分解为径向力 F_e 和切向力 F_ψ 。径向力 F_e 起支承轴颈的作用, 相当于转轴的弹性力; 切向力 F_ψ 垂直于 O' 的径向并顺着转动方向, 使 O' 的速度增大, 因而使径向 OO' 增大, 这个力会使轴颈运动失稳, 如图 2-22 所

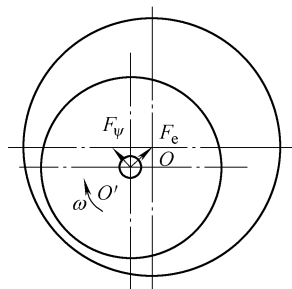


图 2-22 转子在轴承中的受力状态

示。

当轴承油膜所受载荷较小时，可以近似认为径向力 $F_e = 0$ 。在此条件下，以极坐标 e 、 ψ 表示轴颈中心 O' 的位置，则 O' 的运动微分方程为

$$m\ddot{e} - m\dot{e}\dot{\psi}^2 = 0 \quad (2-38)$$

$$m\dot{e}\dot{\psi} + 2m\dot{e}\dot{\psi} = F_\psi \quad (2-39)$$

式中 m ——转轴连同圆盘的质量。

按照 Sommerfeld 理论

$$F_\psi \approx F = \frac{6\pi LR^3}{C^3} \eta \Omega - 2\dot{\psi}e = B\Omega - 2\dot{\psi}e \quad (2-40)$$

式中 L ——轴承长度；

R ——轴颈半径；

η ——润滑油的动力粘性系数；

C ——轴颈和轴承之间的间隙。

也就是说，切向力 F_ψ 与轴承长度 L 、轴颈半径 R 、润滑油的动力粘性系数 η 和轴颈和轴承之间的间隙 C 有关，由于轴颈的运动失稳是由切向力 F_ψ 引起的，因此转子系统振动也与这些因素有关。具体的影响是：可以通过适当地减小转子的轴承间隙、轴承长径比和润滑油粘度的办法，使转子系统发生油膜振荡的转速向后推移，从而提高转子系统的稳定性。

由式 (2-38)、式 (2-39) 可得

$$\dot{e} - e\dot{\psi}^2 = 0 \quad (2-41)$$

$$e\dot{\psi} + 2\dot{e}\dot{\psi} - \frac{B}{m}(\Omega - 2\dot{\psi})e = 0 \quad (2-42)$$

这是非线性微分方程，作为第一次近似解，可设

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= \omega = \text{常数} \\ e &= e_0 e^{v t} \end{aligned}$$

由式 (2-41)，得

$$v^2 - \omega^2 = 0$$

得

$$\omega = \pm v$$

由式 (2-42)，得

$$v = -\frac{B}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{2m}\right)^2 \pm \frac{B}{2m}\Omega} \quad (2-43)$$

稳定运动的条件是 v 的实部小于零，当 $\Omega > \frac{B}{2m}$ 时，有

$$v = -\frac{B}{2m} + \sqrt{\left(\frac{B}{2m}\right)^2 + \frac{B}{2m}\Omega} > 0$$

运动是不稳定的，轴颈出现涡动，其角频率为

$$\omega = v = \frac{B}{2m} \left(\sqrt{1 + \frac{2m}{B}\Omega} - 1 \right) \quad (2-44)$$

实际轴承的轴颈半径 R 和间隙 C 的比值相当大, 常数 $B = 6\pi L\eta (R/C)^3$ 是很大的数, 而 $(2m/B)\Omega$ 通常小于 1, 可以认为

$$\omega \approx \frac{B}{2m} \left[\left(1 + \frac{m}{B}\Omega \right) - 1 \right] = \Omega/2 \quad (2-45)$$

由式 (2-45) 可见, 引起油膜涡动的准确频率略小于转动角速度的一半, 这个涡动称为半速涡动。

由于在油楔的入口区和出口区流量、速度变化, 而且流入轴承中的液压油在轴承两端有泄漏, 因此有

$$\omega < 0.5\Omega$$

实际上, 涡动频率一般为

$$\omega = (0.43 \sim 0.48)\Omega$$

油膜振荡的失稳转速因轴瓦承受不同的载荷而有较大的差别, 当轴承载荷较轻时, 转子在第一阶临界转速前发生半速涡动, 当转速达到第一的临界转速的 2 倍时, 发生油膜振荡, 如图 2-23a 所示。当轴承载荷中等时, 转子半速涡动发生在一阶临界转速的 1 倍和 2 倍之间; 当转子转速超过 2 倍第一阶临界转速后, 发生油膜振荡, 如图 2-23b 所示。当轴承载荷较重时, 转子在发生油膜振荡之前没有出现半速涡动, 直到转速高于 2 倍一阶临界转速才发生油膜振荡, 如图 2-23c 所示。

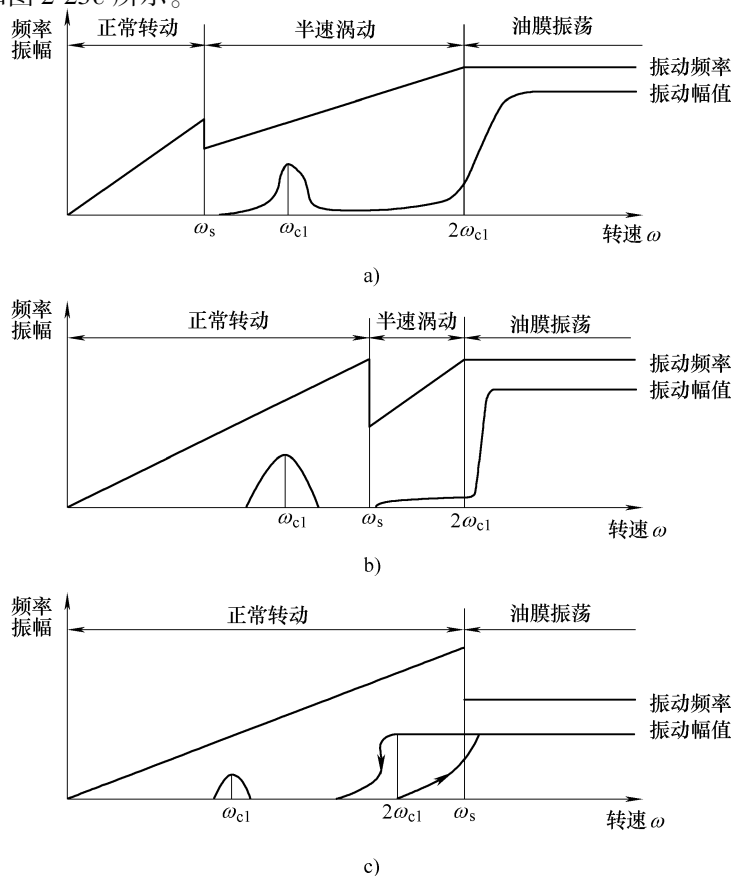


图 2-23 轴瓦自激振动转速特性曲线

其振动特征如下：

- 1) 只有在角频率 Ω 大于第一阶临界角频率 ω_{c1} 的情况下，才有可能发生自激振动（即涡动）。
- 2) 在一般情况下，自激振动频率基本等于转子固有频率 ω_n 。
- 3) 事实上，自激振动并不是共振现象，在很多情况下，它随时有可能在转速的大范围内出现，而且一般情况下都不能确定这个范围的上限。
- 4) 会不会出现自激振动的界限是由轴承设计决定的，最不利情况的界限是失稳转速的下限，大概是临界转速的 2 倍。
- 5) 自激振动是非常激烈的，在一般情况下，它的振幅通常要比转子不平衡引起的共振振幅大。
- 6) 自激振动属于正向涡动，它的转动方向和转子的转动方向相同。
- 7) 随着转子转速的升高，自激振动通常都会延迟，也就是说并不是转速一达到失稳转速的下限就会发生，而是在大于失稳转速的下限时发生。转子转速升得越快，自激振动就越要延迟。
- 8) 自激振动发生后，如果转子转速下降，在转速降低到低于升速时开始发生自激振动的过程中，自激振动会一直保持着，即使在升速比较低而自激振动又没有延迟的情况下也是如此。

6. 轴裂纹

转轴横向裂纹的振动响应与裂纹所处的位置、裂纹深度及受力情况有关。它的主要特征如下：

振动带有非线性性质，出现旋转频率的 1 倍、2 倍、3 倍等高倍分量，随裂纹扩展频率在裂纹不断扩大的情况下增大，速度也越来越快；相位角波动很不规则；会有共振；2 倍频的椭圆；随转速、油温、温度、压力、负荷、流量等振动变化不明显。

7. 失稳

中、小型高速旋转机械多采用滚动轴承支承刚性转子，其故障激励与转速同步，因此产生的振动称为同步振动。而大型高速旋转机械广泛采用流体动压润滑滑动轴承支承柔性转子，以获得较好的抗振性和较长的工作寿命，其故障多与轴承密封装置的流体动压失稳及工作介质工况失稳有关，由此激起的振动属于自激振动，即振动过程中由于系统内部不断有能量输入而产生的共振现象。

滚动轴承故障机理主要是由于设计不当或零件加工、安装工艺不好，或突加载荷影响，滚动轴承承载运转一段时间后会产各种各样的缺陷，继续运转导致缺陷进一步扩大，轴承运转形态恶化以致完全失效。失效部位有滚道、滚动体、保持架、座孔或安装轴承的轴颈，原因在于机械因素引起表面磨损、润滑油中水分使元件表面产生化学腐蚀、润滑油中含有金属使轴承元件表面形成压坑、承受反复载荷而产生疲劳点蚀、剥落或裂纹，甚至导致轴承破断。轴承元件的缺陷在运行中产生低频脉动，由此激起的振动可展为渐减的无穷简谐级数，基频即为脉动频率。

8. 喘振与旋转失速

喘振会导致设备各类零件的损坏。它也是流体机械特有的振动故障之一。当进入叶轮的气体流量减少到某一最小值时，气流的分离区扩大到整个叶轮流道，使气流无法通过。喘振

是压力波在管网和压缩机之间来回振荡的现象，其强度和频率不但和压缩机中严重的旋转脱离气团有关，还和管网容量有关：管网容量越大，则喘振振幅越大，频率越低；管网容量越小，则喘振振幅越小，频率也越高，一般为 $0.5 \sim 20\text{Hz}$ 。

旋转失速时域波形为各成分叠加波形；振动频率出现成对的次谐波成分；常伴频率为组合频率，振动波动或波动幅度都较大；振动方向为径向；相位特征不稳定；旋转机械的轴心轨迹不稳定，进动为反向等。

高速旋转机械的振动信号中含有设备运行工况的丰富信息，体现在振动功率谱的各频率分量中。频域分析是解释、诊断高速旋转机械故障的重要手段，通过它可辨别出各种振动频率的幅值大小和引起振动的主要频率成分，从而在多数情况下推断出振动原因、故障类型。

第3章 信号分析方法及旋转机械故障分析实验设计

3.1 信号分析方法

测试信号中携带着人们所需要的有用信息，也常常包含有大量人们不感兴趣的其他信息，后者常被称为干扰噪声。对测试信号的分析处理，其目的是改变信号的形态，便于滤除干扰噪声、提取有用信息、对信号进行分析和识别。

传统的信号分析方法(如傅里叶分析)要么完全在时域，要么完全在频域，因此无法表述信号的时频局域性质，而这种性质恰恰是非平稳信号最根本和最关键的性质。为了较好地分析和处理非平稳信号，人们对傅里叶变换进行了推广乃至根本性的革命，提出并发展了一系列新的信号分析理论：短时傅里叶变换、Gabor 变换、时频分析、小波变换等。

3.1.1 傅里叶变换

傅里叶变换是时域、频域互相转化的工具，从物理意义上说，一个波形的傅里叶变换的实质是：把这个波形(信号)分解成许多个不同频率的正弦波之叠加和。如果这些正弦波之和加起来成为原来的波形，那么就确定了这个波形(信号)的傅里叶变换。从傅里叶变换中可以看到，这些标准基是由正弦波及其高次谐波组成的，因此它是在频域内局部化的。事实上，傅里叶变换频率域包含的信息和原来函数包含的信息完全相同，不同的仅是信息的表示方法。所以傅里叶变换使人们从另一个观点，即变换分析的观点来研究一个函数。

傅里叶积分定义为

$$F(\omega) = \hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) (e^{i\omega t})^* dt \quad (3-1)$$

这里 $*$ 表示共轭， $i = \sqrt{-1}$ 。它的意义是度量 f 在频率 ω 处的振荡信息。如果 $f \in L^1(R)$ ，该积分收敛且满足

$$|\hat{f}(\omega)| \leq \int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)| dt < +\infty \quad (3-2)$$

如果 $\hat{f}$ 也是可积的，其逆傅里叶变换为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (3-3)$$

为了计算傅里叶变换，需要用数值积分，即取 $f(t)$ 在 R 上的离散点上的值来计算这个积分。在实际应用中，要在计算机上实现信号的频谱分析及其他方面的处理工作。对信号的要求是：在时域和频域应是离散的且都是有限长的。

下面给出离散傅里叶变换 DFT(Discrete Fourier Transform)的定义。

当具有 N 个序列值的离散时间信号 $f[n]$ ($n=0, 1, \dots, N-1$) 给定时，下式变换

$$\hat{f}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] \exp\left(-i \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-4)$$

就称为 f 的离散傅里叶变换。它的反变换由式

$$f[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{f}(k) \exp\left(i \frac{2\pi nk}{N}\right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3-5)$$

给出，称之为离散傅里叶反变换。

在 DFT 的实际应用中往往使用 DFT 的快速算法，即 FFT (Fast Fourier Transform) 算法。因为对有 N 个点的信号 f ，直接计算其离散傅里叶变换需要 N^2 次乘法与加法运算。通过重新组织计算，快速傅里叶变换 (FFT) 算法可将计算复杂度降至 $o(N \log_2 N)$ ，大大加快了变换处理的速度。

对于确定性信号和平稳随机过程来说，傅里叶变换是信号分析与处理技术的基础，起着重大作用。但是，虽然傅里叶变换能够将信号的时域特征和频域特征联系起来，能分别从信号的时域和频域观察，却不能将二者结合起来。这是因为信号的时域波形中不包含任何频域信息，而信号的傅里叶功率谱中也无法确定给定频率发生的时刻，因为傅里叶功率谱是信号的统计特性，没有局部化分析信号的功能，完全不具备时域信息。这样在信号分析中就面临一对基本的矛盾——时域和频域局部化的矛盾。

在实际的信号处理中，尤其是对非平稳信号的处理中，信号在任一时刻附近的频率特征都很重要，这就促使人们去寻找一种新的方法，能将时域和频域结合起来描述观察信号的时频联合特征，构成信号的时频谱。这就是所谓的时频分析法，亦称为时频局域化方法。

3.1.2 小波变换

1. 小波分析

由基本小波或母小波 $\psi(t)$ 通过伸缩 a 和平移 b 产生一个函数族 $\{\psi_{b,a}, (t)\}$ ，

$$\psi_{b,a}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3-6)$$

称为小波。这里 $a^{-1/2}$ 可保证在伸缩过程中能量归一。信号 $x(t)$ 的小波变换为

$$WT_x(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(t - \frac{b}{a}\right) dt \quad (3-7)$$

对照式(3-1)，可见小波变换是用小波基函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 代替傅里叶变换中的基函数 $e^{i\omega t}$ 以及短时傅里叶变换中基函数 $h(t-\tau)e^{j2\pi f t}$ ，而 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 有极其丰富的连续和离散形式，包括 $e^{j2\pi f t}$ 的三角基函数。小波变换的实质就是以基函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的形式将信号 $x(t)$ 分解为不同频带的子信号。

对信号 $x(t)$ 在尺度上进行变化，即 $x(t) \rightarrow x(at)$ ，这里尺度因子 $a > 0$ 。如果 $a > 1$ ，则信号波形收缩；反之，若 $a < 1$ ，则波形伸展。现在式(3-7)通过变量置换可改写为

$$WT_x(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(at) \psi^*\left(t - \frac{b}{a}\right) dt \quad (3-8)$$

式(3-7)表明，当尺度因子 a 增加，函数 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ (滤波器脉冲响应) 在时域中伸展，可计及信号更长时间的行为。式(3-8)表明，随着尺度因子 a 的增加，通过一个恒定的滤波器

$\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 观察到被压缩了的信号波形 $x(at)$ 。显而易见,尺度因子 a 解释了信号在变换过程中尺度的变化,用大尺度可观察信号的总体,用小尺度可观察信号的细节。这便是它优于经典的傅里叶变换与短时傅里叶变换的地方。从总体上看,小波变换比短时傅里叶变换具有更好的时频窗口特性。

2. 连续小波变换

设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$, 当满足允许条件(完全重构条件或恒等分辨率条件):

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3-9)$$

时,称为一个基本小波或母小波(Mother Wavelet)。将母函数经伸缩和平移后得

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (3-10)$$

称为一个小波序列。

式中 a ——伸缩因子;

b ——平移因子。

对任意的函数的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3-11)$$

其重构公式为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (3-12)$$

由于基小波生成的小波 $\psi_{a,b}(t)$ 在小波变换中对被分析的信号起着观测窗的作用,所以还应该满足一般函数的约束条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)| dt < \infty$$

故 $\hat{\psi}(\omega)$ 是一个连续函数,这意味着,为了满足完全重构条件, $\hat{\psi}(\omega)$ 在原点必须等于0,即

$$\hat{\psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3-13)$$

为了使信号重构的实现在数值上是稳定的,除了完全重构条件外,还要求小波 $\psi(t)$ 的傅里叶变换满足下面的稳定性条件:

$$A \leq \sum_{j=-\infty}^{\infty} |\hat{\psi}(2^{-j}\omega)|^2 \leq B$$

式中, $0 < A \leq B < \infty$ 。

连续小波变换具有以下重要性质:

- 1) 线性: 一个多分量信号的小波变换等于各个分量的小波变换之和。
- 2) 平移不变性: 若 $f(t)$ 的小波变换为 $W_f(a, b)$, 则 $f(t - \tau)$ 的小波变换为 $W_f(a, b - \tau)$ 。
- 3) 伸缩共变性: 若 $f(t)$ 的小波变换为 $W_f(a, b)$, 则 $f(ct)$ 的小波变换为 $\frac{1}{\sqrt{c}} W_f(ca, cb)c$

>0。

4) 自相似性: 对应不同尺度参数 a 和不同平移参数 b 的连续小波变换之间是自相似的。

5) 冗余性: 连续小波变换中存在信息表述的冗余度。

连续小波变换的冗余性事实也是自相似性的直接反映, 它主要表现在以下两个方面:

1) 由连续小波变换恢复原信号的重构公式不是唯一的。也就是说, 信号 $f(t)$ 的小波变换与小波重构不存在一一对应关系, 而傅里叶变换与傅里叶反变换是一一对应的。

2) 小波变换的核函数即小波函数 $\psi_{ab}(t)$ 存在许多可能的选择(例如, 它们可以是非正交小波、正交小波、双正交小波, 甚至允许是彼此线性相关的)。

3. 离散小波变换

在实际运用中尤其在计算机上实现, 连续小波必须加以离散化。因此, 有必要讨论连续小波 $\psi_{a,b}(t)$ 和连续小波变换 $W_f(a, b)$ 的离散化。这一离散化都是针对连续的尺度参数 a 和连续平移参数 b 的, 而不是针对时间变量 t 的。

把连续小波变换中尺度参数 a 和平移参数 b 的离散化公式分别取作 $a = a_0^j$, $b = ka_0^j b_0$, 这里 $j \in \mathbb{Z}$, 扩展步长 $a_0 \neq 1$ 是固定值。对应的离散小波函数 $\psi_{j,k}(t)$ 即可写作

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) = a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (3-14)$$

而离散化小波变换系数则可表示为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (3-15)$$

其重构公式为

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3-16)$$

式中 C ——与信号无关的常数。

4. 多分辨率分析

Meyer 于 1986 年创造性地构造出具有一定衰减性的光滑函数, 其二进制伸缩与平移构成 $L^2(R)$ 的规范正交基, 才使小波得到真正的发展。

S. Mallat 在构造正交小波基时提出了多分辨率分析 (Multi-Resolution Analysis) 的概念, 从空间的概念上形象地说明了小波的多分辨率特性, 将此前的所有正交小波基的构造方法统一起来, 给出了正交小波的构造方法以及正交小波变换的快速算法, 即 Mallat 算法。

关于多分辨率分析的理解, 这里以一个三层的分解进行说明, 其小波分解树如图 3-1 所示。

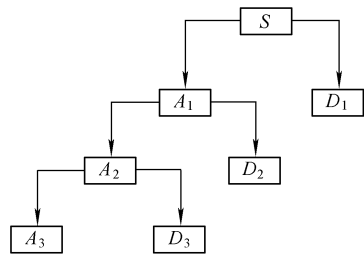


图 3-1 三层多分辨率分析结构图

从图 3-1 可以明显看出, 多分辨率分析只是对低频部分进行进一步分解, 而高频部分则不予考虑。分解的关系为 $S = A_3 + D_3 + D_2 + D_1$ 。这里只是以一个层分解进行说明, 如果要进行进一步的分解, 则可以把低频部分 A_3 分解成低频部分 A_4 和 高频部分 D_4 。以下再分解依次类推。

空间 $L^2(R)$ 中的多分辨率分析是指 $L^2(R)$ 中满足如下条件的一个空间序列 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$:

1) 单调性: $V_j \subset V_{j+1}$, 对任意 $j \in \mathbb{Z}$ 。

2) 逼近性: $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j \in \{0\}$, $\text{close} \left\{ \bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j \right\} = L^2(R)$ 。

3) 伸缩性: $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}$ 。

4) 平移不变性: 对任意 $k \in \mathbb{Z}$, 有 $\phi_j(2^{-j/2}t) \in V_j \Rightarrow \phi_j(2^{-j/2}t - k) \in V_j$ 。

5) Riesz 基存在性: 存在 $\phi(t) \in V_0$, 使得 $\{\phi_j(2^{-j/2}t - k) \mid k \in \mathbb{Z}\}$ 构成 V_j 的 Riesz 基。

对于条件 5), 可以证明, 存在函数 $\phi(t) \in V_0$ 使它的整数平移系 $\{\phi_j(2^{-j/2}t - k) \mid k \in \mathbb{Z}\}$ 构成 V_j 的规范正交基, 称 $\phi(t)$ 为尺度函数。定义函数为

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (3-17)$$

则函数系 $\{\phi_{j,k}(t) \mid k \in \mathbb{Z}\}$ 是规范正交的。

对于子空间 $V_j \in V_{j-1}$, 它的正交补空间设为 W_j , 即有

$$V_j \oplus W_j = V_{j-1} \quad j \in \mathbb{Z} \quad (3-18)$$

与 V_j 的情况一样, 存在一个确定的函数 $\psi(t) \in W_0$, 称之为小波函数, 函数系 $\{\phi_{j,k}(t) \mid k \in \mathbb{Z}\}$ 构成 W_j 的规范正交基。

从包容关系 $V_0 \subset V_{-1}$ 很容易得到尺度函数 $\phi(t)$ 的一个极为有用的性质。注意到 $\phi_{0,0}(t) \in V_0 \subset V_{-1}$, 所以 $\phi(t) = \phi_{0,0}(t)$ 可以用 V_{-1} 子空间的基函数 $\phi_{-1,k}(t) = 2^{1/2} \phi(2t - k)$ 展开, 令展开系数为 $h(k)$, 则

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \phi(2t - k) \quad (3-19)$$

这就是尺度函数的双尺度方程。

另一方面, 由于 $V_{-1} = V_0 \oplus W_0$, 故 $\psi(t) = \psi_{0,0}(t) \in W_0 \subset W_{-1}$, 这意味着小波基函数 $\psi(t)$ 可以用 V_{-1} 子空间的正交基 $\phi_{-1,k}(t) = 2^{1/2} \phi(2t - k)$ 展开, 令展开系数为 $g(k)$, 即有

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \phi(2t - k) \quad (3-20)$$

这就是小波函数的双尺度方程。

双尺度方程式(3-19)和式(3-20)表明, 小波基 $\psi_{j,k}(t)$ 可由尺度函数 $\phi(t)$ 的平移和伸缩的线性组合获得, 其构造归结为滤波器 $H(\omega)$ ($h(k)$ 的频域表示) 和 $G(\omega)$ ($g(k)$ 的频域表示) 的设计。

5. 小波包分析

短时傅里叶变换对信号的频带划分是线性等间隔的。多分辨分析可以对信号进行有效的时频分解, 由于其尺度是二进制变化的, 所以在高频段其频率分辨率较差, 而在低频段其时间分辨率较差, 即对信号的频带进行指数等间隔划分(即有等 Q 结构)。小波包分析(Wavelet Packet Analysis)能够为信号提供一种更加精细的分析方法, 它将频带进行多层次划分, 将多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解, 并能够根据被分析信号的特征, 自适应地选择相应频带, 使之与信号频谱相匹配, 从而提高了时-频分辨率, 因此小波包具有更广泛的应用价值。

关于小波包分析的理解, 这里以一个三层的分解进行说明, 其小波包分解树如图 3-2 所示。

图 3-2 中, A 表示低频, D 表示高频, 末尾的序号数表示小波包分解的层数(即尺度数)。分解的关系为

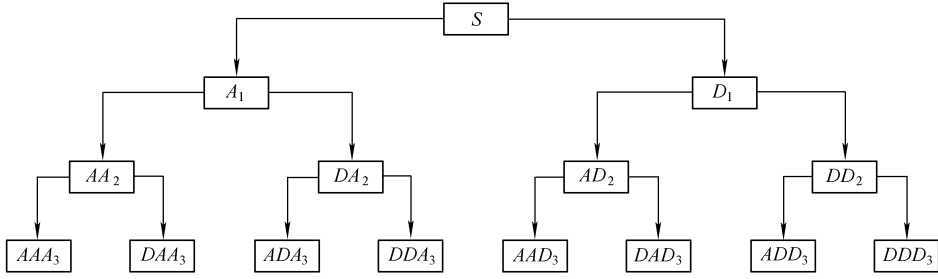


图 3-2 三层小波包树结构图

$$S = AAA_3 + DAA_3 + ADA_3 + DDA_3 + AAD_3 + DAD_3 + ADD_3 + DDD_3$$

(1) 小波包的定义 在多分辨分析中, $L^2(R) = \bigoplus_{j \in Z} W_j$, 表明多分辨分析是按照不同的尺度因子 j 把 Hilbert 空间 $L^2(R)$ 分解为所有子空间 $W_j (j \in Z)$ 的正交和, 其中, W_j 为小波函数 $\psi(t)$ 的闭包(小波子空间)。现在, 希望进一步对小波子空间 W_j 按照二进制分式进行频率的细分, 以达到提高频率分辨率的目的。

一种自然的做法是将尺度子空间 V_j 和小波子空间 W_j 用一个新的子空间 U_j^n 统一起来表征, 若令

$$U_j^0 = V_j \quad j \in Z \quad (3-21)$$

$$U_j^1 = W_j \quad j \in Z \quad (3-22)$$

则 Hilbert 空间的正交分解 $V_{j+1} = V_j \oplus W_j$ 可用 U_j^n 分解统一表示:

$$U_{j+1}^0 = U_j^0 \oplus U_j^1 \quad j \in Z \quad (3-23)$$

定义子空间 U_j^n 是函数 $u_n(t)$ 的闭包空间, 而 U_j^{2n} 是函数 $u_{2n}(t)$ 的闭包空间, 并令 $u_n(t)$ 满足下面的双尺度方程:

$$u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h(k) u_n(2t - k) \quad (3-24)$$

$$u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} g(k) u_n(2t - k) \quad (3-25)$$

式中, $g(k) = (-1)^k h(1-k)$, 即两系数也具有正交关系, 当 $n=0$ 时, 式(3-24)、式(3-25)直接给出

$$u_0(t) = \sum_{k \in Z} h_k u_0(2t - k) \quad (3-26)$$

$$u_1(t) = \sum_{k \in Z} g_k u_0(2t - k) \quad (3-27)$$

与在多分辨分析中, $\phi(t)$ 和 $\psi(t)$ 满足双尺度方程:

$$\phi(t) = \sum_{k \in Z} h_k \phi(2t - k) \quad \{h_k\}_{k \in Z} \in l^2 \quad (3-28)$$

$$\psi(t) = \sum_{k \in Z} g_k \phi(2t - k) \quad \{g_k\}_{k \in Z} \in l^2 \quad (3-29)$$

相比较, 很显然 $u_0(t)$ 和 $u_1(t)$ 分别退化为尺度函数 $\phi(t)$ 和 $\psi(t)$ 小波基函数。式(3-26)、式(3-27)是式(3-23)的等价表示。把这种等价表示推广到 $n \in Z_+$ 非负整数的情况, 即得式(3-24)、式(3-25)的等价表示为

$$U_{j+1}^n = U_j^n \oplus U_j^{2n+1} \quad n \in Z_+, j \in Z \quad (3-30)$$

由式(3-24)、式(3-25)构造的序列 $\{u_n(t)\}$ (其中 $n \in Z_+$) 称为由基函数 $u_0(t) = \phi(t)$ 确定的

正交小波包。当 $n=0$ 时, 即为式(3-26)、式(3-27)的情况。

由于 $\phi(t)$ 由 $h(k)$ 唯一确定, 所以又称 $\{u_n(t)\}_{n \in \mathbb{Z}_+}$ 为关于序列 $\{h(k)\}$ 的正交小波包。

(2) 小波包分解与重构算法 小波包算法的基本思想(参见图 3-2), 是将第一次分解的结果 A_l 部分和 D_l 部分利用二抽取一运算, 保留其偶数部分或奇数部分(即每隔一个数保留一个), 在进行下一步分解时, 不仅将 A_l 部分进行分解, 同时也将 D_l 部分进行分解, 对分解结果仍采用二抽取一运算, 这样无论在低频频段还是在高频频段都具有相同的时频分辨率, 这种空间分解方式可以一直反复进行下去(当然分解次数应小于 L , $2^L = N$, N 为原信号的长度), 频率空间和时域空间被越分越细, 这样反复利用二抽取一运算, 以实现更高的时频分辨率分解。而后对最后一次分解结果的所有数据段进行处理, 即根据需保留所需要的部分频段数据, 将其余部分频段数据置为零, 沿逆向方式进行重构, 获得需要的信息。

设 $g_j^n(t) \in U_j^n$, 则 $g_j^n(t)$ 可表示为

$$g_j^n(t) = \sum_l d_l^{j,n} u_n(2^j t - l) \quad (3-31)$$

小波包分解算法: 由 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 求 $\{d_l^{j,2n}\}$ 和 $\{d_l^{j,2n+1}\}$, 得

$$d_l^{j,2n} = \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1,n} \quad (3-32)$$

$$d_l^{j,2n+1} = \sum_k b_{k-2l} d_k^{j+1,n} \quad (3-33)$$

小波包重构算法: 由 $\{d_l^{j,2n}\}$ 与 $\{d_l^{j,2n+1}\}$ 求 $\{d_l^{j+1,n}\}$ 得

$$d_l^{j+1,n} = \sum_k [h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}] \quad (3-34)$$

3.1.3 小波基函数的选取原则

小波分析方法具备完备的理论基础, 适合于处理非平稳信号, 但小波基函数有很多种, 这给予了工程人员分解信号的灵活性和多变性, 同时也使得小波分解具有复杂性。如何选取合适的小波基函数, 除了考虑小波基函数的连续性、正则性、对称性、正交性外, 还应考虑如下参数:

(1) 小波基的时频窗口的中心和半径 小波分析中的时频窗口的宽度(时域)和高度(频域)是变化的, 但其面积保持不变, 而且只和函数种类有关, 与尺度和位移无关。工程中母函数的时频域局部化能力越强, 小波基的局部化能力也越强。

(2) 小波矩和消失矩 小波消失矩对数据压缩与故障特征提取有着重要的影响。

(3) 线性相位 如果尺度函数和小波函数作为滤波函数, 且它们决定的滤波器具有线性相位, 则能够避免信号在小波分解和重构时失真。

(4) 紧支性和衰减性 紧支性与衰减性是小波的重要性质, 在工程中, 紧支宽度越窄或者衰减越快, 小波的局部化特性越好, 紧支小波不需做人为的截断, 精度很高, 但是一个函数不可能在时域和频域都是紧支的, 最多一个是紧支的, 另外一个为急衰的。在信号作小波变换时, 要求小波在时域和频域都具有紧支性或者急衰性, 而且需要紧支宽度窄或者衰减速度度快。

3.1.4 小波变换的尺度-能量分布

根据上面所述, 应用连续小波变换的方法提取旋转机械的运行状态, 可以将信号转化成

对尺度的表示,其理由如下:

- 1) 在不同的频率和不同的运行模式下信号的能量是不同的。
- 2) 虽然信号经连续小波变换后对时间不太敏感,但是对尺度却很敏感。
- 3) 信号的小波变换尺度域与信号的频率是相对应的,虽然不是准确的频率,但是对应着一个确定的频段。

基于上面所说的性质,可以获得信号在不同尺度下的能量或是与能量对应的值。

根据巴什瓦(Parseval)能量等式和小波变换相关性质可得出信号经连续小波变换在尺度 a 下的能量 E_a 为

$$E_a = \sum_{\tau=1}^n (WT_f(a, \tau))^2 \quad (3-35)$$

随尺度参数 a 的变化,信号的能量也跟着变化。但在实际应用中,可以取连续小波变换系数的模 N_a ,即信号经连续小波变换在尺度 a 下的系数的模以及信号经连续小波变换在尺度 a 下的能量满足下面的关系:

$$X_a = (E_a)^{1/2} \quad (3-36)$$

根据上式可知,用信号连续小波变换的系数的模表征信号与尺度的关系,和用信号经连续小波变换的能量来表示信号与尺度的关系是等价的,但是前者的意义是使同一运行状态不同阶段的数据的特征量的方差较小,有利于后面的故障模式识别。

3.2 旋转机械故障分析实验设计

前面章节对小波分析的一些相关理论和在故障诊断领域的主要应用作了简要介绍,为进行旋转机械的振动测试和故障特征提取实验,下面将针对旋转机械的结构特点,设计旋转机械故障诊断实验装置和实验方案,根据旋转机械的振动特性分析选取合适的小波基函数和振动测试系统。

3.2.1 实验装置及实验方案设计

在旋转机械中,转子是设备的核心部件,它通过轴承支承在轴承座及机壳或基础之上,构成了转子-支承系统。根据旋转机械这一结构特点,采用旋转机械振动监测实验台进行实验。示意图如图 3-3 所示,它主要由模拟转子实验台、传感器、数字测速仪、直流电源、电动机等组成。旋转机械振动监测实验系统如图 3-4 所示。

旋转机械实验台通过联轴器将转子轴和电动机轴连接,由电动机输入动力。电动机为变频电动机,转速可调。

1. 测试对象和部位的选择

在旋转机械中,整个设备是否正常工作主要取决于转子能否正常运转。不过,转子的运动和其他回转件及非回转件是有联系的,许多情况下,轴承的动力学特性在一定程度上会影响转子的运动。但从总体上说,旋转机械的绝大多数故障(大约占 70%)都与转子及其组件

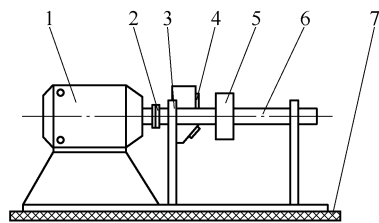


图 3-3 旋转机械振动实验台示意图

1—电动机 2—柔性联轴器 3—轴承座
4—传感器 5—转子 6—转轴 7—底座

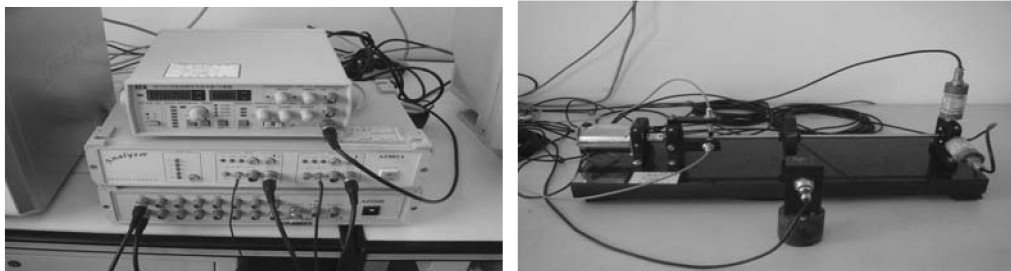


图 3-4 旋转机械振动监测实验系统

(齿轮、轴承)直接有关，而从其他地方能够发现的故障较少。

既然大多数振动故障都直接与转子的运动有关，那么对旋转机械，可以主要从监测转子的振动来发现故障。一般来说，监测转子比监测轴承座或机壳的振动更为直接和有效。在出现故障时，转子上振动比轴承座和外壳要敏感得多，轴颈的相对振动与轴承座的振动有显著的差别，尤其是当支承系统(轴承座、箱体及基础等)的刚度相对来说较大(或说机械阻抗较大)时，轴颈的振动常常比轴承座的振动大几倍到十几倍。

不过，监测转子的振动常常要比监测轴承座或外壳的振动需要更高的测试条件和技术，其中最基本的条件是能够合理地安装传感器。

在本实验中，考虑到传感器的合理安装以及信号传输线的合理布置，同时由于转子转速较高，对传感器的特性会有影响。传感器布置在滑动轴承 1、2 处。

2. 测试点的确定

旋转机械的振动测试一般测试三个方向，即水平方向、垂直方向和轴向方向，这是因为不同的故障在不同的方向上有不同的反映。

径向的两个测点一般是互相垂直安装，水平方向测点以在转轴中心高度为好。若测量轴承座需要注意，一旦测点确定，就应该经常在同一测点测量，测点要作出记号，测点的偏移将导致测量值的极大误差。

在本实验中，主要测试点选择轴承座的水平方向和垂直方向，且水平方向的测点正好在轴的中心高度。

3. 传感器的选择

传感器是实现振动测试的首要环节，如果没有传感器对原始信号进行准确可靠的捕获与转换，则无法实现一切准确测试与控制。所以在进行振动测试时，首先要选择传感器，选择传感器的主要依据是传感器的特性。

振动测试传感器主要有位移传感器、速度传感器和加速度传感器。其中位移传感器输出的电信号正比于振动的位移，这类传感器较适于测量低频振动；速度传感器的速度与振动速度成正比，显然它不适合测量超低频和高频振动。加速度传感器输出的电信号正比于振动加速度，由于高频时振动加速度往往很大，传感器的输出大，故这类传感器较适于测高频振动。

在本实验中，转子转动速度较大，频率较高，故选用加速度传感器。

4. 测试方案

本实验在图 3-3 中的旋转机械振动监测实验台上进行。转子转速 1500r/min(25Hz)，采样频率 1000Hz，采样时间 1s。实验台运行状态有以下几种：

- 1) 正常运行状态。

- 2) 轴承座有轻微松动运行状态。
- 3) 转子与定子有轻微摩擦运行状态。
- 4) 转子不对中运行状态。
- 5) 转子有裂纹(转轴与叶片焊接处裂纹)运行状态。

实验在故障预知的情况下进行,以状态 1)为正常信号样本,对故障状态下振动信号进行分析,与正常信号分析结果对比,得出故障特征,进行模式识别。

3.2.2 小波基函数的选取

小波基函数有多种,只要符合允许条件式(3-9)的函数,都可作为小波的母函数。这样就出现一个问题,如何从多种小波函数中,选取适合分析旋转机械故障信号的小波函数。这个问题具有很强的现实意义。

在前面已经得出结论:故障信号要求小波函数能进行时频分析和多分辨分析。这实际上是要求小波函数有良好的局部分析特性,因此,为了达到这一目的,合适的小波函数应该具有以下一些性能指标:

1) 时频窗口要小,而且时频中心最好在 0 位。小波分析中的时频窗的宽度(时域)和高度(频域)是变化的,但其面积保持不变,而且只和函数种类有关,与尺度和位移无关。时频窗口小,表示有更小的分辨率,分析更为详细。所以,这一要求可以归为,时频窗口面积最小,而且具有接近 0 的时频中心。

2) 要有高的消失矩。高的消失矩表示小波函数尽快地衰减到 0,很明显在时域会有好的分辨率。

3) 在时域和频域中最好在一域中是紧支撑,在另一域中为快速衰减。紧支撑表示小波函数具有很好的局部特性。如果它有紧支集,称小波 $\varphi(t)$ 是紧支的;如果当 $t \rightarrow \infty$ 时,它快速衰减或具有指数规律衰减,称小波 $\varphi(t)$ 是急衰或急降的。紧支性与衰减性是小波的重要性质,紧支宽度越窄或衰减越快,小波的局部化特性越好;紧支小波不需做人为的截断,应用精度很高,但是一个函数不可能在时域和频域都是紧支的,最多有一个是紧支的,另一个是急衰的。在对信号做小波变换时,要求小波在时域和频域都具有紧支性或急衰性,而且需其紧支宽度窄或衰减速度快。

4) 考虑到实际应用,还应该有很好的正交性、对称性和高阶的连续导数。

值得强调的一点是,全部满足以上所述条件的小波函数是不存在的,在选取中,应该有所侧重。这说明在不同应用领域,最合适的小波函数是不可能相同的。如果小波函数在时频是有限支撑而且具有小的时频窗口面积,一般就能够很好地满足对故障信号的分析,所以,在所有要求的条件中,应以这两个条件为主,选择合适的小波函数。下面,就将常见小波函数的特点作一归纳:

① Harr 小波。这个小波具有正交性和对称性。时域中有紧支性,频域中没有,所以,在频域中衰减太慢,局部性变差。只具有 0 阶消失矩,一阶导数不连续。

② Mexican hat 小波。这就是著名的墨西哥草帽小波。它没有正交性,但有对称性。1 阶消失矩,任意阶导数连续。

③ Littlewood Paley 小波。这个小波具有正交性。在频域中有紧支性,时域中没有。只有 0 阶消失矩,但任意阶倒数连续。

④ Meyer 小波。它规范正交，对称，在频域紧支。有任意阶消失矩，任意阶导数连续。

⑤ Daubechies 小波。它具有正交性。在时频和频域都是有限紧支，没有解析式。有限紧支正交小波在信号的小波分解和数据压缩中有着重要作用，在实施中不需要对小波进行人为的切断，具有计算快、精度高等特点。简称 db N ，其消失矩为 N 。其时频窗参数见表 3-1。

⑥ Coifman 小波。它具有正交性和对称性。在时域和频域都是有限紧支。有高阶消失矩(对于 Coinf N 来说，其时域消失矩为 $2N$ ，频域消失矩为 $2N - 1$)。

经过以上几个小波函数的特点分析，Daubechies 小波和 Coifman 小波是最合适的，但考虑到运算的简单程度后，本文选择 db N 系列函数。从理论分析可知， N 越大，其性能越好，但经过实验检验，发现当 $N = 6$ 时，性能很好，如果此时再增大 N 时，性能提高不明显，因此，本文选择 Daubechies6(简称 db6)为适合故障分析的小波基函数。其时频窗参数见表 3-1。

该系统除有传统的随机采样模式外，还具有定点触发采样模式、多次触发采样模式、多时基采样模式等多种采样模式，具有定时采样设定功能，大型实验数据采样时的全自动化管理功能，多组传感器的标定数据科学管理功能。选择不同的采样模式，可以满足工程中各种特殊的采样要求，在进行实验时，对实验台的振动测量采用整周期采样以提高分析精度。

各种信号经过采样之后得到的数字信号通常需要进行各种分析，DASP 系统也提供了非常全面的分析手段，包括幅域、时域、频域、时频域等多种方法。

幅域分析方面有指标统计、峰值计数、变程计数、概率分布和概率密度等，这些方法从不同角度给出了信号幅值变化的特性。

时域分析方面有单踪和多踪时域分析，利萨如图分析和相关性分析。

频域分析方面有自谱分析、互谱分析、传函分析和倒频谱分析等。

时频域分析主要有小波分析，小波分析模块以 Daubechies 小波为基函数进行二进小波变换。根据前节对基函数选择的分析，恰好符合对旋转机械振动测试的要求，故在实验中选择该系统进行数据的采集和分析处理。

表 3-1 小波时频窗参数

小波名	时域窗		频域窗		时频窗口 面积
	中心	半径	中心	半径	
Mexican hat	0.0000	1.0800	0.0000	1.1180	4.8300
Meyer	0.5000	0.6770	2.3700	1.8130	4.9140
Daubechie1	0.4353	0.3308	1.3559	1.5360	2.0325
Daubechie2	0.4793	0.3486	1.3755	1.5822	2.2061
Daubechie3	0.4748	0.4243	1.2911	1.2603	2.1387
Daubechie4	0.4682	0.5000	1.2502	1.1021	2.2040
Daubechie5	0.4597	0.5754	1.2241	1.0290	2.3684
Daubechie6	0.4585	0.6511	1.2118	1.0000	2.6046
Daubechie7	0.4512	0.7237	1.2121	0.9720	2.8137
Daubechie8	0.4446	0.7960	1.2071	0.9665	3.0774
Daubechie9	0.4378	0.8666	1.2038	0.9656	3.3471

(续)

小波名	时域窗		频域窗		时频窗口 面积
	中心	半径	中心	半径	
Daubichie10	0. 4436	0. 9315	1. 2001	0. 9554	3. 2451
Coinfman1	0. 4353	0. 3308	1. 3560	1. 5360	2. 0324
Coinfman2	0. 3756	0. 3981	1. 2458	1. 0914	1. 7379
Coinfman3	0. 3135	0. 4430	1. 2155	0. 9972	1. 7670
Coinfman4	0. 3761	0. 4740	1. 2080	0. 9841	1. 8657
Coinfman5	0. 1883	0. 5050	1. 2005	0. 9710	2. 1010

第 4 章 基于小波分析技术的旋转机械故障分析

4.1 几类常见故障的特征提取

首先需要说明：在实验时振动信号从轴承座 1、2 上的垂直方向和水平方向 4 个测试点采集，但在信号分析时发现，仅用轴承座 1 的垂直方向测试点采集的信号就可以成功提取故障特征，所以以下分析的信号均为从轴承座 1 的垂直方向测试点采集的信号，这也体现了应用小波分析的优越性。以下所有信号波形图的横坐标均表示时间，单位为 s，纵坐标均表示加速度，单位为 m/s^2 。

4.1.1 轴承座轻微松动故障特征提取

在旋转机械运行过程中，由于机械振动使机组的紧固部件逐渐松动，降低了支承的抗振能力。另外，对新安装或经过检修的机械设备，由于安装或检修质量不佳，也会出现支承部件的某些部位松动。轴承座松动是常见的此类故障之一。

图 4-1 是图 3-3 所示实验台正常运转时的时域波形和频谱，图 4-2 是实验台滑动轴承 1 的轴承座有轻微松动故障信号的时域波形和频谱。由于转轴有较高的刚度且整个转子系统受力向下，对时域信号进行傅里叶变换得到的频谱（图 4-1、图 4-2 下图）振动都主要表现在 1 倍频和 2 倍频上，故障特征不明显，无法识别故障。将正常状态信号和故障信号都做 4 尺度小波分解后，得小波分解图 4-3、图 4-4。经信号逐层小波分解后，所包含的采样点数减半，信号所包含的频带也逐层减半。由小波分析理论知，d1、d2、d3、d4a、d4b 分别对应

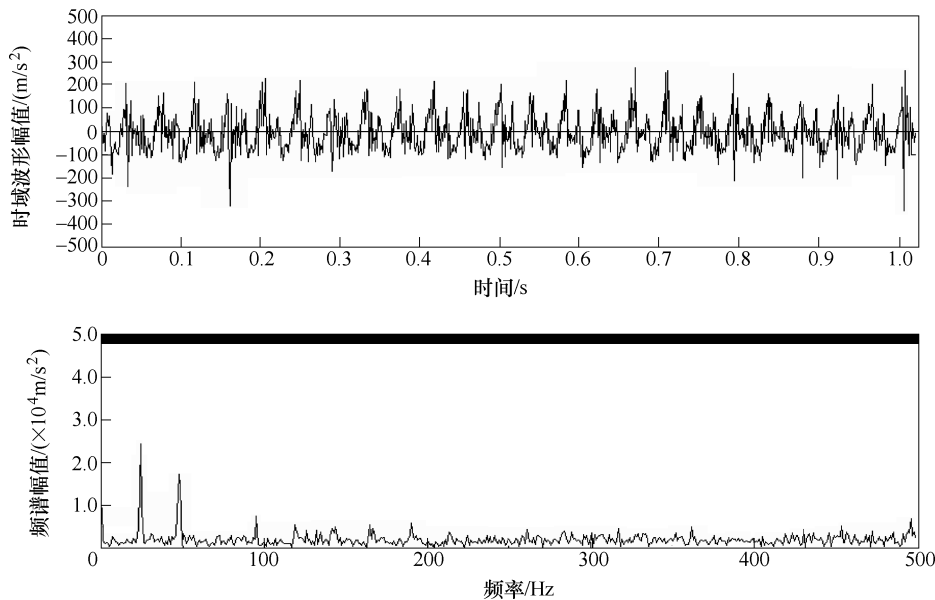


图 4-1 正常运行时的时域波形和频谱

第一尺度小波分解、第二尺度小波分解、第三尺度小波分解、第四尺度小波分解粗略部分和第四尺度小波分解细节部分，其频段范围分别为 250 ~ 500Hz、125 ~ 250Hz、62.5 ~ 125Hz、31.25 ~ 62.5Hz、0 ~ 31.25Hz。其中转速 1 倍频（25Hz）位于 d4b 频带内，2 倍频（50Hz）位于 d4a 频带内。再对各频段进行信号重构后，得到图 4-5、图 4-6 信号重构波形。

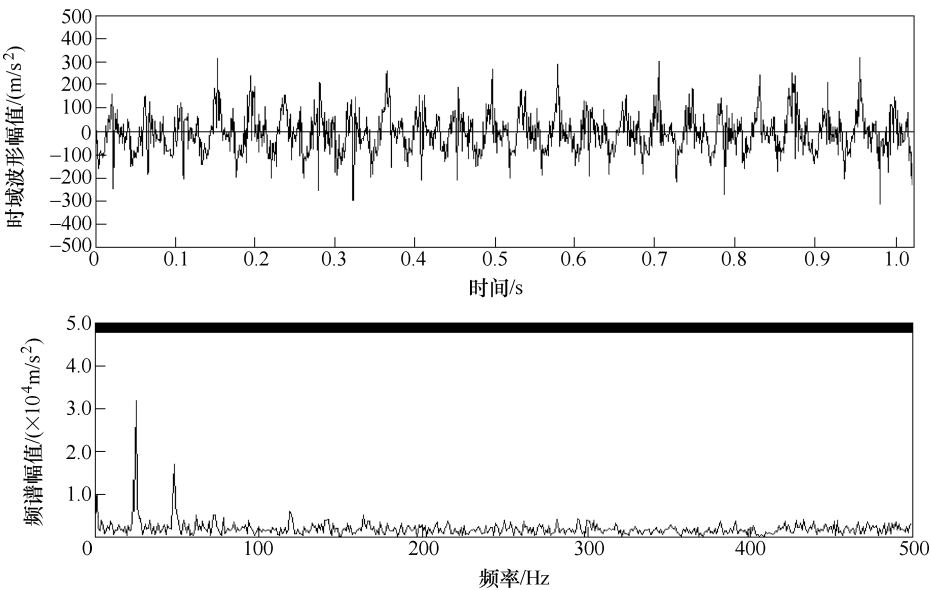


图 4-2 轴承座有松动故障信号的时域波形及频谱

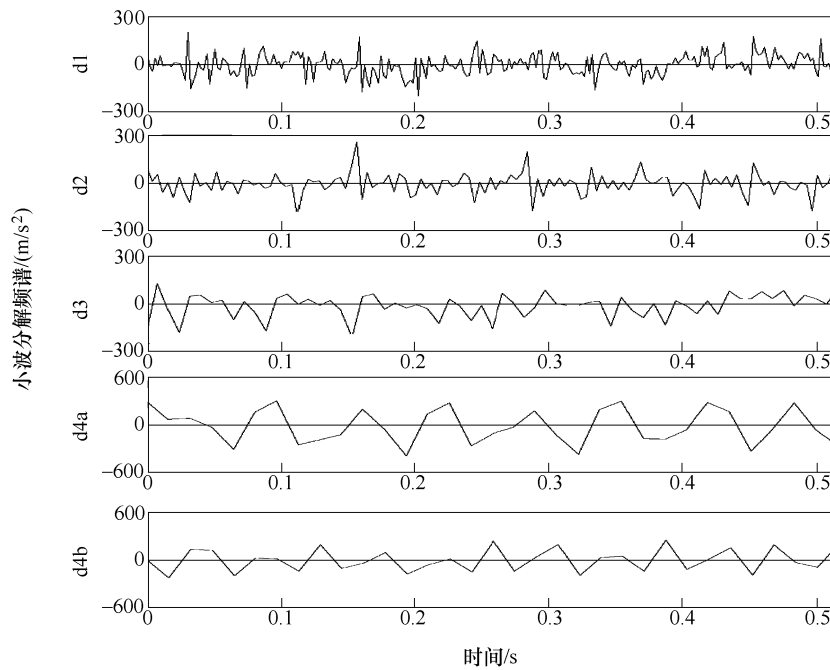


图 4-3 正常状态信号 4 层小波分解

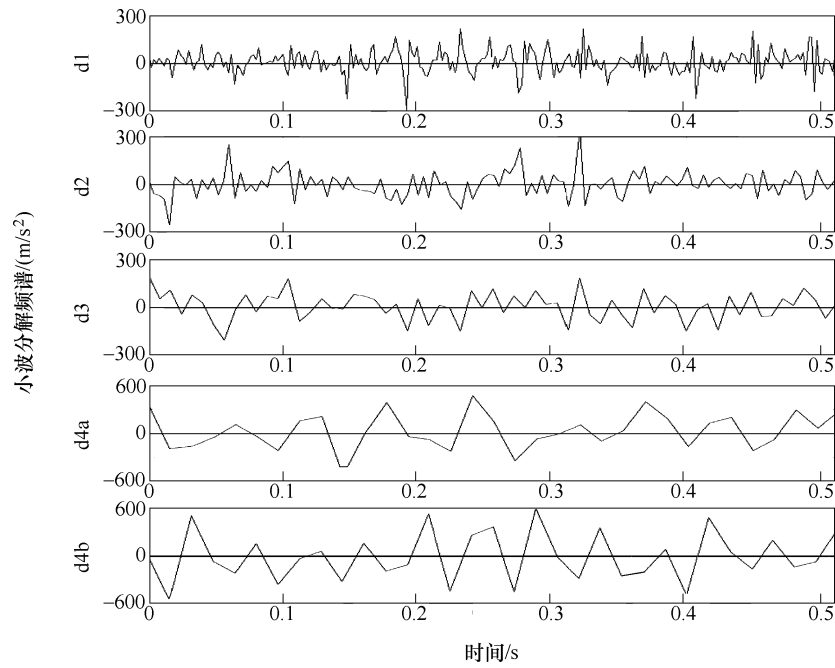


图 4-4 轴承座松动故障信号 4 层小波分解

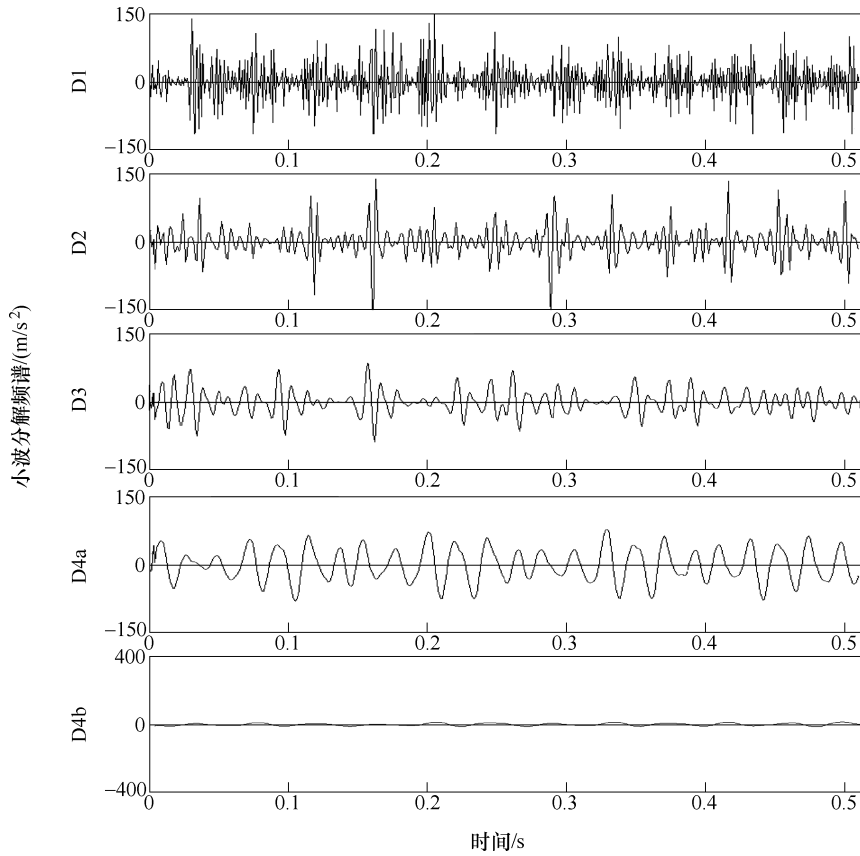


图 4-5 正常状态信号小波重构波形

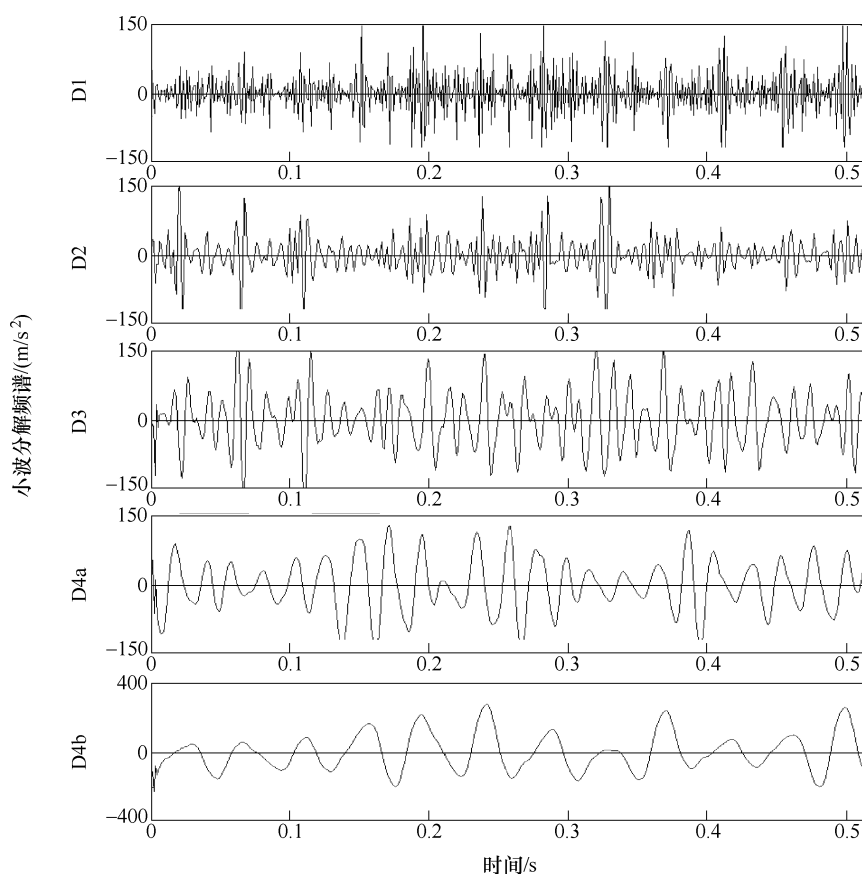


图 4-6 轴承座松动故障信号小波重构波形

由于工况条件和环境的影响，现场采集的信号中常含有白噪声，且通常表现为高频信号，而有用信号通常表现为低频信号。在信号处理中需采用强制消噪处理，将小波分解结构中的高频系数全部置 0，即把各尺度的高频部分全部漏掉，比较图 4-3、图 4-4 的 d4a、d4b 频带可以粗略看出，轴承座松动故障信号的振动加速度信号进行了重构处理。也就是说，在图 4-5、图 4-6 的重构波形中，随着分解层数的增加，信号所含噪声越来越少，信号越来越接近实际信号。

比较图 4-3、图 4-4 的 d4a、d4b 频带可以粗略看出，轴承座松动故障信号的振动加速度（即纵坐标值）较正常状态信号的振动加速度略大。除此，不能得到更有用、更易识别故障的特征信息。

观察图 4-5、图 4-6 的信号小波重构波形，并将各频带重构波形与图 4-1、图 4-2 的时域波形对比可以发现，在原始信号幅值大的地方，重构波形幅值也大；原始信号幅值小的地方，重构波形幅值也小。即重构波形较完整地保持了原信号的时域特征，这充分体现了小波分析良好的时频局部化性能——在频域局部化的同时完好地保留信号的时域特征。

对非平稳信号，将其分解到不同的时频窗口，即不同的频带内进行观察，在某一个或几个适当的时频窗口中，非平稳信号就表现出明显的变化特征，将该段信号进行分析得出表现信号特征的信息，这就是第 3 章所讲的频带分析。

从 D3 频带开始, 轴承座松动信号的振动加速度值增大, 到 D4a、D4b 频带可以看出, 正常状态信号的振动加速度小, 振动平稳, 而故障信号的振动加速度明显增大, 因为转速的 1、2 倍频位于该频带内, 这说明该类故障引起的振动主要集中在 1、2 倍频。这与傅里叶频谱分析的结果相吻合。

同时仔细分析故障信号 D4b 频带的重构波形, 发现波形近似正弦波, 这说明振动相对较平稳, 该类故障产生的冲击振动不大, 在生产现场将不会出现很大的噪声。

4.1.2 动静碰摩故障特征提取

在旋转机械中, 为了提高机器效率, 往往把密封间隙、轴承间隙做得很小, 以减少气体和润滑油的泄漏。但是, 小间隙除了会引起流体动力激振外, 还会引起转子与静止部件的摩擦。像汽轮发电机组、压缩机组等大型旋转机械, 在运行过程中由于热变形、装配不善、机械松动或零部件缺陷等原因, 在旋转部件和静止部件之间也会发生摩擦故障, 进而导致机组损坏。

实验台转子转轴与静止件滑动轴承座接触而引起动静摩擦故障时域波形如图 4-7 所示。仅从时域波形就可以看出, 相对正常信号和轴承座轻微松动故障信号, 发生动静碰摩故障时实验台的振动加速度异常大, 信号出现许多幅值特别大的点, 信号极不平稳, 可以想见, 该类故障一旦发生, 如果不及时检修, 造成的后果将十分严重。

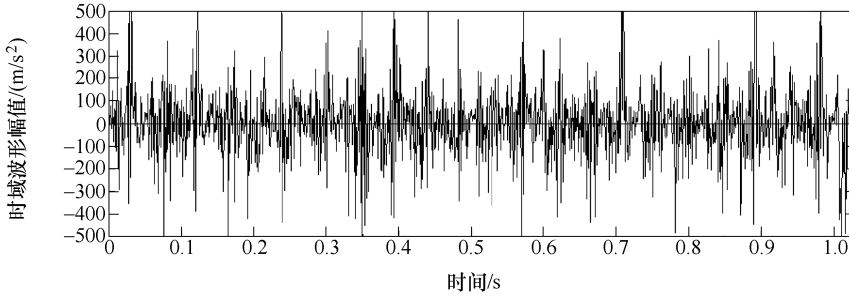


图 4-7 动静碰摩故障时域波形

对信号进行 4 尺度小波分解, 并对分解信号进行重构, 可得到图 4-8 的动静碰摩故障信号小波重构波形。从图中纵坐标可以发现, 故障每一尺度重构信号的振动加速度值都比正常状态信号和轴承座轻微松动故障信号的振动加速度大, 说明碰摩引起的振动频率中不仅包含 1、2 倍频, 还可能含有一些高次谐波。

转子在非接触状态下, 即正常运转状态下的运动方程为

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_n^2 x = e\Omega^2 \cos \Omega t \quad (4-1)$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + \omega_n^2 y = e\Omega^2 \sin \Omega t \quad (4-2)$$

当转子与静止件发生碰摩时, 其运动微分方程可描述为

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_{nb}^2 x + vx - \mu vy = e\Omega^2 \cos \Omega t$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + \omega_{nb}^2 y + vy + \mu vx = e\Omega^2 \sin \Omega t$$

即

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + (\omega_{nb}^2 + v)x - \mu vy = e\Omega^2 \cos \Omega t \quad (4-3)$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + (\omega_{nb}^2 + v)y + \mu vx = e\Omega^2 \sin \Omega t \quad (4-4)$$

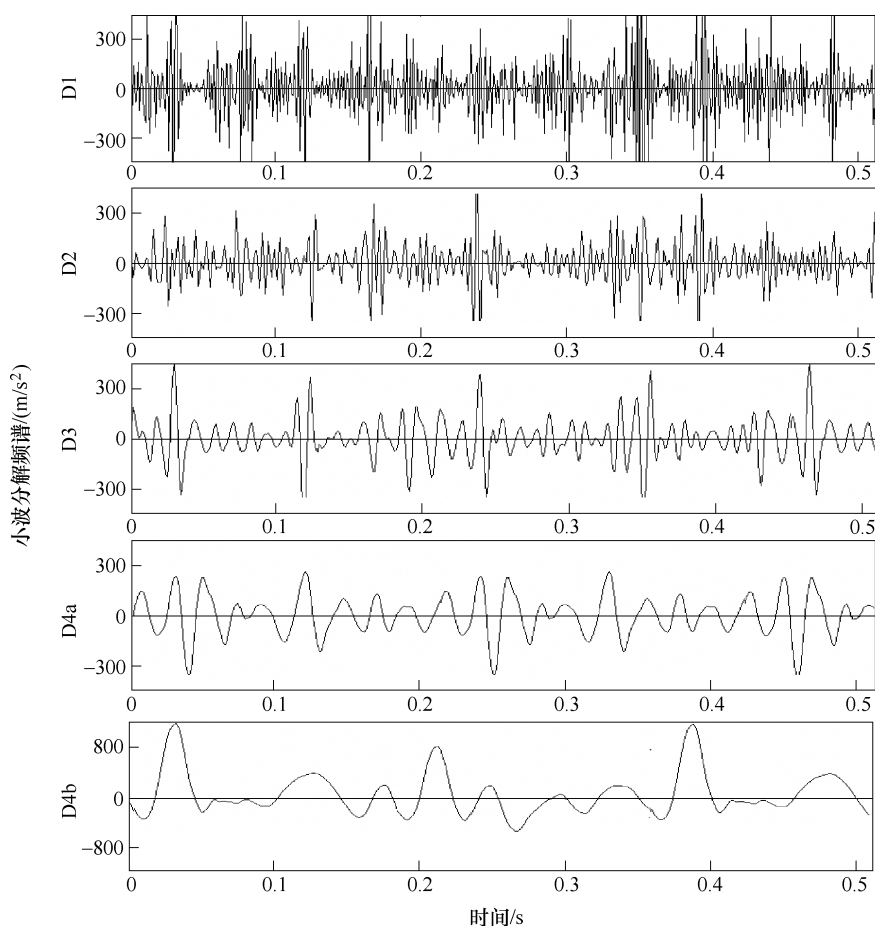


图 4-8 动静碰摩故障信号小波重构波形

$$v = \frac{\omega_n^2 (R - \Delta)}{R}, \quad R = \sqrt{x^2 + y^2}$$

式中 Δ ——转子与静止件间的半径间隙；

ω_n ——转子与静止件无接触时的临界角频率；

μ ——摩擦因数；

ω_{nb} ——转子与静止件接触时的临界角频率。

对式 (4-3)、式 (4-4) 采用数值解法，分析结果表明：转子与静止件发生接触瞬间，转子刚度增大；被静止件反弹后脱离接触，转子刚度减小，并且发生横向自由振动。所以，转子刚度在接触与非接触两者之间变化，转子自由振动与强迫的旋转运动叠加在一起，就会产生一些特有的、复杂的振动响应频率。因此碰摩故障振动含有高频谐波。

观察 D4b 频带波形可得出：振动在该频带表现出明显的周期性，且主要表现为正向振动，而正向振动显著强于负向。这也表明该类故障振动极不平稳，在生产现场通常伴有强烈的噪声。

4.1.3 不对中故障特征提取

旋转机械各转子之间由联轴器连接构成轴系，传递运动和转矩。由于机器的安装误差、承载后的变形以及机器基础的沉降不均等，造成机器工作状态时各转子轴线之间产生轴线平

行位移、轴线角度位移或综合位移等对中变化误差，统称为转子不对中。据统计，转子系统机械故障的 60% 是由不对中引起的。具有不对中故障的转子系统在其运转过程中将产生一系列有害于设备的动态效应，如引起机器联轴器偏转、轴承早期损坏、油膜失稳和轴的挠曲变形等，最终导致机器发生异常振动，且危害极大。

从图 4-9 的不对中故障信号时域波形看出：与动静碰摩故障一样，该信号也极不平稳，且有大的冲击。用与前两种故障特征提取相同的小波频带分析方法提取故障特征，其小波分解重构波形如图 4-10 所示。

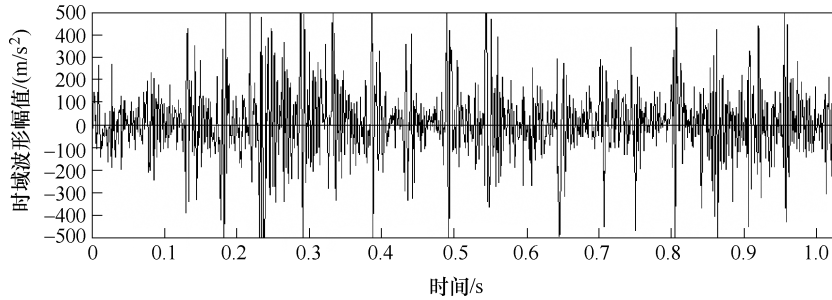


图 4-9 不对中故障信号时域波形

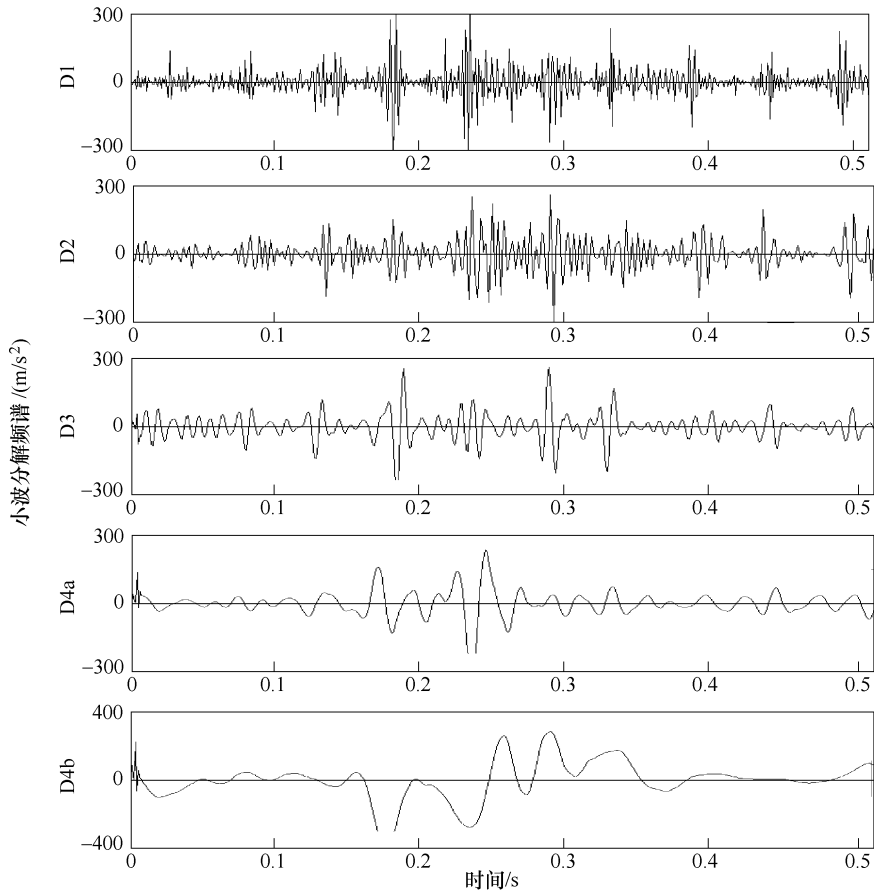


图 4-10 不对中故障信号小波分解重构波形

观察 D4b 频带波形可以得出：故障信号在 1 倍频有相同的发展趋势，先平缓，然后振动加强，再趋平缓，即实验台在运行平稳状态下突然产生大的振动，然后又复趋平稳的过程。

对比上面三种故障信号小波重构波形的 D4b 频带，也即转子转速 1 倍频所处频带，三类故障都有很明显的表现，并且波形有很大的差异，据此就可以有效地识别这三类故障。将该频带的波形作为模式样本，就可以进行三类故障的模式识别。

4.2 叶片裂纹故障特征提取

旋转机械的叶片是十分重要的转动部件，运行中载荷复杂、工作条件苛刻，加之因叶片的设计参数或运行工况使叶片的自振频率和工况的激振频率一致而会发生共振破坏，或因制造、安装和工况环境降低了叶片的抗疲劳能力，所以长期运行的转子，会出现不同程度的裂纹，最终导致叶片断裂，造成机组损坏。当前国内生产的叶轮机械的叶片大都采用焊接方法将其焊接在转轴上，并通过表面和内部无损检测焊接质量，避免裂纹先期产生。但水轮机进入发电站投入运行后，就只能定期、停机检修，这无疑将增加维修成本、减少运行时间，且降低经济效益和社会效益。故进行叶片裂纹故障诊断具有重要的意义。

图 4-11 所示为从具有叶片裂纹故障的实验台上采集的叶片裂纹故障信号时域波形及频谱。裂纹位于叶片与转轴焊接处，裂纹宽 20mm（叶片宽 100mm）。

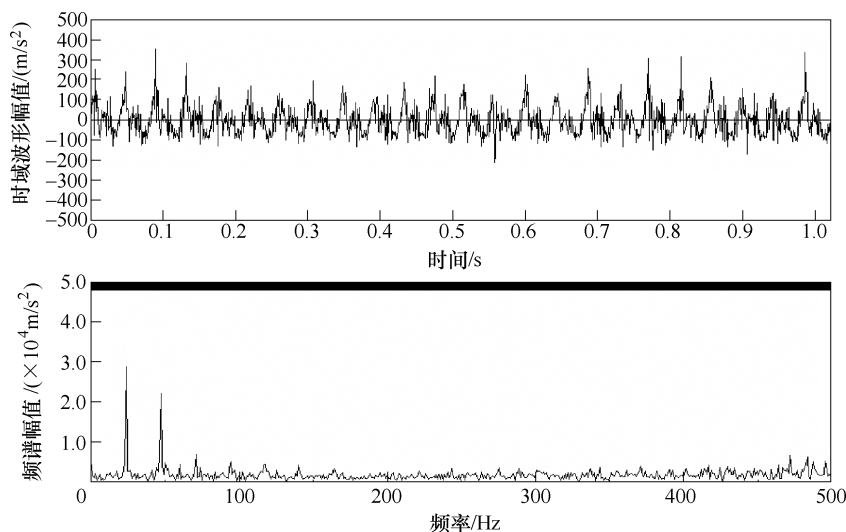


图 4-11 叶片裂纹故障信号时域波形及频谱

由叶片静频的理论计算公式可知，当叶片有裂纹时，叶片结构刚度减小，其固有频率必然降低，并且裂纹离转轴越近裂纹越深，固有频率降低也越多。但将图 4-11 与图 4-1 比较可以看到，叶片裂纹故障振动信号的傅里叶变换频谱与正常信号的傅里叶变换频谱几乎完全相同，说明叶片的固有频率降低非常小，不能通过对振动信号作傅里叶变换得出叶片是否有故障，就是说用傅里叶变换对叶片有无裂纹无法进行诊断。

下面用与前面几类故障特征提取相同的小波分析技术对故障信号进行小波分解，其分解

后 20mm 叶片裂纹故障信号小波重构波形如图 4-12 所示。将图 4-12 与图 4-5 比较可以看出两图的差异不大，不易提取特征以有效识别两类故障，这样在故障诊断时也容易产生误诊。同时可以思考这样一个问题：叶片裂纹故障特征是否可能表现在高频上。

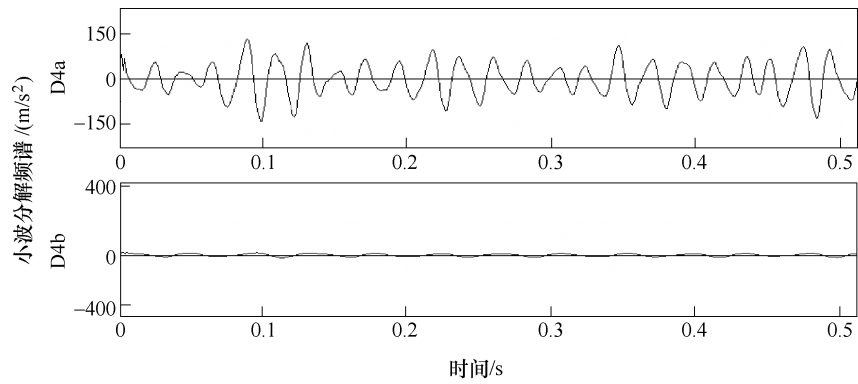


图 4-12 20mm 叶片裂纹故障信号小波重构波形

为此对信号作 4 尺度小波包分解，将信号不仅低频进行细化，而且高频也进行细化。为了便于比较，对正常状态信号也进行同样的分解，其小波包分析谱如图 4-13、图 4-14 所示。从 A1 ~ A16 对应的频带分别为 $[0, 31.25]$ Hz、 $[31.25, 62.5]$ Hz、 $[62.5, 93.75]$ Hz、 $[93.75, 125]$ Hz、 $[125, 156.25]$ Hz、 $[156.25, 187.5]$ Hz、 $[187.5, 218.75]$ Hz、 $[218.75, 250]$ Hz、 $[250, 281.25]$ Hz、 $[281.25, 312.5]$ Hz、 $[312.5, 343.75]$ Hz、 $[343.75, 375]$ Hz、 $[375, 406.25]$ Hz、 $[406.25, 437.5]$ Hz、 $[437.5, 468.75]$ Hz、 $[468.75, 500]$ Hz。两图比较可以看出：从第 9 频带（A9）开始，有叶片裂纹故障的振动信号的小波包分解系数明显大于正常信号的小波包分解系数，这说明有叶片裂纹故障的振动信号中含有高频。

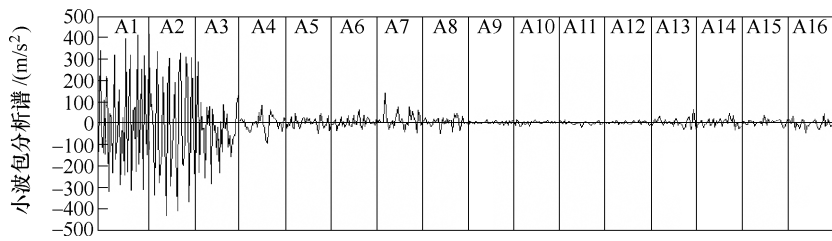


图 4-13 正常状态信号小波包分析谱

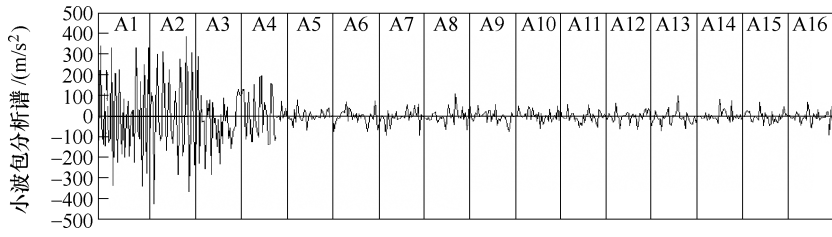


图 4-14 20mm 叶片裂纹故障信号小波包分析谱

从理论上讲，当叶片出现裂纹时，其轴向振动在裂纹处间断，振动信号应为稳态分量和

瞬态分量的叠加，即这部分瞬态分量预示着结构有损伤产生。而由于傅里叶变换不具局部化分析信号的功能，所以这部分高频分量不能在频域中表现出来。相反，小波包分析可以把高频分量提取出来，即小波包分解可以判断出叶片是否存在裂纹。

取第 13（A13）频带细化，结果如图 4-15、图 4-16，从图中可以看出：正常状态振动信号第 13 频带的小波包分解系数几乎为 0，而故障状态振动信号第 9 频带的小波包分解系数略大于正常状态小波包分解系数。对该频带信号重构，得到图 4-17、图 4-18 重构波形。从重构波形就可以看出，叶片产生裂纹后的振动信号幅值较正常信号的幅值略大，振动主要表现为轻微的颤振。

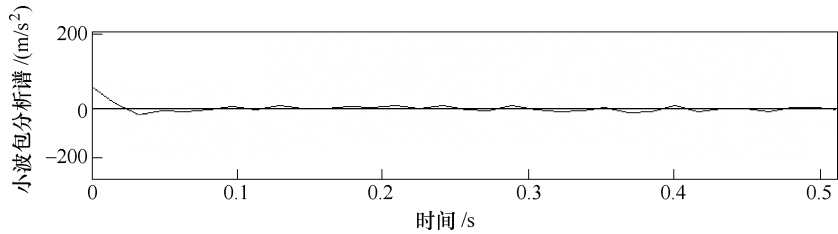


图 4-15 正常状态信号小波包分解第 13 频段细化

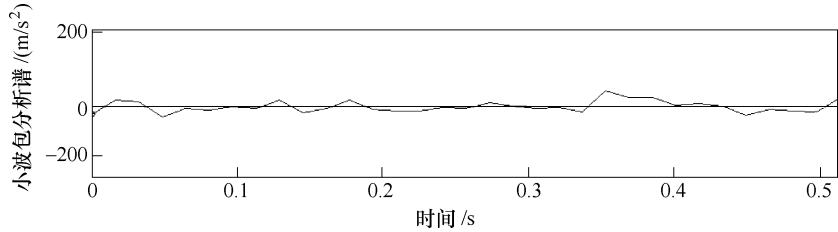


图 4-16 20mm 叶片裂纹故障信号小波包分解第 13 频段细化

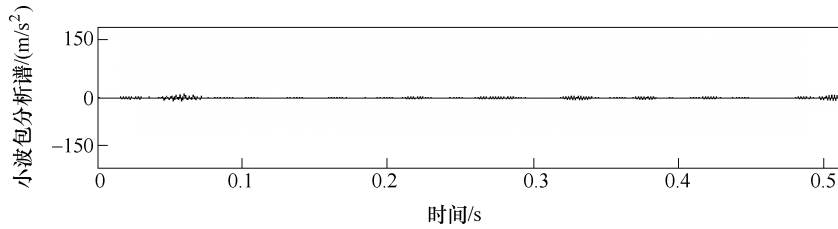


图 4-17 正常状态信号第 13 频段小波重构波形

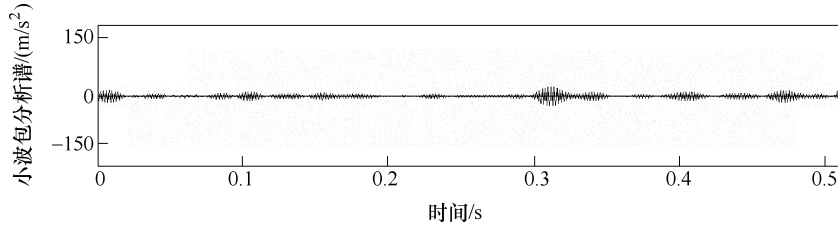


图 4-18 20mm 转子裂纹故障信号第 13 频段小波重构波形

由于裂纹宽度较小，且不位于转轴上（仅靠近转轴），故产生的振动较小，对整个机组的运行不会造成大的影响。但裂纹一旦产生，在载荷作用下会迅速扩张，直至叶片断裂。

为研究裂纹扩张过程中不同宽度裂纹的振动表现，分别采集裂纹宽度为 35mm、50mm 时的振动信号进行分析。图 4-19、图 4-20 分别为 35mm、50mm 叶片裂纹的小波包分解谱。取 13 频带进行细化，得到图 4-21、图 4-22 细化图。将两图所示频带信号实施信号重构，得到重构波形如图 4-23、图 4-24。

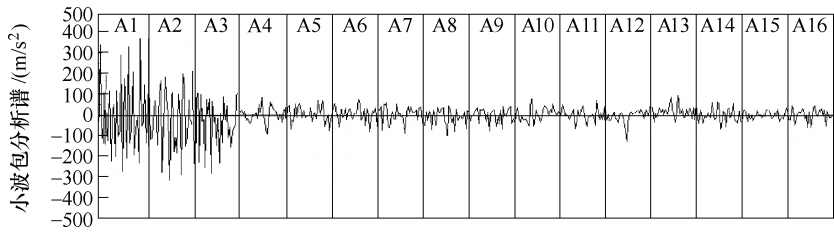


图 4-19 35mm 叶片裂纹故障信号小波包分析谱

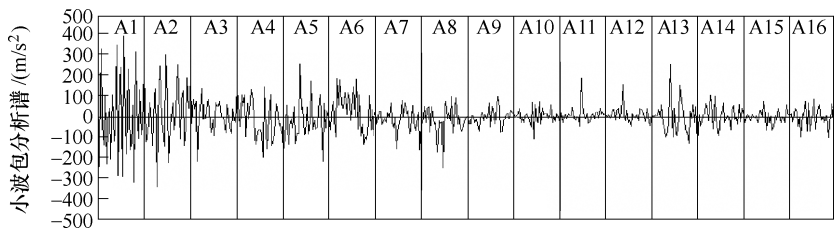


图 4-20 50mm 叶片裂纹故障信号小波包分析谱

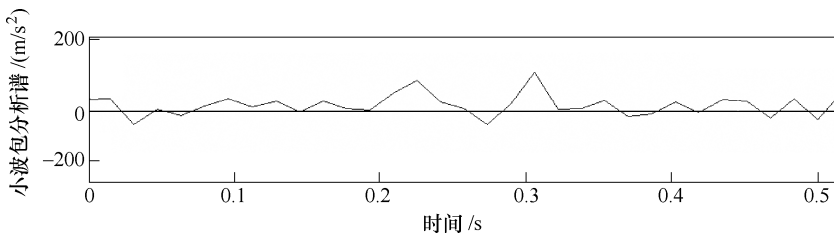


图 4-21 35mm 叶片裂纹故障信号小波包分解第 13 频段细化

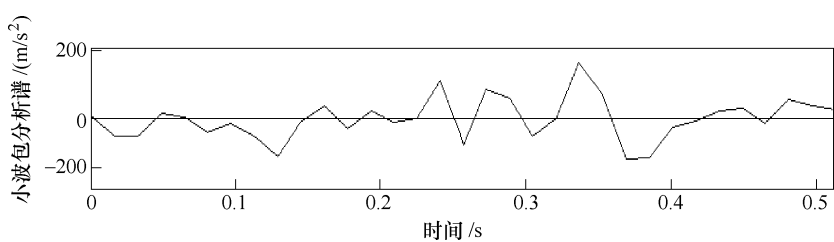


图 4-22 50mm 叶片裂纹故障信号小波包分解第 13 频段细化

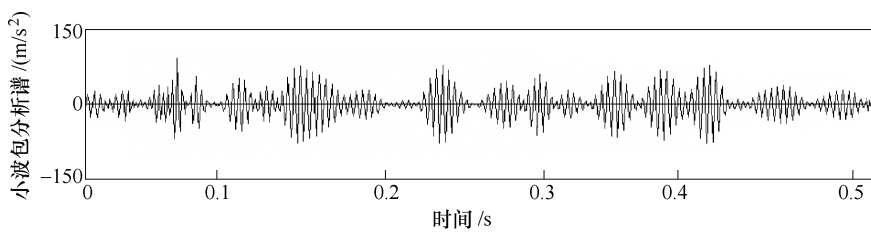


图 4-23 35mm 叶片裂纹故障信号第 13 频段小波重构波形

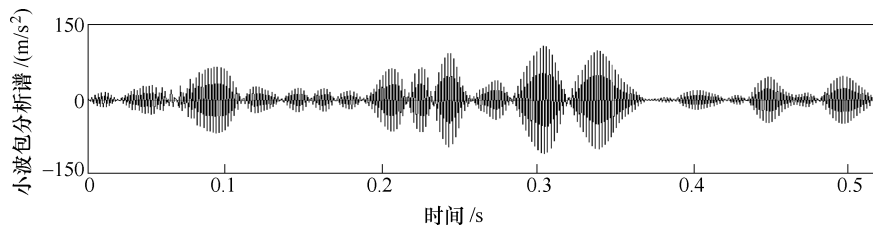


图 4-24 50mm 叶片裂纹故障信号第 13 频段小波重构波形

从频带细化图和小波分析图中可以看出，随着裂纹宽度的增加，振动加剧，由于主要表现为颤振，所以对整个机组运行的影响大。在实验中发现，此类故障常伴有较大的轰鸣声，与碰摩故障的巨大冲击声明显不同；同时发现，当裂纹扩张到 50mm，也就是裂纹宽度达到叶片整个宽度的一半时，裂纹迅速扩张，叶片很快断裂。所以当叶片裂纹宽度接近叶片整个宽度的一半时，必须立即停机检修，否则将导致严重的事故发生。

为进一步研究，可以对正常信号和 50mm 宽裂纹故障信号的第 13 频带进行傅里叶频谱分析，如图 4-25、图 4-26 所示。故障信号第 13 频带的主要频率成分为 349.48Hz、373.93Hz，即实验台转速 16、17 倍频，而正常状态信号在该频带没有主要的频率成分。说明叶片裂纹故障确实存在高频冲击。

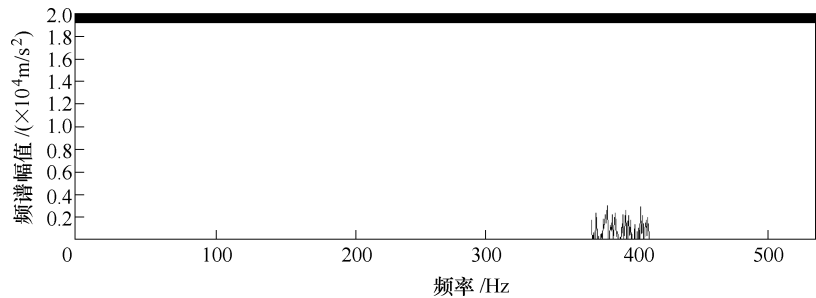


图 4-25 正常状态信号第 13 频带傅里叶频谱

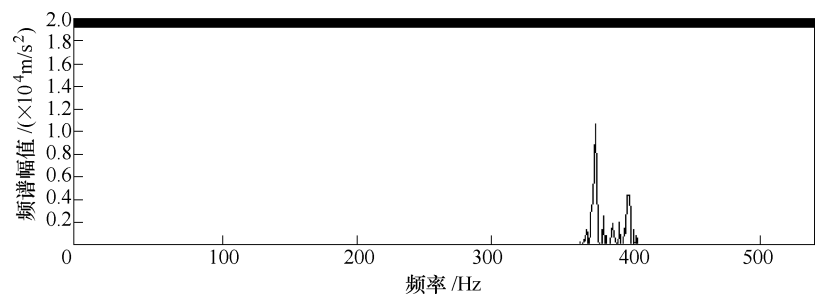


图 4-26 叶片裂纹故障信号第 13 频带傅里叶频谱

也可以运用小波包分解技术，对故障进行能量谱分析，对图 4-13、图 4-20 进行能量统计分别得到图 4-27、图 4-28。

图 4-27 的 16 个频带的能量形成一个 16 维向量，归一化后为 [0.47, 0.35, 0.11, 0.01, 0.007, 0.007, 0.01, 0.006, 0.0005, 0.0005, 0.0005, 0.0005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.008]。其中 1 倍频 (25Hz) 位于第 1 频带内，2 倍频位于第 2 频带内，振动能量

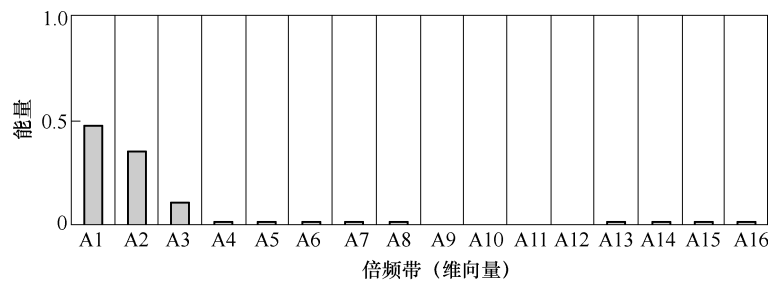


图 4-27 正常状态振动波形能量统计

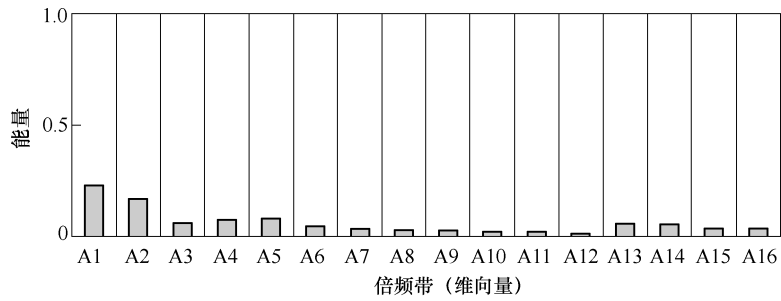


图 4-28 叶片裂纹故障振动波形能量统计

主要集中在 1、2 倍频，这与傅里叶频谱分析的结果相同。

图 4-28 归一化后形成的 16 维向量为 $[0.23, 0.17, 0.06, 0.07, 0.08, 0.05, 0.04, 0.03, 0.03, 0.02, 0.02, 0.01, 0.06, 0.05, 0.04, 0.04]$ 。振动能量也集中在 1、2 倍频。但其他频带内也有能量表现，像第 4、5、13、14 频带还有较大的能量，再一次证明叶片产生裂纹后的振动含有高频冲击。

第5章 基于小波和聚类分析相结合的 旋转机械故障诊断

5.1 聚类分析

聚类分析不仅是多元统计分析的一种，同时也是非监督模式识别的一种。它是把一些没有类别标记的样本集根据一定的准则，把它们划分为若干个子集，并尽量使一些相似的样本归为一类，而把不相似的样本分到不同的类别之中。传统的聚类分析是一种硬划分，它把每个待识别的对象严格划分到某类中，具有非彼即此的性质，因此这种类别划分的界限是分明的。而实际上大多数对象并没有严格的属性，它们在性态和类属方面存在着中介性，且具有亦此亦彼的性质，因此适合进行软划分。随着模糊集理论的提出，聚类分析成为软划分的重要分析工具，人们用模糊理论来处理聚类的问题，这种分析就称为模糊聚类分析。由于模糊聚类分析得到的样本属于各个类别的不确定性程度，表达了样本类属的中介性，即建立起了样本对于类别的不确定性描述，也更能客观真实地反映现实世界，从而成为聚类分析的主流。

5.1.1 聚类分析的数学模型

从数学角度看聚类分析可得到如下数学模型：把所有待聚类分析的对象全体，称作论域，为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。 X 中的每个对象 x_k ($k=1, 2, \dots, n$) 可以用有限个参数来表示，而且每个参数都代表了 x_k 的某种特征。于是对象 x_k 就会伴随着一个向量 $P(x_k) = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{ks})$ ，其中 x_{kj} ($j=1, 2, \dots, s$) 是 x_k 在第 j 个特征上的赋值， $P(x_k)$ 称为 x_k 的特征向量。聚类分析实质上就是待分析样本之间的模式向量间的距离或相似性，根据每个样本之间的亲疏关系可以把 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 划分为若干个互不相交的子集 $X_1, X_2, \dots, X_c$ ，而且满足下列条件：

$$X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_c = X, X_i \cap X_j = \emptyset, 1 \leq i \neq j \leq c \quad (5-1)$$

样本 x_k ($1 \leq k \leq n$) 对子集 x_i ($1 \leq i \leq c$) 的隶属关系如下：

$$\mu_{X_i}(x_k) = \mu_{ik} = \begin{cases} 1 & (x_k \in X_i) \\ 0 & (x_k \notin X_i) \end{cases} \quad (5-2)$$

其中，式 (5-2) 必须满足条件 $\mu_{ik} \in E_h$ ，即要求每一个样本能且只能隶属某一个类，并且每个子集都是非空集，把这种聚类分析称作硬划分。

$$E_h = \{\mu_{ik} \mid \mu_{ik} \in \{0, 1\}; \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, \forall k; 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n, \forall i\} \quad (5-3)$$

但是，正如上面所述，旋转机械运行状态从正常到异常是一个渐变的过程，具有模糊性，如果用硬划分聚类分析，可能会导致判断错误，因此考虑用模糊划分来实现聚类分析。

在模糊划分中，将样本集 X 划分成 c 个模糊子集 $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_c$ ，并把样本的隶属函数

从 0, 1 扩展到 $[0, 1]$ 区间, 并且满足下面的条件:

$$E_f = \{\mu_{ik} \mid \mu_{ik} \in [0, 1]; \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, \forall k; 0 < \sum_{k=1}^n \mu_{ik} < n, \forall i\} \quad (5-4)$$

由式 (5-4) 知 $\bigcup_{i=1}^c \text{supp}(X_i) = X$ (supp 表示取模糊聚合的支撑集)。

对于模糊划分, 如果放宽约束条件 $\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, \forall k$, 则模糊划分演变为可能性划分。显然, 对于可能性划分而言, 每个样本对各个划分子集的隶属度构成的向量 $\mu_k = [\mu_{1k}, \mu_{2k}, \dots, \mu_{ck}]^T$ 在 c 维实空间中单位超立方体内取值, 即 $E_p = \{\mu_i \in R^c \mid \mu_{ik} \in [0, 1], \forall i, k\}$ 。而模糊聚类划分 E_f 的取值范围为 c 维实空间中过 c 个单位基向量的超平面, 即 $E_f = \{\mu_i \in E_p \mid \sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, \forall k\}$ 。

5.1.2 数据标准化

在计算距离与相关系数时, 有时需先对对象的特征量进行标准化处理, 以消除量纲对分类的影响, 常用的标准化如下:

1) 标准差标准化:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{s_j}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (5-5)$$

式中 μ_j 和 s_j —— x_{ij} 的均值和标准差。

2) 极差标准化:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{S_j}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (5-6)$$

其中, $S_j = \max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\}$ 。

5.1.3 距离和相似系数

为了度量各个分类对象间的接近程度和相似程度, 人们定义了很多分类的统计量, 作为分类的指标, 以便更好地实现聚类。通常用到的分类统计量是距离与相似系数, 距离与相似系数的定义和聚类分析的类型是密切相关的。

在聚类分析中, 距离是常用的分类统计量。例如有 p 个变量的样品, 那么 n 个样品可认为是 p 维空间的 n 个点, 自然就可以用点与点间的距离来表示样品之间的接近程度。例如第 i 个样品盒第 j 个样品之间的距离通常用 d_{ij} 表示。点与点之间的距离须满足下列条件:

1) 非负性: 对所有的 i 和 j 而言, 恒有 $d_{ij} \geq 0$ 。式中, 当且仅当两样品的 p 个变量对应相等时, 等式才能成立。

2) 对称性: 对所有的 i 和 j 来说, 恒有 $d_{ij} = d_{ji}$ 。

3) 满足三角不等式: 对所有的 i, j, k 来说, 恒有 $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{jk}$ 。

由以上三个条件可知, 两个样品之间的距离在 $0 \rightarrow \infty$ 之间, 当距离越小时, 两个样品就越接近。聚类分析中, 常用的距离定义有以下几种:

(1) 明氏 (Minkowski) 距离

$$d_{ij}(q) = \left(\sum_{k=1}^p |X_{ik} - X_{jk}|^q \right)^{\frac{1}{q}} \quad (5-7)$$

当 $q=1$ 时, 明氏距离为绝对值距离:

$$d_{ij}(1) = \sum_{k=1}^p |X_{ik} - X_{jk}| \quad (5-8)$$

当 $q=2$ 时, 明氏距离为欧式距离:

$$d_{ij}(2) = \left(\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5-9)$$

当 $q = \infty$ 时, 明氏距离为切比雪夫距离:

$$d_{ij}(\infty) = \max_{1 \leq k \leq p} |X_{ik} - X_{jk}| \quad (5-10)$$

(2) 马氏 (Mahalanobis) 距离 明氏距离一般只是用于欧式空间。但是样品变量的测量值很多都是随机变量, 所以第 i 个样品中的 p 个变量的测量值 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip})^T$ 应该是 p 位随机变量。因为随机变量的分布有一定的规律, 每个分量之间也可能有一定的相关性, 所以把两个样品当做随机变量的个体, 第 i 个和第 j 个样品之间的马氏距离为

$$d_{ij}^2(M) = (x_i - x_j)^T \Sigma (x_i - x_j) \quad (5-11)$$

式 (5-11) 中, Σ 表示随机变量的协方差矩阵。假如它是未知的, 可以用它的估计值。

对 p 维空间的两个向量来说, 能用相似系数来度量它们的相似程度。设 a_{ij} 表示第 i 个向量和第 j 个向量的相似系数, 那么 a_{ij} 必须满足下列条件:

1) 绝对值不能大于 1: 对所有的 i, j 恒有 $|a_{ij}| \leq 1$ 。式中当且仅当两向量之间存在线性关系 $x_i = cx_j$ ($c \neq 0$) 时, $|a_{ij}| = 1$ 才能成立。

2) 对称性: 对所有的 i 和 j 恒有 $a_{ij} = a_{ji}$ 。

定义两个对象之间的相似系数可以有很多种形式, 常见的形式有以下几种:

(1) 夹角余弦 聚类分析中, 待测样品作为 p 维空间的向量, 可以用两个向量之间的夹角表示他们的相似系数, 那么第 i 个和第 j 个样品之间的相似系数为

$$q_{ij} = \cos(\theta_{ij}) = \frac{\sum_{k=1}^p X_{ik} X_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^p X_{ik}^2 \sum_{k=1}^p X_{jk}^2}} \quad (5-12)$$

在聚类分析中, 可以把分类的对象当做指标, 每个指标看成 n 维空间的向量, 其中第 i 个指标可以表示为

$$x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) \quad (5-13)$$

即样本数据矩阵中的第 i 列。各个指标之间的接近程度通常用相似系数表示, 它可以用夹角余弦来表示, 也可以用相关系数来表示。

(2) 相关系数 第 i 个指标和第 j 个指标之间的相关系数记作

$$r_{ij} = \frac{\sum (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (5-14)$$

其中, $\bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_j$ 表示均值, $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ki}$, $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{kj}$ 。

5.1.4 谱系聚类分析

谱系聚类分析又称为系统聚类分析，该方法主要用于待分析的样本数比较少的情况。设样本集 X 有 n 个样本，将这 n 个样本分为 c 类。谱系聚类分析是把模式样本根据距离准则逐步聚类。类别从多到少，直到得到的聚类结果满足适当的分类要求。谱系聚类分析方法主要是由下列步骤实现的：

初始化：将 n 个模式样本聚成一类，建立 n 个子集 $X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_n^{(0)}$ 。计算每个类之间的距离，就得到一个 $n \times n$ 维的距离矩阵 $D^{(0)}$ ，矩阵右上角标号 (0) 表示聚类运算开始之前的状态。假设迭代次数计数器为 $b=0$ 。

第一步：先求出距离矩阵 $D^{(0)}$ 除对角线元素外的最小元素，假如这个最小元素在 $X_i^{(b)}$ 和 $X_j^{(b)}$ 两个类的距离之间，那么可将 $X_i^{(b)}$ 和 $X_j^{(b)}$ 两个类合并为一个类 $X_{ij}^{(b+1)}$ ，并由此建立新的分类 $X_1^{(b+1)}, X_2^{(b+1)}, \dots$ 。

第二步：求出合并之后的新类别间的距离，得到距离矩阵 $D^{(b+1)}$ 。

第三步：令 $b=b+1$ ，然后跳回第一步，重复计算后合并起来。可以一直把所有的样本一直聚集为一类为止；当然也可以取一阈值 D ，当 $D^{(b)}$ 的最小分量大于阈值 D 时，算法就会自动停止，得到的分类结果就是所要求的聚类结果。

谱系聚类分析算法分为两种：聚集法和分裂法。聚集法就是从 n 个只含有单一样本的聚类开始，然后逐渐把这些类合并起来。聚集法的过程是从下往上。分裂法的过程与聚类法刚好相反，它是从上往下进行的。它的起始点是把所有样本当做同一类，然后逐步地把它分裂成多个类别。虽然聚集法的计算比较简单，但是当样本数目很多而且又只是把它分成很少的类的时候，使用分裂法就能避免一些重复的计算。

用谱系聚类分析算法进行聚类时，每次迭代过程中都会形成聚类，但是对每个聚类之间以及每个聚类和每个样本之间的距离表示的准则很多。

(1) 最短距离法 定义两个聚类 A 和 B 之间的最短距离为

$$D_{A,B} = \min \{d_{a,b} \mid a \in A, b \in B\} \quad (5-15)$$

式中 $d_{a,b}$ —— A 类中的样本 x_a 和 B 类中的样本 x_b 之间的距离。

$D_{A,B}$ —— A 类中所有样本和 B 类中所有样本之间的最小距离。如果 B 类由 E 类和 F 类两类合并而成，可以表示为 $D_{A,B} = \min \{D_{A,E}, D_{A,F}\}$ 。

(2) 最长距离法 定义两个聚类 A 和 B 之间的最长距离为

$$D_{A,B} = \max \{d_{a,b} \mid a \in A, b \in B\} \quad (5-16)$$

假如 B 类由 E 类和 F 类两类合并而成，可以表示为 $D_{A,B} = \max \{D_{A,E}, D_{A,F}\}$ 。

(3) 中间最长距离法 假如 B 类由 E 类和 F 类两类合并而成，则 A 类和 B 类的距离为

$$D_{A,B} = \sqrt{\frac{1}{2}D_{A,E}^2 + \frac{1}{2}D_{A,F}^2 - \frac{1}{4}D_{E,F}^2} \quad (5-17)$$

它介于最长距离和最短距离之间。

(4) 重心法 上述定义的类型距离没有考虑每一类中包含的样本数目，如果 E 类中有 n_E 个样本， F 类中有 n_F 个样本，则 E 类和 F 类合并后共有 $n_E + n_F$ 个样本。用 $n_E / (n_E + n_F)$ 和 $n_F / (n_E + n_F)$ 代替中间距离法系数，即得重心法的类与类之间的距离递推式为

$$D_{A,B} = \sqrt{\frac{n_E}{n_E + n_F} D_{A,E}^2 + \frac{n_F}{n_E + n_F} D_{A,F}^2 - \frac{n_E n_F}{(n_E + n_F)^2} D_{E,F}^2} \quad (5-18)$$

5.2 基于小波和聚类分析相结合的转子故障诊断

5.2.1 基于尺寸-能量模的特征提取

首先把测试获得的转子振动位移信号做连续小波变换，并获取该信号沿尺度轴上的能量分布情况，然后把它按照尺度的顺序排成向量作为特征向量，具体的步骤如下：

1) 选择合适的小波基函数，对信号进行小波变换。在这里，选择 db3 小波对信号进行连续小波变换。

2) 选择适当的尺度参数的取值范围。尺度因子的范围应使信号在该范围内对小波尺度变换比较敏感，即取值应大，不同运行状态的信号经连续小波变换后应有较大的区别度。在这里取尺度因子的范围为 [2, 30] 的间隔为 4 的整数。

3) 对信号进行连续小波变换，获得小波系数的模。由式 (5-15) 求得连续小波变换的系数，再通过式 (5-25) 得到其尺度-能量谱，然后用式 (5-26) 转化成小波变换系数的模。

4) 按照尺度因子 a 由小到大将信号连续小波变换的能量模顺序排列，即得到与转子运行信号相对应的特征向量：

$$X_a = (X_{a1}, X_{a2}, \dots, X_{am}) \quad (5-19)$$

m 表示向量的列数，它和进行连续小波变换时 a 的取值点个数是相对应的。 X_{aj} ($j=1, 2, \dots, m$) 表示特征参数。

在转子试验台上模拟四种故障运行状态：转子不平衡、转子不对中、转子支撑松动和油膜涡动。设定采样频率为 2560Hz，通过电涡流传感器，按照一定的时间间隔测取转子在各个采样时刻的振动位移量，采样点数为 512 点。现分别提取转子不对中、转子不平衡、转子支撑松动和油膜涡动四组故障形式的振动位移量各三组，使用软件 MATLAB7.0 绘出时间-振动位移图（时域波形图）。

在 MATLAB7.0 中输入如下程序：

```
N=512; n=0: N-1; t=n/2560; y = [512 点的振动位移量]; plot (t, y)
```

分别得到四种故障状态下的时间位移信号如图 5-1 所示。

将上面保存的信号通过 MATLAB 编程得到基于能量-尺度的特征向量。其具体程序如下：

```
s = load ('E: \ data \ data512 \ bdz \ bdz data \ bdzh001 ')⊖;
```

```
% coefs = cwt (s, 2:4:30, 'db3', 'plot'); %s
```

信号在 db3 小波下的连续小波变换，得到的 coefs 是 $8 * 512$ 的矩阵，其中行是各个采样时刻（采样点），列是尺度 2、6、10、14、18、22、26、30。

得到的系数图如图 5-2 所示。

$$A = (\text{sum}(\text{coefs}' .^2)) .^ (1/2);$$

⊖ 此处为举例路径。

将得到的特征向量 $X_b = (X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, X_3^{(0)}, X_4^{(0)}, X_5^{(0)}, X_6^{(0)}, X_7^{(0)}, X_8^{(0)})$ ，作为聚类的初始样本集，见表 5-1。

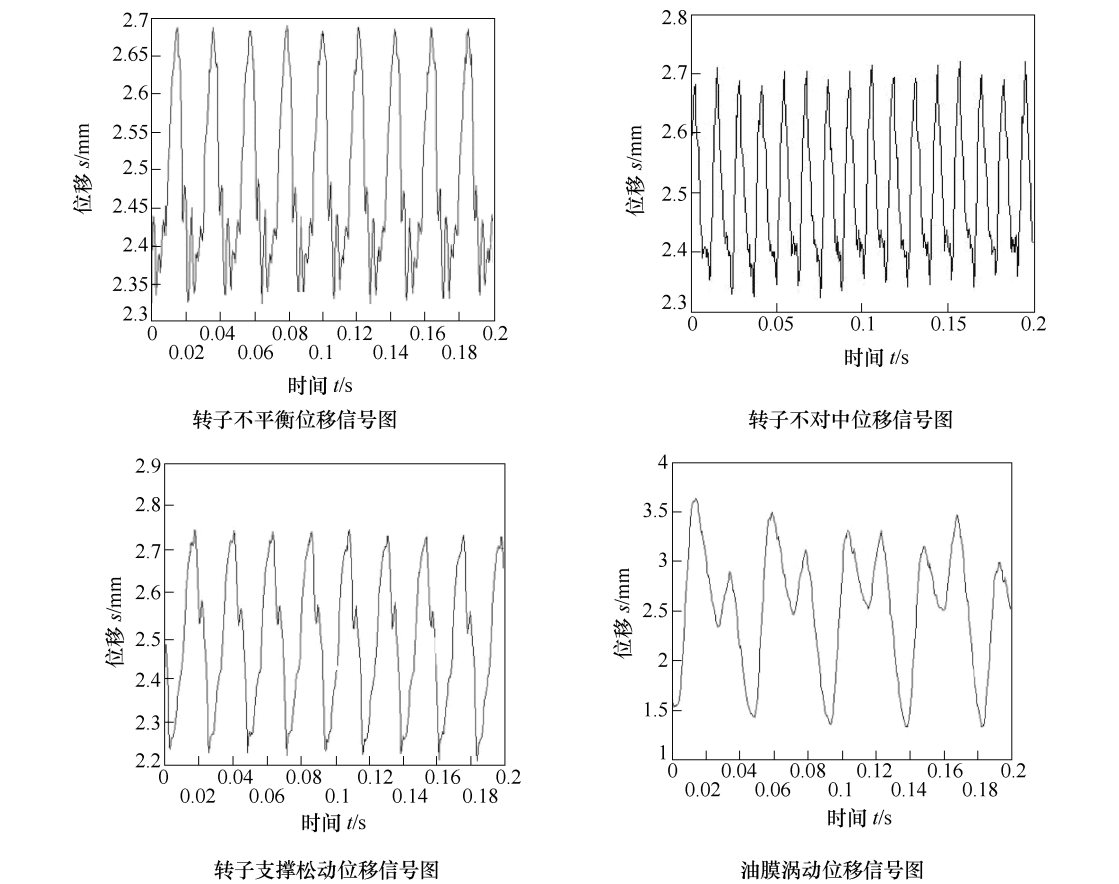


图 5-1 四种故障状态下的时间位移信号

表 5-1 基于尺度-能量模的转子特征向量（初始样本集）

故障模式		尺度							
		2	6	10	14	18	22	26	30
不平衡	$X_1^{(0)}$	0.9337	3.6334	5.9623	8.4198	11.0207	13.4611	15.7762	18.1352
	$X_2^{(0)}$	0.9316	3.6491	5.9707	8.4256	11.0270	13.4707	15.7870	18.1436
	$X_3^{(0)}$	1.0235	3.8729	6.1482	8.7629	11.3860	13.9291	16.3999	18.7940
不对中	$X_4^{(0)}$	1.0031	3.5982	6.4125	9.8615	13.8290	17.2595	19.6189	21.2796
	$X_5^{(0)}$	1.0014	3.6158	6.4296	9.8588	13.8154	17.2436	19.6028	21.2624
	$X_6^{(0)}$	0.9999	3.5921	6.4052	9.8625	13.8457	17.2863	19.6468	21.3048
支撑松动	$X_7^{(0)}$	1.0067	3.7928	6.5103	8.9625	11.7032	15.0225	18.7439	22.4931
	$X_8^{(0)}$	1.0016	3.7871	6.4934	8.9299	11.6608	14.9778	18.7056	22.4697
	$X_9^{(0)}$	1.0011	3.7735	6.4695	8.8923	11.6130	14.9264	18.6611	22.4405

(续)

故障模式		尺度							
		2	6	10	14	18	22	26	30
涡动	$X_{10}^{(0)}$	0.7924	2.9197	5.4165	9.0044	14.3060	21.9468	31.6182	42.0654
	$X_{11}^{(0)}$	0.7988	2.9074	5.3858	8.9605	14.2515	21.8882	31.5640	42.0237
	$X_{12}^{(0)}$	0.7977	2.9060	5.3734	8.9360	14.2143	21.8396	31.5120	41.9761

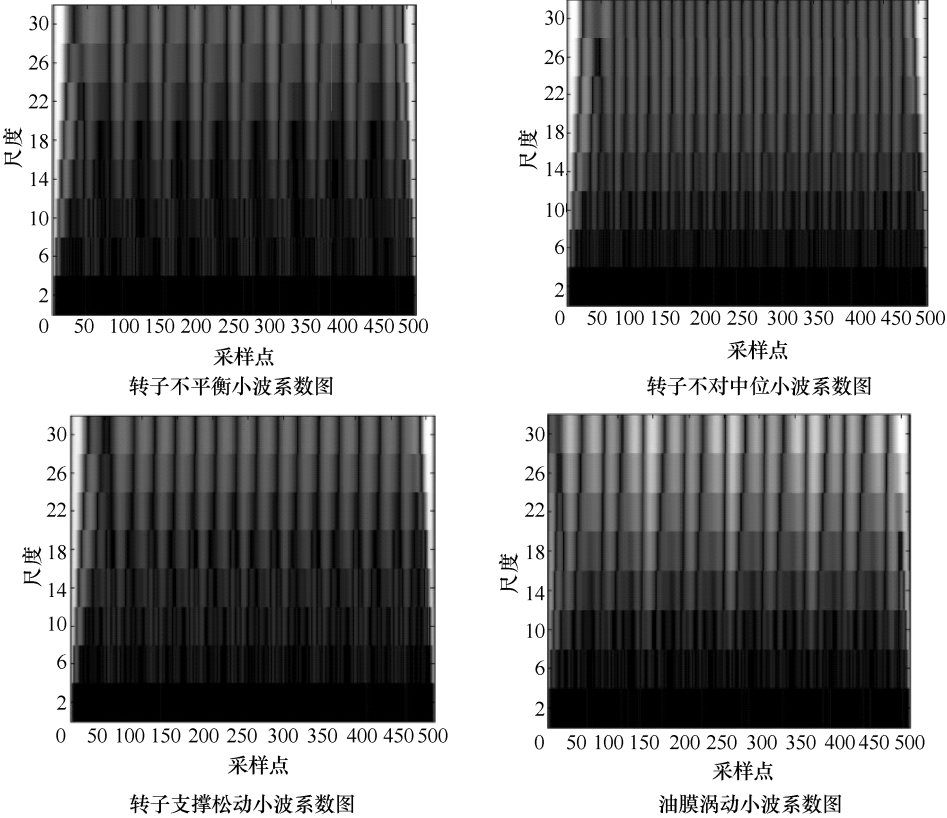


图 5-2 四种故障状态下的系数图

5.2.2 聚类分析的实现

将上述基于尺度 – 能量模的特征提取方法获得的转子特征向量（表 5-1）作为转子运行状态聚类的标准样本，组成转子运行状态的初始样本集：

$$X_b = (X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_{12}^{(0)})$$

采用上述的谱系聚类算法来实现故障的聚类。由谱系聚类分析知道，聚类分为聚集法和分裂法，在这里聚类的主要目的是根据故障的信息进行故障的模式识别，所以采用聚集法。也就是将 n 个只含单一信息的样本逐步合并直到满足给定的分类条件，最终实现聚类。根据谱系聚类算法的步骤先对样本集进行初始化，计算出各类之间的距离，得到一个 12×12 维的距离矩阵 $D^{(0)}$ ，见表 5-2。表中，子集右上角的符号（0）表示进行聚类分析前的状态，

设迭代计算器 $b = 0$ 。

表 5-2 初始样本集构成的距离矩阵

样本集	$X_1^{(0)}$	$X_2^{(0)}$	$X_3^{(0)}$	$X_4^{(0)}$	$X_5^{(0)}$	$X_6^{(0)}$	$X_7^{(0)}$	$X_8^{(0)}$	$X_9^{(0)}$	$X_{10}^{(0)}$	$X_{11}^{(0)}$	$X_{12}^{(0)}$
$X_1^{(0)}$	0	0.026	0.1803	7.0182	6.9881	7.0657	5.5971	5.5362	5.4645	30.126	30.042	29.959
$X_2^{(0)}$	0.026	0	0.1582	6.9992	6.9691	7.0467	5.5796	5.5189	5.4473	30.110	30.027	29.944
$X_3^{(0)}$	0.1803	0.1582	0	5.9121	5.8810	5.9600	4.5444	4.4897	4.4257	29.112	29.029	28.947
$X_4^{(0)}$	7.0182	6.9992	5.9121	0	0.0401	0.0501	3.5520	3.6149	3.6868	24.504	24.433	24.359
$X_5^{(0)}$	6.9881	6.9691	5.8810	0.0401	0	0.0875	3.5339	3.5965	3.6681	24.531	24.460	24.386
$X_6^{(0)}$	7.0657	7.0467	5.9600	0.0501	0.0875	0	3.5782	3.6416	3.7140	24.463	24.392	24.318
$X_7^{(0)}$	5.5971	5.5796	4.5444	3.5520	3.5339	3.5782	0	0.0850	0.1844	26.607	26.526	26.444
$X_8^{(0)}$	5.5362	5.5189	4.4897	3.6149	3.5965	3.6416	0.0850	0	0.0996	26.662	26.580	26.498
$X_9^{(0)}$	5.4645	5.4473	4.4257	3.6868	3.6681	3.7140	0.1844	0.0996	0	26.727	26.645	26.563
$X_{10}^{(0)}$	30.126	30.110	29.112	24.504	24.531	24.463	26.607	26.662	26.727	0	0.1189	0.2143
$X_{11}^{(0)}$	30.042	30.027	29.029	24.433	24.460	24.392	26.526	26.580	26.645	0.1189	0	0.0973
$X_{12}^{(0)}$	29.959	29.944	28.947	24.359	24.386	24.318	26.444	26.498	26.563	0.2143	0.0973	0

因为采集得到的信号之间的差别很微弱，所以为了更好地实现聚类，本文采用欧式距离算法。

根据谱系聚类算法的步骤操作：

步骤一：先求出矩阵 $D_b^{(0)}$ 中除对角线元素外的最小元素，假如这个最小元素在 $X_i^{(b)}$ 和 $X_j^{(b)}$ 两个类的距离之间，就把 $X_i^{(b)}$ 和 $X_j^{(b)}$ 两个类合并成一个新的类 $X_{ij}^{(b+1)}$ ，并且由此建立新的分类： $X_1^{(b+1)}$ ， $X_2^{(b+1)}$ ， $\dots$ 。

步骤二：计算出合并后的新的分类间的距离。因为在实验采集信号时，采集到的故障信号具有偶然性，为了获得更好的样本之间的距离实现聚类，本文采用最短距离算法与最长距离算法来计算确定新类别的距离区间。

步骤三：令 $b = b + 1$ ，返回到步骤一，重复计算合并，直到 $D^{(b)}$ 满足条件为止，算法停止，得到的结果就是聚类分析的结果。在此，经过 8 次的聚类合并后，得到表 5-3 所列距离矩阵，就是聚类结果。

表 5-3 经谱系聚类算法合并的距离矩阵

样本集	$X_{123}^{(8)}$	$X_{456}^{(8)}$	$X_{789}^{(8)}$	$X_{10,11,12}^{(8)}$
$X_{123}^{(8)}$	0 ~ 0.1803	5.8810 ~ 7.0657	4.4257 ~ 5.5971	28.944 ~ 30.126
$X_{456}^{(8)}$	5.8810 ~ 7.0657	0 ~ 0.0875	3.5339 ~ 3.7140	24.318 ~ 24.531
$X_{789}^{(8)}$	4.4257 ~ 5.5971	3.5339 ~ 3.7140	0 ~ 0.1844	26.444 ~ 26.727
$X_{10,11,12}^{(8)}$	28.944 ~ 30.126	24.318 ~ 24.531	26.444 ~ 26.727	0 ~ 0.2143

谱系聚类算法对数据集进行一次扫描就能获得比较好的聚类结果，而且可以对结果进一步扫描以提高聚类的质量，这种算法的时间复杂度用 $O(N)$ 表示，其中 N 为数据集中的数

据对象数目。

通过上述内容可以知道，将小波变换和聚类分析结合起来，能够很好地对故障位移信号进行处理，确定不同位移信号的故障。对一组待诊断故障的位移信号按照上述方法进行处理。得到的位移信号图和系数如图 5-3 和图 5-4 所示。

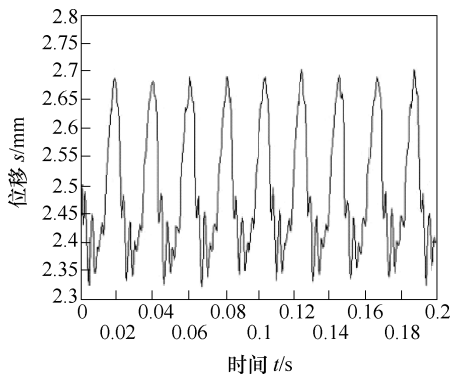


图 5-3 待诊断故障位移信号

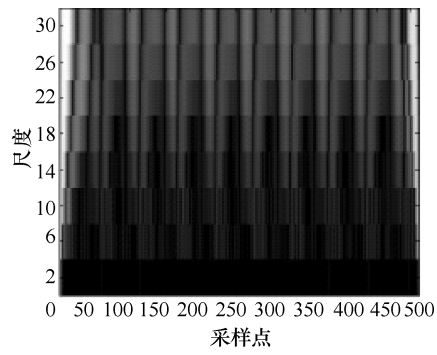


图 5-4 待诊断故障小波系数

并得到待诊断故障的特征向量为 $\mathbf{X}_x^{(0)} = (1.0263 \ 3.8850 \ 6.1659 \ 8.7933 \ 11.4151 \ 13.9544 \ 16.4290 \ 18.8315)$ ，将它加入样本集，然后求待诊断样本与各个初始标准样本之间的欧式距离，见表 5-4。

表 5-4 待诊断样本与各初始样本的距离

样本集	$\mathbf{X}_1^{(0)}$	$\mathbf{X}_2^{(0)}$	$\mathbf{X}_3^{(0)}$	$\mathbf{X}_4^{(0)}$	$\mathbf{X}_5^{(0)}$	$\mathbf{X}_6^{(0)}$	$\mathbf{X}_7^{(0)}$	$\mathbf{X}_8^{(0)}$	$\mathbf{X}_9^{(0)}$	$\mathbf{X}_{10}^{(0)}$	$\mathbf{X}_{11}^{(0)}$	$\mathbf{X}_{12}^{(0)}$
$\mathbf{X}_x^{(0)}$	0.250	0.228	0.071	5.848	5.817	5.896	4.488	4.434	4.371	29.0578	28.975	28.893

由表 5-4 可以看出，待诊断的故障样本与 $\mathbf{X}_x^{(0)}$ 与 $\mathbf{X}_1^{(0)}$ 、 $\mathbf{X}_2^{(0)}$ 、和 $\mathbf{X}_3^{(0)}$ 之间的距离明显小于和其他初始样本之间的距离，因此可以诊断出未知故障是转子不平衡。

因为信号采样具有一定的偶然性，所以待诊断样本和初始样本集的样本之间的距离并不一定都在表 5-4 中。但是通过比较，待诊断样本与各个初始样本之间的距离能够有效地识别待诊断样本的故障类型。

第6章 基于粗糙集和神经网络的旋转机械故障知识识别

6.1 知识系统的构建

6.1.1 故障诊断的知识构成与表示

知识比信息更复杂，但更有价值。知识是以各种方式把多个信息关联在一起的信息结构，是人类在长期的生产和实践活动中所积累的认识和经验的总结。专家系统的水平取决于其所拥有的知识水平和利用这些知识进行推理解决问题的能力。在知识库中，知识是以一定的形式来表示的，知识的表示就是研究如何用最合适的数据结构来描述和组织领域专家头脑中的经验知识，使对所要解决的问题最为有利。在专家系统对知识的表示的基本要求是可扩充性、简明性、明确性等。

1. 诊断知识的构成

知识可分为静态知识和动态知识，静态知识主要指对象性知识，包括与事物有关的各种概念，事物间的相互联系和事物的描述等；动态知识是有关问题求解的知识，通常为一种过程，说明如何利用已有的数据和静态知识进行问题求解，例如，怎样寻找有关的事实，如何进行推理等等。

有关设备故障诊断这个主题的经验有序集合体便构成了故障诊断知识。根据人工智能领域对知识的分类方法以及设备故障诊断领域的特点，故障诊断知识可划分如下：

(1) 故障征兆 故障征兆属于事实性知识，是对设备发生故障时其各种特征属性值的定性或定量的描述。

(2) 背景知识 表示与诊断对象故障诊断有关的知识，一部分来自理论分析、故障机理研究、模型实验的实测数据、故障可能引起的后果的分级等；其余来自诊断对象发生故障时的情景描述，包括故障类型、故障现象、处理措施等。

(3) 经验知识 经验知识是指领域专家在长期工作实践中积累起来的有关如何进行设备故障诊断的启发式知识，通常称为浅知识。它存在于专家的头脑中并被专家非常灵活地应用，虽然经验知识缺乏充分的理论依据，但在故障诊断中一般十分有效，开发专家系统的一个主要任务就是继承和推广专家的经验知识。

(4) 模型知识 模型知识（亦称为深知识）是指基于设备的结构、行为和功能描述的知识，能够对新出现的故障进行诊断。

(5) 过程知识 过程知识常常反映一个动态的具有时序的过程。如果一个过程能用数学模型描述，则过程知识可以由计算机程序流程图来定义。对该类知识的运用就是对描述它的过程的调用。

(6) 决策知识 决策知识为说明设备及其各子系统、部件和零件出现异常时如何采取措施的知识，包括针对各类故障可采用的检测和维修方案，以及故障重复发生时的对策等。

决策知识一方面可作为故障排除和设备维修的参考，另一方面在故障不能完全确诊时也可作为经验知识的必要补充。

(7) 控制知识 控制知识是关于知识的知识。它主要用于协调各类知识的运用以提高诊断效率。

以上各类知识中，控制知识即为元级知识，它是控制诊断过程的策略性知识，其余称为目标级知识，是指故障诊断直接用到的领域级知识。根据知识的性质，目标级知识可分为描述性知识和过程性知识，描述性知识包括故障征兆、背景知识、经验知识和决策知识，以上内容如图 6-1 所示。

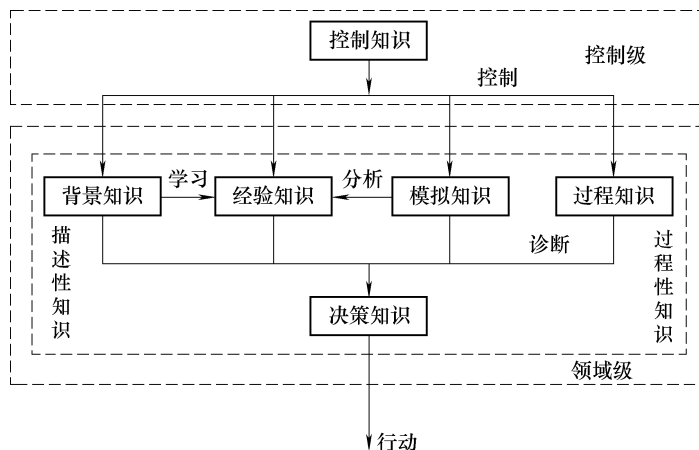


图 6-1 诊断知识的组成及分类

2. 知识的一般表示方法

基于知识的旋转机械的故障诊断方法实质是如何获得知识、运用知识发现故障的过程。因此，知识性是知识征兆专家关键特征之一，它的关键技术在于知识的表示、获取和应用。知识的表示方法是至关重要的，它不仅决定了知识应用的形式，而且也决定了知识处理的效率和实现的域空间规模的大小，其成功与否直接关系到智能设计专家系统的水平。然而，在不同领域，专家经验知识又具有各自不同的特点。因此，知识表示方法的研究历来是建立专家系统首要解决的问题。

所谓知识的表示就是一种描述，是知识的符号化过程。知识的表示方法可分为叙述性（Declarative）表示和过程性（Procedural）表示。叙述性表示只针对知识的使用方法，知识与识别分开，通过编程实现知识的识别，知识内容是一定的，优点是严密、模块化、完备推理，缺点是低效率；过程性表示是融合知识与识别，有针对性地建立知识库来实现识别，优点是高效率。目前用得较多的主要有以下几种：状态空间表示法、产生式规则表示法、语义网络表示法和框架表示法等。

(1) 状态空间表示法 状态空间表示法以状态（state）和运算（operator）为基础来表示和求解问题，状态是为描述某类不同事物间的差别而引入的一组最少变量 $q_0, q_1, \dots, q_n$ 的有序集合，其向量形式如下： $Q = [q_0, q_1, \dots, q_n]^T$ ， $q_i (i=0, 1, \dots, n)$ 为集合的分量，称为状态变量。给定每个分量的一组值就得到一个具体的状态。使问题从一种状态变化为另一种状态的手段称为操作符或算符，可把状态空间记为三元状态 (S, F, G) ，即所有可能的问题初始状态集合 S 、操作符集合 F 以及目标状态集合 G 。

(2) 产生规则表示法 产生式规则表示法是目前许多人工智能系统广泛采用的知识表示法。由产生式规则表示的知识构成的知识库称为产生式规则库(简称规则库),由产生式规则库构成的系统称为产生式系统。产生式规则较好地解决了知识表示方法的不确定描述、不完备知识的表示和推理,得到了广泛的应用。产生式规则的一般表达式如下:对于确定性规则,有

IF 前提 1 AND(OR)
 前提 2 AND(OR)

 前提 N
THEN 结论

其中,前提也称为条件,结论也称为操作。当满足前提条件时,则执行某一操作。一般来说,规则也可以表示不确定或不完备的知识,这就要给前提条件和规则本身赋予一定的信度值。在推理的同时,该值以预定的方式进行传播,最后得到的结论也带有一个信度,它表示该结论成立的可信程度。其表达形式如下:

IF 前提 1(信度) AND(OR)
 前提 2(信度) AND(OR)

 前提 N
THEN 结论(信度)

前提、结论和信度是规则的三要素,前提和结论的信度一般由专家给定,并经过实践验证,它是不精确推理的依据,信度就是不精确推理算法所得的信度。在产生式系统中,主要包括规则库、推理机和工作存储空间。工作存储空间保存着使用数据的结构、已知事实、中间结果和结论。

(3) 语义网络表示法 语义网络是对知识的有向图表示方法。一个语义网络由若干以有向图表表示的三元组(节点和弧线或链线)组成。节点用于表示实体、概念和情况等,弧线用于表示节点间的关系。语义网络表示由下列 4 个相关部分组成:语法部分、结构部分、过程部分、语义部分。

(4) 框架表示法 在人类日常的思维和理解活动中,当分析和解释遇到新情况时,要使用过去经验中积累的知识。这些知识规模巨大而且以很好的组织形式保留在人的记忆之中。也就是人们试图用以往的经验来分析解释当前的情况。经验的存放只能以一个通用的数据库结构的形式放置,这样的数据结构称为框架。

框架是知识表示的基本单位。框架由槽组成,槽由侧面组成,一个槽对应于故障某一方面的征兆属性,一个侧面可以描述一个征兆的具体属性。槽和侧面的属性值分别称为槽值和侧面值,可以是不同类型、字形或数字等。在一个运用框架理论建立起的知识的系统中,通常来说都含有两个以上的框架,为了区分不同的框架、槽、侧面,设置不同的名字、槽、侧面,学术上称之为框架名、槽名、侧面名,再有就是通过约束条件来说明一些什么样的值可以写到框架对应的槽或侧面中。也就是说,在已知知识事物下,又有新的加入时,那就从已知中寻找与这个新事物相同和不同的部分,加以区分、匹配;如没有记录的与之匹配,则补充进记录中。框架网络包括了许多槽和侧面,每个槽包含若干个侧面,每个侧面又包括若干

个值，通过槽和侧面的属性值加以联系上下槽，这样就构成了组成树状交叉结构的框架系统。

6.1.2 框架理论

1. 框架理论概述

1975 年，美国著名的人工智能学者明斯基在其论文“A frame work for representing knowledge”中提出了可以把框架理论作为理解视觉、自然语言对话及其他复杂行为的基础。该理论同时提到，人们以一种类似于框架的结构存储形式认识现实世界中各种事物，当人们对一种新事物重新认识时，就从已经发生过的知识框架中找出其中最符合条件的一个，并根据现实对事物具体细节实行修改、补充等操作，从而达到认识新事物的目的。例如，当人走进实验室时，在已经对“实验室”有了认知的情况下，他会知道实验室一定有四面墙、实验桌、仪器、机器设备等，尽管对其细节(如实验桌的大小、机械设备的型号、仪器的数量、墙的颜色等)还不清楚，但对实验室的基本事物还是可以猜测到的。这就是因为人的记忆中已经建立起了相应的事物框架，当提到实验室时，只要从记忆中提出这些事物的框架，就可以清楚了解实验室的所有细节了。当然，若对给定的条件，记忆中没有相应框架，应建立相应新的框架，给框架赋值从而进一步表现事物细节，框架的自身改善也是十分重要的。

2. 框架

下面给出框架的一般表示形式见表 6-1。

表 6-1 框架的一般表现形式

<框架名>槽名 1	槽名 2		槽名 <i>n</i>
侧面名: 1	侧面名: 1		侧面名: 1
侧面名: 2	侧面名: 2		侧面名: 2
...	...		...
侧面名: <i>m</i> ₁	侧面名: <i>m</i> ₂		侧面名: <i>m</i> _{<i>n</i>}

由框架的一般表现形式可以知道，框架与槽、侧面、侧面值是包含关系，就是说它们是一对多的关系，一个框架可以有多个槽，一个槽可以有多个侧面，一个侧面可以有多个侧面值。还要说明一点的是，这些值的类型可以是字符串、数值、布尔值，当然也可以是动作或过程名称，例如框架的名字，通过这个识别调用这个名字实现一个框架对另一个框架的调用，下图是已建立起的知识库，其中包括了此课题选择的 11 个典型征兆，详见图 6-2，并可以根据此表建立起系统中必需的知识库。

“知识库”框架用于描述各种故障的共同属性，但凡是在“知识库”框架中已经指出的属性，在这里就可以不再指出；框架用于描述故障的共同属性，但是，如果一个在上层框架中描述的属性在下层框架需作进一步说明时，则需要在下层框架中再次给出描述。在框架结构之中，槽有关键的作用，因为它既描述了事物各种方面的属性，又用来表述事物间的复杂关系。

6.1.3 框架构建的问题

1. 事物属性的全面性和必需性

在运用框架理论建立的知识库故障诊断系统中，故障征兆属性可以表示成为知识集合。

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwax	zdyx	xwtz	zsgj	jdfx	slqy	zdyys	zdyw	zdyfh	zdyyl	gzll
1	叠加波形	2x, 3x等	1x	不稳定	双向	不规则变	双椭圆或不	不正进	变化	不明显	不变	不规则变化	不变	轴裂纹
2	低频叠加波	0.5x以	1x, x/n, n	突发强振	径向	不稳定	紊乱或扩散	正进	突变	有影响	不变	敏感, 突发	达到某一值	气流喘振
3	严重	严重削波	x/2, nx	不稳定	径向	反向位移	紊乱	正进	突变	不明显	不变	不明显	不变	动静件全周
4	低频成分明显	1~30的低频	1x	大幅度波动	径向	不稳定	紊乱	正进	变化	明显	不变	很明显	很明显	喘振
5	正弦波	1x	1x	不稳定	径向, 轴向	不稳定	双环椭圆	正进	变化	不明显	不变	不明显	不变	动静件轴向
6	各成分叠加	ω_0 及 $(\omega_0 - \omega_1)$ 组合频率	不稳定	径向	不稳定	椭圆	正进	变化	振动突然增	不变	很明显	很明显	很明显	旋转失速
7	有低频成分	0.42x~0.4组合频率	不稳定	径向	不稳定	扩散, 不规则	正进	变化	振动突然增	有影响	不明显	不变	不变	油膜振荡
8	轻微削波	1x/n, nx	1x	不稳定	径向	反向位移	紊乱	正进	突变	不明显	不变	不变	不变	动静件局部
9	有低频成分	0~0.5x	1x	较稳定	径向	不稳定	双环椭圆	正进	变化	明显	有影响	不明显	不变	油膜涡动
10	次谐波叠加	x/n	1x	不稳定	径向	杂乱	不稳定	正进	变化	明显	不变	明显	不变	热套配合过
11	基频、分数谐波、分数	2x, 3x, nx	不稳定, 工	轴向	不稳定	紊乱	正进	变化	很明显	不变	很明显	不变	不变	支撑部件松
12	正弦波	1x	2x, 高次谐	稳定, 启动	径向	正常运行	椭圆	正进	启动时失真	明显	不变	不明显	不变	临时性弯曲
13	正弦波	1x	2x, 高次谐	稳定, 启动	径向	突变后稳	椭圆	正进	突变后稳	明显	不变	不明显	不变	永久性弯曲
14	正弦波	1x	较小的高次	突变性增大	径向	突变后稳	椭圆	正进	突变后稳	明显	不变	不明显	不变	突发性不平衡
15	正弦波	1x	较小的高次	逐渐增大	径向	渐变	椭圆	正进	渐变	明显	不变	不明显	不变	渐变不平衡
16	正弦波	1x	较小的高次	稳定	径向	稳定	椭圆	正进	不变	明显	不变	不明显	不变	原始不平衡
17	1×频与2×频	2×频明显	1×频、高	稳定	轴向	稳定	双环椭圆	正进	不变	明显	有影响	明显	不变	平行不对中
18	1×频与2×频	2×频明显	1×频、高	稳定	径向、轴向	较稳定	双环椭圆	正进	不变	明显	有影响	明显	不变	综合不对中
19	正弦波	1x	较小的高次	稳定	正进	稳定	椭圆	正进	不变	明显	不变	不明显	不变	转子不平衡
20	含有低频成分	小于0.5x	1x, x/n, nx	不稳定, 突	径向	不稳定	紊乱, 扩散	正进	突变	有影响	不变	很敏感, 达	明显达到某	迷宫密封气
21	叠加波形	2x, 3x等高	1x	不稳定	径向, 轴向	不规则变	双椭圆或不	不正进	改变	不明显	不变	不规则变化	不变	转轴横向裂
22	基频、分数谐波、分数	2x, 3x	不稳定, 过	松动方向	径向	紊乱	正进	变化	很明显	不变	很明显	不变	不变	转子支承前
23	次谐波叠加波	x/n	1x	不稳定	径向	杂乱	不稳定	正进	改变	明显	不变	明显	不变	转子热套配
24	1x与2x叠加波	2x频明显	1x高次谐波	稳定	径向, 轴向	较稳定	双环椭圆	正进	不变	明显	有影响	明显	不变	角度不对中
26	轻微削波	x/n, nx	1x	不稳定	径向	反向位移	紊乱	正进	突变	不明显	不变	不影响	不变	动静件局部

图 6-2 关于一个诊断的知识库框架

知识系统通过大量的表达各相关方面属性值的槽来组成知识集合, 并用之来解决所需的问题。“各有关方面属性”的含义有以下两点: 设计系统时定的目标属性, 即求解的问题属性, 或是可能要用到的属性; 对有关的属性设立槽。一般来说, 事物是有某些方面属性的, 但并不是任一个属性都是设计的知识系统所必需的。因此, 首先在知道设计系统的目的后就要有目的地选择一些必要属性, 这些属性是系统诊断所必需的, 把它们筛选出来建立相应的槽。

2. 知识框架的联系性

在知识系统中, 通过设置相应的槽来作为知识之间的联系, 从而构成一个完整的知识体系。在框架构成的知识系统中, 通过槽值设置为另一个框架名的形式实现了对不同事物的知识系统的联系。经过多年的发展, 现在框架表示系统中对于槽名也有公认的标准。称这些槽名为系统预定义槽名, 下面列出其中用得较多的几个:

(1)ISA 槽 ISA 槽通常用来说明事物在抽象概念上的一种类属关系。常见表达的含义是“一个特性是它的一个属性”之类的意思。在用它来表示下层框架的槽时, 则说明下层描述的事物是上一个层的一个属性, 上层是更宽泛、更抽象的概念。ISA 槽如下:

框架名: ISA <平行不对中>

时域波形: 类别 <1 倍频>

特征频率: 类别 <1 倍频>

常伴频率: 类别 <2 倍频明显较高>

振动稳定性: 类别 <稳定>

振动方向性: 方向 <轴向>

相位特征：类别 < 稳定 >

轴心轨迹：类别 < 双环椭圆 >

“平行不对中”框架中的 ISA 槽指出的是所有不对中类型中的一种，不对中相对于平行不对中具有更宽泛的范围。通常 ISA 槽具有继承性，即下一层具有上一层的属性值。

(2) AKO 槽 AKO 槽一般用来表示具体事物间的类属关系。常见表达形式为下层是上层的一种。它与 ISA 没有太大区别，对于具体事物可以通用，也具有继承性。对于上例可以通用。

(3) Subelass 槽 这种槽是用来表示子集与总集之间的类属关系，将它用来表示上下框架时，它表示的就是下层是上层的一个子集，比如对于上例来说，平行不对中就是不对中的一个子集。

(4) Instance 槽 Instance 槽与 AKO 槽存在逆关系。当把它用来表示上层框架的槽时，同时可以得到此种类型故障的下一层框架表示些什么，也有继承性。对于上例，假设还有“角度不对中”、“综合不对中”，则“不对中”框架中可用 Instance 槽来指出它的这些下层框架，即：

框架名：Instance < 平行不对中 > < 角度不对中 > < 综合不对中 >

时域波形：类别 < 1 倍频，2 倍频 >

特征频率：类别 < 1 倍频，2 倍频 >

常伴频率：类别 < 2 倍频明显较高 >

振动稳定性：类别 < 稳定，不稳定 >

振动方向性：方向 < 轴向，径向，双向 >

相位特征：类别 < 稳定，不稳定 >

轴心轨迹：类别 < 双环椭圆，椭圆 >

(5) Part-of 槽 此种槽要注意与上面四种的区分，它们有本质区别的。Part-of 槽是用来表示“部分”与“整体”的关系，它在性质上不具有继承性，只说明下一层是上层的构成部分。对于上例来说，平行不对中与不对中就不是部分与整体的关系，因为构成平行不对中的是各种属性值，可以说轴心轨迹是平行不对中的一个部分考察属性。也就是说，在这个诊断知识库中，轴心轨迹才是与平行不对中构成部分与整体的关系。而不能从字面上来说平行不对中是不对中的一部分，它们应该属于子类与类的关系。再举一个与故障不相关，但更好理解的例子，发动机是火车的一部分，但两者的构造和材料，种类是完成不一样的，发动机这个集合没有火车的大量属性，火车是一个整体，它包括了发动机，但火车有的属性，发动机没有，这一差异是很重要的。当然一个框架里的对象可同时具有上、下层结构关系和“整体”与“部分”的关系时，例如魔方里的小方块和魔方的关系。

(6) Infer 槽 Infer 槽是用来表示逻辑推理关系的，大多数用于表示产生式规则。它是一种必要的关系，对产生的问题可以采取什么样的对应措施，逻辑推理性强是它的显著特点。

(7) Possible-Reason 槽 此槽与上面的 Infer 槽是方向相反的推理。它用来表示往前推，产生这个问题的原因在什么地方。当然，它主要也是用来表示逻辑推理类的。

此外还有表示时间关系槽、空间关系槽、相似关系槽等，总之，它们都是一种数据、知识的组织形式，用来使大量的数据符号有秩序地组织在一起，便于查询和管理。

3. 合理的组织框架的槽

由于槽具有继承性这个特点，通过一些槽（如 AKO 槽、Instance 槽等）即可实现框架间上下层的联系，这一特性使得有可能抽取不同框架的相同属性，放入到上层框架中，这样做的好处在于：很大程度上减少冗余的信息；有效保证了知识的一致性。通过这样合理的处理，就可把相同的属性放在上一层，而下一层就可以放一些特有的属性，实现了最简捷有效的框架区分。

4. 实现框架的有效推理

一般来说，知识系统由两部分构成：一是知识库；另一是框架推理。知识库可以通过框架理论来建构，用来解决知识的构成问题；框架推理是要达到解释功能，通过知识库中的知识来解决问题，它是一个反复进行具有不确定性的框架匹配的过程。具体的设置的框架匹配槽值有如下类别：“充分条件”槽、“必要条件”槽、“触发条件”槽、“否决条件”槽及“阈值”槽等。不同槽值来配合不确定性匹配的实现。根据其所用的推理方法，设置不同种类的槽来配合推理。总之，这些都是很基础的，要做到全局出发，统筹安排，合理组织，以避免信息的重复和冗余，使应用方便。只有这样，才能为旋转机械故障诊断专家系统建立一个良好的基础。

5. 框架表示法的特点

(1) 结构性 用框架构建知识系统的最大优势是它的结构性，运用框架表示知识的基本单位为框架，而框架下有多个槽，槽又有多个侧面，这样就结构性地把知识表示出来，也能够表示出内部结构关系和知识间的联系，所以说它的结构性强。

这一特点也是优于产生式表示法的主要方面。在运用产生式规则的时候，知识单位太小，难于处理复杂问题，也不能表示出知识间的结构关系；它只能显示因果关系，不能表示更复杂的关系，如并列、选择等。

(2) 继承性 在运用框架理论的知识系统中，通过对槽值的不同设置，例如另一个框架的名字，就可以实现框架间的联系，而下一层框架可以继承使用上一层框架的槽值，这样就在实现了去除知识的冗余、保证了知识的一致性的同时，也实现了框架间的继承。

(3) 自然性 框架表示法的自然性是说，在观察事物时人的自然思维活动——认识新事物时，调用已存储了的事物的框架，进行修改、补充，从而得到了新的认识。

框架表示法的主要缺点是缺乏表达过程性的知识的能力。故而结合产生式表示法可以弥补框架表示法的这个缺点。与其他知识表示法相比，故障框架表示的特性决定了其可以表达具有很强的结构性的故障的知识，结构性更强；产生式表示法的缺点是知识单元过小，无法表示出复杂故障的知识结构关系；面向对象的表示关系的特点是表示子类和父类的继承关系，而不具有框架表示法的结构性。

6.1.4 旋转机械典型的故障知识表示

1. 知识表示

依据典型故障的征兆集和框架理论而建立起知识表示，可以取以下几种征兆：时域波形、特征频率、常伴频率、振动稳定性、振动方向、相位特征、轴心轨迹、进动方向、矢量区域、转速、油温、介质温度、压力、流量、负荷等。表 6-2 为一种具体的典型的故障在框架中的表达方式：

表 6-2 典型故障表示

编号	故障名称	时域波形	特征频率	常伴频率	振动稳定性	振动方向	……
1	轴裂纹	叠加波形	2×, 3×	1×	不稳定	径向, 轴向	……

下面是整体系统表的应用过程，并对知识表示和知识库的创建进行说明。如图 6-3 所示，存在一个机械设备的知识表达系统，取典型的十个故障类型，并按征兆的不同建立起约简表。

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdfx	xwtz	zxgj	jdfx	slqy	zdyes	zdyvw	zdyfh	zdyyl	gzll
1	叠加波形	2x, 3x	1x	不稳定	双向	不规则变	双椭圆或	正进动	变化	不明显	不变	不规则变	不变	轴裂纹
12	正弦波	1x	2x, 高次谐波	稳定, 升起	径向	正常运行	椭圆	正进动	启动时失	明显	不变	不明显	不变	临时性不平衡
13	正弦波	1x	2x, 高次谐波	稳定, 启动	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳	明显	不变	不明显	不变	永久性不平衡
14	正弦波	1x	较小的高次谐波	突变性增大	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳	明显	不变	不明显	不变	突发性不平衡
15	正弦波	1x	较小的高次谐波	逐渐增大	径向	渐变	椭圆	正进动	渐变	明显	不变	不明显	不变	渐发性不平衡
16	正弦波	1x	较小的高次谐波	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	原始不平衡
17	1×频与2×频	1×频、高	稳定	轴向	稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	平行不对中	
18	1×频与2×频	1×频、高	稳定	径向、转	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	综合不对中	
19	正弦波	1x	较小的高次谐波	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	转子不平衡
24	1x与2x	2x频明显	1x高次谐波	稳定	径向、转	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	角度不对中

图 6-3 约简表

对上图进行数据化，以便后面的数据处理。对该故障征兆知识系统的文字进行数据化得到图 6-4。

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdfx	xwtz	zxgj	jdfx	slqy	zdyes	zdyvw	zdyfh	zdyyl	gzll
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2
13	2	2	2	3	2	3	2	1	3	2	1	2	1	3
14	2	2	3	4	2	3	2	1	3	2	1	2	1	4
15	2	2	3	5	2	4	2	1	4	2	1	2	1	5
16	2	2	3	5	2	5	2	1	5	2	1	2	1	6
17	3	3	4	5	3	5	3	1	5	2	2	3	1	7
18	3	3	4	5	1	6	3	1	5	2	2	3	1	8
19	2	2	5	5	2	5	2	1	5	2	3	2	1	9
24	3	3	4	5	1	6	3	1	5	2	2	3	1	10

图 6-4 数字化后约简化

为了简便，表中使用故障名每个词的第一个字母 sybx、tzpl、cppl、zdwdx、zdfx、xwtz、zxgj、jdfx、slqy、zdyes、zdyvw、zdyfh、zdyyl 代表条件属性：时域波形、特征频率、常伴频率、振动稳定性、振动方向、相位特征、轴心轨迹、进动方向、矢量区域；同时考虑几个敏感参数：转速、油温、负荷、压力。字母 gzll 表示故障这个决策属性。表中的数字与故障现象及征兆是一一对应的。以这些数字代表的征兆集合来表示各个故障。可通过对这些数字的处理来实现对故障的诊断。

2. 知识的处理

(1) 删除冗余决策知识 知识库中每条记录代表着一种决策知识，在实现故障诊断系统时，故障知识一般会反复出现，这样即加重了知识征兆的重合率，效率低。因此在处理知识过程中，在决策表中需要将之删除，简化知识决策表。

(2) 去除冗余条件属性 根据定义可分析出典型故障表示，根据公式 $Ind(A, B, C) = Ind(A, B)$ ，表中的特征 jdfx 和 zdyyl 的值对决策表决策属性的等价类分类没有影响，所以是可约简的。那么表 6-2 的内容可表示成图 6-5 的情况。图 6-5 为去除多余条件属性的知识

表达系统。

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdfx	xwtz	zxgj	slqy	zdycs	zdyw	zdyfh	gzll
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
13	2	2	2	3	2	3	2	3	2	1	2	3
14	2	2	3	4	2	3	2	3	2	1	2	4
15	2	2	3	5	2	4	2	4	2	1	2	5
16	2	2	3	5	2	5	2	5	2	1	2	6
17	3	3	4	5	3	5	3	5	2	2	3	7
18	3	3	4	5	1	6	3	5	2	2	3	8
19	2	2	5	5	2	5	2	5	2	3	2	9
24	3	3	4	5	1	6	3	5	2	2	3	10

图 6-5 去除多余条件属性的知识表达系统

6.2 粗糙集属性约简

粗糙集(Rough Set, RS)理论是 Z. Pawlak 于 1982 年提出的一种数据分析理论，常用于处理模糊和不精确的问题。RS 的本质思想是利用不可分辨关系建立论域的一个划分，得到不可区分的等价类，从而建立一个近似空间来进行粒度计算，目前粗糙集已成为粒度计算的主要工具之一。

6.2.1 近似空间和知识库

1. 近似空间与不可分辨关系

定义 6.1：知识直接与真实或抽象世界有关的分类模式联系在一起，称为论域 U ； R 为建立在 U 上的一个等价关系，称二元有序组 $AS = (U, R)$ 为近似空间(Approximate space)。

定义 6.2：令 R 为等价关系族，设 $P \subseteq R$ ，且 $P \neq \emptyset$ ，则 P 中所有的等价关系的交集称为 P 上的不可分辨关系(Indiscernibility Relation)，记作 $IND(P)$ ，即有

$$[x]_{IND(P)} = \bigcap_{R \in P} [x]_R \tag{6-1}$$

$U/IND(P)$ (即等价关系 $IND(P)$ 的所有等价类)表示等价关系族 P 相关的知识，称为 K 中关于 U 的 P 基本知识(P 基本集)。简单地，用 U/P 表示 $U/IND(P)$ 。

2. 知识与知识库

知识库就是征兆按不同分类方法的集合，知识就为征兆集合。等价关系就是一种将论域中的对象分类的方法，也就是按照不同的类属性进行分类再有序排放到一起的方法。所以，论域也就是知识集合。

定义 6.3：知识集为论域 U 的一个子集($\emptyset$ 也称之为概念)； U 的不同知识分类形成的集合称之为 U 的知识库，所以一定程度上，近似空间也称为关于论域 U 的知识。

定义 6.4：用 $K = (U, R)$ 表示知识库，其中，选取 R 的不同子集 P 可以得到不同的知识集合。 R 为论域 U 上的等价关系族，习惯上，用 U/P 代替 $U/IND(P)$ 。具体来说， $U = \{u_1, u_2, \cdots, u_n\}$ 表示论域空间，是所要讨论的个体的集合。 $U/r = \{u_1, u_2, \cdots, u_n\}$ 定义为论域空间根据 r 所得的分类。以上表达式中， u_i 为 U 的对象； r 表示 U 上的一个等价关系； $E_i \subseteq U$ 是等价类。

【例 6.1】 现有故障的集合 $U = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6\}$ ，故障的基本情况描述见表 6-3。

表 6-3 故障的基本情况描述

对象\属性	时域波形 (一、二、三)	特征频率 (1×、2×、3×)	振动稳定性 (稳定、不稳定)
X_2	二	2×	不稳定
X_3	二	2×	不稳定
X_4	三	3×	不稳定
X_5	一	3×	稳定
X_6	一	3×	不稳定

设属性对应的等价类 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为

$$\begin{aligned} R_1 &= \{ \langle x, y \rangle \mid x \text{ 与 } y \text{ 时域波形相同} \} \\ R_2 &= \{ \langle x, y \rangle \mid x \text{ 与 } y \text{ 特征频率相同} \} \\ R_3 &= \{ \langle x, y \rangle \mid x \text{ 与 } y \text{ 振动稳定性相同} \} \end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned} U/R_1 &= \{ \{x_1, x_5, x_6\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\} \} \text{ 为关于时域波形的初等知识。} \\ U/R_2 &= \{ \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\} \} \text{ 为关于特征频率的初等知识。} \\ U/R_3 &= \{ \{x_1, x_5\}, \{x_2, x_3, x_4, x_6\} \} \text{ 为关于振动稳定性的初等知识。} \end{aligned}$$

其中的等价类为知识库 $K = (U, \{R_1, R_2, R_3\})$ 的初等概念。

若设 $P = \{R_1, R_2\}$ ，则基本知识 P 为 $U/\text{IND}(P) = \{ \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6\} \}$ 。

$\{x_1, x_5\} = \{x_1, x_5, x_6\} \cap \{x_1, x_4, x_5\}$ 是 $P = \{R_1, R_2\}$ 的时域波形和特征频率相同的分类基本概念。如定义 6.3 所述，概念是对象的集合，如 $\{x_4\} \cup \{x_1, x_2\} = \{x_1, x_2, x_4\}$ 是 R_1 的概念，表示上表所有的故障。有些概念在知识库中对应空集，如 $\{x_4\} \cap \{x_1, x_2\} = \emptyset$ ，即知识库中不存在包含所属故障征兆的故障类型。

6.2.2 上下近似与粗糙集

在已经建立的征兆知识库中，由于表示文字是模糊，不精确的，模糊概念很难精确等价于已知的征兆知识。例如，集合(概念) $\{x_1, x_2, x_3\}$ 在例 6.1 所给的知识库 $K: (U, R)$ 中是一个含糊的概念。下近似和上近似为定义域 K 中的一对精确、模糊近似地表示。具体来说，如在例 6.1 中， $\{X_1, X_2, X_3\}$ 的 R 下近似为 $\{X_2, X_3\}$ ， R 上近似为 $\{X_1, X_2, X_3, X_5\}$ 。

定义 6.5：有 $X \subseteq U$ ， R 为其一个等价关系，称

$$\begin{aligned} R_*(X) &= \{ X \in U/R \mid X \subseteq Y \} \text{ 为 } X \text{ 关于 } R \text{ 的下近似；} \\ R^*(X) &= \{ x/(x \in U) \wedge ([x]_B \cap X) \} \text{ 为 } X \text{ 的上近似；} \\ BN_B(X) &= R^*(X) - R_*(X) \text{ 为 } X \text{ 的边界或边界区域(Boundary)。} \end{aligned}$$

粗糙集的定义与近似的关系如下：

定义 6.6：若 $BN_B(X) \neq \emptyset$ ，即 $R_*(X) \neq R^*(X)$ ，称 X 是 R 粗糙集(或 R 不可定义集)。若 $BN_B(X) = \emptyset$ ， $R_*(X) = R^*(X)$ ，称 X 是 R 精确集(或 R 可定义集)。

6.2.3 知识约简

粗糙集理论的核心之一便是知识约简，它是在粗糙集理论中，面对信息系统，在尽量维

持分类能力的情况下,通过消除冗余属性和冗余属性值,最终得到信息系统的分类或决策规则的方法。

1. 约简与核

约简与核是征兆知识约简的最基本概念,是粗糙集约简的基础,有以下两个基本定义:

定义 6.7: 设 R 为等价关系族, $r \in R$, 若有 $\text{IND}(R) = \text{IND}(R - r)$, 则称 r 为等价关系族 R 中可省的, 否则称为不可省的。若 R 中任意一个等价关系 r 都是不可省的, 则称 r 是独立的, 否则称为依赖的。

定义 6.8: 设 $Q \subseteq P$, 若 Q 是独立的, 且 $\text{IND}(Q) = \text{IND}(P)$, 则称 Q 是 P 的一个约简。 P 中所有不可省关系的集合称为等价关系族 P 的核, 记作 $\text{CORE}(P)$ 。

定理 6.1: 等价关系族 P 的核等于 P 的所有约简的交集, 即有

$$\text{CORE}(P) = \cap \text{RED}(P) \quad (6-2)$$

由此可以看出核与约简的关系, 它的意义在于: 可以通过计算集合的核来确定知识征兆中哪条征兆属性是关键的点, 是不能消去的。

【例 6.2】 设有知识库 $K = (U, R)$, 其中 $u = \{x_1, x_2, \dots, x_8\}$, $R = \{R_1, R_2, R_3\}$, 等价关系 R_1, R_2, R_3 的等价类如下:

$$\begin{aligned} U/R_1 &= \{\{x_1, x_4, x_5, x_6\}, \{x_2, x_3\}, \{x_7, x_8\}\} \\ U/R_2 &= \{\{x_1, x_2, x_5\}, \{x_4, x_6, x_7\}, \{x_3, x_8\}\} \\ U/R_3 &= \{\{x_1, x_2, x_5\}, \{x_4, x_6\}, \{x_3, x_7\}, \{x_8\}\} \end{aligned}$$

求约简和核。

解: 由题意知

$$U/\text{IND}(R) = \{\{x_1, x_5\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}\}$$

$$U/\text{IND}(R - R_1) = U/(R_2, R_3) = \{\{x_1, x_2, x_5\}, \{x_3\}, \{x_4, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}\}$$

$$U/\text{IND}(R - R_2) = U/(R_1, R_3) = \{\{x_1, x_5\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}\}$$

$$U/\text{IND}(R - R_3) = U/(R_1, R_2) = \{\{x_1, x_5\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}\}$$

因此, R_1 是 R 中不可省的, R_2 与 R_3 是 R 中可省的, 故 $\text{CORE}(R) = \{R_1\}$ 。

$(U/\{R_1, R_2\})$ 与原有知识库 K 表示同样的知识(等价), 通过计算分析可得

$U/\{R_1, R_2\} \neq U/R_1$ 且 $U/\{R_1, R_2\} \neq U/R_2$, 故 $\{R_1, R_2\}$ 是独立的, 所以 $\{R_1, R_2\}$ 是 R 的一个约简。同理 $\{R_1, R_3\}$ 也是 R 的一个约简, 于是可以得出 R 的属性约简分别是 $\{R_1, R_2\}$ 和 $\{R_1, R_3\}$ 。核 $\text{CORE}(R) = \{R_1, R_2\} \cap \{R_1, R_3\} = \{R_1\}$ 。

2. 相对约简和相对核

定义 6.9: 设 P 和 Q 是论域 U 上的等价关系, Q 的 P 正域记作 $\text{POS}_P(Q)$, 定义为

$$\text{POS}_P(Q) = \bigcup_{X \in U/Q} (X) \quad (6-3)$$

定义 6.10: 设 P 和 Q 为论域 U 上的等价关系族, $R \in P$, 有

$$\text{POS}_{\text{INP}(P)}(\text{INP}(Q)) = \text{POS}_{\text{INP}(P - \{R\})}(\text{INP}(Q)) \quad (6-4)$$

若 P 中每一个关系 R 都是不可少的, 则 P 相对于 Q 是独立的, 否则是依赖的。

定义 6.11: 设 $S \subseteq P$, 称 S 是 P 的 Q 约简, 当且仅当 S 是 P 的 Q 独立子集, 且满足

$$\text{POS}_P(\text{INP}(Q)) = \text{POS}_S(\text{INP}(Q)) \quad (6-5)$$

定理 6.2: P 的 Q 核等于 P 的所有 Q 约简的交集, 即

$$\text{CORE}_Q(P) = \cap \text{RED}_Q(P) \quad (6-6)$$

总之, 约简求出的核是知识系统的关系核心属性, 是粗糙集约简的精髓。

6.2.4 信息系统

1. 信息系统的定义

在智能知识数据处理过程中, 知识是何种表达方式是重要的。

定义 6.12: 称四元组 $S = (U, A, V, f)$ 为信息系统。其中 U 为非空有限集合, 称为论域; A 为属性的非空有限集合; $V = \cup V_a$, 而 V_a 是属性值的集合。 $f: U \times V \rightarrow V$ 是一个信息函数, $V_x \in U, a \in A, f(x, a) \in V_a$ 。对给定对象 $x, f(x, a)$ 赋予对象 x 在属性 a 下的属性值。

用数据表格来表示信息系统的方法如下: 表格的行表示论域中的对象, 列表示对象的属性, 这样就可以建立起一个故障信息系统。具体的情况如【例 6.1】和【例 6.2】所示。

2. 差别矩阵与差别函数的

定义 6.13: 令信息系统 $S = (U, A, V, f)$, $|U| = n, |A| = m$, 则 S 的差别矩阵 M 定义为一个 n 阶对称矩阵, 其中 i 行 j 列处元素定义为

$$m_{ij} = \{a \in A \mid f(x_i, a) \neq f(x_j, a)\} \quad i, j = 1, \dots, n \quad (6-7)$$

即 m_{ij} 是能够区别对象 x_i 和 x_j 的所有属性的集合。

对每一个 $a \in A$, 指定布尔变量 $\bar{a}$, 则可以定义为一个 m 元布尔函数:

$$\rho(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_m) = \bigwedge \{ \bigvee m_{ij} \mid 1 \leq j \leq i \leq n, m_{ij} \neq \emptyset \} \quad (6-8)$$

即 ρ 为 $(\bigvee m_{ij})$ 的合取, 而 $(\bigvee m_{ij})$ 为 m_{ij} 中各属性对应的布尔变量的析取。因此可以总结出以下几点:

- 1) 每一个约简都是差别矩阵的析取范式中的每一个合取式。
- 2) 写出上三角部分和下三角之一, 因为差别矩阵一般为对称矩阵。
- 3) 核的计算:

$$\text{CORE}(A) = \{a \in A \mid m_{ij} = \{a\}, i \leq j, j \leq n\}$$

6.2.5 决策表及决策规则

1. 决策表

决策表是一种特殊的知识表示方式, 具体来说有如下定义:

定义 6.14: 信息系统 $S = (U, A, V, f)$ 中, 若属性 $\text{Ind}(A, B, C) = \text{Ind}(A, B)$, $A = C \cup D$, $C \cap D = \emptyset$, C 称为条件属性集, D 称为决策属性集, 则称信息系统为决策表。

【例 6.3】 建立一个关于故障的决策表(表 6-4), $U = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, $C = \{\text{噪声}, \text{振动}, \text{温度}\}$, $D = \{\text{故障}\}$ 。

由表 6-4 可知,

$$\begin{aligned} U/C &= \{\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}\} \\ U/D &= \{\{x_1, x_4, x_5\}, \{x_2, x_3, x_6\}\} \\ \text{POS}_C(D) &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\} \end{aligned}$$

表 6-4 关于故障的决策

U	条件属性			决策属性
	噪声 (cs)	振动 (zd)	温度 (wd)	
x_1	大	大	正常	否
x_2	大	大	高	是
x_3	大	大	很高	是
x_4	小	大	正常	否
x_5	小	小	高	否
x_6	小	大	很高	是

计算 $k = \frac{|\text{POS}_C(D)|}{U} = 1$ 。因此，可以得出此表的一致性。

定义 6.15: n 阶的差别方阵的元素定义为

$$m_{ij} = \begin{cases} \{a \mid a \in C \wedge a(x_i) \neq a(x_j)\} & D(x_i) \neq D(x_j) \\ \emptyset & \text{其他} \end{cases}$$

(6-9)

其中 $x_i, y_j \in U$ 。

定义 6.16: C 的核 D 是差别矩阵中所有单个元素 m_{ij} 组成的集合，即

$$\text{CORE}_D(C) = \{a \in c \mid m_{ij} = \{a\}, 1 \leq i, j \leq n\}$$

(6-10)

定义 6.17: 决策表的差别函数定义如下:

$$\rho^* = \bigwedge \{ \bigvee m_{ij} \}$$

(6-11)

下面以一个具体的例子来说明对以上公式的运用。

【例 6.3】中表 6-4 的差别矩阵见表 6-5，设置 ut 表示噪声， hl 表示振动， tw 表示温度， tt 差异为 a ， hl 差异为 b ， tw 差异为 c ：

$$\begin{aligned} \rho^* &= c \wedge c \wedge (a \vee c) \wedge (a \vee c) \wedge (a \vee b) \wedge (a \vee c) \wedge (a \vee b \vee c) \wedge a \wedge c \\ &\quad \wedge (b \vee c) = c \end{aligned}$$

因此，可以得到这样的一个结果：表 6-4 可约简为 $\{c\}$ ，核为 $\{c\}$ 。

表 6-5 故障决策表的差别矩阵

U	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
x_1	$\emptyset$	c	c	$\emptyset$	$\emptyset$	ac
x_2		$\emptyset$	$\emptyset$	ac	ab	$\emptyset$
x_3			$\emptyset$	ac	abc	a
x_4				$\emptyset$	$\emptyset$	c
x_5					$\emptyset$	bc
x_6						$\emptyset$

2. 决策规则

定义 6.18: 定义决策规则为

$$rij: des(Xi) \rightarrow des(Yj), Xi \cap Yj \neq \emptyset$$

(6-12)

其中， $des()$ 为对等价类的描述。定义规则 rij 的确定性因子为 $\mu(Xi, Yj) = |Xi \cap Yj| / |Xi|$ ，它的值在 $(0, 1)$ 的范围内，规定当其为 1 时为确定的；在 $(0, 1)$ 的范围内不确定

的。在所有决策规则中，每条不一样，有的是起决定性的，有的是冗余的，所以对建立起的征兆知识库有必要采取合理的决策规则约简。

6.2.6 故障诊断数据约简

通过以上理论分析处理建立起来的故障知识库如图 6-6 所示。

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdyx	xwtz	zxgj	jdfx	slgy	zdycs	zdyvw	zdyfh	zdyyl	gzll
1	叠加波形	2x, 3x等高	1x	不稳定	双向	不规则变	双椭圆或不	不正进动	变化	不明显	不变	不规则变化	不变	轴裂纹
2	低频叠加波	0.5x以	1x, x/n, nx	突发强振动	径向	不稳定	紊乱或扩散	正进动	突变	有影响	不变	敏感, 突发达到某一值	气流喘振	
3	严重	严重削波	x/2, nx	不稳定	径向	反向位移	紊乱	正进动	突变	不明显	不变	不明显	不变	动静件全周向重度径向
4	低频成分明显	1~30的低频	1x	大幅度波动	径向	不稳定	紊乱	正进动	变化	明显	不变	很明显	很明显	喘振
5	正弦波		1x	不稳定	径向, 轴向	不稳定	正进动	变化	不明显	不明显	不变	不明显	不变	动静件轴向摩擦
6	各成分叠加	ω_0 及 $(\omega -$	组合频率	不稳定	径向	不稳定	椭圆	正进动	变化	振动突然增	不变	很明显	很明显	旋转失速
7	有低频成分	0.42x~0.4	组合频率	不稳定	径向	不稳定	扩散, 不规则	正进动	变化	振动突然增	有影响	不明显	不变	油膜振荡
8	轻微削波	1x/n, nx	1x	不稳定	径向	反向位移	紊乱	正进动	突变	不明显	不变	不变	不变	动静件局部轻度径向摩
9	有低频成分	0~0.5x	1x	较稳定	径向	不稳定	双环椭圆	正进动	变化	明显	有影响	不明显	不变	油膜晃动
10	次谐波叠加	x/n	1x	不稳定	径向	杂乱	不稳定	正进动	变化	明显	不变	明显	不变	热套配合过盈不足
11	基频、分数谐波, 分	2x, 3x, nx	不稳定, 工	检测方向振	不稳定	紊乱	正进动	变化	很明显	不明显	不变	很明显	不明显	支撑部件松动
12	正弦波	1x	2x, 高次谐	稳定, 升速	径向	正常运行	椭圆	正进动	启动时矢量	明显	不变	不明显	不变	临时性弯曲
13	正弦波	1x	2x, 高次谐	稳定, 启动	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳定	明显	不变	不明显	不变	永久性弯曲
14	正弦波	1x	较小的高次	突发性增大	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳定	明显	不变	不明显	不变	突发不平衡
15	正弦波	1x	较小的高次	逐渐增大	径向	渐变	椭圆	正进动	渐变	明显	不变	不明显	不变	渐变不平衡
16	正弦波	1x	较小的高次	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	原始不平衡
17	1×频与2×频	2×频明显	1×频、高	稳定	轴向	稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	平行不对中
18	1×频与2×频	2×频明显	1×频、高	稳定	径向、轴向	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	综合不对中
19	1x与2x叠加	2x频明显	1x高次谐	稳定	径向, 轴向	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	角度不对中
20	正弦波	1x	较小的高次	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	转子不平衡
21	含有低频成分	小于0.5x	1x, x/n, nx	不稳定, 突	径向	不稳定	紊乱, 扩散	正进动	突变	有影响	不变	很敏感, 过	明显达到某	迷宫密封气流激振
22	叠加波形	2x, 3x等高	1x	不稳定	径向, 轴向	不规则变	双椭圆或不	不正进动	变化	不明显	不变	不规则变化	不变	转轴横向裂纹
23	基频、分数谐波, 分	2x, 3x	不稳定, 达	松动方向振	不稳定	紊乱	正进动	改变	很明显	不明显	不变	很明显	不变	转子支承部件松动
24	次谐波叠加波	x/n	1x	不稳定	径向	杂乱	不稳定	正进动	改变	明显	不变	明显	不变	转子热套配合过盈不足
25	轻微削波	x/n, nx	1x	不稳定	径向	反向位移	紊乱	正进动	突变	不明显	不变	不影响	不变	动静件局部轻度径向磨

图 6-6 故障知识库

从中取出 9 个故障诊断，分别为弯曲、不平衡和不对中，如图 6-7 所示。

12	正弦波	1x	2x, 高次谐	稳定, 升速	径向	正常运行	椭圆	正进动	启动时矢量	明显	不变	不明显	不变	临时性弯曲
13	正弦波	1x	2x, 高次谐	稳定, 启动	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳定	明显	不变	不明显	不变	永久性弯曲
14	正弦波	1x	较小的高次	突发性增大	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳定	明显	不变	不明显	不变	突发不平衡
15	正弦波	1x	较小的高次	逐渐增大	径向	渐变	椭圆	正进动	渐变	明显	不变	不明显	不变	渐变不平衡
16	正弦波	1x	较小的高次	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	原始不平衡
17	1×频与2×频	2×频明显	1×频、高	稳定	轴向	稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	平行不对中
18	1×频与2×频	2×频明显	1×频、高	稳定	径向、轴向	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	综合不对中
19	1x与2x叠加	2x频明显	1x高次谐	稳定	径向, 轴向	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	角度不对中
20	正弦波	1x	较小的高次	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	转子不平衡

图 6-7 部分故障知识库

运用已知的粗糙集知识可表示如下：有知识库 $K = (U, R)$ ，其中 $u = \{x_1, x_2, \dots, x_9\}$ ， $R = \{R_1, R_2, \dots, R_{13}\}$ ，等价关系 $R_1, R_2, \dots, R_{13}$ 的等价类如下：

$$\begin{aligned} U/R_1 &= \{\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\}\} \\ U/R_2 &= \{\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\}\} \\ U/R_3 &= \{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\}\} \\ U/R_4 &= \{\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U/R_5 &= \{ \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\} \} \\
U/R_6 &= \{ \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_9\}, \{x_7, x_8\} \} \\
U/R_7 &= \{ \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\} \} \\
U/R_8 &= \{ \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\} \} \\
U/R_9 &= \{ \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\} \} \\
U/R_{10} &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\} \\
U/R_{11} &= \{ \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\} \} \\
U/R_{12} &= \{ \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\} \} \\
U/R_{13} &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}
\end{aligned}$$

计算核：根据上方的定义 6.7：如 $IND(R) = IND(R - r)$ ，则 r 为多余属性，从而知道属性 10 和 13 是多余的，可删除；又见 U/R_1 、 U/R_2 、 U/R_3 、 U/R_7 、 U/R_8 、 U/R_{11} 、 U/R_{12} 的分类结果是一样的，表明这些属性是相似的，只保留一个即可，可保留属性 1。则还剩下属性 1、4、5、6、9 五个属性。

$$\begin{aligned}
U/R_4 &= \{ \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\} \} \\
U/R_5 &= \{ \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\} \} \\
U/R_6 &= \{ \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_9\}, \{x_7, x_8\} \} \\
U/R_9 &= \{ \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\} \} \\
U/R_1 &= \{ \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_9\}, \{x_6, x_7, x_8\} \}
\end{aligned}$$

$$U/R = \{ \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\} \}$$

$$U/R - R_1 = U/(R_4, R_5, R_6, R_9) = \{ \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_9\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\} \}$$

$$U/R - R_4 = U/(R_1, R_5, R_6, R_9) = \{ \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_9\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\} \}$$

$$U/R - R_5 = U/(R_1, R_4, R_6, R_9) = \{ \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_9\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\} \}$$

$$U/R - R_6 = U/(R_1, R_4, R_5, R_9) = \{ \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_9\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\} \}$$

$$U/R - R_9 = U/(R_1, R_4, R_5, R_6) = \{ \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\} \}$$

上述计算表明， $U/(R_1, R_5, R_6, R_9)$ 、 $U/(R_4, R_1, R_6, R_9)$ 、 $U/(R_4, R_5, R_6, R_1)$ 、 $U/(R_4, R_5, R_1, R_9)$ 表示同样的知识（等价），但它们是否为约简，还需判断是否是独立的。

$U/(R_1, R_5, R_6, R_9) \neq U/R_4$ ， $U/(R_1, R_4, R_6, R_9) \neq U/R_5$ ， $U/(R_1, R_4, R_5, R_9) \neq U/R_6$ ， $U/(R_1, R_4, R_5, R_6) \neq U/R_9$ ，故 $U/(R_1, R_5, R_6, R_9)$ 、 $U/(R_4, R_1, R_6, R_9)$ 、 $U/(R_4, R_5, R_6, R_1)$ 、 $U/(R_4, R_5, R_1, R_9)$ 是独立的，所以它们是 R 的一个约简。因此 R 的属性约简分别是 $(R_1, R_4, R_5, R_6, R_9)$ 、 (R_4, R_1, R_6, R_9) 、 (R_4, R_5, R_6, R_1) 、 (R_4, R_5, R_1, R_9) 。核 $CORE(R) = (R_1, R_4, R_5, R_6, R_9) \cap (R_4, R_1, R_6, R_9) \cap (R_4, R_5, R_6, R_1) \cap (R_4, R_5, R_1, R_9) = \{R_4\}$ 。

在以上基础上构造差别矩阵见图 6-8 和表 6-6。

根据式(6-11)可得

$$\rho^* = R_4 R_1 R_5 R_6 R_9$$

故核为 $R_1 R_4 R_5 R_6 R_9$ ，与约简一致。

	x_1	x_4	x_5	x_6	x_9
x_1	正弦波	稳定, 升速时	径向	正常运行时	启动时矢量后
x_2	正弦波	稳定, 启动时	径向	突变后稳定	突变后稳定
x_3	正弦波	突变性增大	径向	突变后稳定	突变后稳定
x_4	正弦波	逐渐增大	径向	渐变	渐变
x_5	正弦波	稳定	径向	稳定	不变
x_6	$1 \times$ 频与 $2 \times$ 频	稳定	轴向	稳定	不变
x_7	$1 \times$ 频与 $2 \times$ 频	稳定	径向、轴向	较稳定	不变
x_8	$1 \times$ 与 $2 \times$ 叠加	稳定	径向、轴向	较稳定	不变
x_9	正弦波	稳定	径向	稳定	不变

图 6-8 故障矩阵

表 6-6 故障矩阵(数字化)

U	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	$\emptyset$	$R_4 R_6 R_9$	$R_4 R_6 R_9$	$R_4 R_6 R_9$	$R_4 R_6 R_9$	R	R	R	$R_4 R_6 R_9$
x_2		$\emptyset$	R_4	$R_4 R_6 R_9$	$R_4 R_6 R_9$	R	R	R	$R_4 R_6 R_9$
x_3			$\emptyset$	$R_4 R_6 R_9$	$R_4 R_6 R_9$	R	R	R	$R_4 R_6 R_9$
x_4				$\emptyset$	$R_4 R_6 R_9$	R	R	R	$R_4 R_6 R_9$
x_5					$\emptyset$	$R_1 R_3$	$R_1 R_5 R_6$	$R_1 R_3 R_6$	$R_6 R_9$
x_6						$\emptyset$	$R_5 R_6$	$R_5 R_6$	$R_1 R_4$
x_7							$\emptyset$	$\emptyset$	$R_1 R_5 R_6$
x_8								$\emptyset$	$R_1 R_5 R_6$
x_9									$\emptyset$

6.3 数据化知识识别

这章将把征兆进行数据化，使之能实现通过软件的纯数据处理。具体来说，首先将字符型的征兆知识转化成数字知识库，再对其约简，之后将前后的数据进行对比，处理上主要是借助 MATLAB 软件强大的数据处理功能，先培训神经网络再诊断，从结果上可以得出它们在约简前后的区别，证明粗糙集约简对诊断效果是有用的。

6.3.1 神经网络处理方法

神经网络方法起源于生物学的神经网络，最早是由心理学家和神经学家开创的，旨在寻求开发和测试神经的计算模拟。粗略地说，神经网络是一组连接的输入、输出单元，其中每个连接都与一个权重相关联。在学习阶段，通过调整这些权重，能够预测输入元组的正确类标号。由于单元之间的连接，神经网络学习又称连接者学习(connectionist learning)。

1. 神经元模型

人工神经网络是由大量神经元互连而成的网络，是人脑的抽象、简化、模拟，反映人脑的基本特性。一般来说，作为神经元模型应具备三个要素：

- 1) 具有一组突触或连接，常用 w_{ij} 表示神经元 i 和神经元 j 之间的连接强度，常称为权重。
- 2) 具有反映生物神经元时空整合功能的输入信号累加器。
- 3) 具有一个激励函数，用于限制神经元输出。

一个典型的人工神经元模型如图 6-9 所示。

其中， $x_j(j=1, 2, \cdots, n)$ 是神经元的输入信号，即是来自前级 n 个神经元的轴突的信息； θ_i 是 i 神经元的阈值； $w_{ij}(j=1, 2, \cdots, n)$ 是 i 神经元对 $x_j(j=1, 2, \cdots, n)$ 的权值，即突触的传递效率； y_i 是 i 神经元的输出； f 是激励函数(也称为传递函数)，决定 i 神经元受到输入 $x_j(j=1, 2, \cdots, n)$ 的共同作用达到阈值时以何种方式输出。该神经元模型的输入输出关系为

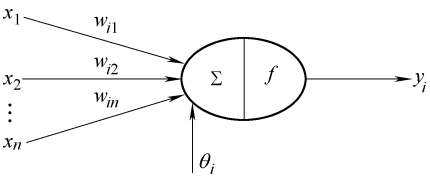


图 6-9 神经元模型

$$s_i = \sum_{j=1}^n x_j w_{ij} - \theta_i$$
$$y_i = f(s_i) \tag{6-13}$$

其中的激励函数 f 有多种形式，最常见的有比例函数、 $[0, 1]$ 阶跃函数和 $(0, 1)$ S 型函数，如图 6-10 所示。

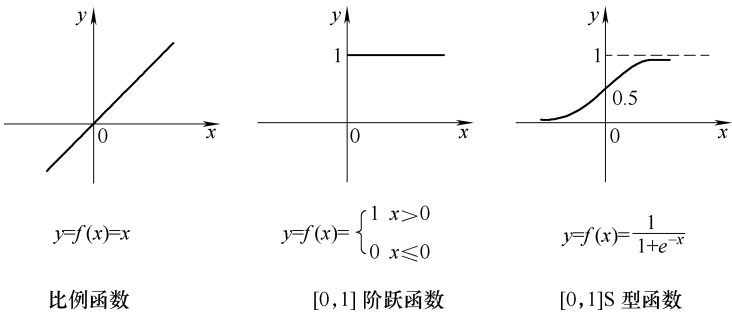


图 6-10 典型的激励函数

2. 人工神经网络

人工神经网络是一个并行和分布式的信息处理网络结构，该网络结构一般由许多个神经元组成，每个神经元有一个单一的输出，它可以连接到很多其他的神元，其输入有多个连接通路，每个连接通路对应一个连接权系数。

从网络结构角度，可以把人工神经网络分为前向网络与反馈网络，如图 6-11 所示。

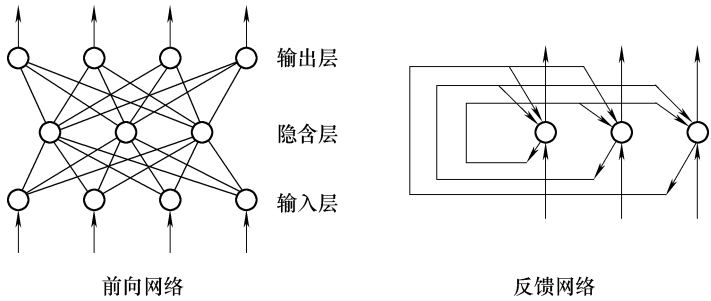


图 6-11 人工神经网络的两种结构

人工神经网络是生物神经网络的一种模拟和近似。它主要从两个方面进行模拟：一种是从结构和实现机理方面进行模拟，它涉及生物学、生理学、心理学、物理及化学等许多基础学科。由于生物神经网络的结构和机理相当复杂，现在距离完全认识它们还相差甚远。另一

种是从功能上加以模拟，即尽量使得人工神经网络具有生物神经网络的某些功能特性，如学习、识别、控制等功能。本文侧重于功能的模拟。

3. BP 网络

人工神经网络中最常用的是 BP 网络。BP 网络是一种多层前馈型神经网络，其神经元的传递函数是 S 型函数，输出量为 0 和 1 之间的连续量，它可以实现从输入到输出的任意非线性映射。按照一般的设计方案，中间层神经元的传递函数为 S 型正切函数，输出层神经元的传递函数为 S 型对数函数。

BP 网络模型结构的确定有两条比较重要的指导原则：

- 1) 对于一般的模式识别问题，三层网络可以很好地解决。
- 2) 三层网络中，隐含层神经元个数 n_2 和输入层神经元个数 n_1 之间可以有以下近似关系： $n_2 = 2n_1 + 1$ 。

通过神经网络建立起输入、输出单元，且如有必要，都有特定的权重。先通过计算机培训，培训得到权重等，建立起特定的数学模型。而后用培训好的数学模型来实现诊断。

用 MATLAB 实现计算过程的主要三层网络的近似关系公式为

$$n_2 = 2n_1 + 1 \tag{6-14}$$

其中在三层网络中， n_2 为隐含层神经元个数， n_1 为输入层神经元个数。

6.3.2 数据化及其约简处理

在转子实验台模拟转子各种不平衡、不对中、弯曲等 10 种故障运行状态，如图 6-12 所示，存在一个机械设备的知识表达系统，取典型的 10 个故障类型，并按征兆的不同建立起约简表。

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdvyx	xwtz	zxqj	idfx	slqv	zdyxs	zdyvw	zdyfh	zdyvl	gzll
1	叠加波形	2x, 3x等	1x	不稳定	双向	不规则	变行椭圆或	正进动	变化	不明显	不变	不规则	变	轴裂纹
12	正弦波	1x	2x, 高次谐波	稳定, 升起	径向	正常运行	椭圆	正进动	启动时失	明显	不变	不明显	不变	临时性弯曲
13	正弦波	1x	2x, 高次谐波	稳定, 启动	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳	明显	不变	不明显	不变	永久性弯曲
14	正弦波	1x	较小的高次谐波	突变性增大	径向	突变后稳	椭圆	正进动	突变后稳	明显	不变	不明显	不变	突发性弯曲
15	正弦波	1x	较小的高次谐波	渐变增大	径向	渐变	椭圆	正进动	渐变	明显	不变	不明显	不变	渐变性弯曲
16	正弦波	1x	较小的高次谐波	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	原始不平衡
17	1×频与2×频	明显	1×频、高次谐波	稳定	轴向	稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	平行不对中
18	1×频与2×频	明显	1×频、高次谐波	稳定	径向、转角	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	综合不对中
19	正弦波	1x	较小的高次谐波	稳定	径向	稳定	椭圆	正进动	不变	明显	不变	不明显	不变	转子不平衡
24	1x与2x等	2x频明显	1x高次谐波	稳定	径向、转角	较稳定	双环椭圆	正进动	不变	明显	有影响	明显	不变	角度不对中

图 6-12 原始知识

1. 知识数据化

将故障诊断的知识征兆进行数字编制，用不同数字表示不同故障征兆，作为神经网络进行诊断的数据来源，如图 6-13 所示。

2. 删除、去除、约简知识

决策表中每条记录代表着一种决策知识，在实现完善故障诊断系统时，故障知识一般会反复出现，这样即加重了知识征兆的重合率，效率低。因此在处理知识过程中，在决策表中需要将之删除，简化知识决策表。去除无影响的，约简相同的征兆故障，再根据 $Ind(A, B, C) = Ind(A, B)$ 约简。那么图 6-13 可表示成图 6-14 的情况。

3. 知识的归一化

系统首先对该知识表达系统的数据进行了归一化处理，得出的数据也用于系统诊断，进

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdfx	xwtz	zxcgj	jdfx	slqy	zdycs	zdyyw	zdyfh	zdyyl	gzll
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2
13	2	2	2	3	2	3	2	1	3	2	1	2	1	3
14	2	2	3	4	2	3	2	1	3	2	1	2	1	4
15	2	2	3	5	2	4	2	1	4	2	1	2	1	5
16	2	2	3	5	2	5	2	1	5	2	1	2	1	6
17	3	3	4	5	3	5	3	1	5	2	2	3	1	7
18	3	3	4	5	1	6	3	1	5	2	2	3	1	8
19	2	2	5	5	2	5	2	1	5	2	3	2	1	9
24	3	3	4	5	1	6	3	1	5	2	2	3	1	10

图 6-13 数字化的知识

bh	sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdfx	xwtz	zxcgj	slqy	zdycs	zdyyw	zdyfh	gzll
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
13	2	2	2	3	2	3	2	3	2	1	2	3
14	2	2	3	4	2	3	2	3	2	1	2	4
15	2	2	3	5	2	4	2	4	2	1	2	5
16	2	2	3	5	2	5	2	5	2	1	2	6
17	3	3	4	5	3	5	3	5	2	2	3	7
18	3	3	4	5	1	6	3	5	2	2	3	8
19	2	2	5	5	2	5	2	5	2	3	2	9
24	3	3	4	5	1	6	3	5	2	2	3	10

图 6-14 去除多余条件的知识

行对比判别。归一化公式如下：

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

(6-15)

对图 6-14 归一化得到表 6-7。

表 6-7 归一化后的数据

sybx	tzpl	cppl	zdwdx	zdfx	xwtz	zxcgj	slqy	zdycs	zdyyw	zdyfh
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.5	0.25	0.25	0.5	0.2	0.5	0.5	1	0	0.5
0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	0.4	0.5	0.25	1	0	0.5
0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	0.4	0.5	0.5	1	0	0.5
0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.6	0.5	0.5	1	0	0.5
0.5	0.5	0.5	1	1	0.8	0.5	0.75	1	0	0.5
1	1	0.75	1	1	0.8	1	0.75	1	0.5	1
1	1	0.75	1	0	1	1	0.75	1	0.5	1
0.5	0.5	1	1	1	0.8	0.5	0.75	1	1	0.5
1	1	0.75	1	0	1	1	0.75	0.5	1	1

在此基础上，应用基于 BP 网络的旋转机械故障诊断方法对旋转机械 10 种故障状态进行分类与故障诊断。分别提取转子在各种不平衡、不对中和弯曲等 10 种故障运行状态下的特征设置为输入向量 P ，都是 11 维的。设置决策结果成以下形式：(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)表示轴裂纹，(0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)表示临时性弯曲，(0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)表示永久性弯曲，(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)表示突发不平衡，

(0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)表示渐变不平衡, (0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0)表示原始不平衡, (0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0)表示平行不对中, (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)表示综合不对中, (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)表示转子不平衡, (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0)表示角度不对中, 10种故障类型作为输出 T 。根据式 6-13 得 $n_1 = 11$ 为输入层神经元, $n_2 = 23$ 为输出层神经元, $T = 10$ 为期望输出, 具体阵列如下:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 3 & 4 & 2 & 3 & 2 & 3 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 3 & 5 & 2 & 4 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 3 & 5 & 3 & 5 & 2 & 5 & 2 & 1 & 2 \\ 3 & 3 & 4 & 5 & 3 & 5 & 3 & 5 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 4 & 5 & 1 & 6 & 3 & 5 & 2 & 2 & 3 \\ 2 & 2 & 5 & 5 & 2 & 5 & 2 & 5 & 2 & 3 & 2 \\ 3 & 3 & 4 & 5 & 1 & 6 & 3 & 5 & 2 & 2 & 3 \end{bmatrix}$$

将输出列成数列得

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在选择 BP 网络的训练函数的问题上, 综合考虑选用 trainlm, 虽然也还有一些不错的函数, 如 traingd、traingdm、traingdx 等, 但 trainlm 运行速度快, 适合运用于多维, 学习函数取默认值 learnsgm, 性能函数取默认值 mse。创建代码如下:

```
net = newff(minmax(P), [23 10], {'tansig', 'logsig'}, 'trainlm');
```

要达到诊断的效果, 必须运用上面的公式对原始故障类型进行培训, 得到相应的权值后, 就建立起相应的诊断模型, 能够用来实行诊断。网络的训练代码如下:

```
net.trainParam.epochs = 200;
net.trainParam.show = 10;
net.trainParam.goal = 0.02;
LP.lr = 0.1;
net = train(net, P, T);
```

网络训练结果为:

TRAINLM, Epoch 0/200, MSE 0.262576/0.02, Gradient 17.0822/1e-010

TRAINLM, Epoch 10/200, MSE 0.0432993/0.02, Gradient 5.88717/1e-010

TRAINLM, Epoch 17/200, MSE 0.0184581/0.02, Gradient 1.84102/1e-010

TRAINLM, Performance goal met.

从中可以得出这样的结论，网络的训练速度较快，经过 16 次循环迭代后达到要求的精度，结果如图 6-15 所示。

为采用前面的特征提取方法提取特征向量各一组，组成待诊断样本集 Q 。

$$Q = [2 \ 2 \ 3 \ 5 \ 2 \ 5 \ 5 \ 2 \ 1 \ 6]$$

上面已经得到了培训好了的数学模型，为了证明有效，通过以下公式来对这个模型的有效性进行验证，公式如下：

$$R = sim(net, Q) \tag{6-16}$$

将之代入可以得到以下的 R 值：

$$R = [0.0365 \ 0.0008 \ 0.0180 \ 0.0001 \ 0.0743 \ 0.7911 \ 0.0550 \ 0.0378 \ 0.0085 \ 0.0174]$$

根据所得的数据可知故障接近[0 0 0 0 0 1 0 0 0 0]，接近第六种故障。

用同样的方法处理归一化后的数据如下：

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0.25 & 0.5 & 0.2 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.25 & 1 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.75 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 0.8 & 0.5 & 0.75 & 1 & 0 & 0.5 \\ 1 & 1 & 0.75 & 1 & 1 & 0.8 & 1 & 0.75 & 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 1 & 0.75 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0.75 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 1 & 1 & 0.8 & 0.5 & 0.75 & 1 & 1 & 0.5 \\ 1 & 1 & 0.75 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0.75 & 1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

采用归一化前相同的理论公式，结果如图 6-16 所示，处理时间更短(只要 6 次)，且对

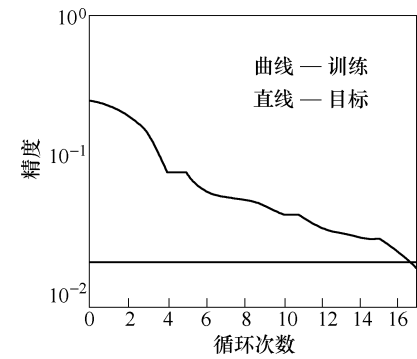


图 6-15 归一化前数据处理

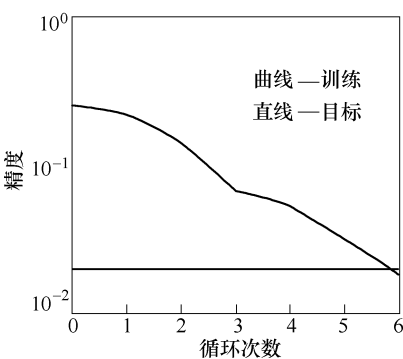


图 6-16 归一化后数据处理

同一种故障实现诊断时更准确。

对上面同种故障识别得到的结果为

$$R = 0.0008 \quad 0.0000 \quad 0.0000 \quad 0.0283 \quad 0.0051 \quad 0.9312 \quad 0.0002 \quad 0.0485 \quad 0.0148$$

0.0350

根据数据可知很接近 $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ，可推知是第六种故障。从上述结果可以看出，根据这两种诊断的结果可明白经过约简归一化的数据是更加准确、合理的。

第 7 章 基于模糊聚类分析的自动诊断

7.1 水轮发电机组振动特征分析

水轮发电机组的转子系统由通过法兰连接的水轮机、励磁机和发电机各转子连成的轴系，上机架的上导轴承（下导）和水导轴承的导向支承，在水流的推动下进行低速运转。转子、联轴器、导轴承、基础、密封等部件的任何缺陷或故障，以及水流压力和电网的扰动，均会不同程度地诱发激振力，产生多种多样的振动形式。作为一种特殊的旋转机械，应从理论研究和实验分析两方面着手研究水轮发电机组振动故障原因与振动征兆参量之间的对应关系，以此建立起故障样本与征兆模糊关系矩阵，为进一步实现机组的实时在线自动诊断打下基础。

7.1.1 故障的振动频谱特征

振动信号的处理有时域和频域分析两种基本方法。通过对振动信号进行频谱分析可以获得反映信号特征三个基本要素：振幅、频率和相位。振幅反映了故障发生的严重程度，频率和相位反映了故障的性质。水轮发电机组的不同故障总是对应着一定的频率成分。运用频谱分析方法，国内外有关专家对遇到的大量实际故障进行分类统计，按照征兆对应的故障发生频率建立了用于故障诊断的征兆频率表。比较有名的是美国的 J. S. Sohre 在 600 多次事故分析的基础上，根据经验编制出了旋转机械振动故障分析表和日本的白木万博的“得分法”。这里参考 Sohre 提供的定量化征兆表并根据白木万博的“得分法”和大量文献资料总结出如下的针对水轮发电机组常见故障频谱特征表（表 7-1）。

表 7-1 水轮发电机组机振动故障频谱特征表

故障原因 \ 频带	1	2	3	4	5	6
	$1/6 \sim 1/2 f_0$	$1/f_0$	$2 f_0$	$n f_0$	100Hz	> 300Hz
1. 转子不平衡	0.00	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00
2. 转子部件脱落	0.00	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00
3. 转子弓形弯曲	0.00	0.50	0.40	0.10	0.00	0.00
4. 上导轴承间隙大	0.00	0.80	0.20	0.00	0.00	0.00
5. 水导轴承间隙大	0.00	0.80	0.20	0.00	0.00	0.00
6. 定子椭圆度大	0.00	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00
7. 转子绕组匝间短路	0.00	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00
8. 止漏环间隙不当	0.00	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00
9. 转子不对中	0.00	0.40	0.50	0.10	0.00	0.00

(续)

频带 故障原因	1	2	3	4	5	6
	$1/6 \sim 1/2 f_0$	$1f_0$	$2 f_0$	nf_0	100Hz	> 300Hz
10. 定子转子气隙不匀	0.00	0.10	0.15	0.80	0.00	0.00
11. 导叶开口不匀	0.00	0.10	0.10	0.85	0.00	0.00
12. 主轴法兰密封偏磨	0.00	0.80	0.15	0.05	0.00	0.00
13. 定子铁心、组合缝松动	0.00	0.00	0.00	0.10	0.90	0.00
14. 负序电流	0.00	0.00	0.00	0.10	0.90	0.00
15. 尾水管低频涡带	0.90	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
16. 转轮叶片裂缝	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.90
17. 气蚀磨损	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.90
18. 轮叶形线不好	0.00	0.90	0.05	0.05	0.00	0.00
19. 卡门涡列	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.90

注：表中 f_0 为转子工作频率。

7.1.2 故障的振动部位判别

振动幅值的大小是反映故障发生严重程度的一种度量。大量的工程实践表明，当发生振动故障时，总会在水轮机组的某个部位检测到超过允许值的振动或摆度。实际的现场技术人员通常也是根据监测点的振动进行故障原因的初步判断。一般例子如下：

1) 若在水导轴承处的振动比其他部位更明显时，可能是蜗壳、导叶及转轮中的水力不平衡（该水力不平衡主要来自于蜗壳、导叶中的不均匀流场和导叶开口不均匀，转轮线型、间隙、开口不均匀）所引起的机组振动。

2) 若上机架处振动较为明显时，则振动原因多为机组推力轴承（仅对悬式机组）、上导轴承有缺陷（间隙摆度调整不适合）或故障，或机组轴线有曲折、机组中心发生变化，或发电机零部件有缺陷或故障。

3) 若因转轮叶片出水边线型差异、叶片尾部形成卡门涡列、尾水管中产生偏心涡带等引起的机组振动，则在压力钢管、尾水管顶板均可测得明显振动，蜗壳中会出现较大水压波动。

因此，根据机组振动部位的不同，也可在一定程度上判断振动故障原因。当水轮发电机组发生振动故障时，总会 在机组的某个（或某些）部位产生较大的振动或摆度，即振动部位反映与振动故障有着一定的对应关系。

采用“得分法”对监测振动超标部位作故障主要原因初步判断，再根据振动的特征进一步细化，总结出机组常见故障振动部位特征模糊关系矩阵（表 7-2），作为水轮机组振动故障与振动部位的一种量化征兆表。需要说明的是，本文得到的标准故障模式类故障频谱特征表（表 7-1）和振动部位特征（表 7-2）是具有通用性的一般结论，可以作为水轮发电机组故障诊断的基本依据，但在实际应用中，还需要根据特定机组对这两个表的内容进行适当

调整。

表 7-2 水轮发电机组机振动故障幅值特征表

故障模式 \ 测点	1	2	3	3	4
	上导	法兰	水导	上机架	顶盖
1. 转子不平衡	0.45	0.00	0.00	0.55	0.00
2. 转子部件脱落	0.40	0.05	0.00	0.55	0.00
3. 转子弓形弯曲	0.25	0.05	0.30	0.45	0.00
4. 上导轴承间隙大	0.55	0.10	0.00	0.35	0.00
5. 水导轴承间隙大	0.00	0.00	0.55	0.10	0.35
6. 定子椭圆度大	0.30	0.10	0.00	0.60	0.00
7. 转子绕组匝间短路	0.30	0.05	0.00	0.55	0.00
8. 止漏环间隙不当	0.00	0.05	0.60	0.05	0.30
9. 转子不对中	0.20	0.55	0.20	0.05	0.00
10. 定子转子气隙不匀	0.20	0.00	0.20	0.55	0.05
11. 导叶开口不匀	0.02	0.03	0.40	0.02	0.53
12. 主轴法兰密封偏磨	0.15	0.55	0.05	0.20	0.05
13. 定子铁心、组合缝松动	0.30	0.10	0.00	0.60	0.00
14. 负序电流	0.30	0.10	0.00	0.60	0.00
15. 尾水管低频涡带	0.02	0.02	0.43	0.03	0.50
16. 转轮叶片断裂	0.00	0.05	0.40	0.05	0.50
17. 气蚀磨损	0.00	0.00	0.10	0.00	0.90
18. 轮叶形线不好	0.05	0.05	0.35	0.05	0.50
19. 卡门涡列	0.15	0.10	0.40	0.05	0.30

7.2 模糊诊断方法

虽然机组的故障原因与振动信号参量之间不具有线性关系，但表 7-1、表 7-2 中的数据同时也表明，不同的振动故障之间有着相似的频率成分和相近的机组振幅部位关系。因而，对于这种非线性关系的故障诊断采用基于模式识别与分类思想的智能诊断方法更合适。如果直接采用表中的数据进行模糊关系诊断，将出现不能有效地对故障原因和振动信息进行线性划分的情况，同时，也很容易造成误诊。聚类分析的基本思想是根据各个待分类模式特征的相似程度进行分类，在数学概念上即特征矢量之间各分量分别比较接近。

7.2.1 模糊关系诊断

根据现代数学的集合论知，集合可以表示概念，对故障诊断中的许多模糊概念可以采用模糊集来描述，因此模糊集合的运算和变换可以表示故障诊断理论的判断和推理。在设备诊断过程中，获取的征兆和故障原因之间存在着一定的关系。

设一种征兆论域为 $S = \{s_1, s_2, \cdots, s_m\}$ ，由分析得到信号的隶属度组成征兆论域上的

一个模糊子集 $A = [\mu_{A1}(s_1), \mu_{A2}(s_2), \dots, \mu_{Am}(s_m)]^T$, 对应着的故障论域 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 上一个模糊子集 $B = [\mu_{B1}(f_1), \mu_{B2}(f_2), \dots, \mu_{Bn}(f_n)]^T$, 论域 S 与论域 F 之间存在着模糊关系 R 。故障的模糊诊断过程, 即是征兆论域 S 与故障论域 F 之间的模糊矩阵运算。运用模糊关系变换定理, 最终的模糊关系方程为:

$$B = \tilde{R} \cdot A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \mu_{A1}(s_1) \\ \mu_{A2}(s_2) \\ \vdots \\ \mu_{Am}(s_m) \end{bmatrix} \quad (7-1)$$

其中诊断权矩阵 $\tilde{R}$ 中的 $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 表示故障 f_i 对征兆 s_j 的隶属度。诊断结果从故障论域 F 的模糊子集 B 中得到。“ $\cdot$ ”为广义逻辑算子, 可表示不同的逻辑运算。

7.2.2 模糊化接口

模糊化接口用于实现精确量到模糊量的变换。在模糊关系诊断中, 利用振动信息作为故障征兆时, 同样幅值大小的频率成分, 高阶频率含有更多的能量, 因此需要用不同的模糊隶属度函数来计算各阶频率分量的隶属度衡量振动的大小。对旋转机械, 其“振动大”这个概念, 一般采用升半柯西 (Cauchy) 分布公式:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq a \\ 1 - 1 / (1 + k(x - a)^2) & x > a \end{cases} \quad (7-2)$$

x 为振幅, 参数 a 和 k 待定。在度量水轮发电机组的振动和摆度时, 考虑到振动部位的允许值 x_0 , 一般取系数 $a = x_0 / 10$, 根据 $\mu_{x_0} = 0.5$ 的原则计算 k 的值。若使水导轴承处摆度允许值 $x_0 = 20 \mu\text{m}$ 时 1 倍频振动为“振动大”的隶属度值为 0.5, 则可计算出参数 $k = 1/6400$, 并以 0.5 为允许的限值。

频谱中各谐波的幅值采用不同的隶属度函数。即对于一阶谐波来说, 式(7-2)中的 $\mu(x)$ 作为衡量“振动大”的度量; 对于二阶谐波和油膜振荡时出现的半波幅值来说, 分别取 $\mu^{\frac{1}{2}}(x)$ 和 $\mu^{\frac{1}{4}}(x)$ 作为衡量“振动大”的度量。

7.2.3 模糊关系矩阵

模糊关系矩阵的确定是模糊诊断中十分重要的一个环节, 需要参考大量的故障诊断经验的总结和实验测试及统计分析的结果。前已述及可参考振动征兆表和“得分表”, 它是根据机组运行特性对各种征兆信息进行人工评价“打分”, 从而确定模糊关系矩阵中的诸元素。但不同的机组, 在不同的运行条件下, 故障模式可能不同, 并且有些得分表是许多机组运行结果综合起来的, 和实际监测的机组有很大的差距。一般根据实际监测的机组的运行记录作出自己的得分表, 并在机组长期运行过程中, 反复修正矩阵中的各元素, 直到诊断结果满意为止。

7.2.4 模糊诊断准则

模糊诊断的实质是根据模糊关系矩阵 R 及征兆模糊向量 A , 求得状态向量 B , 从而根据判断准则大致确定有故障还是无故障。判断准则 (诊断决策) 有最大隶属度原则、择近原则和阈值原则。

(1) 最大隶属度准则 有 $\mu_{B_i} = \max \{\mu_{B_1}(f_1), \mu_{B_2}(f_2), \dots, \mu_{B_n}(f_n)\}$, 即取 B 中隶属度最大的元素隶属于模糊子集 B , 即发生了第 i 种故障; 这是一种直接的状态识别方法。

(2) 择近原则 当被识别的对象本身也是模糊的, 或者说是故障论域 F 上的一个模糊子集 B 时, 此时需要通过识别 B 与征兆论域 A 中 K 个模糊子集 $s_1, s_2, \dots, s_K$ 的关系来进行判断, 若

$$(B, s_i) = \max_{1 \leq j \leq n} \max_{B \in s_i} (B, s_i) \quad (7-3)$$

则

即故障相对属于论域中的第 i 类。

择近原则是一种间接的状态识别方法, 即通过表现被识别事物的模糊子集来判断此事物属于哪一类。

(3) 阈值原则 在确定模糊等价关系矩阵后, 根据截集定理, 选定适当的阈值 λ 进行截取, 当 F 论域的模糊子集 B 中的隶属度大于给定 λ , 则考虑这种 (或几种) 故障原因发生的可能性。否则作出故障原因没有发生的结论。

7.3 基于核函数的聚类理论与方法

模糊聚类分析就是应用模糊数学的方法把具有相似性质的事物区分开并加以分类。1965 年 L. A. Zadenh 创立模糊集理论后不久, E. H. Ruspini 就于 1969 年引入了模糊划分的概念进行模糊聚类分析。模糊聚类分析大致分为两大类: 基于模糊关系的聚类分析法 (系统聚类法) 和基于目标函数的聚类法。前者一次分类成形, 但计算量大; 后者则是把样本集粗略分类, 再按照某种最优原则进行迭代修改, 直到分类合理。作为一种新的模式识别技术, 它不需要预先给出关于模式的先验知识和判别函数, 通过自身的学习机制自动形成所需要的决策区域, 克服了系统聚类法的缺点。

模糊 C-均值聚类 (Fuzzy C-Means) 最早由 Dunn 提出并由 Bezdek 将之推广, 目前已在模式识别、统计分析、图像处理等领域得到广泛的应用。FCM 不仅能用于完成聚类, 而且还能获得每一类别的聚类中心。在模糊聚类分析中各样本以一定的程度隶属于 C 个不同的子空间。

设被分类的样本集合 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中每个样本 x_i 均有 m 特性指标, 即 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 。将样本分成 C 类 ($2 \leq C \leq N$)。则 C 个聚类中心向量为

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1m} \\ V_{21} & V_{22} & \cdots & V_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{C1} & V_{C2} & \cdots & V_{Cm} \end{bmatrix} \quad (7-4)$$

为获得一个最佳的模糊分类, 就需要一个分类准则, 从模糊分类空间中选择一个最好的模糊分类, 因此, 定义目标函数:

$$J(U, V) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^C (\mu_{ij})^q (d_{ij})^2 \quad (7-5)$$

$U = [\mu_{ij}]$ 为初始隶属度矩阵, μ_{ij} 表示第 j 个样本隶属于第 i 个类的隶属度, 并且 $\sum_{i=1}^C \mu_{ij} = 1$, $\mu_{ij} \in [0, 1]$, q 为权重指数, $q \in [1, \infty]$, d_{ij} 表示样本到中心向量的距离,

如采用欧氏距离, 则 $d_{ij} = \|x_j - V_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2}$ 。

聚类的准则是在约束条件 $\sum_{i=1}^c \mu_{ij} = 1$ 下使泛函数 $E(U, V) \rightarrow \min$ 。利用拉格朗日乘数法, 可得到 $J(U, V)$ 极小值时的 μ_{ij} 值和 V_{ij} 值。

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}}\right)^{2/(q-1)}} \quad (7-6)$$

$$V_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{ij})^q x_k}{\sum_{k=1}^n (\mu_{ij})^q} \quad (7-7)$$

若 r_{ij} 近似等于 0, 则认为第 j 个样本不属于第 i 类, 反之, 若 r_{ij} 近似等于 1, 则认为第 j 个样本属于第 i 类。下面给出具体的 FCM 算法步骤。

FCM 算法只用一个聚类中心点作为一类的代表, 一个点往往不能充分反映该类的模式分布结构, 从而损失很多有用的信息。当类的自然分布为球状或近似球状时, 即每类中各分量的方差接近相等时, 才有较好的效果。但对如图 7-1a 所示的各分量方差不等而呈椭圆状的正态分布的情况采用 FCM 分类会有误判, 例如, 图中的 A 点, 如依概率密度应该属于 ω_1 类, 但由于它距离 ω_2 类的均值更近, 因此用 C-均值算法就会将它分到 ω_2 类。为此, 定义一个类核函数 $K_j = K(x, V_j)$ 表示类 ω_j 的模式分布情况, 其中 V_j 是关于类 ω_j 的一个参数集, x 是 n 维空间的特征向量, K_j 可以是一个函数、一个点集或其他模型。为了刻画待识模式 x 和 ω_j 的接近程度, 利用样本 x 到核 K_j 的欧氏距离 $d^2(x, K)$ 度量样本 x 与核 K_j 之间的相似程度, 根据样本与核的相似性判别样本是否属于该类。实际上 C-均值算法是基于核 K_j 的动态聚类算法的特例, 欧氏距离就上核函数距离的一种简化。由主元分析可知, 各类样本集中在相应的主元子空间中, 故选用样本的主轴作为聚类的核具有代表意义, 图 7-1b 中的第一类样本集中在用 D_1 表示的主轴方向上, 而第二类样本则集中在 D_2 表示的主轴上。样本的主轴就是该类样本的主元方向。

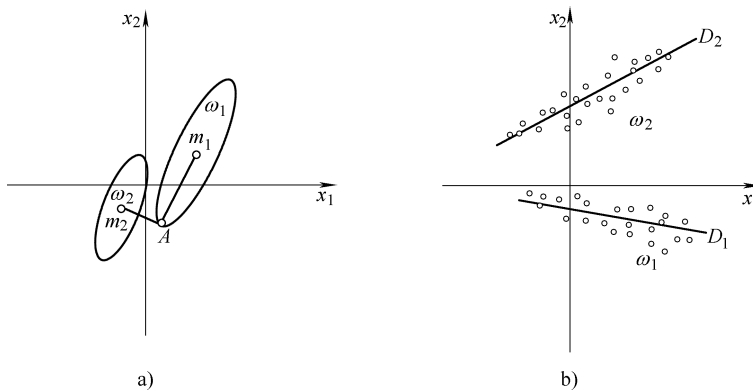


图 7-1 类的模式分布情况

a) 各分量方差不等的正态分布 b) 沿主轴分布

当已知各类样本分别集中在相应的主轴附近时, 定义主轴函数:

$$K(x, V_j) = U_j' x \quad (7-8)$$

$U_j' = (u_1, u_2, \dots, u_{d_j})$ 是 ω_j 类统计样本协方差矩阵的 d_j 个最大特征值所对应的已规格化的特征向量构成的矩阵。即 U_j 是协方差矩阵给出的部分主轴系统, u_i ($i = 1, 2, \dots, d_j$) 给出了样本分布的主轴方向 (散布情况由特征值反映出来) 的单位向量。设 m_j 是 ω_j 类样本均值向量, 求 x 和一个主轴的距离如图 7-2 所示。模式 x 和 ω_j 类间的距离可以用 x 和该类的主轴间的欧氏距离平方度量。

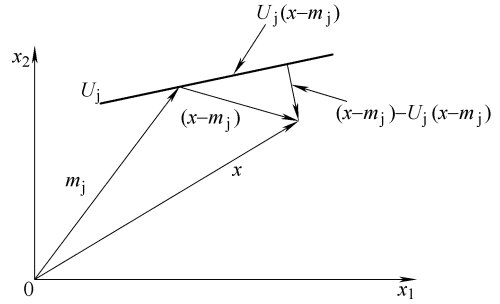


图 7-2 样本到主轴核函数的距离

$$L^2(x, K_j) = [(x - m_j) - U_j'(x - m_j)] \cdot [(x - m_j) - U_j'(x - m_j)] \quad (7-9)$$

一般情况下, U_j 是对样本矩阵进行主元分析得到的得分矩阵, 即由若干主元方向构成, 是某一类别对应的主轴组成的向量矩阵, 而不仅仅是一个向量。

由以上所述, 基于核的批处理聚类算法步骤如下:

1) 确定类数 C ($2 \leq C \leq N$), 参数 q 和一个适当的小数 $\varepsilon > 0$; 通常取 $1 < q \leq 5$ 。

2) 设定初始模糊分类矩阵 $U^{(0)}$, 令 $s = 0$ 。

3) 利用式 (7-7) 计算 $U^{(s)}$ 时的 $\{V_i^{(s)}\}$ 。

4) 考虑到 d_{ij} 可能为 0, 对 $\forall j$, 定义集合 $I_j = \{i \mid d_{ij} = 0\}$ 和 $\bar{I}_j = \{1, 2, \dots, c\} - I_j$, 按下面的方法更新 $U^{(s)}$ 为 $U^{(s+1)}$ 。对 $j = 1$ 至 N , 如果 $I_j = \Phi$, 则 $\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{j=1}^C (\frac{d_{ij}}{d_{kj}})^{2/(q-1)}}$, 如果 $I_j \neq \Phi$, 则 $\forall i \in \bar{I}_j$, 令 $u_{ij} = 0$, 并使 $\sum_{i \in I_j} u_{ij} = 1$ 。

5) 以一个适当的矩阵范数比较 $U^{(s)}$ 和 $U^{(s+1)}$, 直到 $\|U^{(s)} - U^{(s+1)}\| < \varepsilon$, 则 U 和 V 即为所求, 否则 $s = s + 1$, 返回步骤 3)。

上述方法获得的最优解是相对于某一分类数 C 、初始分类矩阵 U 、误差 ε 和权重系统 q 而言的, 若改变这些取值, 则可以得到许多局部最优解。要想从这些最优解中选出最佳解, 可以用下面两个指标检验。

1) 分类系数, $F(U, C) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^C \mu_{ij}^2$, $F(U, C)$ 越接近 1, 聚类效果越好。

2) 平均模糊熵, $H(U, C) = -\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^C \mu_{ij} \ln(\mu_{ij})$, $H(U, C)$ 越接近 0, 聚类效果越好。

7.4 基于核函数聚类分析的综合自动诊断

7.4.1 综合自动诊断模型

模糊综合自动诊断是根据机组运行时产生的振动信号进行的一种自动诊断方法。该方法

充分有效地利用了振动信息的频率结构、幅值大小和振动测点表征三个重要振动参量，是在模糊关系的基础上采用聚类分析的一种模糊模式识别，诊断过程是基于模糊数学模型的数值计算，诊断过程不需要人的干预，诊断结果具有较高的可信度和诊断效率。

首先，对获得的机组振动监测信号进行频谱分析，并计算相应的征兆隶属度；然后应用模糊关系诊断方法，根据频率幅值大小计算故障隶属度；由模糊关系矩阵（表 7-2）计算振动信号测点的故障隶属度值；在此基础上，运用核函数模糊聚类分析方法对故障隶属度表进行分类，诊断结果由聚类中心向量和相应的故障类进行判别。模糊综合自动诊断模型如图 7-3 所示。综合自动诊断系统过程如下：

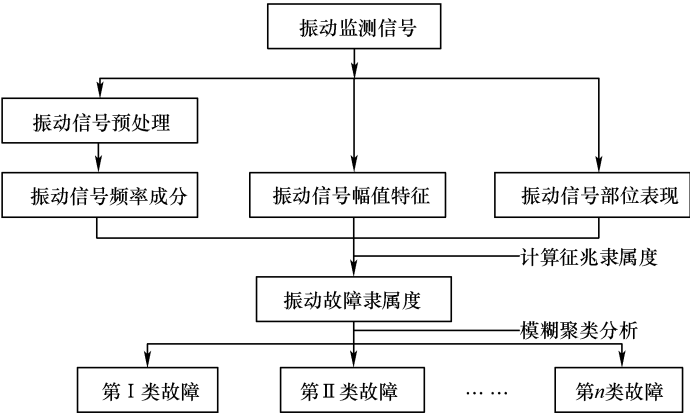


图 7-3 模糊综合自动诊断模型

- 1) 根据振动（摆度）信号幅值计算故障隶属度值，并进行单一适量化处理。获得相应的故障振动隶属度。
- 2) 振动信号预处理，即对在线监测的原始振动信号进行频谱分析，提取振动信号的特征值，并进行归一化处理，获得振动频谱征兆隶属度值。
- 3) 利用振动信号故障状态向量进行模糊聚类分析，获得故障模式类别。

基于聚类分析的综合自动诊断过程充分利用了振动故障与振动信号的模糊关系，考虑到了故障原因与振动征兆的非线性和复杂性，可以避免简单的模糊关系诊断的误诊和漏诊。不仅可以具有相似谱结构的故障归为一个模式类，而且可以在故障模式类层次上进行诊断，区分开不同性质的故障，解决不同模式类间的误诊断。

该方法故障征兆的提取不需要人工干预，诊断过程是基于模糊集的变换和运算，具有诊断效率高和诊断结果可靠等优点。

7.4.2 自动诊断系统的实现

振动信息的自动诊断是基于数值运算的诊断方法，其具有的快速性、自动性和实时性适于机组的在线诊断，在线诊断是机组状态监测与故障诊断系统的一个重要功能。

1. 在线自动诊断主要模块和工作流程

在线诊断采用了振动信息综合诊断方法，系统的主要模块有参数设置、信号处理、征兆自动获取、模糊诊断及诊断报告等。

- 1) 参数设置，由征兆隶属度的计算公式可知，振动报警值的设置直接影响其大小，从



图 7-4 实时诊断结果显示

而影响诊断结果，因此，在进入自动诊断功能前应根据有关标准和机组的实际情况对振动的各阶频率的报警值和故障值进行合理的设置。

2) 信号处理，主要是对各振动通道的时域信号进行小波分析，以获得振动的频谱图，从而得到各阶频率成分的幅值。

3) 征兆自动获取，即利用公式自动计算征兆的隶属度值，构成征兆模糊向量。

4) 模糊诊断模块，综合获取的频谱结构、幅值大小和测点表征三个振动信息参量，采用基于核函数技术的模糊聚类分析对故障进行模式分类，从而实现在故障类层次上识别诊断。

5) 诊断报告，通过对话框和页面的形式实时显示当前机组监测振动数据的故障隶属度值。对第一类故障中超过设定的故障界限值的数据可以直接查看诊断报告的内容，还可以通过对话方式，在获得更多的征兆信息的情况下进行类故障的详细诊断或验证。

2. 在线自动诊断具有的特点

- 1) 能根据机组的实际情况建立具体的机组数据库，设置参数，调整模糊关系矩阵。
- 2) 自动实时的在线诊断，根据设置的报警值，系统能自动触发自动诊断模块的运行，无需人工干预，对诊断结果可进行自动保存。
- 3) 由于是在故障类层次上进行的自动诊断，系统具有诊断可信度高的特点。
- 4) 基于监测振动信号的自动诊断方法简单、快捷，在完成对系统的诊断设置后就能进行在线诊断。为了进一步提高诊断的性能及适应现场状态监测及故障诊断的需要，实时诊断结果还应与其他诊断方法一起使用，以最终确定故障原因。

第 8 章 基于知识的故障诊断方法研究

8.1 故障诊断专家系统

水轮发电机组的故障诊断是一个复杂的模式识别过程，通过振动信号数学模型的模糊自动诊断还不能得到一个确定的诊断结果，同时也没有充分利用机组运行中的其他征兆参量和有用信息。故障诊断专家系统是当前人工智能领域中最活跃并且是工程领域中应用最成功的一个分支，它是充分应用大量专家知识和推理方法求解复杂的实际问题的一种人工智能计算机程序。专家系统能够模拟、再现、保存和复制有时不能超过人类专家的脑力劳动。从工程领域而言，它比较适于复杂的但规范化的（即知识来源可从类似机器获取）的大型动态系统。由于这种系统大部分故障是随机的，人们很难判断，这时就有必要汇集众多专家知识进行诊断。

故障诊断专家系统除了具备专家系统的一般结构外，还有自己的特殊性，其结构框图如图 8-1 所示。图中虚线框中的监测部分是故障诊断专家系统特有的部分，对设备故障诊断而言，征兆准确是诊断结果准确的前提，因此，监测系统的设计安装、信号分析与数据处理、专家系统的数据传递和征兆的自动获取都是故障诊断专家系统的重要内容。

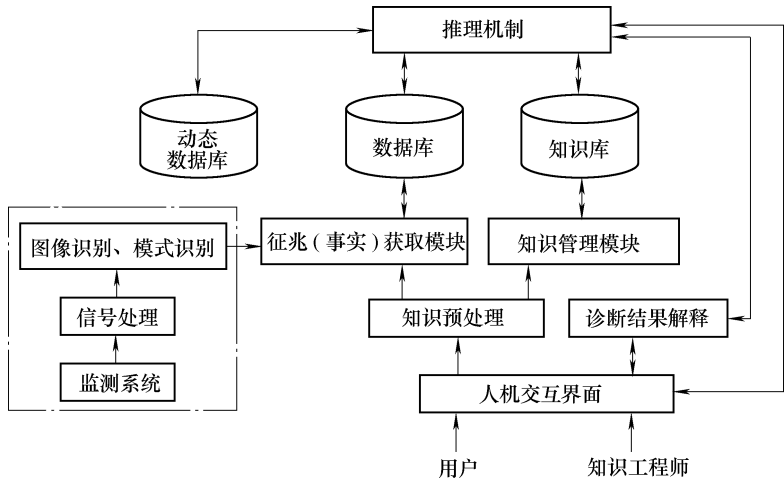


图 8-1 故障诊断专家系统框图

基于知识的故障诊断专家系统涉及多方面的问题，如领域知识的表示、组织与管理，诊断问题的求解方法及推理控制策略等。

8.2 诊断知识的表示

知识的表示方法有很多种，如逻辑表示法、产生式规则表示法、框架表示法、语义网络

表示法、过程表示法等。产生式规则的知识表示方式是当前专家系统中运用最广泛的一种方法，它不仅可以表示事实，而且可以附上置信度因子来表示对这种事实的可信度，这就导致了专家系统非精确推理的可能性；同时，由于规则之间相对独立，有利于知识库的修改和扩充。

8.2.1 诊断知识的产生式规则表示

规则表示的一般形式为

IF P THEN R WITH CF (P, R)

其中，P 为规则前提条件，是与故障原因有关的若干个征兆的组合；R 为规则的结论，即故障原因；CF (P, R) 是规则可信度。

通常情况下，机组的故障诊断不能只通过一种征兆诊断，往往是综合利用多种征兆的组合。机组的征兆可以是来自同一信息源的同类信息，如源自振动信号的频谱成分、幅值大小、相位特征、振动与负荷变化关系等，也有来自不同信息源的异类信息，如水轮机组的运行状态参量，包括工作水头、尾水管压力、轴瓦温度和进出口油温、导叶开度等，以充分运用多种征兆进行故障的识别。虽然振动信号是主要的诊断依据，对故障原因的识别也具有重要作用，但振动征兆反映的毕竟是故障的一部分信息，还有些故障是不能只根据振动特征明显区分开的，这就需要充分利用其他征兆进行综合判断。

8.2.2 诊断知识的模糊化处理方法

基于知识的故障诊断涉及大量事实和概念，有很大的不确定性，如征兆的模糊性、诊断经验知识的不确定性等。这种不确定性知识来源是多方面的，如知识本身并非完全可靠，知识不完全，或者知识来自多个相冲突的知识源等。由于情况的不断变化，或者在对客观事物所掌握的信息不完整或不正确时，进行诊断推理所得出的结论也具有不确定性，要求诊断系统能够处理这种不确定性，并且能在信息不完全的情况下做出判断和裁决。采用模糊集理论可以很好地描述和刻画这些复杂概念，并能利用模糊集的运算和变换进行故障的诊断和推理。

同时，在故障诊断中，同一种征兆尽管对应着多种故障原因，但对不同故障的灵敏度不一定相同，一种故障与多个征兆相对应，但不同征兆对识别故障所起的作用也不尽相同，为了体现不同征兆对识别同一种故障重要程度的差别，以及实现规则前提中组合征兆之间的逻辑关系，诊断系统采用了模糊产生式规则。基于如下特征的模糊产生式规则能够体现诊断知识的不确定性，能够满足模糊推理模型的有效性和实用性要求。

1) 前提条件和结论（动作）模糊化，即前提条件用模糊状态量词表达模糊关系和状态，并按一定原则进行匹配；规则的结论和动作具有 0~1 之间的可信度。

2) 设置规则的激活阈值 τ ，只有前提条件的真值大于等于 τ 时，规则才被激活。

在诊断系统中，模糊产生式规则具有如下的一般形式：

$$\begin{aligned} \text{Rule:} \quad & \text{IF } P_1(w_1) \quad \text{AND} \quad P_2(w_2) \quad \text{AND} \cdots \text{AND} \quad P_n(w_n) \\ & \text{THEN} \quad \text{Result} \quad \text{WITH} \quad (\text{CF}, \tau) \end{aligned} \quad (8-1)$$

其中， $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 表示复合规则的子前提条件，即故障诊断中的模糊性征兆（事

实); $w_1, w_2, \dots, w_n$ 为前提子条件的权重系数, 表示前提子条件中征兆对故障贡献大小的度量且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0$; 通常根据各事实的重要程度规定为以下几个等级: 最重要、很重要、比较重要、一般、可有可无。这 5 个等级分别对应于某一数值 (根据设计情况而定)。条件中的每一事实将对应一个数值, 于是每一事实的加权系数就等于本事实的重要程度对应的数值与所有事实对应数值之和的比值。

下面将就上述例子进行说明, 首先对该规则中各事实设定重要程度:

IF 振频为高频 (很重要)
尾水管压力脉动大 (比较重要)
机组在某负荷工况下振动大 (一般)
尾水管入孔处噪声大 (一般)
THEN 气蚀引起振动

假设 5 个等级分别对应于数值 5、4、3、2、1, 每一条事实的加权系数就可计算出, 例如:

“振频为高频”的加权系数 = $4 / (4 + 3 + 2 + 2) = 0.3637$ 。

以此类推, 每一条规则的各事实的加权系数都可以计算出来。

同一征兆对不同故障应分配不同权重系数, 这是考虑到同一种征兆对一种故障诊断的可信度高, 可分性好, 权系数大; 而对另一种故障诊断的可信度会很低, 其权系数就小。CF 是规则的可信度, τ 为规则成立的阈值, 取值通常介于 0.5 到 1 之间。

从式 (8-1) 可以看出, 模糊产生式规则中的一个或多个征兆组合构成诊断的前提部分, 每个征兆设置了模糊隶属度值, 用于计算证据与征兆的匹配程度, 并且按征兆对故障的贡献大小分配其权重值, 结论 (由前提确定的故障类型) 的可信度由模糊推理算法计算获得。

8.2.3 水轮发电机组故障诊断参量的分类识别方法

在诊断系统中, 故障征兆是一种重要的事实知识, 根据其描述信息的不同, 可分为时域、频域、工作状态和监测部位等征兆类型; 不同类型的征兆又有不同的获取方式, 有自动获取和人机交互式获取等; 征兆形式又有数值型、图形征兆和语义型等; 征兆的描述方式又分为精确的和模糊的。在建造专家系统时, 其中一个重要内容便是对这些故障征兆的组织 and 形式化处理。考虑到故障征兆知识的这些特点, 本系统采用征兆参量的概念进行知识的系统化和规范化处理, 不仅可以满足不同诊断系统间的信息交流, 还有利于同一诊断系统中不同知识表示方式的相互转换和融合, 提高知识表示的灵活性、适应性及集成化水平。

诊断能量是对知识抽象化处理的一种基本知识表示单元, 是存放于知识库中的一种知识型数据结构。诊断参量及其所对应的值构成机组的故障征兆。

综合大量文献提供的资料和对水轮发电机组故障征兆的充分研究, 在表 8-1 中把诊断参量分为五大类共 11 种。每一类都反映了水轮发电机组运行稳定性的一个方面特性。此表的征兆的标准化描述, 为进一步对诊断规则实现框架式表示和结构化存储打下了基础。

表 8-1 水轮发电机组故障诊断系统的诊断参量分类表

参量类型	诊断参量名	诊断参量值
工作状态(Ⅰ)	振幅与转速关系	随转速变化明显;随转速变化不明显
	振幅与负荷关系	随负荷变化明显;随负荷变化不明显
	振动与励磁电流关系	随励磁电流变化不变;随励磁电流增大而增大
	振动与过流量关系	随流量变化明显;随流量变化不明显
频谱特征(Ⅱ)	$[(1/6-1/3)f_0;1f_0;nf_0]$ 振动幅值	较大
	振动随相位变化	基本不变;突变后稳定;周期性变化;不稳定变化
	振动稳定性	稳定;不稳定;逐渐增大;突然增大后稳定;启动时振动大
时域波形(Ⅲ)	波形状态	正弦波;削波;畸变等
	轴心轨迹形状	椭圆形;香蕉形;8 字形;紊乱等
监测部位(Ⅳ)	监测位置	上导;上机架;水导;连接法兰;顶盖;尾水管等
	监测方向	振动:X 方向、Y 方向、轴向;摆度:X 方向、Y 方向
压力脉动(Ⅴ)	尾水管	较大

8.2.4 诊断规则的框架形式与结构化存储

对于水轮发电机组来说，由于故障诱发因素极其复杂，并存在发生多重故障的可能性，单纯使用产生式规则表示法描述故障诊断的知识就会使得规则库中的规则急剧“膨胀”，造成搜索空间变大，推理效率低，将会严重影响诊断的实时性。而且产生式表示法的知识单元过小，当面对复杂的故障问题时，无法把诊断知识的结构关系显式表示出来。

框架是一种描述某种形态的数据结构。一个框架（Frame）有一个框架名，由一组槽（Slot）所组成，每个槽表示对象的一个属性，即槽值，槽下面的层次叫侧面（Faces），每个侧面可以有一个或多个值（Values）。框架的结构可如下表示：

框架名
槽名 i: 侧面名 i1（值 i11，i12…）
 侧面名 i2（值 i21，i22…）
槽名 j: 侧面名 j1（值 j11，j12…）
 侧面名 j2（值 j21，j22…）

框架模式的主要优点如下：

- 1) 有利于“期望制导”的处理，即人们所在的特定环境寻找期望的事情。
- 2) 在给定的状况下，通过设计能决定其本身的可利用性或提供其他框架。
- 3) 知识组织方式有利于推理。

框架把一组相关的知识存储在一起，适于表示固定的典型的概念和行为，但不太适合表示不完全的和动态的知识。规则是领域专家在实践中总结出的概念和行为，它同人的思维和相近，容易阅读、解释和编辑，但推理效率低，规则之间容易产生冲突和不一致。为此，本文提出框架式诊断规则概念：对规则中涉及的所有征兆类型分配一个表字段，建造规则便成为简单的对规则存储表的字段的填写。每一条规则的故障原因作为一个槽名，其征兆前提的

种类为侧面，其值就是规则的前提，不同的规则便有了框架式结构，同时，诊断规则这种标准化组织形式与数据库的表形成了统一，完成了数据库存储的知识领域的延伸。这种方法融合了产生式规则的简洁直观，表示形式单一且模块化，具有解释能力、可扩充性和能够表达不确定性的优点，同时知识表示的结构化框架能比较好地反映故障诊断知识的多样性和较好的适应性。

规则中的每个前提为一个征兆（事实）。事实是知识库的最小单位，也是构成规则的基础，在故障诊断系统中，每一个前提事实即为一种征兆。构造专家系统时，首先综合领域专家的意见，归纳出知识库中会用到的所有事实，同时，为了对诊断知识进行结构化存储，根据征兆特征对征兆进行分类，如振动频谱、时域波形、轴心轨迹、振动随负荷变化关系等。在进行存储时，给每个征兆分配一个代码作为该征兆的识别码，该识别码在规则库中即代表规则前提的各种征兆。

规则是关于某个故障原因的征兆的一种组合方式。规则的结构化存储充分考虑到规则前提（事实）的结构化存储形式，为此先构造一个规则框架（表 8-2），规则框架中涉及所有的征兆类型，每种征兆类型分配一个表字段，建造规则便成为简单的对规则存储表的字段的填写。

表 8-2 诊断规则的结构化框架

规则编号	R001	R002	...
故障/征兆类型			
故障类型	转子质量不平衡	轴线不对中	...
频谱特征	S00101	S00102	...
时域波形	0	0	...
振动稳定性	0	S00201	...
轴心轨迹	S00401	S00302	...
相位特征	S00501	0	...
振动随转速变化	0	0	...
振动随负荷变化	S00702	0	...
振动随电流变化	0	0	...
振动随水流压力变化	0	0	...
其他征兆	0	0	...
规则前提数	4	3	...
已激活前提	0	0	...
规则可信度	0. 85	0. 90	...

8.3 诊断系统的模糊推理与控制策略

8.3.1 模糊推理算法描述

不确定知识的表示、模糊推理算法和证据的信任组合是知识诊断系统处理不确定性问题

的三个核心环节。推理的不确定性反映知识不确定性的动态积累和传播，在推理的每一步都需要综合证据和规则的不确定性因子，直至得出结论。为此要寻找一个尽可能符合客观实际的模糊推理方法。

针对知识的模糊表示，系统采用了加权模糊逻辑推理机制，其中涉及模糊匹配和语义距离方法。模糊匹配认为两事物已经相似到可以认为匹配的某个程度，使用模糊对象之间的“语义距离”可以衡量对象间的相似程度，两者间的语义距离越小，就认为越相似，只要足够小就认为两者是模糊匹配的，只是存在一定的差异。采用的语义距离计算公式有切比雪夫距离、欧几里德距离、加权明科夫斯基距离等。通常模糊量词采用区间表示，所以采用以下语义距离计算公式：

假设论域的元素之间已定义了一种距离 $\rho(x, y)$ ，当论域为实数域时，两个模糊区间数表示的模糊数 f_1, f_2 为

$$f_1 = [a_1, b_1]/P_1, f_2 = [a_2, b_2]/P_2 \quad (8-2)$$

f_1, f_2 之间的语义距离定义为

$$SD(f_1, f_2) = \mu_1 \left| \frac{(b_1 - b_2) + (a_1 - a_2)}{2} \right| + \mu_2 \left| \frac{(b_1 - b_2) + (a_1 - a_2)}{2} \right| + \mu_3 |P_1 - P_2| \quad (8-3)$$

式中 μ_1, μ_2, μ_3 ——权系数，且均大于 0， $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$ ；

P_1, P_2 ——模糊区间语义个数。

由于诊断规则的前提中设置了权系数，相应地在推理中采用加权模糊逻辑，它是一种主观的不充分置信推理。

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为 n 个 ($n > 2$) 加权合式逻辑公式，实数 $w_1, w_2, \dots, w_n$ 为满足 $w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$ ，且 $w_i \geq 0$ 的加权系数，则

$$x = w_1 x_1 \wedge w_2 x_2 \wedge \dots \wedge w_n x_n = \bigwedge_{i=1}^n w_i x_i \quad (8-4)$$

公式为一个合式逻辑公式，称为“ x_i 的加权合取式”，其真度为

$$T(x) = \sum_{i=1}^n w_i T(x_i) \quad (8-5)$$

即为子式真度的加权和。

在故障诊断中，规则前提中只要有一部分证据存在，就有对应的结论存在；存在的证据越多，则对应结论为真的程度越大；在存在的证据中，对结论为真贡献越大的证据越多，则结论为真的程度越大。为了刻画这种现象，系统采用加权模糊推理，认为结论的真值不仅与证据的真值有关，而且与各证据的权重有关。前提条件的真值 $T(P)$ 可以用下式表示：

$$T(P) = \sum_{i=1}^n w_i T(P_i) \quad (8-6)$$

式 (8-6) 为证据和模糊子前提条件的匹配程度，即子前提条件 P_i 的真值，规则结论的置信度为

$$E = CFT(P) \quad (8-7)$$

当 $E \geq \tau$ 时，规则激活， $E < \tau$ 时，规则不成立。

初始证据置信度的获取有两种方式：

1) 如果规则的前提征兆事实中包含状态监测量（如振动信号），则系统直接调用数据

库中相应的隶属度函数，根据实际的监测值计算征兆的置信度。这里采用升半柯西分布公式：

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x \leq a \\ 1 - 1 / (1 + k(x - a)^2) & x > a \end{cases} \tag{8-8}$$

其中， x 为振幅，一般取系数 $a = 0$ ；若使 1 倍频振动为 $50\mu\text{m}$ 时“振动大”的隶属度值为 0.5，则 $k = 1/2500$ ，并以 0.5 为允许的限值。

频谱中各谐波的幅值采用不同的隶属度函数。即对一阶谐波，式 (8-8) 中的 $\mu(x)$ 作为衡量“振动较大”的度量；对二阶谐波和油膜振荡时出现的半波幅值，分别取 $\mu^{\frac{1}{2}}(x)$ 和 $\mu^{\frac{1}{4}}(x)$ 作为衡量“振动较大”的度量。

2) 如果是通过人机对话方式来获取征兆时，对确定性前提（隶属度阈值为 0），使用者只需回答“是”或“不是”，其可信度为 0 或 1；对不确定性子前提，提出的问题也是模糊的，可从对话窗口中直接输入可信度（在 0 到 1 闭区间中的值），也可以从列表框的模糊量词中选取。对模糊量词，可以给它赋予 $[0, 1]$ 中的任意两个实数所构成的一个区间中的值来定量地表示。通常每一种故障对应多个征兆，在推理时，由于每一个前提的表述的不确定性会降低诊断结果的可靠性，因此，为每一个前提设定一个“发生程度”，有以下几个等级：绝对发生、极强、很强、比较强、一般、比较弱、很弱、不发生。每一个等级对应一个数值区间，见表 8-3。

表 8-3 模糊量词的区间对应值

模糊量词	数值区间
绝对发生	[1.00, 1.00]
极强	[0.93, 0.99]
很强	[0.80, 0.92]
比较强	[0.65, 0.79]
一般	[0.45, 0.64]
比较弱	[0.10, 0.44]
很弱	[0.01, 0.09]
不发生	[0.00, 0.00]

系统将根据模糊语言变量表量化使用者的回答，得到证据的可信度。

该推理算法的模糊规则匹配及可信度传播都是以模糊可信度为基础，将算法凝结为一个数学公式，推理中直接用公式计算，能够快速获得结论及结论可信度。

8.3.2 多种控制策略的推理机设计

知识应用也就是知识的推理和搜索，是专家系统的最终目的。推理的控制策略有三种：正向推理、反向推理和混合推理。正向推理是指知道了故障结果来推导原因，直到推出正确的结论的方式，就是系统根据使用者提供的原始信息与规则库中的规则的前提条件进行匹配，若匹配成功，则将该知识块的结论部分作为中间结果，利用这个中间结果继续与知识库中的规则进行匹配，直到得出最后的结论的方式。反向推理是指先从知识库中选择一种故障作为假设，然后寻找支持假设的证据或事实来验证这种假设的真实性，当使用者提供的数据

与系统所需要的证据完全匹配成功时，则推理成功，所作的假设也就得到了证实，与正向推理相比，它具有很强的目的性。正反向混合推理是指同时运用正向推理和反向推理的推理方式，也就是先根据给定的原始数据或证据（这些初始数据或证据往往是不充分的）向前推理，得出可诊断结论，然后以这些结论为假设，进行反向推理，寻找支持这些假设的事实或根据。

推理机制决定了诊断效率的高低以及对知识处理水平的高低，实现从已有的事实和知识得出新信息的功能，从而揭示出蕴涵在已知信息中的关于故障性质的描述。通常采用的推理策略有基于数据的正向推理、基于目标的反向推理及正反向混合推理策略。从事实（征兆）出发推出相应的故障集（目标），再从故障集出发寻找相应的事实以验证假设故障的正反向混合推理，结合了数据驱动和目标驱动控制各自的优点，是一种较好的控制策略。正反向混合推理控制策略示意如图 8-2 所示。

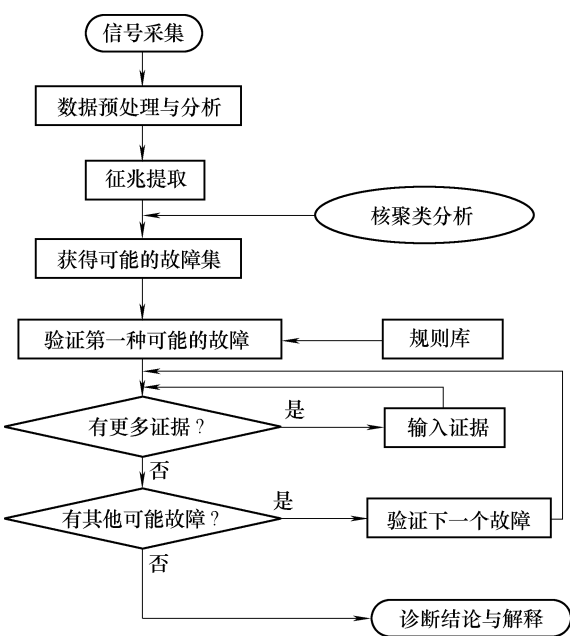


图 8-2 正反向混合推理控制策略示意图

8.3.3 解释功能

解释功能就是要解释诊断结果如何得出。在向使用者输出解释时不但列出所用到的规则，而且要求有条理地、按规则被触发的先后次序列出。解释功能部分的好坏也是专家系统成功与否的关键问题之一，它决定了该系统是否透明，能否信赖。解释功能部分刚好与诊断部分相反，可充分利用诊断推理时得到的结论和中间事实，运用从结论到事实的反向推理更合适。

基本思路及实现方法，从故障结论集即待求证结论事实集出发，采用宽度优先的搜索策略，在结论集中依次查找其中每一条结论事实作为结论被触发，若该结论事实单条规则可信度大于某个门槛值的规则，即取这些规则的编号，形成规则编号集。然后再提出这些规则的

前提事实来代替原来的待求证结论集，从而形成新的待求证结论事实集。再在规则表中进行下一次查找，遇到满足条件的规则，则将其编号添入规则编号集，循环直到最后的待求证结论事实集全为已知事实为止。这样形成的规则编号集从后向前，其代表了诊断推理的基本流程，再按照一定的输出格式把这些规则输出，就可以得到诊断的解释。在具体实现时，采用两个动态数组来表示新老结论集，完成一次宽度搜索后，老的结论集可由新结论集取代，形成新的搜索目标集，而且规则编号集也可以由动态数组表示，最后输出时用循环语句从后到前输出其规则编号，代表了诊断的流程，即完成解释功能。

8.4 基于数据库的知识库管理系统

知识库的建立包括知识获取、知识表示和知识组织三个方面的内容。

专家系统的性能取决于其所拥有的知识的数量和质量，以及它对知识的管理和运用能力。早期专家系统的知识库多采用文件管理系统的模式，即将各种知识以文件形式存储于计算机中。这种模式虽然较易实现，但存在很多缺点。例如知识存储结构不清晰、冗余性大，访问速度慢、使用效率低、不利于查询，可扩充性差、管理能力弱等。

当专家系统涉及大量的领域知识和专家经验以及多种推理方法时，这种对知识的存储和管理方式的要求很高。为了满足这些要求，将数据库技术引入专家系统的开发领域，利用数据库技术具有的强大信息管理能力的提高知识的存储和管理能力就显得十分必要了。

基于数据库的知识库管理系统（KBMS）不必为文本格式的数据关和闭进行额外的读写操作，也无须花费更多的系统资源（内存）。KBMS 使用标准的文件格式，即数据库文件格式，借助于 MDB 格式，数据库中的所有表和索引都可以包含在一个磁盘文件中。通过索引可以建立起快速高效的对记录的访问。另外，MDB 还能够实现数据完整性保护和多用户的访问控制。

专家系统的核心是知识库和推理机，它们与关系数据库的关系如下：

知识库的主要功能是对知识进行存储和管理，而数据库则是对数据进行存储和管理，因此它们在功能上是相似的，在处理对象上则有所不同，数据库的大部分管理技术对知识库同样适用。例如，知识库将知识从应用程序中分离出来，交给知识库系统程序处理；数据库则是将数据从应用程序中分离出来，交给数据库系统程序处理。两者都需研究大容量信息处理的理论和技术，诸如可恢复性、安全性、保密性和一致性等内容。诚然如前所述，知识可能是不精确的、不完备或者模糊的，在这点上和数据有所不同，但该问题可以利用一些方法进行解决。专家系统的推理与数据库中的检索也是相似的，都是一种匹配过程。以基于产生式规则的推理为例，每次推理过程就是将输入事实与规则前提的一次匹配过程，这种匹配过程在数据库中可以看做是对规则的条件部分进行的查询检索，而查询检索是数据库管理系统最基本的功能，因此专家系统的推理机制在数据库中可以借索引功能予以实现。

综上所述，现代专家系统应该是人工智能和数据库相结合的产物，而且数据库应构造在关系模型基础之上。基于关系数据库技术的专家系统具有如下优点：

- 1) 利用关系数据库成熟的管理技术能够对知识库中的各种知识进行集中管理，可以方便地对这些知识进行增加、删除、修改、浏览等操作，增加了知识对技术人员的透明度，并

极大地减弱了系统设计和维护人员对已有知识的访问过程和管理、维护难度。

2) 利用 ODBC (Open Database Connectivity) 等技术可以在多种编程环境 (如 VC++、VB、Delphi、powerBuild) 中方便地实现对各种数据库系统的访问, 使不同编程语言在数据库的基础上实现了统一, 从而在专家系统开发过程中可以根据需要灵活地选择开发语言以降低开发难度、提高开发效率。

3) 对于集成故障诊断模型而言, 在关系数据库平台上, 不同诊断方法间可以方便地进行信息交换。

专家系统与数据库系统的结合方式, 按两者结合的紧密程度可以分为三种:

1) 弱耦合。通过一个标准数据文件 SDF (Standard Data File) 实现专家系统与数据库间的信息交流。

2) 松散耦合。松散耦合是具有一定限制的直接通信方式。松散耦合和弱耦合的区别在于它允许专家系统与数据库直接通信, 而不用借助中间媒体——SDF。松散耦合通常提供专家系统与数据库存取的一些特定命令, 允许专家系统在推理之前从数据库中抽取数据。

3) 紧耦合。紧耦合的设计目标是使专家系统在推理过程中的任一点都可以与数据库直接交互, 即专家系统在任一时刻、任一位置上都可以从数据库读取数据或是把标准数据写入数据库中。紧耦合方式把知识库系统和数据库管理系统集成起来, 以数据库管理系统为主体, 将知识库放到数据库管理系统中, 交由数据库管理系统处理。

弱耦合的实现比较简单, 其缺点是数据格式转换过程必须在推理之前完成, 知识库和数据库需要在内存中来回切换, 效率低; 紧耦合是以数据库管理系统为中心, 知识库和数据库均由它控制, 始终在一种环境下运行, 是一种普遍适用的结合方式, 可以将程序和数据彻底分离, 提高了各功能模块的逻辑独立性。但将控制策略进行量化比较困难, 尤其是一些比较复杂的控制方法的量化; 松散耦合是介于弱耦合与紧耦合之间的一种结合方式。鉴于专家系统与数据库紧耦合带来的诸多优点, 这里系统的开发采用紧耦合的结构。

8.4.1 诊断知识的数据结构

知识库是诊断知识的集合。知识库的结构形式取决于所采用的知识表示方式。知识库包括规则库和综合数据库, 综合数据库中存放的是与模糊控制规则及模糊数据处理有关的各种参数, 如尺度变换因子、模糊语言变量、隶属度函数的选择等; 同时也是存放推理的过程中用到的事实、得到中间结论和最终结论, 并以此向使用者进行解释。

规则库分为元级规则库和目标级规则库, 元级规则库中元知识主要用于控制推理路径的选择, 缩小推理范围, 根据不同的诊断范围构造不同级的元规则, 可以指导推理正确快速执行。

目标级规则库中存放的是模糊诊断规则及规则的阈值、权重值等。用关系数据库建立的规则库是以数据表的形式表现的。根据诊断规则的关系模型, 本系统中可以建立三个表: 征兆事实表、规则表、规则权值表。知识库的数据表结构如图 8-3 所示。

1. 前提事实表

事实是知识库的最小单位, 也是构成规则的基础, 在故障诊断系统中, 每一个前提事实即为一种征兆。构造专家系统时, 首先综合领域专家的意见, 找出知识库中会用到的所有事实, 然后构造一个表, 并根据诊断参量的分类对征兆事实用一个唯一的代码进行标志, 该代

8.4.2 基于 ADO 数据库访问技术的诊断推理

ADO (ActiveX Date Object) 是为 Microsoft 最新和最强大的数据库访问接口 OLE DB 而设计的, 是一个便于使用的应用程序层。OLE DB 为任何数据源都提供了高性能的访问, 这些数据源可以是关系数据库, 也可以是非关系数据库、文本系统、电子邮件、文本和图形以及自定义业务对象等。在面向对象的 ADO 具有技术中, 对象与对象之间的层次结构不是很明显, 这会给编程者带来很多便利。可以访问多种数据源, 使应用程序具有很好的通用性。

利用 ADO 访问数据库时, 其典型的编程模型如下:

- 1) 连接到数据源。如果需要, 可以启动事务处理。数据源就是具体数据库的连接定义, 连接定义包括数据库的类型信息以及数据库的相关位置信息, 然后连接再被赋予一个公共名称, 叫做数据源名称 (DSN)。
- 2) 通过一个命令打开数据源。如果需要, 可以指定参数和进行性能优化。
- 3) 执行命令, 对数据进行操作。
- 4) 如果所执行的命令是返回一个表中的某些行期的数据, 则可以将这些数据先写入缓冲区内以便处理。
- 5) 如果需要, 更新缓冲区内数据。
- 6) 在应用程序中处理错误。利用高级程序设计语言如 Visual C + + , Visual Basic, Delphi 等开发的 Windows 应用程序, 可以很容易地通过 ADO 实现对数据库的快速访问和操作。ADO 访问数据库结构如图 8-4 所示。

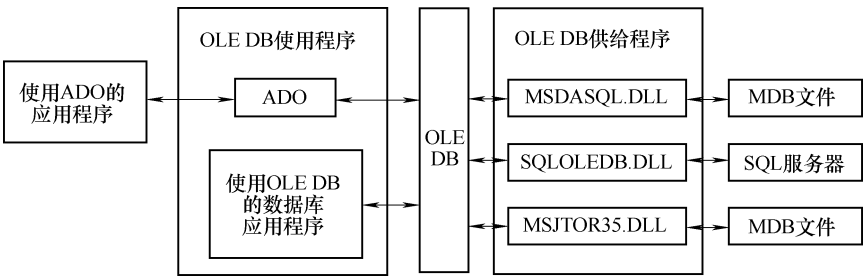


图 8-4 ADO 访问数据库结构

在基于数据库管理的知识库系统中, 对诊断知识库的访问就是通过对数据库的访问来实现的。系统在进行诊断时, 由于要频繁地使用到对数据库的访问、修改等操作, 因此, 程序中把针对数据库的一些公共操作集中起来, 可以使代码更加规范和容易维护。这样, 在诊断推理过程时便可以很方便地实现对规则表的访问和修改等操作了。

正向推理的基本思想是从征兆事实出发, 在规则库中找出所有规则前提条件子句匹配的事实。如果匹配成功, 规则被激活, 从而产生新的结论。把新的结论放入事实数据库中, 继续进行匹配, 直到得到结论再也不能进行匹配为止。

程序实现的基本思路, 由于元规则只控制推理的方向, 不进行模糊运算, 因而根据征兆事实的一次故障原因和二次故障原因对目标级规则进行分层, 在故障的一次故障原因规则推理结束后, 将产生的结论作为二次故障原因的中间事实, 再对二次故障原因规则进行推理, 得到的结论便是诊断的最终结果。其推理流程如图 8-5 所示。

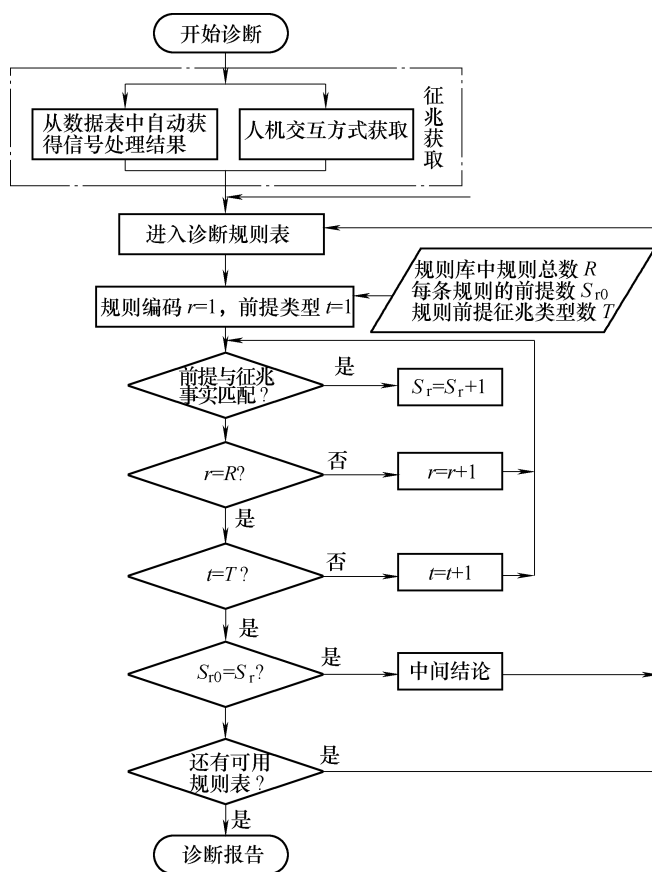


图 8-5 诊断推理流程图

第 9 章 旋转机械状态监测与故障诊断硬件系统设计

9.1 中小型水轮发电机组状态监测与故障诊断硬件系统设计

9.1.1 系统硬件总体结构

基于水轮发电机组振动摆度信号的低频或超低频特点，必须使用低频或超低频的振动位移传感器和电涡流传感器。低频或超低频的振动位移传感器的研究取得实质性的突破并产品化只是近几年的事，检测摆度的非接触式电涡流传感器也是 20 世纪 80 年代引进国外的产品，但太贵而难以普及。现在国内的非接触式电涡流传感器性能已与进口的相当，而价格较便宜且得到普及。在线监测水轮发电机组的振动与摆度，在技术上有许多难点，首先仪器使用的现场环境差，电磁干扰大，温度变化大，湿度也大，长期在线工作方式要求仪器比一般的便携式测量仪表有更高的可靠性及可用率；其次，大多数的传感器的安装环境与在实验室内截然不同，安装电涡流传感器的支架本身长期颤动，增加了测量的误差，如长时间地用螺距为 1mm 的螺母固定量程为 1~2mm 的电涡流传感器探头，由于支架本身就处于颤动的状态，时间一长，螺钉易松动，探头会移位，传感器测出的参数值将很不准确。针对以上技术难点，本书将在硬件方面采取相应的措施。

本书中的振动监测系统的硬件结构如图 9-1 所示。该系统结构简单、紧凑，全部采用模块化结构，易于扩展功能。它由各种传感器、信号调理电路、抗干扰电路、通信线路、端子板、数据采集控制卡以及 PC 机等组成。传感器一方面与被监测部件相连接（直接或者是间接接触），以采集各个被监测点的振动量或者是摆度；另一方面与端子板相连，将采集到的各种信号经过信号调理电路、抗干扰电路以及端子板上滤波电路、隔离电路处理好后送到数据采集卡，其主要功能是进行 A/D 转换以便完成模拟量的输入。PC 机接收数据采集控制卡所采集到的数据并进行存储，以便进一步判断与分析。本系统具备以下特征：

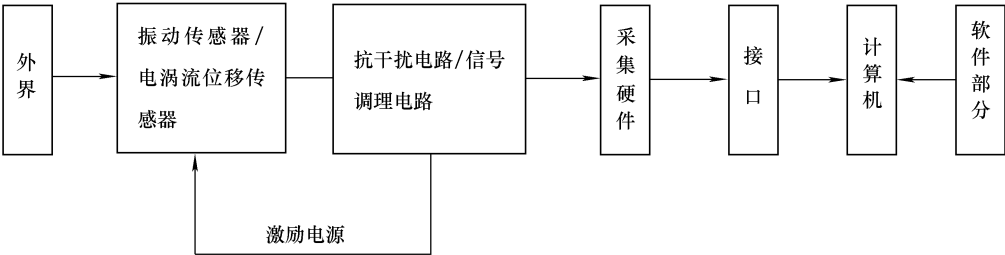


图 9-1 中小型水轮发电机组振动监测系统的硬件结构

1) 响应速度快。水轮发电机组振动监测系统是一个高速实时在线监测系统，监测人员

通过各种人-机接口设备,实时监测机组的运行状态。当机组出现振动过大的故障时,要求监测系统以最快的速度响应并通知运行人员,分辨率可达到毫秒级别。另外,本监测系统需要对大量的数据进行计算,这同样要求系统的高响应速度。

2) 可靠性高,水轮发电机组振动监测系统是保证机组稳定运行的重要环节,为此,本研究系统采取了各种可靠性措施,保证系统各部分能够分别检查、维护与更换。

3) 扩展性好,兼容性强,其有利于进一步完善系统。

4) 可维修性好,系统中使用的传感器具有自诊断功能。

5) 性价比高。

9.1.2 振动监测点的布置与传感器的选型

1. 振动监测点的选择与布置

监测点的选择与布置是获取机组运行状态信号的重要环节,将直接影响到采集信号的真实性、监测系统对机组运行状态评估的准确性和诊断系统诊断结果的可靠性。若监测点太少,不能完全反映机组的运行状态;而监测点过多,不仅成本大大增加,而且使得系统更加复杂化,反而不利于机组的状态监测。所以应该选择最有代表性、最能够反映机组运行状态的监测点。在 GB/T 8564—2003《水轮发电机组安装技术规范》中,就振动的等级作了详细的规定;在 DL/T 556—1994《水轮发电机组振动监测装置设置导则》中,就振动装置的设置作了详细的说明。上述标准为振动监测装置的设置与结果的评定提供了依据。振动在线监测装置的一个基本功能就是实时监测机组的振动是否超过允许的上限,以提醒运行工作人员及时避开振动区运行或者是通知维护人员查找故障。关于如何设置报警值的大小,GB/T 8564—2003《水轮发电机组安装技术规范》中就振动允许值给出了明确的规定。本系统根据此技术规范,设置了在一般工况下振动值的上限。(注意:①该上限允许值是混频下的峰-峰值,不涉及振动的频率。②该振动允许值是指在正常工况下的测量值。)同时,根据竖轴混流式水轮发电机组振动特点与监测点的选择与布置的原则和要求以及现场的实际情况,设置系统中振动摆度的监测点,见表 9-1(不同的机组需要配置的传感器和监测点分布略有不同)。其振动摆度监测点分布如图 9-2 所示。

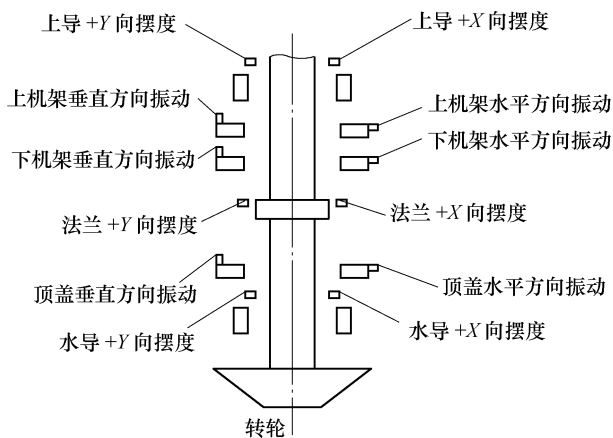


图 9-2 振动摆度监测点分布示意图

2. 振动、摆度传感器的选择与安装

一般来说,选择传感器应该满足以下要求:

- 1) 传感器的工作原理与待测量相符合。
- 2) 传感器应该满足监测点的精度要求。
- 3) 传感器的外形尺寸要满足现场的安装要求。
- 4) 传感器应该满足现场恶劣环境的要求。

表 9-1 系统中振动摆度的监测点列表

序号	测点名称	传感器型号	数量	序号	测点名称	传感器型号	数量
1	上机架水平振动	低频振动位移传感器	1	7	上导 + X 向摆度	电涡流传感器	1
2	上机架垂直振动	低频振动位移传感器	1	8	上导 + Y 向摆度	电涡流传感器	1
3	下机架水平振动	低频振动位移传感器	1	9	水导 + X 向摆度	电涡流传感器	1
4	下机架垂直振动	低频振动位移传感器	1	10	水导 + Y 向摆度	电涡流传感器	1
5	顶盖水平振动	低频振动位移传感器	1	11	法兰 + X 向摆度	电涡流传感器	1
6	顶盖垂直振动	低频振动位移传感器	1	12	法兰 + Y 向摆度	电涡流传感器	1

5) 传感器的性价比应该能够接受。

振动量的测量按照传感器的安装方式可以分成非接触式和接触式两大类。非接触式的传感器一般选用电涡流位移传感器。电涡流位移传感器具有灵敏度高、线性范围大、频率范围宽、结构尺寸小、抗干扰能力强等优点。在本系统中，选用电涡流位移传感器来测试轴的振动（即摆度），安装时将电涡流传感器安装在一个特定的支架上。由于测量的时候支架本身也在振动，传感器测得的是被测物体相对于支架的振动值。被测部位离机座不宜过远，因为被测部位离机座越远，支架臂就越长，对支架刚度的要求也就越高。另外，支架臂过长不仅影响到测量精度，而且影响到现场运行和检修人员的巡视、维护工作。

振动传感器不仅要满足水轮发电机组低频振动的特点与要求，而且要方便现场安装。在本系统中选用 DP 型地震式振动传感器，这是一种接触式的传感器。DP 型传感器是将机械结构固有频率较高（如 10Hz）的地震检波器经过电路校正，使整体固有频率降为 0.5Hz 或更低，从而使 DP 型传感器既保持了原检波器的优点（抗振、耐冲击、高稳定度），又有了更良好的低频输出特性。DP 型振动传感器适用于水轮发电机组和低速回转机械的振动监测。根据以上的分析以及现场实际的需要，测试机组摆度与振动的传感器选型如下：

1) CWY-DO-20T05-M10X1-B-01-05-50 电涡流位移传感器（用于上导、水导、法兰处主轴的摆度监测），其主要技术参数如下：①信号灵敏度为 5V/mm；②频响范围为 0 ~ 10kHz；③使用范围为 0.25 ~ 1.25mm；④前置器为 CWY-DO-20Q05-50V；⑤供电电压为 -18 ~ -26V；⑥线性中点为 0.75mm。

在本系统中采用 -24V 供电。在测试摆度时，传感器安装位置要尽量靠近轴承，否则，由于轴的挠度，得到的测量值将包含附带误差。

2) DPS-0.5-5-H 与 DPS-0.5-5-V 振动位移传感器（分别用于监测上机架、下机架、顶盖的水平与垂直振动），其主要技术参数如下：①固有频率为 0.5Hz；②灵敏度为 5mV/μm（1 ± 5%）；③最大输出电压为 ±5V；④量程为 ±1mm；⑤线性度 < 5%；⑥环境温度范围为 -20 ~ 60℃；⑦供电电压为（±6 ~ ±12）V（DC），消耗电流 < 15mA，在本监测系统中使用 -12V 的电源。

在测试机组固定部件振动时，传感器应尽可能靠近转轴安装，并避开母线出线等电磁场较强的地方。

9.1.3 抗干扰方案

水电站现场干扰非常严重，因此传感器监测得到的信号可能混有严重的干扰成分，为了

得到可靠的信号，在干扰信号进入数据采集控制卡之前，就必须将干扰成分去除掉；若干扰信号中混有高压成分，还将严重影响到采集卡与微机的安全运行，引起事故。因此系统中的抗干扰措施至关重要。下面首先分析系统干扰的形成，然后针对这些干扰采取有效的抗干扰措施，确保所采集到的振动信号安全、可靠。

1. 干扰的形成分析

本系统的主要干扰来源如下：

- 1) 水电机组发电设备的强电磁场、强电场造成的干扰。
- 2) 发电机组大功率传输电流造成的干扰，是主要的共频噪声源，测试装置的低电平信号线只要有一定长度与机组输电线平行，就会受到明显干扰。对于输入阻抗和灵敏度都比较高的振动测量系统来说，它是很大的干扰源。
- 3) 电源干扰：监测系统在数据采集过程中的电源电压波动、异常高压、高次谐波、高频噪声、配电系统感性负载切换噪声、电容性负载涌入电流等也是很大的干扰源。
- 4) 监测系统器件内部噪声干扰。
- 5) 脉冲干扰：甩负荷试验等各种工况的测试现场，发电设备的起动电流和接地电位变化引起的干扰。
- 6) 监测系统的信号调理电路干扰。

2. 硬件抗干扰设计

噪声形成干扰必须具备三个条件，即噪声源、对噪声敏感的受干扰设备和噪声源到受干扰设备之间的耦合通道。抑制干扰的基本方法从形成干扰的这三个条件入手，即削弱噪声源、切断耦合通道以及提高受干扰设备本身抗干扰能力。其中消除或者是抑制噪声源是最有效的措施，因为它能够从根本上消除和减少干扰。

- 1) 对机组发电设备负荷变化等造成的高频干扰及浪涌电压，采取的措施为采集装置配备 UPS 和对变压器初次级间进行静电屏蔽等。
- 2) 铺设传输线比较长的传感器信号线时，注意尽量不要与现场机组输电线平行，且传感器与端子板之间的信号线都采用屏蔽线。
- 3) 传感器信号进入数据采集卡之前，先通过端子板上的低通滤波电路滤波，初步消除干扰信号。
- 4) 各种电路、主要元器件直流电源采用 RC 滤波、去耦，同时加高频旁路电容，以消除电源线和地线引入的脉冲干扰信号。
- 5) 合理设计电路接地点，遵循一点接地的原则。

9.1.4 信号调理电路设计

信号调理的作用是将传感器测得的低电平信号进行缓冲、放大、滤波及线性化等，以获得本系统中 ADC 所需要的归一化信号。同时，它为系统的传感器的前置器提供激励电压。

(1) 放大 这是信号调理的最基本方式，从振动传感器中所输送出来的信号比较微弱，所以必须经过放大，以便提高分辨率，减小噪声。当放大后的信号的动态范围刚好等于 ADC 的动态电压范围时，才可达到最大的测量精度。在这里的自动测试系统中，放大器的倍数可由程序控制，以保证达到最高的测量精度。

(2) 隔离 这是信号调理的另一种基本方式，由于水轮发电机组的电气环境非常复杂，

传感器输送出来的信号中可能混有损害计算机的高压信号，因此，在传感器和计算机之间必须进行隔离。同时隔离可以消除地电位或者是共模电压对系统的影响，对毫伏级的输入信号还可提供噪声抑制能力。在这里采用磁隔离。

(3) 激励 在本系统中需要给振动位移传感器提供 -12V 电源激励，给电涡流位移传感器提供 -24V 的电源激励。

(4) 电平转换 电涡流位移传感器输出信号为负电平，通过电平转换，电路将信号转换成正电平。

9.1.5 端子板 PCLD-881B

从传感器测得的振动、摆度信号经过放大、隔离、电平转换等措施后送入 PCLD-881B 端子板，它是连接传感器与数据采集卡之间的桥梁。PCLD-881B 为传感器输送出来的信号提供了方便可靠的接线端子。

由于 PCLD-881B 上面有专门的 PCB 设计图，根据系统的需要，可以在上面很方便地插上一些无源器件构成信号调理电路，如低通滤波器、分流电路、转换电路等。其主要特性及规格如下：

1) 40 个终端接口，其中 32 个为模拟量输入端口，可以设置成 32 路单端输入或 16 路差动输入或者是两种混合方式。

2) 为信号调理电路如低通滤波器、转换电路、分流电路预留了位置。

3) 工业用端子板，能够承受大的负荷并且连接可靠。

有两种将信号连接到端子板 PCLD-881B 的方式，一种为单端输入，另一种为差动输入。为了有效抑制共模干扰，在这里采用差动输入方式。

9.1.6 滤波电路设计

在信号进入数据采集卡之前，必须经过低通滤波电路将信号中的高频成分除去。水轮发电机组振动信号的主要高频成分是由于导叶或者是转轮中流水不平衡而导致的。此处机组额定转速为 210r/min，所以水轮发电机组在以额定转速运转时，其转频大致为 3 ~ 3.5Hz，而水轮机的导叶叶片数为 16，转轮叶片数为 13，所以振动信号中的主要高频成分 50 ~ 60Hz；而对大轴摆度信号，使用者感兴趣的主要是转频及其倍频部分，因此将摆度信号中高于 15Hz 以上的高频成分滤除掉。

在 PCLD-881B 端子板上预留了 RC 低通滤波电路的位置，通过选择适当的电阻与电容即可得到系统所要的低通滤波电路，其下限截止频率计算如下：

$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi (RA_n + RA_{n+1}) CD_n} \quad (9-1)$$

其电路原理如图 9-3 所示。

由于水轮发电机组在运行时工作速度总是变化，而机组的振动与摆度截止频率要求随着转速的变化而变化，所以在本系统中将 RA_n 和 RA_{n+1} 设置为可变电阻，使其组成的滤波电路的截止频率随着机组转速变化而变化。

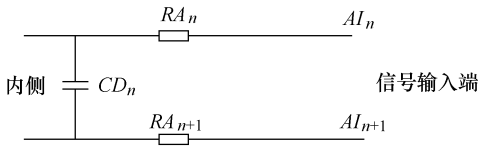


图 9-3 低通滤波电路原理图

9.2 风机状态监测与故障诊断硬件系统设计

9.2.1 系统硬件总体结构

风机在线振动监测硬件系统由一台上位机（监控计算机）和信号调理模块组成。信号调理模块负责将转速、振动和轴位移等信号转换成标准信号并传送给监控计算机，工控机负责显示机组的运行状态、保存数据、数据查询和分析以及故障诊断，并与公司局域网连接，如图 9-4 所示。

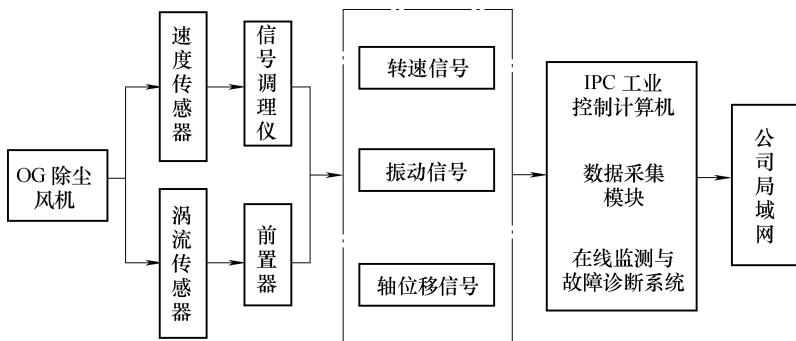


图 9-4 风机振动监测系统的硬件结构

9.2.2 振动监测点的布置与传感器的选型

对于风机这种旋转机械来说，表征其状态的参量有振动、噪声等，但最直接、最明显的表征参量是振动，旋转机械的振动主要是由转子引起的（如不平衡、不对中、动静摩擦等），而对于大多数旋转机械（包括具有滚动轴承的大部分机械和具有油膜轴承的大部分机械）来说，轴振动大部分被传递到轴承座上。在这种情况下，测量轴承座的振动可以对机械设备的综合工况提供比较有意义的信息。风机是一种旋转机械，本监测系统就是通过监测轴承座及机壳的振动，并辅以监测轴向位移实现状态监测的。

监测轴承座和机壳的振动用 ZHJ-2 型振动速度传感器，其技术参数如下：①频率范围为 10 ~ 300Hz；②灵敏度为 30mV/（mm/s）；③最大加速度为 8g；④测量范围为 2mm（p-p）；⑤工作环境为温度 -10 ~ 100℃。

ZHJ-2 型振动速度传感器可用来测量轴承基座、机壳结构的振动。这种传感器测量的振动是相对于自由空间的绝对振动，其输出电压信号与振动速度成正比。这种传感器属于惯性式传感器，是利用磁感应原理把振动信号转换成电信号，它主要由磁路系统、惯性质量、弹簧阻尼等部分组成。在传感器壳体中的刚性固定有磁铁，惯性质量（线圈组件）用弹簧悬挂于壳体上。工作时，将传感器安装在轴承座上，在机器振动时，在传感器工作频率范围内，线圈与磁铁相对运动切割磁力线，在线圈内产生感应电压，该电压值正比于振动速度值，但感应电压量级通常较小，为 mV 级，通过放大电路将信号放大后进入下位机（数据采集卡），采集的数据送入上位机的监测软件中显示、分析、处理。

监测轴向位移用 CWY-DO 型电涡流传感器，这种传感器系统主要由探头、延长电缆和

前置器组成。其技术参数见表 9-2。

表 9-2 CWY-DO 型电涡流传感器技术参数

参数	轴向位移	转速
探头直径	8mm	11mm
灵敏度	8mV/ (mm/s)	8mV/ (mm/s)
线性量程	4mm	4mm
线性误差	系统误差≤2%	系统误差≤2%
频率响应	0 ~ 3000Hz	0 ~ 3000Hz
使用环境（温度）	探头≤120℃ 前置器≤65℃	探头≤120℃ 前置器≤65℃
输出（DC）	-0.9 ~ -21V	-0.9 ~ -21V
供电电压（DC）	24V	24V

电涡流传感器利用电涡流效应进行工作，可测量被测物体（金属导体）与探头端面的相对位置。该传感器采用非接触测量，具有长期工作可靠性好、灵敏度高、抗干扰能力强、响应速度快、监测不受油污及蒸汽的介质影响的良好特性，适用于大型旋转机械的轴向振动、位移、转速等参数的长期实时监测；还可以分析设备的工作状况和早期预报，有效地对设备进行预测性维修及保护。电涡流传感器的输出电压为 -0.9 ~ -21V，量级大，数据采集卡可以直接采集其输出信号，并送入上位机的监测软件中进行显示、分析、处理。

9.2.3 系统硬件工作原理

系统的信号共包括三类——振动信号、键相信号、轴位移信号。它们由 CM4016B 信号调理仪进行信号抗混滤波、放大、转换成标准信号，然后由上位机进行信号采集、存储、分析和诊断，并实现网络连接。

9.3 PCI-1713 卡编程方法的选取

根据现场实际情况和研究需要，在本系统中选用研华科技生产的 PCI-1713 经济型模拟量输入数据采集卡。该卡简单易用，且为即插即用型，可以直接接入到计算机的 PCI 总线的扩展插槽中。

任何数据采集以及监控系统都需要有软件来进行控制。对于数据采集系统的编程可以采用以下三种方法来实现：硬件编程、驱动程序级编程、软件包级编程。

硬件编程是采用 C 语言或者是汇编语言直接对硬件的寄存器进行编码。采用 C 语言编写程序的优点是简洁，编译程序小，编译生成的目标代码质量高，且程序执行效率高。但是对软件开发人员的要求比较高，从而造成系统开发周期比较长，可维护性差，而且 DOS 下的应用程序不具有标准的 Windows 图形界面。

驱动程序级编程就是采用 Microsoft Visual C + +、Visual Basic、Delphi 等高级语言来调用板卡制造商提供的库文件中的高级函数，这些函数将完整的调用（如 A/D 变换）封装在一个调用函数中。

软件包编程就是采用板卡制造商开发的应用程序来帮助使用者完成工作，使用者只需要

简单地告诉提供的程序如何去做。该软件包将数据分析、表示以及设备控制能力集成在一个界面中。这些程序提供了多种特性，如下拉式菜单及图标、数据记录及分析以及实时的图形显示等。

PCI-1713 卡支持研华的 32 位 Windows98/NT/2000/ME/XP 驱动程序的 DLL。该 DLL 驱动程序允许使用标准的函数去控制 PCI-1713 卡，而不需要去控制它的寄存器。该 DLL 驱动程序支持的高级语言有 Microsoft Visual Basic、Visual C++、Delphi 等。

根据监测系统的要求和自身掌握以上三种编程方法的水平，这里选择了 Visual C++ 对 PCI-1713 卡进行驱动程序级编程。

9.4 PCI-1713 卡的测试

9.4.1 研华的 Windows DLL 驱动程序

研华的 32 位 Window98/NT/ME/XP 驱动程序的 DLL，是基于 Windows98/NT/ME/XP 内核函数的，DLL 驱动程序用于主计算机和数据采集卡之间的通信。本系统主要用到其中下列函数：设备函数——初始化配置硬件和软件；模拟量输入函数——转换单个或者是多个通道的 A/D；高速函数——使用 DMA 以及中断来进行数据采集。

PCI-1713 卡的 Windows98/NT/ME/XP 驱动程序的 DLL 为 ADS1713.DLL。下面将详细介绍在本监测系统中常用的一些函数。

1. 设备函数

(1) DRV_DeviceOpen 从注册表或者是配置文件中返回与设备操作相关的参数，并且为这些参数分配存储空间。在使用其他函数之前，必须先使用“DeviceHandle”参数调用该函数。

(2) DRV_DeviceClose 释放由 DRV_DeviceOpen 函数所占用的存储空间。

(3) DRV_GetErrorMessage 从上一个函数调用中获得发生错误的错误代码，由这个错误代码可以确定发生的错误原因。

2. 高速模拟量输入函数

(1) DRV_FAIntScanStart 初始化多通道的各个采样参数（触发模式、采样速率、通道数、开始通道号、增益列表、数据缓冲区大小、采集数据量大小、采集模式、FIFO 大小），开始采集数据。

(2) DRV_FAICheck 检测数据采集是否已经结束，并且返回当前的状态。

(3) DRV_FAITransfer 开始数据传输，将开始暂存在采集卡缓存中的数据传输到系统内存中。

(4) DRV_FAIStop 模拟量停止输入。

9.4.2 使用 Visual C++ 创建 DA&C 应用程序

为了实现对 I/O 端口的访问，采用了动态链接库（DLL）技术来调用研华提供的库文件中的高级函数。DLL 是应用程序的组件，它以文件的形式提供多种函数。在运行的时候能被另外的程序链接和使用，在应用程序中不用再创建这些函数。使用 Visual C++ 调用 PCI-

1713 卡的研华 32 位 Window98/NT/ME/XP 驱动程序 ADS1713. DLL 中的函数创建一个 Windows 应用程序的具体步骤如下：

- 1) 打开一个新的工程，创建一个新的窗体，如图 9-5 所示。
- 2) 为了能够使用 ADS1713. DLL 驱动程序开发 DA&C 应用程序，首先将该 DLL 驱动程序作为标准模块添加到工程中。
- 3) 添加驱动程序标准模块后，可以看到一些常量的定义、参数的声明、DLL 调用函数、自定义的数据类型、消息等，如图 9-6 所示。

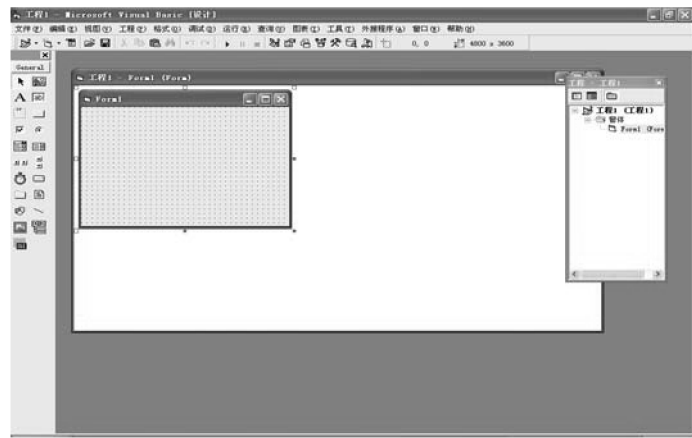


图 9-5 新建工程

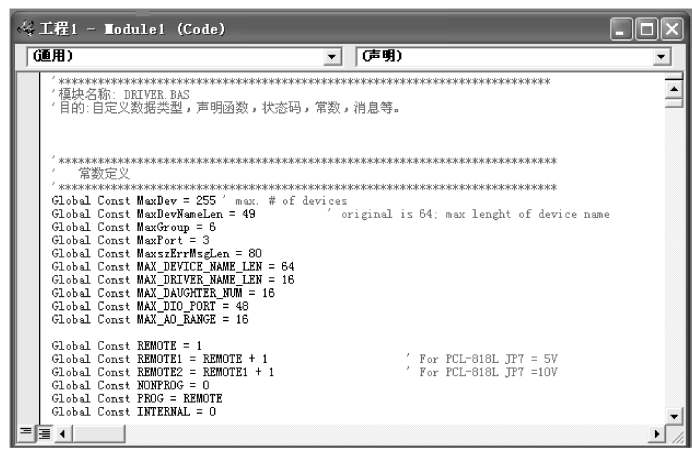


图 9-6 驱动程序标准模块

9.4.3 PCI-1713 卡的标定

为了保证采集数据的精度，必须要经常对数据采集卡进行校正标定。可以利用研华提供的校正标定程序 ADCAL. EXE 调整采集卡上的可变电阻以校正标定好数据采集卡。

第 10 章 旋转机械状态监测与故障诊断系统应用研究

10.1 水轮发电机组故障诊断系统(HGSFDS)

10.1.1 HGSFDS 系统总体设计

HGSFDS 系统是为中小型水轮发电机组而开发的故障诊断系统。其总体结构的设计兼顾了实时性与可靠性、实用性与通用性,以及系统运行效率等性能指标的要求。具体表现如下:具有实时的在线自动诊断和详细的离线交互式诊断,较好地满足了机组对故障诊断的实时性和准确性的要求;具有完备的后台数据库管理功能,方便地实现了对监测数据的检索、存储和分析处理。运用数据库管理技术实现对知识库的管理,使知识库具有了数据库的透明性和数据的一致性,完成了知识库和数据库的统一。良好的交互式界面设计方便使用者参与分析诊断。无处不在的系统帮助功能使用显得更加得心应手。

系统的结构功能菜单如图 10-1 所示。

10.1.2 系统结构与模块功能

1. HGSFDS 软件特点

水轮发电机组故障诊断系统(HGSFDS)软件为基于 Windows XP 平台的多文档(MDI)应用程序。由于诊断系统除了知识的存储和检索外,还包括大量的数值计算(如模糊聚类分析自动诊断过程的计算、征兆事实与前提条件匹配程度的计算等),再者系统在诊断过程中需要对数据库和诊断知识库进行频繁的访问和操作,所以,本系统采用面向对象的高级程序设计语言和基于 ADO(ActiveX Date Object)数据库访问技术相结合的方式进行系统的开发。微软公司的 Visual Studio 98 集成开发环境中的 Visual C++ 6.0(以下简称 VC++)具有可视化功能,能够快速开发出高质量的用户界面,在数据库应用程序开发领域上,不论数据来源维护、数据访问控件、数据的连接、报表图表制作等应用程序的开发,都显示了其高效的开发特点,适合于开发大规模的应用程序。Access 是 Office 办公套件中一个极其重要的组成部分,不管是处理公司的客户订单数据、还是大量科研数据的记录和处理,都可以用它来解决大量数据的管理工作。两者的结合不仅能加快系统的开发速度,还使应用程序独立于具体的数据库之外,给信息的交换带来了方便。

2. HGSFDS 系统结构

HGSFDS 故障诊断系统主要由以下几个部分构成:黑板结构;两个库,即机组数据库和诊断知识库;七个功能模块,包括系统用户管理模块、诊断信息获取模块、数据分析处理模块、知识库管理模块、诊断推理模块、诊断结果解释模块和系统使用帮助模块。

(1)黑板结构 黑板结构是专家系统的一个重要组成部分,它不仅用于存储获得的征兆事实,还用于存储推理的中间结论和推理过程中全局变量和局部变量值的改变,同时,专家

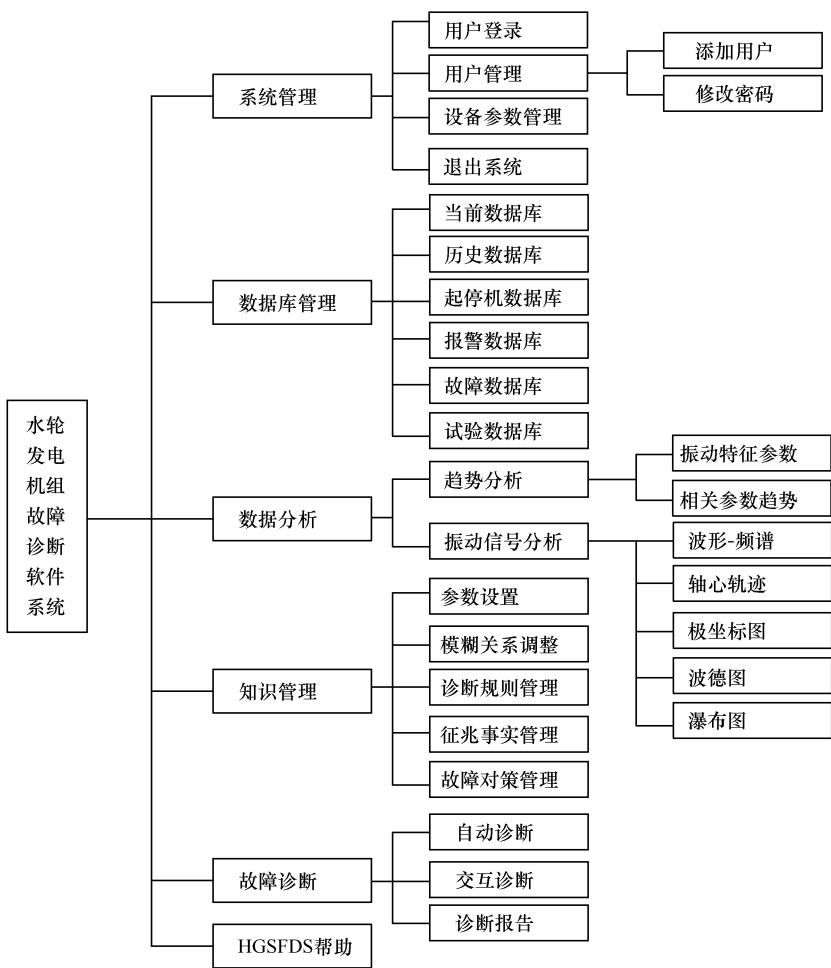


图 10-1 HGSFDS 系统结构功能菜单

系统通过黑板向使用者进行解释，这是专家系统透明的一个重要标志。

HGSFDS 系统中包括全局黑板和局部黑板。全局黑板是一个全局数据区，诊断系统在推理过程中，要求不同的诊断任务在问题求解过程中能相互协调，即一个故障诊断的任务能够引用其他故障求解得到的一些故障征兆或中间结论，如在求解“转子不平衡故障”时，已经获得了“振动波形是正弦波”这样一条征兆，在解决其他的诊断任务如“轴线不对中”时，就可直接引用这个征兆，而不需要再次向使用者提问。已获得的征兆事实和推理的中间结论放在全局黑板上，此外，存放用于推理的全局变量也作为全局黑板中的内容。局部黑板存储每个任务在推理中产生的局部事实，如局部变量等，在规则匹配的过程中每个规则已激活的前提数便是一个局部变量。系统将黑板和知识库融为一体，如征兆事实表的激活标志字段、规则表的已匹配前提数字段都是黑板中的数据。

(2) 数据库

1) 机组数据库。机组数据库存放机组的静态数据和动态数据，静态数据是指水轮发电机组的结构和功能参数，如轴系结构，气蚀系数，上(下)、水导轴承的允许间隙等。动态数据库用于存放机组实时监测的振动、摆度信号，压力脉动，工作转速等各种特征信息。根

据监测数据的性质又分为当前数据库、历史数据库、起停机数据库、报警数据库和故障数据库等。

2) 诊断知识库。诊断知识库是故障诊断系统的核心, 不仅包括用于交互式诊断的诊断规则、征兆参量和诊断策略, 还包括用于模糊诊断的权系数、模糊关系矩阵和自动诊断中设置的各个参数等。

(3) 模块与功能

1) 用户管理模块。该模块用于完成用户的系统登录和用户管理等功能。对不同级别的用户设置不同的系统使用范围, 如普通用户是不能对知识库中的内容进行修改、删除等操作的。

2) 数据库管理模块。本系统设计了六类数据库, 即当前数据库、历史数据库、起停机数据库、报警数据库、故障数据库和振动试验数据库。数据库存储机组正常工作状态下, 当前一个月的数据, 保留数据时间间隔设为 30s; 历史数据库存储了当前一年的历史数据, 保留数据时间间隔为 30min。报警数据库和故障数据库分别保存系统在发出报警和故障信号的情况下, 自动写入的一批数据。起停机数据库存储机组起停机时的数据。

3) 数据分析模块。包括振动信号瞬态和稳态数据分析、趋势分析。瞬态数据分析机组的起停机数据分析功能, 可对升降速过程中的振动数据绘制伯德图、极坐标图、波形图、频谱图和轴心轨迹图等。稳态数据分析, 即日常运行数据分析功能, 可对数据库中的历史数据进行分析处理, 可作波形图、频谱图、轴心轨迹图、趋势图、快速趋势图、三维频谱图等图形。趋势分析是指对振动信号的特征参数、振动与温度、振动与压力等相关参数在选定的时间段做趋势分析。

4) 参数设置。根据不同类型的机组及测点布置情况, 配置诊断系统的参数, 如通过设置各导轴承的允许间隙、共振频率, 自动获得与其有关的征兆; 非振动量的通道设置则是为了获得它和振动量相关联的征兆。

5) 诊断信息获取模块。该模块主要用来形成故障征兆, 经过两种途径获得诊断信息: ①自动获取征兆, 自动获取模块主要从两类信息获取征兆, 一类是机组当前的状态信息, 一类是机组状态的历史信息和趋势信息。经过模糊化处理或其他手段自动获得征兆。②人机交互获取征兆, 在诊断过程中, 对不能直接观测到或难以通过算法自动获取的征兆, 如轴心轨迹特征、三维谱特征、趋势特征等, 需要信号分析和人类专家分析相结合形成诊断证据。在诊断过程中, 当需要这类信息时, 使用者根据有关的信号分析结果, 对系统提出的问题做出回答。

6) 知识库管理模块。知识库管理模块该模块的主要功能是为知识库的建立、使用和维护提供各种操作。本文提出的基于数据库的知识库管理技术对知识更新、查询和检验都非常方便。

7) 故障诊断模块。故障诊断有自动诊断、交互诊断和分类 + 交互诊断三种诊断方式。自动诊断过程是在模糊关系矩阵变换和运算的基础上运用核函数进行的聚类模式识别, 通过聚类分析, 将故障原因识别到类的层次上, 获得的结果为可能的故障集。该方式主要用于实时在线监测机组的状态。交互诊断利用诊断知识库中的模糊规则, 根据一定的推理方式和控制策略, 完成诊断问题的求解。分类 + 交互诊断则集成了模糊聚类、模糊关系诊断和专家系统, 采用混合推理控制策略, 故障假设集由自动诊断算法获得或使用者自己选择。可实现对

当前采样数据、历史数据及超限、危急数据进行故障诊断，诊断内容包括转子不平衡、转子部件脱落、转子弓形弯曲、上导轴承间隙大、水导轴承间隙大、定子椭圆度大、转子绕组匝间短路、止漏环间隙不当、转子不对中、定子转子气隙不均匀、导叶开口不均匀、主轴法兰密封偏磨、定子铁心、组合缝松动、负序电流、尾水管低频涡带、转轮叶片断裂、气蚀磨损、轮叶形线不好、卡门涡列等故障类型。

8) 诊断解释模块。该模块记录了系统的动态推理过程，直观地向使用者显示系统如何运用知识求解问题的过程，对获得的各类故障的征兆类型及置信度和给出的诊断结论进行解释。

9) 在线帮助模块。在线帮助功能提供对以上各种分析及故障诊断功能的在线帮助与说明，方便使用。一个功能完善的 Windows 应用程序，联机帮助是不可缺少的，可以通过多种途径获取帮助。Windows 联机帮助的标准格式是超文本，这是一种立体式的电子文本，它将大量的文件资料分割成许多片段，然后将这些片段分别存放在不同的节点上，而节点间则通过链接形成网状结构。在使用过程中可通过嵌入在文件中的链接跳跃浏览相关内容。

10.1.3 HGSFDS 系统运行与诊断实例

1. 系统运行实例

水轮发电机组故障诊断系统(HGSFDS)是一个多功能的故障诊断系统，包括监测数据的管理、分析和利用机组振动数据完成自动诊断，实现机组的实时状态监测，以及基于知识推理的交互诊断等。诊断任务可以由自动诊断方法获得，也可以自己选择。图 10-2 ~ 图 10-6 为 HGSFDS 系统运行的界面图。

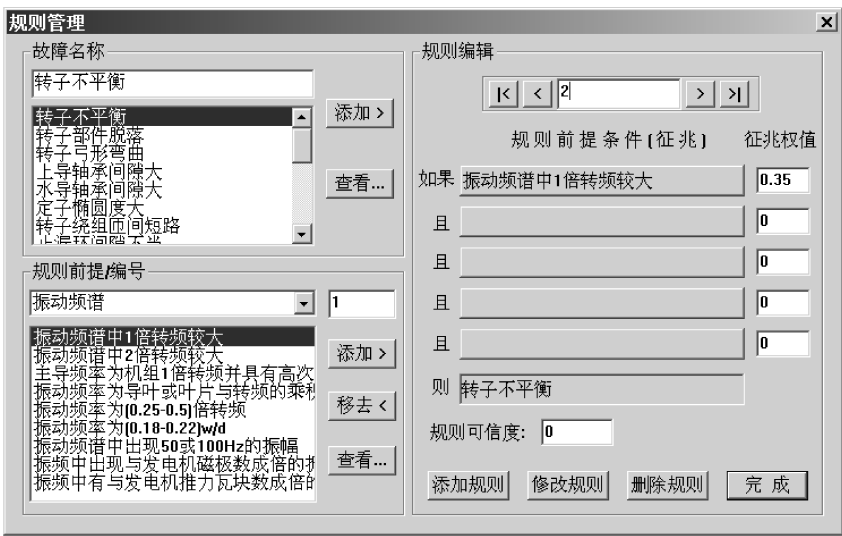


图 10-2 诊断知识库管理系统-规则管理

2. 故障诊断实例

某电站 5 号机组主要技术参数如下：

机组型号：HLD303C-LH-424.7；单机容量：51.55MW；额定水头：38.0m；额定转速：107.1r/min；转轮叶片数：15；活动导叶数：24。



图 10-3 分类交互诊断-诊断数据选择



图 10-4 交互诊断对话框

运行过程中出现振动剧烈，于是进行试验，试验数据见表 10-1。

表 10-1 某电站 5 号机组振动试验结果 (单位: $\mu\text{m}/\text{kPa}$)

工况/MW 振 幅	0	5.7	9.8	15.3	20.3	25.1	31.5	34.6	39.5	45.3	50	51.6
上导摆度	177	170	171	167	163	241	173	183	177	175	175	187
水导摆度	206	210	240	140	155	199	138	99	64	83	119	184
上机架振动	61	65	91	92	81	69	86	55	53	45	55	61
法兰摆度	42	60	87	127	176	237	210	180	159	135	120	85
顶盖振动	53	97	99	94	101	52	122	105	30	19	33	34
尾水管压力	66	106	98	71	66	52	87	83	34	23	27	32

注：1. 尾水管压力脉动评定以低频值为主。

2. 试验水头：39.19m。

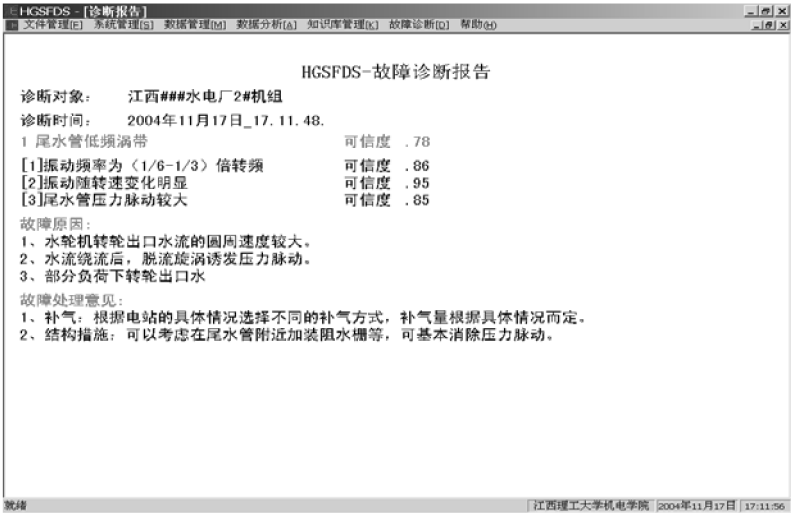


图 10-5 诊断报告

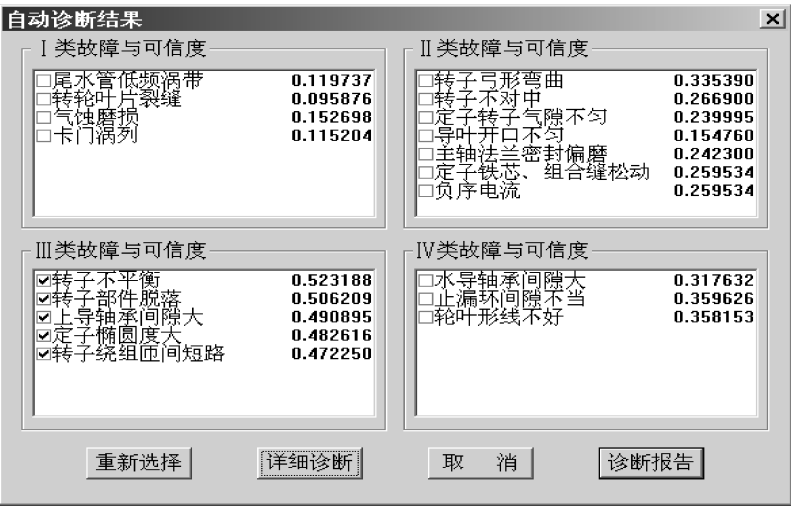


图 10-6 分类交互诊断——详细诊断故障类型选择

由表 7-1 和表 7-2 中故障与振动征兆的模糊关系矩阵和模糊变换公式(7-1)，可分别求得第一、二、三征兆群对应的故障隶属度值，见表 10-2。

表 10-2 故障隶属度

序号	故障模式	第一征兆隶属度	第二征兆隶属度	第三征兆隶属度
1	转子不平衡	0.5127	0.2281	0.3056
2	转子部件脱落	0.5127	0.2281	0.2717
3	转子弓形弯曲	0.3144	0.1866	0.1698
4	上导轴承间隙大	0.4631	0.1451	0.3736
5	水导轴承间隙大	0.4631	0.1722	0.0000
6	定子椭圆度大	0.5127	0.2488	0.2038

(续)

序号	故障模式	第一征兆隶属度	第二征兆隶属度	第三征兆隶属度
7	转子绕组匝间短路	0.5127	0.2281	0.2038
8	止漏环间隙不当	0.5127	0.1878	0.0187
9	转子不对中	0.2648	0.0626	0.2064
10	定子转子气隙不匀	0.1161	0.2281	0.1358
11	导叶开口不匀	0.1161	0.1798	0.0136
12	主轴法兰密封偏磨	0.1953	0.0829	0.2064
13	定子铁心、组合缝松动	0.0665	0.2488	0.2038
14	负序电流	0.0665	0.2488	0.2038
15	尾水管低频涡带	0.0562	0.1697	0.0136
16	转轮叶片断裂	0.0033	0.1697	0.0188
17	气蚀磨损	0.0000	0.3054	0.0000
18	轮叶形线不好	0.5127	0.1697	0.0340
19	卡门涡列	0.0033	0.1252	0.1019

在此，对计算得到的故障振动信息结果进行故障类层次上的模式识别，即对表 10-1 的样本数据进行核聚类分析。取 $C = 4$ ， $q = 1.1$ ， $\varepsilon = 0.0001$ ，编程后计算得到的四种模式类如下：

1) 模式。

属于第Ⅰ模式类的样本有 {15, 16, 17, 19}。

属于第Ⅱ模式类的样本有 {3, 9, 10, 11, 12, 13, 14}。

属于第Ⅲ模式类的样本有 {1, 2, 4, 6, 7}。

属于第Ⅳ模式类的样本有 {5, 8, 18}。

此时的分类指标 $F(U, C) = 0.999975$ ， $H(U, C) = 1.25 \times 10^{-4}$ 其相应的模式类的聚类中心向量为

$$V_1 = (0.0157, 0.1925, 0.0336)$$

$$V_2 = (0.1628, 0.1768, 0.1628)$$

$$V_3 = (0.5028, 0.2156, 0.2717)$$

$$V_4 = (0.4962, 0.1765, 0.0176)$$

2) 计算结果分析。聚类计算结果表明，聚为第Ⅲ类的故障的向量最大，因此第Ⅲ类中的故障可优先诊断为引起机组振动过大的原因。需要说明的是，各聚类中心向量数值虽然是故障的隶属度聚类计算后的结果，但并没有实际意义，而只是一个相对值，在所有类中只有相对意义。即第Ⅲ类的中心向量最大，因此认为由第Ⅲ类故障引起的振动的可能性最大。

同时，聚类的分类指数 $F(U, C)$ 接近 1，模糊度 $H(U, C)$ 接近于 0，因此诊断的结果可靠度较高。

3) 结果检验。现场进一步进行振动试验表明：机组在变转速工况下，机组导轴承摆度均较大，且随转速变化明显，上机架径向振动较大，但上机架径向振动、下机架和顶盖径向与垂直振动随励磁电流的变化规律性不强，而且数值变化不大，这说明发电机磁极线圈的改造等产生的电磁不平衡力对机组影响不大。因此，在聚为第Ⅲ类的故障中，可排除上导轴承

间隙大、定子椭圆度大和发电机转子绕组匝间短路故障，所以主要的不平衡力是由于机组增容改造后机械存在不平衡造成的。建议电厂对机组配重后，再进行动平衡实验，以提高机组的稳定性水平。

10.2 基于网络的风机在线状态监测和故障诊断系统(FMDS)

本书将结合现场实例介绍开发的基于网络的风机在线状态监测和故障诊断系统(FMDS)的特点和功能。

10.2.1 设备概况以及存在的主要问题

炼钢转炉一次除尘风机是炼钢厂的关键设备之一，要求 24h 连续工作，停机检修时间短，一旦出现事故停机，将严重影响生产的正常进行及带来重大的经济损失。因此，实施钢铁转炉一次风机状态监测和故障诊断，准确掌握钢铁厂风机运行状况就显得尤其重要，这不仅可以避免风机自身故障造成损害，而且能够保证炼钢转炉生产安全有序的进行。

某钢铁厂虽然也建立过机组的振动监测系统，但仍然存在不足，体现在以下几个方面：

- 1) 测点设置不合理，为了能真实反映机组的运行状态，需要增加部分监测点。
- 2) 目前的振动监测系统虽然可以显示机组振动量值和报警，但由于在该系统中对振动信号按直流量进行处理，仅取振动峰-峰值，导致原始振动信号所包含的大量重要信息(如相位、波形、频谱等)被丢失，不能真实反映机组振动的原始状态。
- 3) 缺乏信号分析及对机组常见故障的预测、预报和进行诊断的功能，不能为机组的检修提供参考意见。
- 4) 不能对诊断有用的异常数据、起停机数据进行长时间的存储、管理及提供强大的专业图谱分析功能。
- 5) 没有对实时数据和历史数据进行存储和管理，不能动态掌握机组的运行状态和故障劣化趋势，以至于在机组发生振动异常时无法准确有效地诊断故障原因，也不利于领导及设备管理人员结合机组的实际情况调节生产。
- 6) 不能和公司现有的局域网进行联网，不能从网上查询机组的运行状态及有关参数的趋势分析图表。

10.2.2 实施风机在线状态监测和故障诊断的目的和意义

炼钢厂的一次风机是企业的关键设备，它们能否安全、连续、稳定运行将直接影响到企业的生产和经济效益。开展设备状态监测，有效地实施故障诊断技术可以在早期发现故障，避免重大恶性事故的发生，是保障设备安全正常运行的主要措施。另一方面，推行状态监测与故障诊断技术有利于从根本上改变现行的“定期维修”体制，并逐步走向科学的基于状态监测的“状态维修”体制。

建立风机在线监测和故障诊断系统的优点如下：

- 1) 可以了解和掌握风机的运行状态和故障劣化趋势，为合理安排生产和检修提供科学依据。
- 2) 可以实时显示各监测点的振动值，实现超限报警和联锁停机保护功能。

- 3)可以对风机的振动、轴位移等有关参数进行趋势分析，及时识别机组状态、发现早期故障征兆。
- 4)可以通过建立风机的自适应故障预报模型，对机组的常见故障进行预报和诊断，对故障原因、严重程度及发展趋势作出判断，为停机检修提供决策依据，从而可以及时消除故障隐患，避免破坏性事故的发生。
- 5)可以和公司的局域网进行连接，实现资源的共享，便于公司领导及有关人员对设备的状态进行实时监控、了解和查询。
- 6)实施设备状态维修，提高设备可靠性，降低维修成本，提高企业综合实力。

10.2.3 FMDS 系统主要功能

根据现场的需求，开发的系统功能框图如图 10-7 所示。

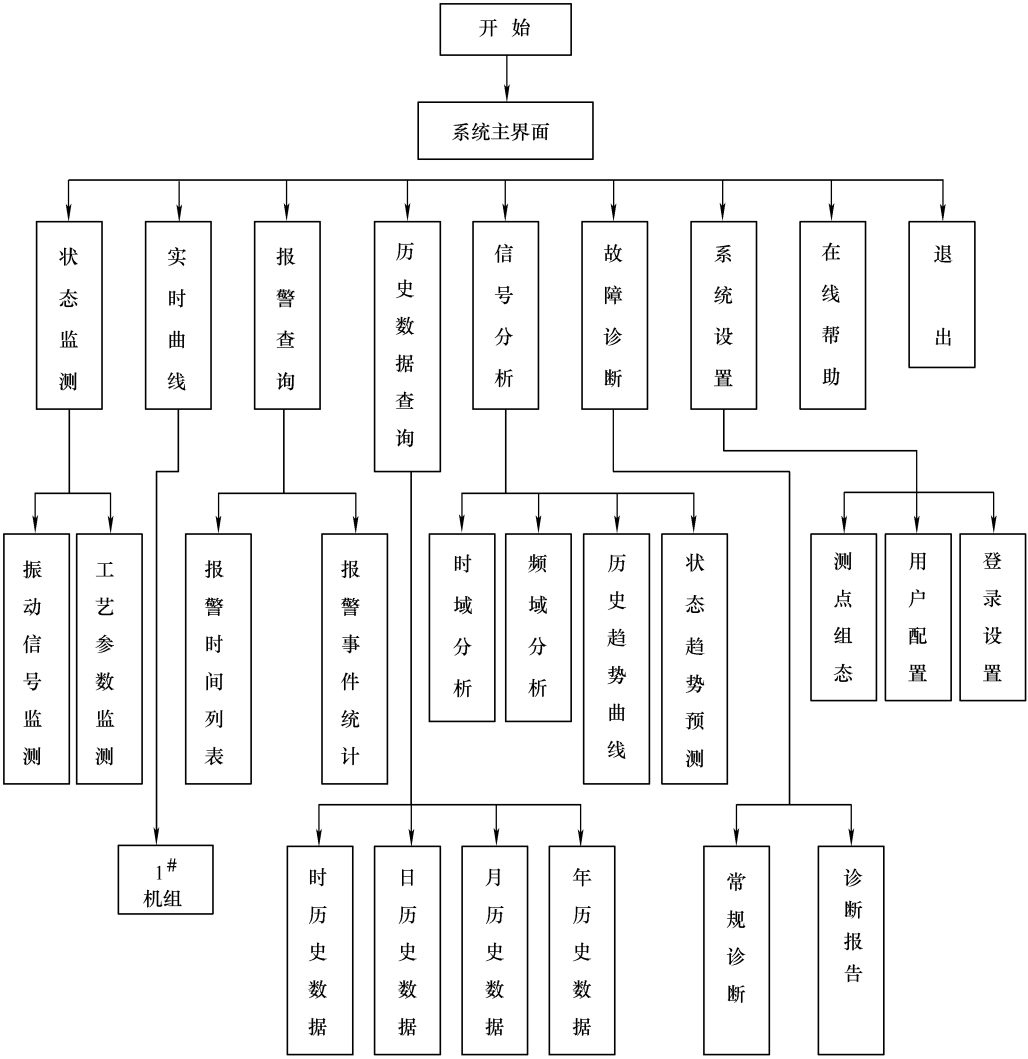


图 10-7 系统功能框图

1. 底层数据采集模块

底层数据采集模块负责数据采集，它能自动识别机组的运行状态并自动启动采集。在正常状态下，进行整周期同步采样。

2. 实时状态监测模块

实时状态监测是 OG 风机状态监测与故障系统(FMDS)的一个子系统，是以 IPC 工业控制计算机为中心的多路信号并行采集系统，系统直接面向操作人员进行机组在线监测。本系统共有四种监测图谱：机组测点布置图、多值棒图、监测数据表、实时曲线。

(1)机组测点布置图 通过该图谱，可以了解到机组各个通道的总振值、轴位移值以及机组相关的工艺参数。

机组测点布置示意图显示机组振动通道、轴位移通道以及工艺参数(机组转速)的当前值，同时标明机组的结构形式及各测点所在位置，如图 10-8 所示。

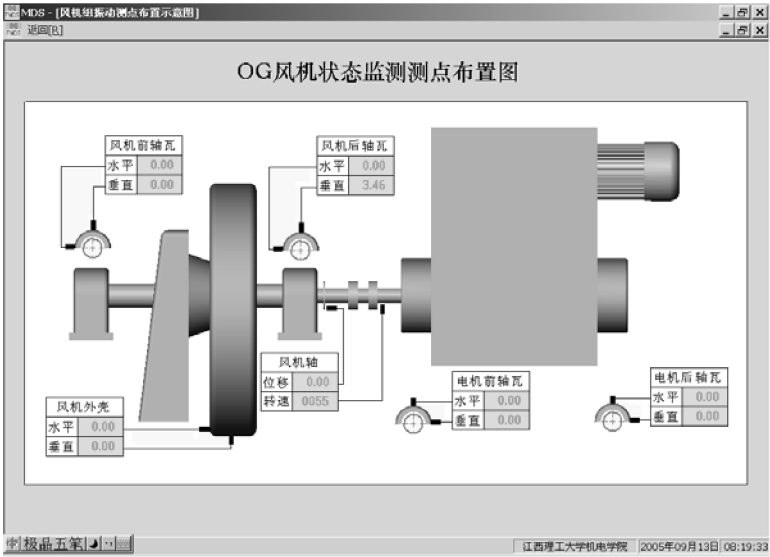


图 10-8 系统主监控画面

显示数据的背景颜色反映机组该测点的运行状态：绿色代表正常，当出现报警信号时，该区域将显示红色闪烁，这时监测系统将自动对报警前后的数据进行保存，监控画面上的闪烁的指示灯只有待故障消除后才返回绿色。

(2)多值棒图 多值棒图是以棒图的形式显示机组的振动通道的实时振动幅值。棒图有 11 个棒图，对应 11 个通道的值，包括通道振动的有效值和峰值、风轴位移以及机组转速。

如图 10-9 所示，每一个棒图区域的左(或右，或下)侧有相应的幅值坐标，并且在一级报警值处标注一个黄色的小三角，在二级报警值处标注一个红色的小三角。当振动幅值没有超过报警值时，棒图用绿色来表示，当超过一级报警值时，棒图的颜色会变成黄色，同理，当振动值超过二级报警值时，棒图会变成红色。各个棒图的下方显示对应通道的振动幅值以及通道名，振动幅值随着时间变化不断刷新。

(3)监测数据表 监测报表记录了振动通道的振动情况和过程量通道的情况，包括各振动通道值以及过程量通道的当前值。此外还显示一段时间内的峰峰值、最小值以及平均值。

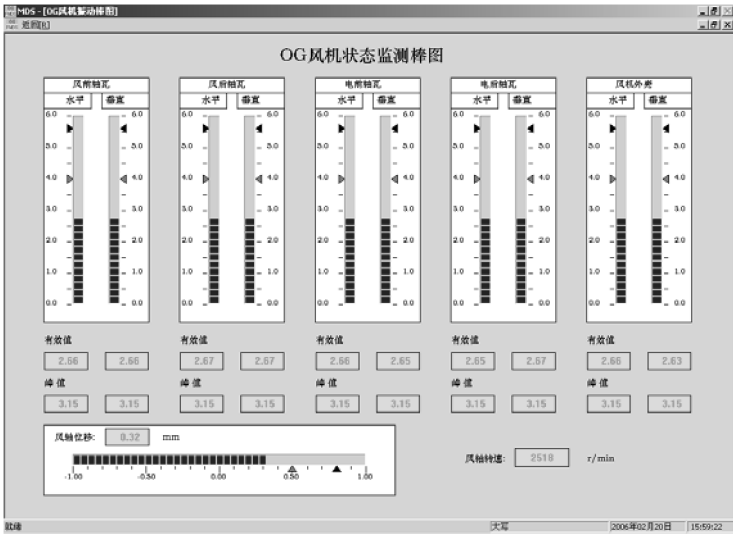


图 10-9 OG 风机实时监测多值棒图

监测报表分别显示各监测通道的通道号、通道名称、信号类型、一级和二级报警值、通道振动的有效值和峰峰值以及报警状态。在监控区域的右侧显示当前监控各种参数(包括采样日期时间、触发方式、触发间隔，采样频率和风轴转速)等。风机实时监测数据表如图 10-10 所示。



图 10-10 风机实时监测数据表

(4)实时曲线 实时曲线包含轴瓦—轴位移实时曲线、外壳—电机实时曲线，各测点的实时曲线用不同的颜色表示，如图 10-11 所示。

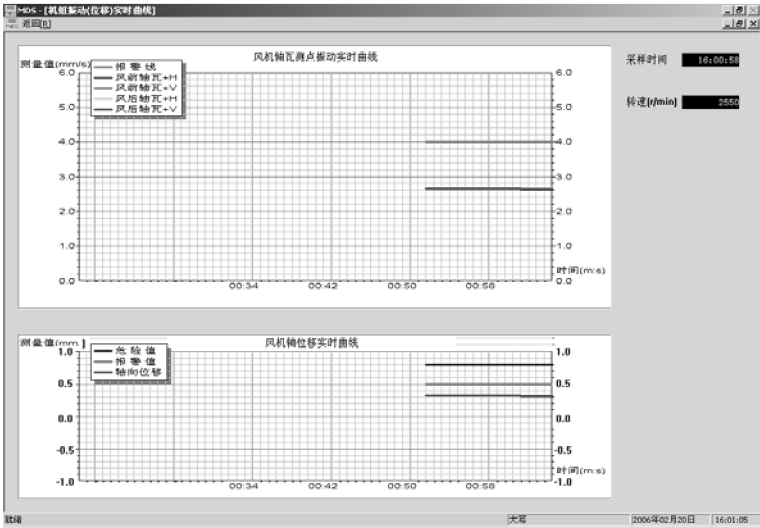


图 10-11 风机轴瓦振动和轴位移实时曲线

3. 数据服务模块

数据服务模块用来完成监测数据的自动存储，它由历史数据库和报警数据库等组成，它根据机组的不同状态把各种数据保存到不同的数据库中，以用于后续分析。

(1)报警 FMS 系统具有根据设置的一级报警、二级报警值自动记录报警前后报警通道的数据的功能，菜单能对风机机组实时运行状态下的报警情况进行查询，可以选择历史报警数据列表和统计直方图两种形式进行查看。

1)报警事件列表。在报警查询菜单中，输入要查询的时间段(可直接进行日历选择，单击日期选择的下拉小三角形，如图 10-12 所示)，就可以按时间查询出该时间段机组的报警情况，包括测点号、测点名称、报警时间、报警值和工程单位，查询结果如图 10-12 所示。

2)报警事件统计。在报警数据查询窗口中，可查询机组的报警次数，在选择统计查询时间后，统计结果用条形直方图表示，如图 10-13 所示，从图中可以看出，风机后轴瓦水平、电机后轴瓦水平、垂直和风机外壳都有报警。

(2)趋势分析 振动趋势分析是以趋势图的形式显示选定监测通道一段时间的历史数据进行趋势分析。

历史数据与趋势曲线窗口共分上下两个部分，上部有用来选择显示的振动部位、时间段输入(选择)、显示方式、打印控制和关闭窗口按钮。下部为趋势曲线显示区域，以 X-Y 坐标方式确定。趋势数据的纵坐标为振动(位移)幅值，横坐标为随时间的趋势，不同的趋势图将会自动显示不同的时间坐标，并在最下面注明了不同颜色曲线表示的部位通道。振动通道的趋势曲线最多可以有两条，分别用不同颜色表示一个振动部位水平和垂直两个方向的振动趋势。

1)时趋势图。时历史数据能按小时查询过去 7 天内的每隔 1min 的历史数据趋势曲线。不同颜色的线条代表不同的测点，如图 10-14 所示，其中红色直线代表报警值。

2)时历史数据查询。历史数据查询菜单能按年、月、日、小时等方式对历史数据进行



图 10-12 报警事件列表

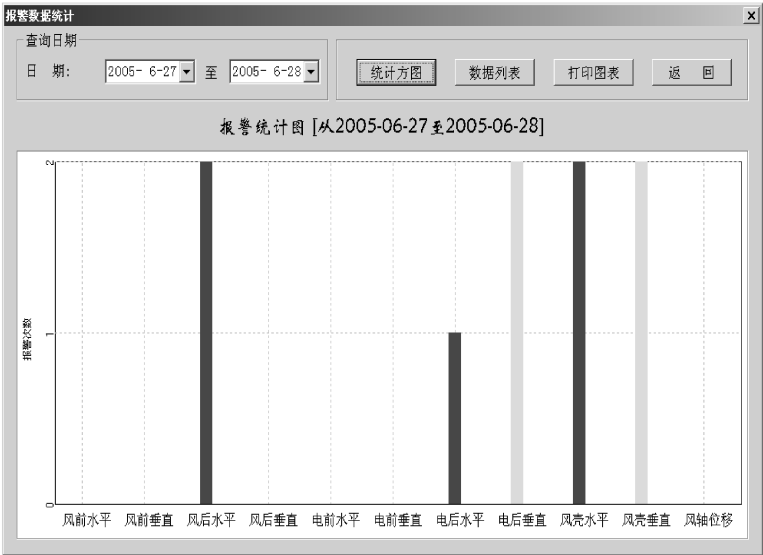


图 10-13 报警事件统计直方图

查询。该窗口部为历史数据查询列表显示区域，有采样时间和所有通道采样值。

时历史数据能按小时查询过去 7 天内的每隔 1min 的历史数据，如图 10-15 所示。

4. 信号分析模块

信号分析模块主要用于对各种当前数据和历史数据进行分析，以判断机组的运行状态和进行故障诊断。

(1)信号分析 FMDS 系统具有对不同时刻保存的测点采样数据进行信号分析的功能，包括波形-频谱分析(图 10-16)、倒频谱分析(图 10-17)、自相关分析谱(图 10-18)，通过菜

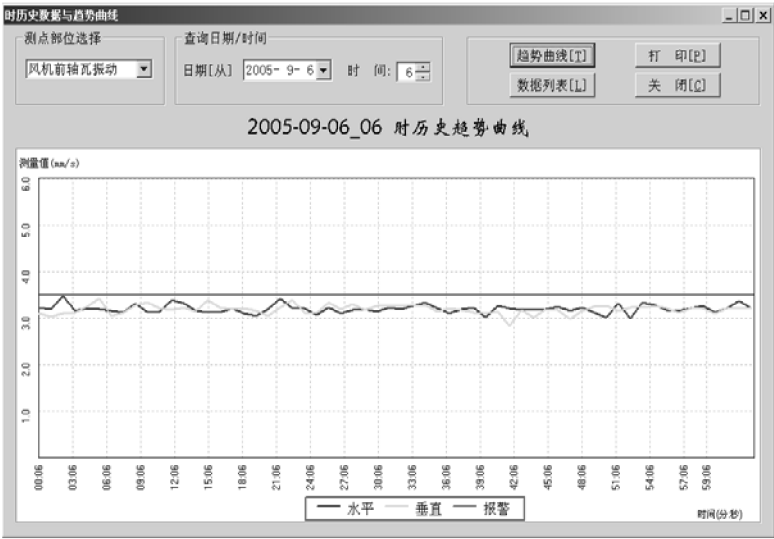


图 10-14 时历史数据趋势分析

采样时间	风前水平	风前垂直	风后水平	风后垂直	电前水平	电前垂直	电后水平	电后垂直	风壳水平	风壳垂直	风轮转速	风轮位移
2005-9-6 6:00:06	3.02	2.91	3.09	3.01	3.02	2.96	2.99	3.21	2.92	3.05	0.41	2914.00
2005-9-6 6:01:06	2.99	2.84	2.95	2.93	3.00	2.93	2.80	3.11	2.82	3.07	0.36	2923.00
2005-9-6 6:02:06	3.25	2.91	2.95	2.94	3.01	2.90	3.03	2.95	3.14	2.89	0.47	2914.00
2005-9-6 6:03:06	2.95	2.93	2.92	3.02	2.97	2.94	2.93	3.02	3.03	2.90	0.37	2914.00
2005-9-6 6:04:06	3.00	3.04	3.13	2.88	3.06	2.96	2.81	3.12	3.02	2.91	0.29	2914.00
2005-9-6 6:05:06	2.99	3.20	3.08	3.06	2.92	3.02	2.97	3.02	3.03	3.08	0.29	2914.00
2005-9-6 6:06:06	2.95	2.86	2.81	2.86	3.01	3.21	3.03	2.84	2.89	3.04	0.45	2914.00
2005-9-6 6:07:06	2.92	2.92	2.96	2.88	3.00	2.91	3.10	3.06	3.01	3.02	0.33	2923.00
2005-9-6 6:08:06	3.10	3.07	3.04	3.05	2.97	3.08	2.84	2.99	3.03	3.04	0.60	2923.00
2005-9-6 6:09:06	2.93	3.13	2.95	2.85	2.91	2.95	2.99	2.96	3.02	2.94	0.35	2923.00
2005-9-6 6:10:06	2.94	3.00	2.77	2.97	3.09	2.94	2.99	2.94	3.05	2.91	0.33	2914.00
2005-9-6 6:11:06	3.17	2.98	2.84	2.80	2.97	3.01	2.91	3.06	2.95	3.06	0.32	2914.00
2005-9-6 6:12:06	3.10	3.03	3.00	3.07	3.00	2.93	2.98	3.07	3.04	2.96	0.34	2914.00
2005-9-6 6:13:06	2.96	2.94	2.88	2.98	2.95	2.98	2.86	2.97	2.99	2.95	0.37	2914.00
2005-9-6 6:14:06	2.93	3.17	2.92	3.03	2.98	3.00	3.12	3.04	3.02	2.98	0.40	2914.00
2005-9-6 6:15:06	2.92	3.02	3.06	3.01	2.89	2.99	2.97	2.93	2.96	2.82	0.25	2914.00
2005-9-6 6:16:06	3.01	2.99	2.87	3.06	2.91	3.05	2.91	2.93	2.91	2.90	0.30	2914.00
2005-9-6 6:17:06	2.91	3.00	3.06	3.11	3.07	2.96	2.99	3.00	2.99	2.91	0.53	2914.00
2005-9-6 6:18:06	2.85	2.95	2.98	3.03	3.01	2.90	3.03	2.99	2.95	2.95	0.24	2914.00
2005-9-6 6:19:06	2.99	2.85	2.99	2.90	2.80	3.10	3.05	2.95	3.01	2.92	0.35	2914.00
2005-9-6 6:20:06	3.20	3.03	2.98	3.10	2.97	2.80	3.07	2.98	2.92	2.80	0.38	2914.00
2005-9-6 6:21:06	3.01	3.17	2.93	2.87	2.89	3.01	3.08	3.19	3.08	3.07	0.31	2914.00
2005-9-6 6:22:06	3.00	2.93	2.90	2.92	2.87	2.97	2.87	2.99	3.01	3.05	0.39	2914.00

图 10-15 时历史数据查询

单操作可分别查看分析不同图谱。

(2)故障诊断 FMDs 系统有自动诊断和人工交互式诊断两种诊断模式，自动诊断模式综合运用振动信号频率幅值信息和频率成分结构信息，基于最大最小贴近度函数确定故障性质，基于模糊关系诊断原理计算故障隶属度。人工诊断模式基于矩阵判断的知识推理方法，根据一定的推理方式和控制策略，完成问题的求解。

1)自动诊断。通过故障诊断菜单中的子菜单自动诊断，系统将自动分析所选择的数据文件进行运算，诊断结果如图 10-19 所示。在诊断结果图中，可以移动光标查看不同频率下

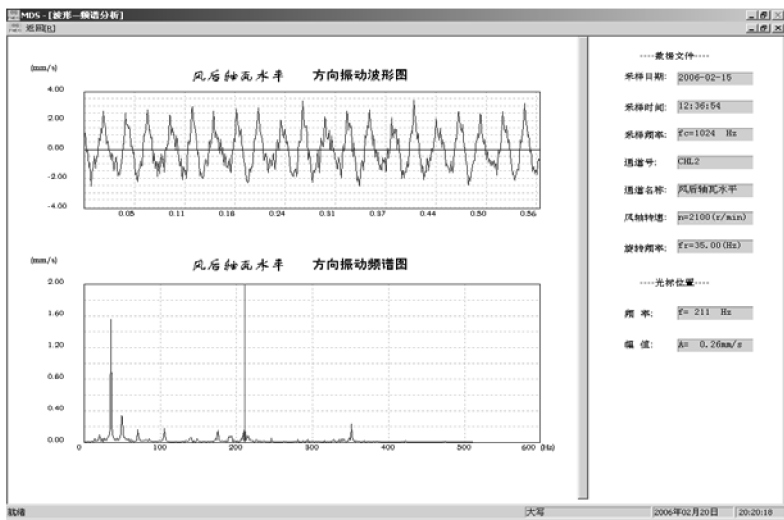


图 10-16 波形-频谱图

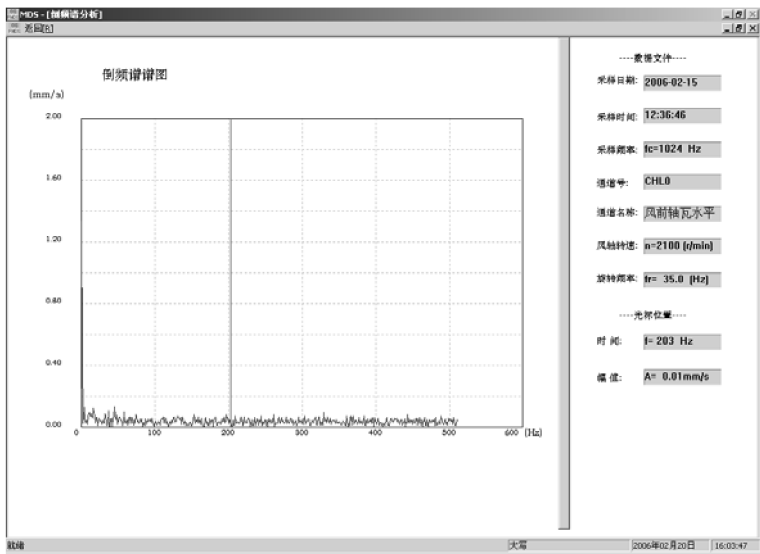


图 10-17 倒频谱分析

的幅值。

2)人工诊断。通过故障诊断菜单中的人工诊断子菜单，可以根据发生的故障特征进行选择，如图 10-20 所示。系统按照一定的推理策略求解，诊断结果显示在页面的诊断结果列表框中，要查看某一故障原因可单击相应的故障码，系统弹出故障原因及识别表对话框，如图 10-21 所示。

5. Internet 网络模块

Internet 网络模块主要用于远程计算机通过 IE 浏览器查询机组的运行状态和趋势分析等。

(1)Internet 网络模块功能 FMDs 系统的在线监测、报警查询、趋势分析、历史数据查询均可采用 Web 浏览的方式进行浏览。无需在客户端计算机安装任何软件，就可以使用 IE

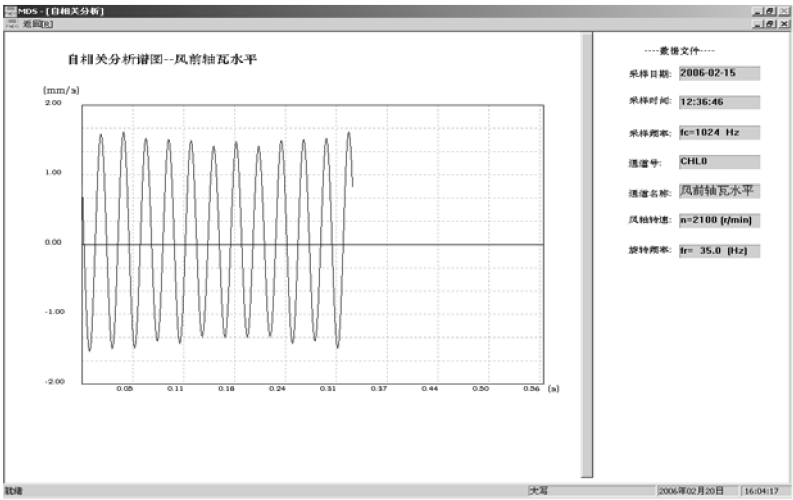


图 10-18 自相关分析谱图

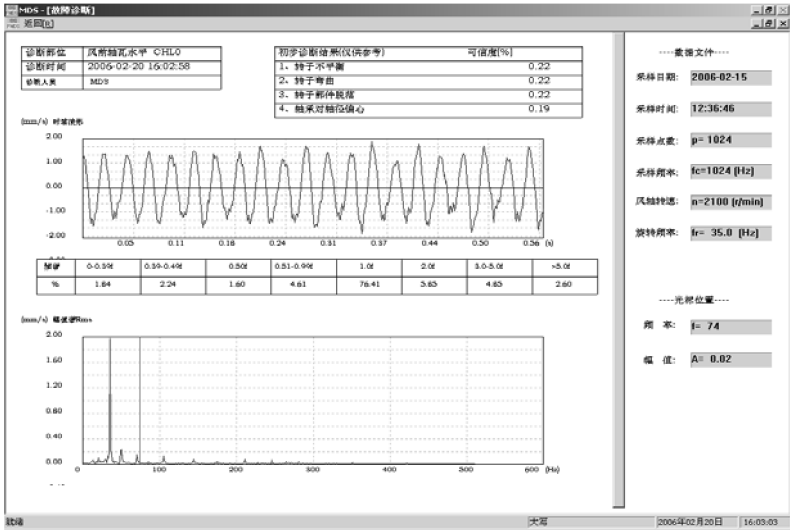


图 10-19 自动诊断结果

浏览器软件，通过访问 MDS 服务器的 IP 地址，进入功能界面，全面获取现场机组的运行状态和数据查询。

(2)网络通信

1)数据通信。具有多种通信网络接口，可与智能仪表、巡检仪、DCS 系统及企业 CIMS 系统通信，实现数据共享，满足企业日益增长的不同系统之间交流信息共享数据的需要。

2)公司级机组状态监测网。新系统可方便地利用现有局域网构建公司级机组状态监测网。设备管理工程师在网络可及的范围内，即可方便地实现机组的在线监测分析和诊断，随时掌握机组的状态，使其状态监测工作更加有效。

系统经过一段时间的运行表明：该系统方案设计合理，技术先进，运行稳定，数据准确可靠，达到了规定的要求、目标、功能和性能指标，确保了设备的安全运行。



图 10-20 人工诊断特征选择

振动故障原因及识别表		
振 动 故障 机理	直接原因	轴暂时性弯曲
	分 类	转子自身
振 动 故障 识别 特征	特 征	旋转矢量渐增力
	振动主导频率	1N
	振动方向	径向/轴向
	常伴频率	2N
	振动稳定性	不稳定
	相位特征	随弯曲有小变化
	转子轴心轨迹	圆或椭圆正进动
	振动随负荷变化	变大
	振动随转速变化	升高
	振动随油温变化	不变
振 动 故障 二次 原因	振动随出口压力变化	不变
	与类似振动故障判别方法	
	暖机时间加长，高振动逐步消失，低速时振动等于裙始弯曲度	
措 施	设计制造	
	安装维修	机壳调整不当，受热时膨胀不足
	运行操作	汽轮机暖机不足，机壳膨胀不均
原因	机器劣化	
	防治方法	充分吸机，切不可动平衡
返回(R)		

图 10-21 常见振动故障原因及识别表

参考文献

- [1] 屈梁生, 何正嘉. 机械故障诊断学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1986.
- [2] 杨叔子, 吴雅, 等. 时间序列分析的工程应用: 上册[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991.
- [3] 闻邦椿, 武新华, 丁千, 等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 黄文虎, 夏松波, 刘瑞岩, 等. 设备故障诊断原理, 技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 徐敏, 等. 设备故障诊断手册[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [6] 褚福磊, 彭志科, 冯志鹏, 等. 机械故障诊断中的现代信号处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] 温熙森, 秦国军. 第五届全国机械设备故障诊断学术会议论文集[C]. 北京: 科学文献出版社, 1996.
- [8] 张正松. 旋转机械振动监测及故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [9] R. A. 柯拉科特. 设备故障的诊断与情况监测[M]. 孙维东, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [10] 高金吉. 基于矩阵判别筛选法的机械故障诊断专家系统[J], 振动、测试与诊断, 1998, 18(2): 120-124.
- [11] 韩捷, 张瑞林. 旋转机械故障机理及诊断技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] Thomas D L. Vibrational Monitoring Strategy for Large Turbo-generators[C]. The 3rd Int. conf. On Vibration in Rotating Machinery. Yorkshire, 1984, 44-49.
- [13] Benatj, Frigeri C, Siloestri G C. Vibration monitoring and mechanical diagnostics on large rotating machinery in ENEL Power Plants[C]. Symposium on Diagnostics Rotating Machines in Power Plants, IFTOMM/CISM, Udine. 1993(10): 27-29.
- [14] 盛兆顺, 尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [15] 沈东, 褚福涛, 陈思. 水轮发电机组振动故障诊断与识别[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 25(1): 129-133.
- [16] 刘晓亭. 水电机组状态检修的实施及关键技术[J]. 水力发电, 2004, 30(4): 38-41.
- [17] 王海. 水轮发电机组状态监测、诊断及综合试验分析系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [18] 黄其柏. 工程噪声控制学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [19] 何永勇, 褚福磊, 陈真勇, 等. 分布式智能集成诊断多 Agent 系统研究[J]. 振动工程学报, 2000, 13s: 43-48.
- [20] 何学文, 卜英勇, 刘晓波. 分布式远程故障诊断系统的研究与实现[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(4): 667-669.
- [21] 张周琐, 李凌均, 何正嘉. 基于支持向量机的机械故障诊断方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(12): 1303-1306.
- [22] 贾民平, 凌娟, 许飞云, 等. 基于时序分析的经验模式分解法及其应用[J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 54-57.
- [23] 刘晓波, 沈亮霓. 基于分形盒维数的裂纹转子故障诊断的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30s(6): 408-411.
- [24] Claasen T A C M, Mecklenbrauker W F G. The Wigner distribution a tool for time-frequency signal analysis. Part I: Continuous-time signals[J]. Philips Res, 1980, 35(3): 217-250.
- [25] Zheng G T, McFadden P D. A time-frequency distribution for analysis of signal with Transient components,

- its application to vibration analysis[J]. ASME Transactions Journal of Vibration and Acoustics, 1999, 121(3): 328-333.
- [26] Dalpize G, Rivola A. Condition Monitoring, Diagnostics in Automatic Machines: Comparison of Vibration Analysis Techniques[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11(1): 53-73.
- [27] Gelle G, Colas M, Delaunay G. Blind sources separation applied to rotating machines monitoring by acoustical and vibrations analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(3): 427-442.
- [28] Alexander Y, Amir L, Robert P W D. Blind separation of rotating machine sources: bilinear forms and convolutive mixtures[J]. Neurocomputing-Special Issue on ICA/BSS, 2002, 49(1-4): 349-368.
- [29] Gao Q, Duan C, Fan H, et al. Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(5): 1072-1081.
- [30] Cheng Junsheng, Yu Dejie, Yang Yu. The application of energy operator demodulation approach based on EMD in machinery fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(2): 668-677.
- [31] Sun Weixiang, Chen Jin, Li Jiaqing. Decision tree and PCA-based fault diagnosis of rotating machinery [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(3): 1300-1317.
- [32] Zio E, Gola G. A neuro-fuzzy technique for fault diagnosis and its application to rotating machinery[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(1): 78-88.
- [33] Wu T Y, Chung Y L, Liu C H. Looseness Diagnosis of Rotating Machinery Via Vibration Analysis Through Hilbert-Huang Transform Approach[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2010, 132(3): 1005-1013.
- [34] Lee Young K, Mavris Dimitri N, Volovoi Vitali V, et al. A Fault Diagnosis Method for Industrial Gas Turbines Using Bayesian Data Analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4): 1602-1607.
- [35] 关惠玲, 张优云, 韩捷, 等. 从故障实例数据库中挖掘振动信号特征[J]. 振动工程学报, 2002, 15(3): 337-342.
- [36] 杨世锡, 焦卫东, 吴昭同. 独立分量分析基网络应用于旋转机械故障特征抽取与分类[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 45-49.
- [37] 程军圣, 于德介, 杨宇. 基于 EMD 和分形维数的转子系统故障诊断[J]. 中国机械工程, 2005, 16(12): 1088-1091.
- [38] 李志农, 王心怡, 张新广, 等. 基于变分贝叶斯理论的机械故障源盲分离方法研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(6): 12-16.
- [39] 窦唯, 刘占生. 基于灰度-梯度共生矩阵的旋转机械振动时频图形识别方法[J]. 振动工程学报, 2009, 22(1): 85-91.
- [40] 周鹏, 秦树人. 基于切片谱免疫系统的旋转机械故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(6): 1198-1202.
- [41] 丁康, 郑春松, 杨志坚. 离散频谱能量重心法频率校正精度分析及改进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(5): 43-48.
- [42] 何正嘉, 訾艳阳, 孟庆丰, 等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [43] 钟秉林, 黄仁. 机械故障诊断学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [44] 师汉民. 机械振动系统——分析·测试·建模·对策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [45] 陈进. 信号处理在机械设备故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 1999, 18(1): 83-86.
- [46] Cohen L. Time-Frequency Analysis: Theory and Analysis[M], Prentice Hall, 1995.
- [47] 张贤达, 等. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [48] James H, McClellan R, W Schafer(信号处理引论)[M]. 周利清, 等译. 北京: 电子工业出版社,

2003.

- [49] Grossmann A, Molert J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape [J]. SIAMJ Math, 1984, 15: 723-736.
- [50] Mallat S G. Mutifrequency channel decompositions of images and wavelet models[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and signal Processing, 1989, 37(12): 2091-2110.
- [51] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(5): 961-1006.
- [52] Meyer Yet. Wavelets and Applications[C]. Proceedings of the Internation Conference Marseille. France, RMA20. 1992.
- [53] Chui C K. An Introduction to wavelets[M]. Boston: Academic Press, 1992.
- [54] D E Newland. Random vibrations, spectral and wavelet analysis[M]. third edition. New York: Longman Scientific Technical, 1993.
- [55] Xiong Z, Ramchandran K, Herley C, et al. Flexible tree-structuresignal expansions using time-varying wavelet packets[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(2): 333-345.
- [56] Strang Gilbert. Orthogonal multiwavelets with vanishing moments[J]. Optical Engineering, 2003, 33(7): 2218-2223.
- [57] 耿中行, 屈梁生. 小波包的移频算法与振动信号处理[J]. 振动工程学报, 1996, 9(2): 146-151.
- [58] 刘占生, 武新华, 夏松波. 小波分析法在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 汽轮机技术, 1996, 38(6): 326-329.
- [59] 彭志科, 何永勇. 小波多重分形及其在振动信号分析中应用的研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 59-63.
- [60] 刘晓波, 孙康. 基于小波分析的旋转机械故障诊断技术研究[J]. 矿山机械, 2004, 3: 68-69.
- [61] 刘晓波, 黄其柏, 孙康. 小波包分解及其在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 风机技术, 2004, 6: 51-53.
- [62] 朱玉全, 杨鹤标, 孙蕾. 数据挖掘技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 2006.
- [63] Liu Xiaobo, Li Jianping. Research on the Fault Diagnosis of Rotating Machinery Based on Wavelet Analysis and Fuzzy Cluster[C]. 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Beijing, 2009, 8: 876-881.
- [64] Liu Xiaobo, Liangni Shen, Research on the fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet analysis and BP network[C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha; 2010(5): 152-156.
- [65] Liu Xiaobo, Li Kaiqin. Research of Strength of Rotor System about Containing Blade Crackle Based on Non-linear Dynamics[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(44-47): 1158-1162.
- [66] Slowinski Retal. Rough set sorting of firms according to bankrupterisk. In: Applying Multiple Criteria aid for Decision to Environment Management[J]. Dordrccht: Kuwer Academic Publishers, 1994, 33-357.
- [67] 王彪, 等. 粗糙集与模糊集的研究及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [68] Hagan M T. Neural network design[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [69] Liu Xiaobo, Zhang Congbing. Knowledge identification based on rough sets and artificial neural network [C]//2011 3rd International Conference on Computer and Network Techrology; Taiyuan; 2011(2): 23-28.
- [70] Liu Shih-Yaug, Chen Jen-Gwo. Development of a Machine Troubleshooting Expert System via Fuzzy Multiattribute Decision-Making Approach[J]. Expert Systems With Applications, 1995, 8(1): 187-201.
- [71] 虞和济, 等. 故障诊断的专家系统[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.

- [72] 吴今培, 肖健华. 智能故障诊断与专家系统[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [73] Angeli Chr. An online expert system for fault diagnosis in hydraulic systems[J]. Expert Systems, 1999, 16(2): 115-120.
- [74] Angeli Chrissanthi, Atherton Derek. A model-based method for an online diagnostic knowledge-based system[J]. Expert Systems, 2001, 18(3): 150-158.
- [75] Choi H L, Williams W J. Improved time-frequency representation of multi-component signals using exponential kernels[J]. IEEE Trans. on ASSP, 1989, 37(6): 862-871.
- [76] Zhao Y, atlas L, Marks R. The use of cone-shaped kernels for generalized time-frequency representations of non-stationary signals[J]. IEEE Trans. ASSP, 1990, 38(7): 1080-1091.
- [77] Baraniuk R G, Jones D L. Signal-Dependent Time-Frequency Analysis using a Radially Gaussian Kernel[J]. Signal Processing, 1993, 32(3): 263-284.
- [78] Schwuttke U M, Veregge J R, et al. Cooperating Expert System for the Next Generation of Real Time Monitoring Application[C]. IEEE 2th International Conference on Expert System for Develop, 1994: 210-214.
- [79] Scholkopf B, Smola A, Muller K R. Nonlinear component analysis as a kernel eigenvalue problem[J]. Neural Computation, 1998(10): 1299-1319.
- [80] G Baudat, F Anouar. Generalized Discriminant Analysis Using a Kernel Approach[J]. Neural Computation, 2002, 12(10): 2385-2404.
- [81] 张莉, 周伟达, 焦李成. 核聚类算法[J]. 计算机学报, 2002, 25(6): 587-590.
- [82] Milligan G. Clustering and Classification[C]. River Edge: World Scientific, 1996, 341-374.
- [83] Pedrycz W, Waletzky J. Fuzzy clustering with partialsupervision[J]. IEEE Trans on Syst Man and Cybertnet Soc B, 1997, 27: 787-795.
- [84] Marques de Sá J P. 模式识别[M]. 吴逸飞, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [85] 余波, 张礼达, 王辉. 水轮机故障诊断专家系统的一种模糊诊断方法[J]. 水力发电, 2002, 28(4): 38-39.
- [86] 史铁林, 陈勇辉, 李巍华, 等. 提高大型复杂机电系统故障诊断质量的几种新方法[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 1-10.
- [87] 梁武科, 赵道利. 水电机组监测与诊断技术的现状及发展[J]. 水利水电技术, 2003, 34(4): 41-43.
- [88] 陈维克, 等. 我国水电机组振动监测与故障诊断技术的现状和发展方向[J]. 大电机技术, 1994, 6: 1-3.
- [89] 沈东. 水力机组故障分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [90] 于德荣. 水轮发电机组振动的故障论断研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
- [91] 马震岳, 董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [92] 曹鹏, 姚志民. 水轮机原理及水力设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [93] 高建铭, 林洪义, 杨永萼. 水轮机及叶片泵结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [94] Willi Bohl. 叶轮机械(原理与结构)[M]. 王俊宝, 卞昭浚, 译. 北京: 化学工业出版社, 1984.
- [95] 武汉水利电力学院, 华中工学院. 水力机组测试技术[M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [96] Henry T F. A Primer on draft tube surging[J]. HYDORO REVIEW, 1993, 2.
- [97] 黄汤民, 黄竹霞. 水轮发电机组的振动特征[J]. 水利水电技术, 2003, 34(7): 53-57.
- [98] 章志平, 韦彩新, 张双全, 等. 尾水管水力振动的监测与故障判断[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(7): 64-68.
- [99] 冯志鹏, 褚福磊. 基于 Chirplet 变换的水轮机非平稳振动信号分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 11-16.
- [100] 陈大喜, 朱铁光. 大型回转机械诊断现场实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

- [101] 刘耀宗. 不平衡激励对碰摩转子振动特性的影响[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(4): 536-538.
- [102] Chang C S, Tian L, Wen F S. Development and Implementation Knowledge-Based System for On-Line Fault Diagnosis of Power Systems[J]. Electric Power Components and Systems. 2001, 29: 897-913.
- [103] Angeli C, A Chatzinikolaou. Prediction and diagnosis of faults in hydraulic systems[J]. Proc Instn Mech Engrs, 2002, 216: 293-297.
- [104] 卢文详, 杜润生. 机械工程测试·信息·信号分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999.
- [105] Mallat Stephane. 信号处理的小波导引[M]. 2版. 杨力华, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [106] Sohre John. Operating problem with high speed turbomachinery, cause and correction[M]. Norwalk: Sawyer's Turbomachinery Internation Publications, 1968.
- [107] 陈铁华, 陈启卷. 模糊聚类分析在水电机组振动故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002(3): 43-47.
- [108] 刘晓波, 黄其柏. 基于动态核聚类分析的水轮机组故障模式识别[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(9): 47-49.
- [109] Kruglinski vid J. Visual C++ 技术内幕[M]. 潘爱民, 王国印, 译. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [110] 刘晓亭. 水力机组现场测试手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [111] Vaahedi Ebrahim, Mansour Yakout, E K Tse. A general Purpose Method For On line Dynamic Security Assessment[J]. IEEE Transactions on Power System, 1998, 13(1): 243-249.
- [112] Massimo Ceraolo. Get a Clear View of Simulated and Measured Data[J]. IEEE Computer Application on power, 2000(10): 60-64.
- [113] 陈盛南, 王启昌, 吴正义. 山美水电站计算机监控系统[J]. 电力系统自动化, 1998, 10: 79-81.
- [114] 王海. 大型水轮机组综合测试系统研制[J]. 计算机应用研究, 1999(10): 18-20.
- [115] 梁武科, 罗兴铸, 等. 水力发电机组振动故障诊断系统中的信号预处理[J]. 水力发电学报, 2003(3): 114-120.
- [116] 刘晓波, 孙康. 一类水力发电机组在线状态监测系统的设计[J]. 传感器技术, 2004, 123(3): 25-27.
- [117] 黄开启, 黄跃飞, 刘晓波. 多征兆模糊诊断知识表示及专家系统的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(12): 1077-1079.
- [118] 刘晓波, 黄其柏, 黄开启. 基于框架式规则的水轮机组故障诊断专家系统研究[J]. 水力发电, 2005, 31(12): 50-53.
- [119] 刘晓波, 黄其柏. 水轮发电机组故障诊断模糊专家系统研究[J]. 华中科技大学学报, 2006, 34(1): 71-73.
- [120] 刘晓波, 黄其柏, 陈三凤. 中小型水电机组振动监测系统的设计与开发[J]. 水利水电技术, 2006, 37(3): 60-62.
- [121] 彭文季, 罗兴铸. 基于小波神经网络的水电机组振动故障诊断研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 123-128.
- [122] Liu Xiaobo, Li Jianping. Fault Diagnosis of Fan Based on Fuzzy Neural Expert System[C]. The Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Zhangjiajie: 2009, 10: 525-528.
- [123] 马明建. 数据采集与处理技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [124] 毛楠. 电子电路抗干扰实用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [125] 苏群星, 解璞, 谷宏强. ADO 在故障诊断专家系统中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2003, 24(4): 85-87.
- [126] 杨湛莹, 张琦明. 实时监控系统中数据库系统的实现[J]. 电气自动化, 2003, 25(2): 52-55.

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

上架指导 工业技术 / 机械 / 仪表设备

ISBN 978-7-111-39132-6

策划编辑◎沈红 / 封面设计◎陈沛

ISBN 978-7-111-39132-6



9 787111 391326 >

定价: 29.00元