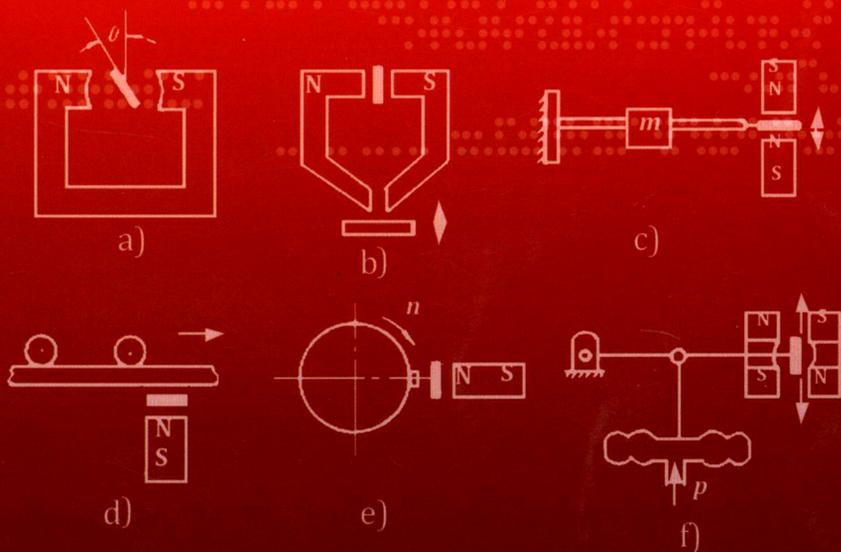


应用型本科汽车类专业规划教材

# 汽车工程 测试技术

麻友良 主编



应用型本科汽车类专业规划教材

# 汽车工程测试技术

主 编 麻友良

副主编 丁礼灯 席 敏



机械工业出版社

本书内容主要包括测试技术概述、测量技术基础、测量误差分析及数据处理、信号分析基础、传感器原理、测量电路原理、非电量测量及计算机测试系统等。本书在测试技术基础理论方面把握必需和够用的原则，对测试技术应用方面的知识则较为系统全面，以便给读者在测量仪器和测量方法的选用、测量过程和测量结果与数据的处理等方面提供尽可能多的帮助。

本书可作为车辆工程、汽车服务工程、交通运输、机械与自动化、汽车维修、汽车技术服务与营销及其他非电类专业本科和高职高专学生学习工程测试技术课程的教材，也可作为工程技术人员参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

汽车工程测试技术/麻友良主编. —北京: 机械工业出版社, 2016.8  
应用型本科汽车类专业规划教材  
ISBN 978-7-111-53832-5

I. ①汽… II. ①麻… III. ①汽车-测试技术-高等学校-教材  
IV. ①U467

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 138186 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: 赵海清 责任编辑: 赵海清 丁 锋

责任校对: 刘秀芝 刘怡丹 封面设计: 路恩中

责任印制: 乔 宇

北京富生印刷厂印刷

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·10.75 印张·246 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-53832-5

定价: 35.00 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

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

# 前言

工程测试技术是现代社会工程领域中的一门基础性技术，从其目的和效用看，工程测试技术实际上是如何获取信息的技术。在当今信息时代，人们的日常生活、商品流通、生产制造、交通运输、电子通信、生物工程、军事技术及宇宙科学等领域都离不开测试技术，因此，工程测试技术已成为工科学生必修的基础课程。本书以工程测试技术在汽车领域的应用为主要内容，介绍了汽车工程测试技术的基本理论和基本技术。

本书可作为车辆工程、汽车服务工程、交通运输、汽车维修工程等专业的测试技术课程教材，在内容组织上以相关专业学生构建专业知识结构所必需与够用为原则，力求知识面系统全面、深度适宜。教材共分八章，各章的主要内容如下。

第一章 概论：信息与信号、测量与检测等的定义；机械工程领域中信息的表达形式；测量的类型及测试技术的现状与发展。

第二章 测试技术基础：测试系统的基本组成及对测量装置的基本要求，测试系统的静态特性和动态特性；频率响应、阶跃响应在系统动态分析中的实际意义。

第三章 测量误差分析与数据处理：误差的基本概念及随机误差的基本特征；随机误差的计算方法、标准误差的含义和在误差分析中的作用；系统误差、粗大误差的特征，系统误差和粗大误差来源及发现与消除方法；测量数据的处理与表示方法。

第四章 信号分析基础：动态信号的基本类型；傅里叶级数与傅里叶积分对动态信号分解的物理意义；时域、频域的概念及在时域、频域中信号物理量的含义，周期信号、非周期信号及随机信号的分析方法。

第五章 传感器：传感器的类型与发展概况；各类传感器的结构特点、工作原理及适用的检测物理量。着重介绍电阻应变式传感器原理、电涡流式传感器的类型与原理、电容类传感器的类型与测量原理、压电式传感器的测量原理及等效电路、磁电式传感器的类型与工作原理以及热电式传感器的测量原理。

第六章 测量电路：测量电路的作用与基本类型；各类电桥的作用、直流电桥的电路原理，交流电桥的平衡条件，平衡电桥的测量原理；滤波电路的作用与类型；实际滤波器与理想滤波器的差别、实际滤波器的基本参数；放大器的作用与原理，载波放大和相敏检波的作用与原理。



第七章 测试技术的应用：力、位移、转速、温度等物理量测量的基本概念及基本原理；测量力、位移、转速、温度等物理量的传感器原理。

第八章 计算机测试技术简介：计算机测试系统的组成与特点；智能仪器的组成、类型与特点；虚拟仪器的概念与特点；网络化仪器的组成与特点等。

在编写本书时，考虑了非电类专业专科教学的需要，高职高专院校师生使用本教材时可根据教学大纲和教学时数等实际情况，对教学内容进行适当的增减。

本书由武汉科技大学麻友良教授主编，丁礼灯、席敏任副主编，参加编写的有麻友良（第一章、第三章、第五章、第七章）、丁礼灯（第二章、第四章第一节~第三节）、席敏（第四章第四节、第六章）、张进（第八章第一节、第二节）、金杭（第八章第三节）、丁华斌（第八章第四节）等。

在编写本书过程中，我们参阅了大量的书籍和资料，从中得到了许多的启发和帮助，借此向这些作者表示感谢。

由于水平所限，书中难免会有不妥和错误之处，恳望读者予以指正。

编 者

# 目录

## 前言

### 第一章 概论 ..... 1

- 第一节 工程测试技术的基本概念 ..... 1
  - 一、信息与信号 ..... 1
  - 二、测量与测试 ..... 4
  - 三、检测与检测技术 ..... 4
- 第二节 测量对象信息的表达形式与测量方法 ..... 5
  - 一、测量对象信息的表达形式 ..... 5
  - 二、测量方法 ..... 6
- 第三节 测试技术的现状与发展 ..... 7
  - 一、传感器技术的现状与发展 ..... 8
  - 二、测试技术的应用领域与发展概况 ..... 9
- 思考题 ..... 11

### 第二章 测试技术基础 ..... 12

- 第一节 测试系统的基本组成与要求 ..... 12
  - 一、测试系统的基本组成 ..... 12
  - 二、测试系统的基本要求 ..... 13
- 第二节 测试系统的输出特性 ..... 14
  - 一、测试系统的静态特性 ..... 15
  - 二、测试系统的动态特性 ..... 16
- 思考题 ..... 26

### 第三章 测量误差分析与数据处理 ..... 27

- 第一节 误差的基本概念 ..... 27
  - 一、误差的表示方法 ..... 27
  - 二、误差的来源 ..... 28
  - 三、误差的分类 ..... 29
  - 四、精度的表示方法 ..... 29
- 第二节 随机误差的基本特征及计算方法 ..... 30
  - 一、随机误差统计直方图 ..... 30

二、随机误差的分布与特征 ..... 31

三、标准误差与概率积分 ..... 32

四、随机误差的计算方法 ..... 33

五、误差传递函数 ..... 36

### 第三节 系统误差 ..... 38

一、系统误差的分类 ..... 39

二、系统误差对测量结果的影响 ..... 39

三、系统误差的发现 ..... 40

四、系统误差的消除 ..... 43

五、粗大误差的发现与消除 ..... 44

### 第四节 测试数据的处理及表示方法 ..... 45

一、有效数字 ..... 45

二、测试数据的表示方法 ..... 46

三、一元线性与非线性回归 ..... 48

思考题 ..... 55

### 第四章 信号分析基础 ..... 57

#### 第一节 信号分析概述 ..... 57

一、信号分析的作用与方式 ..... 57

二、测试信号的分类 ..... 57

#### 第二节 周期信号分析 ..... 59

一、周期信号的傅里叶级数 ..... 59

二、周期信号的数字特征（平均值、均方值、相关函数） ..... 62

#### 第三节 非周期信号分析 ..... 63

一、非周期信号的傅里叶积分 ..... 63

二、非周期信号的能量谱密度和相关函数 ..... 65

#### 第四节 随机信号分析 ..... 66

一、随机信号的基本概念 ..... 66

二、随机信号的均值、均方值和均方差 ..... 66

三、随机信号的概率密度函数 ..... 67



四、随机信号的相关函数与功率谱密度函数 .....	68	一、信号的调制 .....	116
思考题 .....	69	二、信号的解调 .....	117
<b>第五章 传感器 .....</b>	<b>71</b>	思考题 .....	119
第一节 概    述 .....	71	<b>第七章 测试技术的应用 .....</b>	<b>120</b>
一、传感器组成及类型 .....	71	第一节 力的测量 .....	120
二、传感器的基本要求与特性标定 .....	73	一、力的测量原理 .....	120
第二节 电阻类传感器 .....	73	二、测力传感器 .....	122
一、电位计(变阻器)式传感器 .....	74	三、压力的测量 .....	124
二、电阻应变式传感器 .....	77	四、转矩的测量 .....	126
三、其他电阻类传感器 .....	80	第二节 位移的测量 .....	128
第三节 电感类传感器 .....	82	一、位移测量的特点与类型 .....	128
一、自感式电感传感器 .....	82	二、测位移传感器 .....	128
二、互感式电感传感器 .....	84	三、位移测量示例 .....	131
三、电涡流式传感器 .....	86	第三节 转速的测量 .....	133
第四节 电容类传感器 .....	87	一、转速的测量方法 .....	133
一、变极板间隙式电容传感器 .....	87	二、测转速传感器 .....	134
二、变极板面积式电容传感器 .....	88	第四节 温度的测量 .....	137
三、变介电常数式电容传感器 .....	90	一、温度的测量原理 .....	137
第五节 发电类传感器 .....	92	二、测温度传感器 .....	138
一、压电式传感器 .....	92	思考题 .....	146
二、光电式传感器 .....	93	<b>第八章 计算机测试技术简介 .....</b>	<b>147</b>
三、磁电式传感器 .....	96	第一节 计算机测试系统的组成 .....	147
四、热电式传感器 .....	97	一、计算机测试系统的构成与特点 .....	147
五、霍尔效应式传感器 .....	98	二、多路模拟开关 .....	148
思考题 .....	100	三、模/数转换与数/模转换 .....	149
<b>第六章 测量电路 .....</b>	<b>101</b>	四、采样保持 .....	150
第一节 电桥 .....	101	第二节 智能仪器 .....	151
一、直流电桥 .....	101	一、智能仪器概述 .....	151
二、交流电桥 .....	104	二、智能仪器的功能模块 .....	152
三、变压器电桥 .....	106	第三节 虚拟仪器 .....	155
四、平衡式电桥 .....	107	一、虚拟仪器概述 .....	155
第二节 滤波器 .....	107	二、虚拟仪器的基本组成 .....	156
一、理想滤波器 .....	107	三、LabVIEW 虚拟仪器开发系统 .....	158
二、实际滤波器 .....	108	第四节 网络化测试系统 .....	159
第三节 放大器 .....	111	一、网络化测试系统概述 .....	159
一、运算放大器 .....	112	二、基于现场总线技术的网络化测控系统 .....	160
二、电压放大器 .....	113	三、基于 Internet 的网络测控系统 .....	161
三、电荷放大器 .....	115	思考题 .....	162
第四节 调制与解调 .....	116	<b>参考文献 .....</b>	<b>164</b>

# 第一章

## 概 论

### 第一节 工程测试技术的基本概念

在工程上,采用测试仪器或测量工具进行测量,其目的就是要获取相关的信息(被测对象的某个数据),因此,工程测试技术也就是如何获取信息的技术。

#### 一、信息与信号

##### 1. 信息

(1) 信息的定义 提起“信息”,大家是再熟悉不过了,因为在日常生活和工作中,我们经常与“信息”打交道,现代社会也被称之为信息社会。例如,我们会耳闻目睹“交通信息”“气象信息”“招聘信息”等,此外,大学里有“信息与传媒”“电子信息工程”等带着“信息”字眼的学院或系,并且有“信息与计算科学”“电子与信息工程”等与信息相联系的专业。“信息”虽然是现代人最熟悉的名词之一,但信息究竟是什么?至今尚无统一的定义。

目前比较明确和一致的认识是,将信息定义为“事物运动的状态和方式”,这里的“事物”和“运动”是广义的。该定义从正面回答了什么是信息,即“信息就是事物运动的状态和方式”。人们认识了“事物运动的状态与方式”,也就获取了信息。

控制论创始人之一,美国科学家维纳(N. Wiener)在1948年出版的《控制论—动物和机器中的通信与控制问题》一书中指出,“信息就是信息,不是物质,也不是能量”,这将信息与物质和能量区分开来。

信息论的奠基人,美国科学家山农(C. E. Shannon)在“通信的数学理论”一文中,把信息定义为“熵的减少”。熵是不定性程度的度量,因此,信息是用来“减少或消除不定性”的。该定义从信息的效用角度,帮助人们更好地认识信息,减少信息究竟是什么的疑问。

(2) 信息的性质 从以上信息的定义,我们对信息有了初步的认识,下面通过了解信息的基本性质来进一步认识信息。



1) 信息可识别性。信息可以通过人的感官直接识别, 比如, 看到某人脸部表情, 可识别其表现出的喜、怒、哀、乐; 信息可以通过测量等方法间接识别, 比如, 通过汽车发动机转速表的示值, 可识别发动机转速的高低。

2) 信息可转换性。信息可以有多种表现方式, 各种表现方式可以互相转换, 比如, 某生产状况信息可以用语言、文字、图像和图表等不同的方式来表示; 信息可以转换为计算机代码、广播和电视等电信号, 而代码、电信号又可转换为语言、文字、图像等。

3) 信息可存储性。人的大脑神经细胞可以记忆许多东西, 即人脑储存有信息; 计算机可通过存储器(内存、硬盘)及磁盘、光盘存储信息; 录音机、照相机及录像机可通过磁带、存储卡存储信息。

4) 信息可传输性。人与人之间可通过语言、表情、动作等传递信息; 社会信息可通过报纸、电视、广播传输; 测试过程可借助机械、声、光、电等传递信息。

信息的这些基本性质决定了信息具有共享性和永恒性, 只要物质世界存在, 信息就无所不在、取之不尽, 信息永不会枯竭。

(3) 信息的作用 与物质和能量一样, 信息也是一种资源, 是人类生活、生产及进一步发展所不可或缺的。

物质向人类活动提供各式各样的材料, 能量向人类活动提供各种形式的动力, 而信息提供给人类的则是无穷无尽的知识与智慧。

为更好理解信息的作用, 我们通过两个实例来说明物质、能量和信息这三种资源的相互关系及信息在这三者中所起的作用。

1) 导弹防御系统。导弹防御系统通过雷达监视防御空间, 当有敌方导弹入侵时, 雷达就将所监测到的目标位置、运动状态和方向转换为电信号, 并通过通信系统传递给防御控制中心, 控制中心对雷达系统提供的电信号进行分析处理后, 得到了目标的坐标、方位、运动速度、加速度等参数, 并计算出拦截导弹的发射参数, 然后输出控制信号, 控制武器系统发射拦截导弹。导弹发射后, 控制中心又根据雷达发回的误差信息及时调整导弹的飞行参数, 直到拦截成功。在这个导弹防御系统中, 物质(雷达、计算机、导弹等)和能量(雷达系统、控制中心、导弹及导弹发射系统工作所需的能量), 在信息(敌方导弹飞行参数和拦截导弹飞行参数)的配合下完成了导弹拦截, 信息在这里起到了“灵魂”的作用。

2) 汽车发动机电子控制系统。汽车发动机电子控制系统根据各相关传感器的电信号计算得到发动机转速、负荷、温度及其他相关的参数, 并输出控制信号, 控制喷油器、电子点火器等执行器工作, 将发动机的空燃比、点火时间调整至最佳状态, 以充分发挥发动机的动力性, 降低油耗和排气污染。在这个汽车发动机电子控制系统中, 同样说明了信息与物质和能量是三位一体、相辅相成的关系, 以及信息的“灵魂”作用。

## 2. 信息系统

信息系统包括信息的发布、信息的传输及信息的接收。信息系统可以用广义的通信系统来表示, 如图 1-1 所示。

信源: 即信息的来源, 许多信息需要经过转换, 并由信息发送器发送出去。

信道: 即信息的传送通道, 信息经信道传送过程中, 可能会受到噪声的干扰。



图 1-1 广义通信系统组成

信宿：即信息的接收者，为了能够接收信息或提高接收信息的能力，通常需要进行信息的转换，由信息接收器接收。

无线通信系统、测试系统、自动控制系统等均可看成是一个信息系统。

(1) 无线通信系统 无线通信系统的信源、信道和信宿说明如下。

对无线通信系统来说，人的大脑思维活动是信源，通过语言发出信息，语言通过拾音器转换为电信号，再经调制后从天线发射出去。

拾音器、调制器与天线系统组成了信息的发送器。电波通过空气传播，空气就是无线通信系统的信道。

接收端的天线接收电波，并经解调、滤波、放大等处理后，再由扬声器转换为声音，被接听者（信宿）感知。接收天线、解调、滤波、放大等电路及扬声器等组成了信息的接收器，使人能听到远方传来的声音，并经大脑的思维分辨，获得相应的信息。

(2) 测试系统 在测试系统中，被测对象的状态参量或状态变化参量由传感器转变为电信号，并输入测量电路（中间变换器），测量电路对输入的电信号进行处理后输送给显示器（或记录仪、计算机等），显示（或记录）相应的参量，供人读取以获得被测对象的状态或状态变化信息。

在这个测试系统中，被测对象是信源，传感器是信息的转换器，测量电路及传输线路是信道，显示器（记录仪、计算机等）是信息的接收器，测量者是信宿。

(3) 自动控制系统 在自动控制系统中，被控对象的状态参量或状态变化参量由传感器转变为电信号，经信号处理电路对电信号进行相应的处理后输送到控制器，控制器对输入的电信号进行计算分析与比较，以获得被控对象的相关信息，并输出控制信号，经驱动电路控制相应的执行器工作，将被控对象的状态参量调整到设定的值。

在这样一个自动控制系统中，被控对象是信源，传感器是信息转换器，传感器信号处理电路和传输导线是信道，控制器是接收信息的信宿，而控制器与执行器之间的线路及执行器驱动电路则是这个“信息系统”中的逆向信道。

### 3. 信号

前面已多次提到了“电信号”。在日常生活中我们也会接触到许多信号。在城市街道的交叉路口上，可以看到交通信号灯发出的通行信号（绿灯亮）或停止通行信号（红灯亮）；行驶的汽车会发出该车转向信号（转向灯闪光）、制动信号（制动灯亮起）等。显然，从信号中我们可以获得相关的信息。那么信号与信息有什么区别和联系呢？

从前面信息的定义中可知，信息不是物质，也不是能量，信息是非物理性的。信号实际上是信息的载体，它具有物理性，具有能量。比如，汽车转向灯闪光所发出的转向信号使我们得到了该汽车要转向这个信息，而转向灯是物质，转向灯发出的闪光是一种光能，由灯泡消耗电能所获得。



## 二、测量与测试

### 1. 测量

(1) 测量的定义 我们经常会与“测量”打交道，比如，体检时需要测量一下身高体重、血压等，在化学实验室测量化学试剂的酸碱度，电工实验用万用表测量电路的电流或电压，生病时医生护士会给我们测量体温。我们对“测量”一词是再熟悉不过了，但要用文字确切地表述什么是测量，可能会答不上来。实际上，对测量的解释有几种不同的说法。

定义之一：测量就是利用仪器、工具，采用一定的方法从对象中获取定性或定量的“数据”（信息）的过程。

定义之二：测量是将被测量与标准量比较，得到被测量相对于标准量倍数的过程。

定义之三：测量是人们借助于仪器、工具等扩展获取信息的渠道、提高感知信息的能力的有效手段。

从上述对测量的不同定义中，我们对什么是测量有了比较明确的认识：测量的目的是要从被测对象（信源）获取所需的信息；测量需要使用工具和仪器，采用适当的方法；通过测量增加了获取信息的渠道，提高了感知信息的能力。

(2) 测量的过程与结果 人们通过一个具体的测量过程得到一个测量的结果，并从测量的结果中获得相关的信息。

1) 测量过程。测量过程包括选择、比较、读数和感知。以测量电压过程为例，选择：根据测量对象选择交流电压表或直流电压表，并调整好适当的量程；比较：测量时，电压表指针摆动或显示数字，这实际上就是与标准量“伏特”进行比较的过程；读数：从电压表的示值读取数据；感知：这是人类大脑的思维过程，根据读取的数据判断电压的高低、电路是否有故障等。对于有些测量，其感知过程可能需要对数据进行适当的分析处理才能获得明确的信息。

2) 测量结果。测量结果包括数值的大小和测量单位，数值的大小大都以数字表示，也可能是曲线（如示波器显示电压波形）、图形（显示器显示直方图、比例图等）。

### 2. 测试

通常我们将具有研究性、探索性、论证性的测量过程叫作测试。测试不包括简单的测量，比如，用卷尺量一下桌子的高度、用电压表测一下电路的电压等测量过程都不称之为测试。

测试过程通常需要对测量结果进行分析处理，以获得更为明确的信息，从而达到试验的目的。

## 三、检测与检测技术

### 1. 检测

检测如同测试，也包括测量及测量结果的分析处理。一些测试技术教材以“检测技术”命名。如果一定要区别检测与测试有什么区别的话，“检测”则更侧重于以检查为目的的测量，因此，一些测量过程称其为“检测”比“测试”要合理些。比如，用于汽车故障诊断



的测量通常称其为“检测”而不是“测试”。专门用于对汽车进行安全性、排放情况及性能测量的车间称之为“汽车检测站”，如果叫“汽车测试站”听起来就会觉得有点不顺耳了。

## 2. 检测技术

检测（测试）是为了获取相关的信息，因此检测技术（测试技术）就是如何获取信息的技术。现代测试技术主要包括三个方面。

1) 信息的转换技术。从被测对象中获取的信息往往不容易识别，需要将其转换为容易识别、分析和处理的物理量（通常是电信号），这就是传感器技术，它在测试技术中最为关键。

2) 信号处理技术。对传感器输出的电信号进行处理，使其成为方便显示和记录的信号，并要求信号处理过程不产生失真。

3) 信息显示技术。将从被测对象中获取的信息以某种方式显示出来，或通过计算分析显示更为明确的信息。

## 第二节 测量对象信息的表达形式与测量方法

### 一、测量对象信息的表达形式

人类表达信息的形式有语言、动作、发出某种声音（哭、笑、喊、叹等）和面部表情等，世间万物表达信息的形式千千万万。在这里，我们只是对工程测量中所要遇到的测量对象其信息表达形式做一归纳。

#### 1. 以机械量表达的信息

(1) 位移及位移速度方面的信息表示 被测对象的位移、线速度、角速度、线加速度和角加速度等，表达被测对象空间位移、移动（转动）的速度及速度变化的信息。

(2) 几何形态方面的信息表示 被测对象的长度、厚度、直径、间距和倾角等，表达被测对象的几何形态、空间位置等信息。根据这些基本信息，通过计算分析可得到被测对象的面积、体积、形状和空间位置分布等信息。

(3) 力及力的作用方面的信息表示 被测对象的力、应力、应变、力矩、重量、功率和振动等，表达被测对象受（施）力大小及方式等信息。

#### 2. 以热工量表达的信息

(1) 温度与压力方面的信息表示 被测对象的温度、压力、压差等，表达被测对象的温度、压力的大小及温度和压力对应关系等信息。

(2) 气态和液态流动信息表示 被测对象的流量、流速、容量和流态等，表达气态或液态被测对象的流动情况及占有空间大小等信息。

#### 3. 以电工量表达的信息

(1) 电路电压与电流方面的信息 被测对象的电压、电流、阻抗和功率等，表达被测对象电路结构、电功率输入与输出等信息。

(2) 电信号动态变化方面的信息 被测对象的频率、相位、波形和频谱等，表达被测



电信号的变化周期、滞后情况、频率成分等信息。

(3) 电磁场方面的信息 被测对象的磁场强度、电场强度、磁导率等，表达被测对象产生磁场（电场）的强度或受磁场（电场）影响的程度、磁路磁阻情况、磁通量等信息。

#### 4. 以物性成分表达的信息

(1) 物态及化学成分方面的信息 被测对象的气态、液态、固态及化学成分等，表达被测对象的物态、化学成分及物态和化学成分改变情况等信息。

(2) 物性成分方面的信息 被测对象的浓度、黏度、密度等，表达被测对象的物性成分及物性改变情况等信息。

(3) 酸碱度、颜色及表面粗糙度等方面的信息 被测对象的酸碱度、颜色、表面粗糙度等，也可表达被测对象物性及物性变化情况等信息。

#### 5. 以状态表达的信息

(1) 机械状态方面的信息 被测对象处于某种机械状态所表达的信息。

(2) 异常 被测对象出现某种异常现象所表达的信息。

## 二、测量方法

不同的测量对象，使用不同的测量工具和测量设备，测量方法也有多种。下面通过不同的分类方法来概括各种测量方法。

### 1. 按被测对象所处的状态分

(1) 静态测量 被测对象的被测参量在测量的时间内不变或变化很缓慢（其变化可以忽略）的测量过程为静态测量。比如，用温度计测量体温属于静态测量；用激光干涉仪监测建筑物的缓慢沉降也是一种静态测量。

(2) 动态测量 被测对象的被测参量随时间和（或）空间变化的测量过程为动态测量。比如，用示波器测量汽油发动机的点火电压是一种动态测量；用雷达监测飞行物的方位、飞行速度与方向等也是动态测量。

### 2. 按被测参量是否转换分

(1) 直接测量 用预先标定好的仪器对被测对象进行测量，直接读取被测量的测量方法称为直接测量，如图 1-2 所示。



图 1-2 直接测量

用电压表测量电路中的电压属于直接测量，汽车修理中用百分表测量发动机气缸直径也是直接测量。直接测量的特点是简便、直观、速度快，适用于现场观测和被测对象为稳态情况下的测量，不适于动态测量，可测量的范围较小。

(2) 间接测量 间接测量是指用传感器将被测量转换为另一种物理量的测量方法，间接测量的一般过程如图 1-3 所示。

间接测量通常通过传感器将被测量转化为电量，再经中间（测量）电路对电信号进行处理后由显示器或记录仪等显示或记录测量结果。这种也被称之为电测技术的测量方法具有



图 1-3 间接测量

如下优点。

- ① 可以对被测参量进行连续自动的记录。
- ② 电参量可以远距离传送，便于远距离测量和控制。
- ③ 可实现动态参量甚至瞬态参量的测量。
- ④ 可与计算机联机，进行数据的自动运算分析和处理。

### 3. 按测量与显示方式不同分

(1) 偏位式 测量时，以偏离零位的数值来反映被测量。这种测量方法其仪表内并没有标准量具，而是以标准量进行标定的刻度和根据被测量大小摆动相应角度的指针。偏位式测量方法的特点是简便、速度快，因此被广泛地应用于工程测量中。偏位式测量方法其精度取决于仪表系统标定的准确性，实现高精度的测量相对较为困难。

(2) 零位式 测量时，使测量系统平衡（使指针指向 0），用已知的标准量表示被测量。零位式测量方法其仪表内部设有标准量具，其精度取决于标准量的精度，因而容易实现高精度的测量，但在测量中需进行调平衡操作，测量过程较为复杂，花费时间相对较长。一些零位式测量装置设置了自动调平衡系统，但受反应速度的限制，只适用于被测量不变或缓慢变化的测量。

(3) 微差式 微差式是综合了偏位式和零位式的一种测量方法。测量时，先使被测量与测量装置内部的标准量取得大体的平衡，不平衡的微小差别则用偏位方式指示，其测量值为标准量值加微差值。微差式测量方法反应速度较零位式快，测量精度较偏位式高。

### 4. 按是否接触被测对象分

(1) 接触式测量 测量工具或测量仪器的测量探头、传感器等与被测对象接触的测量。比如，用温度计测量体温、将温度传感器伸入发动机冷却液中测量发动机温度、用万用表测量电路中的电压或电阻等，均属接触式测量。

(2) 非接触式测量 测试装置的传感器与被测对象有一定的空间距离的测量。比如，用电涡流式测厚仪测量钢板的厚度、用雷达监测飞机的方位和飞行速度等均属非接触式测量。

## 第三节 测试技术的现状与发展

测试技术与科学研究、工程实践密切相关，凡是需要了解“事物运动状态与方式”并做定性或定量描述时均离不开测试。现代科学技术的发展离不开测试技术，而科学技术的发展又对测试技术提出了更高的要求，现代科学技术的发展本身又促进了测试技术的完善和不断提高。

现代科学技术迅猛发展对测试技术的促进作用主要体现在两个方面，一是传感器技术的完善与提高，二是计算机技术在测试技术领域的广泛使用。



## 一、传感器技术的现状与发展

在测试系统中，传感器的作用是将被测对象的状态和方式（被测物理量）转化为电量（信号），它是测试系统的基础。传感器技术是现代测试技术发展水平的重要体现。

早期的传感器技术以结构型传感器为主，其基本特征是以结构的部分变化或变化后引起场（力场、电场、磁场）的变化来反映被测量。比如电容式传感器和电感式传感器，其信号转换形式为：被测量的变化（移动）→传感器结构的部分变化→电场（或磁场）变化→电容量（或电感量）变化→测量电路的电压或电流变化，电压或电流的变化反映了被测量的改变。

结构型传感器能够转换的被测量极为有限，物性型传感器的出现和迅速发展，才使测试技术有了今天的重要地位。物性型传感器利用敏感材料本身的物性随被测量的改变而变化的特性将被测量转变为相应的电信号。根据其敏感材料敏感特性的不同，物性型传感器有热敏、光敏、压敏、磁敏、湿敏、声敏、色敏、味敏和化学敏等。

有了物性型传感器，使得测试技术的应用领域和可测试的对象变得非常广泛。虽然敏感材料的种类有限，但由敏感材料构成的传感器可以有很多。这是因为同一种敏感材料可以用于转换不同的被测物理量，即使是转换同一种被测物理量也可以用作不同的用途。比如，压敏元件可做成振动传感器、压力传感器、测力传感器等；又如，以热敏材料做成的温度传感器在汽车上可用作发动机温度传感器、排气温度传感器、空调蒸发器温度传感器、车内温度传感器和车外温度传感器等。

测试技术进一步发展的关键是传感器技术的发展，现代传感器技术发展主要体现在如下三个方面。

(1) 新的敏感材料的开发与应用 新敏感材料有新型晶体、陶瓷、高分子材料、超导体、光导纤维、液晶、生物功能材料、凝胶和稀土金属等，以及被称为“智能材料”的形状记忆合金、具有自增殖能力的生物体等。这些敏感材料的开发与使用，不仅使可测量的范围扩大了，也使传感器的集成化、小型化、更高性能及智能化成为可能。

此外，随着材料性能控制技术的逐渐成熟，原来以敏感材料的特性设计传感器的思路将会转变为按传感器的要求来合成所需的敏感材料。这样，传感器测量范围的扩大、性能的提高将更加迅速。

(2) 结构小型化、更轻便 如前所述，新的敏感材料的出现，使得传感器从结构型转向了物性型。随着电子技术、微加工技术和集成化工艺等的发展，集成化传感器开发应用成为热点之一。新型传感器结构向着小型化、轻便及器件与电路一体化的方向发展，使其适用性得到进一步提高。

(3) 高精度、智能化 随着科学技术的发展和对测试技术要求的提高，对传感器则提出了更高精度和智能化的要求。集成化传感器可以是同一功能的敏感元件排列成不同的阵列，以适应高精度和不同被测量的需要；也可以是不同功能的敏感元件集成在一起，组成可同时测量不同参量的传感器；或者是传感器与测量电路集成在一起，使传感器具有信号处理、温度补偿等自动调整功能。



## 二、测试技术的应用领域与发展概况

### 1. 测试技术应用领域

在技术研究与开发、自动化生产、产品质量与性能检验等都需要用测试技术来获取信息、传输信息、显示与储存信息。测试技术的应用范围相当广泛，我们将其归纳为四个方面。

(1) 产品的质量和性能评价 在产品的生产过程中，通过对部件或半成品的检测，以剔除不合格的部件或半成品，确保产品的质量；一些产品出厂前的最后一道工序是对产品质量是否合格、性能是否达标进行检测，以确保出厂的是合格产品；有关的质检部门对某些产品进行抽查，或对某个有争议的产品进行检测，以对该产品的质量和性能做出评价。

(2) 生产线或设备的自动控制 自动生产线上，通过测量取得与运行条件有关的信息，实现生产线的自动运行控制；具有自动控制功能的设备，则是通过测试手段获得被控制对象的相关状态参数，实现设备的自动控制功能。

(3) 判断设备或部件的故障 一些设备运行是否正常、有无故障出现，需要通过测量某些状态参量，并与标准量进行比较后才能做出准确的判断；某些设备的部件需要用专门的检测设备，通过测量获得相关的检测参数才能判断该部件是否有故障。

(4) 科研验证实验 在科学研究中，通常需要通过实验过程测得相关的数据，以取得未知的信息，或论证研究方案、研究结果的正确与否。

### 2. 测试技术类型

为适应不同的测试对象、满足不同的测试要求，测试设备和测试方法多种多样。除了用测试装置接触被测对象进行测量的普通测试方法外，测试技术还有如下几种类型。

(1) 非接触检测技术 这是一种测试设备不接触被测对象的测量方法。非接触式测量可实现因距离远而无法接触被测对象的测量，比如用雷达测试系统监测飞机的飞行情况；可对运动的被测对象进行测量，比如用车速监测仪检测道路上行驶车辆的车速、用光电式测矩仪检测转动轴的转矩等。非接触式检测方法不但可用于远距离测量和运动对象的测量，还具有测量操作简单、测量速度快等优点。其缺点是达到高精度的测量较为困难。

(2) 无损检测技术 检测部件内部结构或损伤情况但对部件不造成损伤的测量方法。无损检测技术通过磁力探伤、核磁共振等方法将被测对象内部相关的信息显现出来，以实现无损检测。

(3) 在线检测技术 测试系统连续工作，对工作过程中的被测量对象进行不间断的监测。自动生产线、自动控制设备中通过在线检测以实现自动控制。

(4) 多功能检测技术 检测设备综合多项测试功能，可同时或按步骤进行多个被测参量的测量。比如，汽车检修中使用的发动机不解体检测仪，可用于发动机转速、功率、点火电压和点火提前角等多项检测，这不但使检测方便迅速，还可对各检测参量进行综合分析，以获得所需的检测结果。

(5) 智能化检测技术 智能化的检测系统能进行自动校正，信号转换方式能自动切换，可根据需要自动对测量参数进行统计分析，能自动按设定的程序完成所需的检测。



(6) 仿生物检测技术 根据某些生物原理设计的检测方法,以满足生物工程中的一些测量和其他领域某些较为特殊被测量的测量。

### 3. 测试技术的发展

现代测试技术发展的另一个显著特点是计算机技术融入了测试系统。计算机作为测试系统的重要组成部分,承担了系统的信号采集、分析和处理及其他的重要工作,使得测试系统同时进行多个测试项目变得非常简单,确保多项目同时测量的实时性、同步性也很容易。

计算机测试技术的发展主要体现在测试系统硬件的发展和实验仪器系统软件环境的发展,多功能的综合测试系统、自动测控系统、智能化仪器、虚拟仪器及网络化仪器已成为现代测试技术发展的主要趋势。

(1) 综合测试系统 由计算机测试系统组成的综合测试系统如图 1-4 所示。该测试系统可对多个被测参量进行同步测量,并能进行实时信号分析和数据处理。

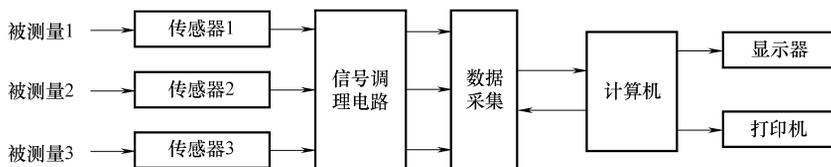


图 1-4 综合测试系统

(2) 自动测控系统 以计算机为控制中心的自动控制系统如图 1-5 所示。该系统通过传感器将被控对象的状态参量转换为相应的电信号,并输送给计算机,实现对被控对象运行状态的实时监测;计算机根据传感器输入的信号判断出被控设备的运行状态,需要时,输出控制指令,通过执行器调整被控设备的运行状态。

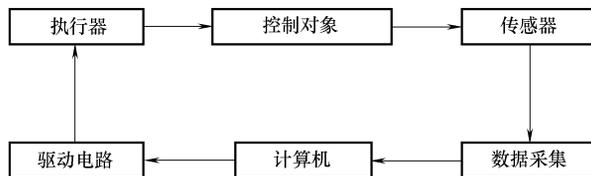


图 1-5 自动测控系统

(3) 新型仪器开发应用 计算机硬件与传统测量仪器的完美结合,及计算机软件资源的开发利用,使得智能化仪器、虚拟仪器及网络化仪器得到了迅速的发展。

智能化仪器能够完成一些需要人类智慧才能完成的工作,比如量程的选择、零位校正、数据的存储与处理、显示方式等由仪器中的微处理器自动控制。所谓虚拟仪器是带有数据采集卡的计算机利用软件在显示器上显示某种仪器的虚拟面板,并在计算机程序的控制下进行数据采集、运算、分析和处理,完成仪器测量的全过程。网络化仪器则是将计算机、高档外设和通信线路等硬件资源以及大型数据库、程序、数据和文件等软件资源纳入网络,以实现资源共享的测试系统。

测试技术未来的发展将是新型传感器进一步开发应用、计算机测试系统越来越多地应用于综合检测设备和自动控制设备、新型仪器更加成熟并被广泛使用。



## 思 考 题

1. 何谓信息？信息具有哪些性质？
2. 信息的作用是什么？信息系统一般由哪几部分组成？
3. 信号与信息有何区别和联系？
4. 工程测试领域内，信息的表达形式有哪些？
5. 何谓测量？测量过程包含哪些内容？
6. 直接测量和间接测量有何不同？间接测量具有哪些优点？
7. 现代测试技术有哪些应用领域？测试技术包括哪些类型？
8. 工程测试技术的发展主要体现在哪些方面？

## 第二章

# 测试技术基础

### 第一节 测试系统的基本组成与要求

#### 一、测试系统的基本组成

具有间接测量功能的测试系统通常包括传感器、测量电路和显示记录装置等，其基本组成如图 2-1 所示。

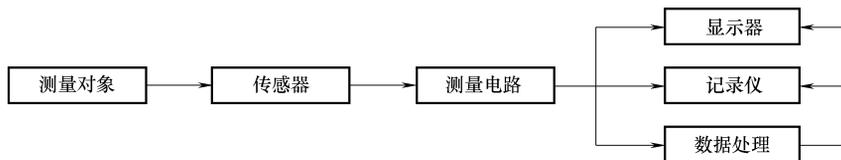


图 2-1 测试系统的基本组成

(1) 传感器 传感器 (Transducer) 的作用是将测量对象的被测物理量 (信息) 按一定的规律转换为另一种物理量 (一般为电量), 并传送给测量电路。传感器也被称为变送器 (Transmitter) 或变量器 (Transformer)。

(2) 测量电路 在普通的测试系统中, 测量电路的作用是对传感器输入的电信号进行处理 (转换、放大、衰减、滤波、调制与解调等), 变成显示器能够显示、记录仪可以记录、数据处理电路能分析处理的信息。在计算机测试系统中, 测量电路对传感器输入的电信号进行处理后, 经数据采集卡输送到计算机, 由计算机进行信号的分析与处理。

(3) 显示器与记录仪 显示器用于显示经测量电路或数据处理电路处理后的测量信号, 显示方式有指针偏摆、数字、曲线和图表等不同的形式; 带有记录仪的测试系统, 可由记录仪将测试系统的测量结果以数字或代码、曲线、图表等方式记录下来。

(4) 数据处理 一些测试系统还具有数据处理功能, 通过所带的数据处理模块对测量信号做进一步的处理, 以得到更为明确的信号。在计算机测试系统中, 由计算机承担数据处理的任务。



## 二、测试系统的基本要求

能用作间接测量的测试系统，且其所获得的测量结果可信、可用，就必须满足如下基本要求。

### 1. 基本功能要求

测试系统的基本功能是确保其能进行正常测量所必需的最基本要求，测试系统必须具备的基本功能是转换、选择、比较和显示。

转换功能：测试系统能按一定的规律将被测量转换为易于测量的另一种物理量。

选择功能：测试系统具有选择被测量，抑制其他影响因素的功能。

比较功能：测试系统具有将被测量与标准量进行比较（测量）的功能。

显示功能：测试系统应能通过指针的偏移、数字、图像等方式显示被测量。

### 2. 精度要求

所谓测量精度是指测量值偏离真值的程度，或者说测量值与真值符合的程度。真值是指在一定的条件下，被测量客观存在的实际值，通常情况下真值是不可知的。

既然真值是未知的，那我们又如何知道测量的精度（与真值符合的程度）呢？实际上，在测量中所用到的精度是通过与相对真值比较得到的。相对真值是指用高一精度等级的测量仪器的指示值作为低一级精度的真值，因而相对真值是可知。此外，理论真值、规定真值也是可知的。理论真值也称绝对真值，是指在理论上已被证实的真值，比如，三角形的三内角之和为 $180^\circ$ 就是绝对真值。规定真值是指国际上公认的某些基准量值，比如，米、千克、伏特等。

测试系统本身所造成的测量结果偏差应在允许的范围之内，即其精度应能满足要求。测量装置按其引用误差（引用误差的概念参见第三章）划分精度等级，一般工程测量用仪器的精度等级范围为0.5~5级，实验用测量仪器的精度要求较高，精度等级范围为0.2~0.5级。

### 3. 精密度要求

测量仪器的精密度是指其测量值的重复性，即在相同的条件下对某被测量进行多次测量时，其测量值的分散程度。

测试系统精密度实际上是反映其本身可能产生随机误差（随机误差的概念参见第三章相关的内容）的大小程度，对测量装置精密度的要求就是要确保测量过程所产生的随机误差在允许的范围之内。

### 4. 分辨力（率）要求

分辨力是指测试装置能检测到最小输入信号变化的能力，分辨率则是单位量程的分辨力。为更好地理解分辨力与分辨率，我们以三位数字电压表为例。

如果电压表满量程为1V，其分辨力为0.001V，分辨率为 $1/1000$ （0.001/1）；如果电压表的满量程是100V，其分辨力为0.1V，但其分辨率仍然是 $1/1000$ （0.1/100）。

测试系统的分辨力（率）应能满足最小被测量变化的测量要求。



### 5. 测量范围要求

测量范围包括示值范围和频率范围。示值范围是指测试系统能测量的最大被测量；频率范围是指测试系统在对动态信号测量时其可测试的频率范围。

测试系统的示值范围和频率范围均应满足测量的需要，即测试系统的可测量范围（示值范围和频率范围）应将被测量可能的变化范围均包括在内。

### 6. 稳定性要求

测试系统的稳定性要求是指随着时间的推移或当环境温度、电源电压、测试环境等因素改变时，测试系统的测量值应保持不变，或其变化在允许的范围之内。

(1) 测试系统相对于时间的稳定性 相对于时间的稳定性也称仪器的零漂，用测试系统示值在单位时间的变动量（输出变动量/时间）来衡量。

(2) 测试系统相对于温度的稳定性 相对于温度的稳定性是指测试系统的测试结果受测量温度影响的程度，用单位温度改变量下的测试系统示值的变动量（输出量改变量/温度改变量）来表示。

(3) 相对于电压的稳定性 相对于电压的稳定性是指测试系统在电压波动时，其测量结果受影响的程度，用单位电压改变量下的测试系统示值变动量（输出量改变量/电压改变量）来衡量。

(4) 相对于环境的稳定性 相对于环境的稳定性是指测试系统在不同的测试环境下其测量值的稳定性，通常用环境影响系数来衡量。

### 7. 测试成本与使用环境

(1) 测试成本 在满足测试基本要求的前提下，应选择测试成本最低的测量方法和测试系统。一般情况下，测试装置的精度和精密度高，其价格也高；由多个测量装置完成的综合测量，其测量精度取决于精度最低的仪器。因此，选购测量装置时，不要一味要求高精度仪器；综合测量的各种仪器，最好选用精度等级相同的。

(2) 使用环境 一些使用环境可能会对测试系统本身造成损害或对测试结果产生影响，比如，测试环境温度很高或很低、振动很大、有腐蚀性物质或有较强的电磁场等。在这样一些环境下进行测量，就必须考虑采用具有相应保护措施测量装置，测试过程也应注意避免环境因素对测量装置及测量结果带来的负面影响。

## 第二节 测试系统的输出特性

测试系统的输出特性是指其输出量（示值或输出的电信号）随输入量（被测量）变化的关系。分析并掌握测试系统输出特性，其目的是了解测量装置在静态测量和动态测量中可能产生的测量误差，有助于合理选择测量装置和测量方法。

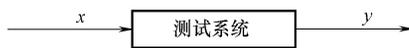


图 2-2 测试系统模型

测试系统模型如图 2-2 所示。理想的测试系统其输入  $x$  与输出  $y$  之间有如下关系：

$$y = a_0x + a_1x^2 + \dots + a_{n-1}x^n \quad (2-1)$$

式中  $x$ ——测试系统输入量；



$y$ ——测试系统输出量；

$a_0, a_1, \dots, a_n$ ——常数。

## 一、测试系统的静态特性

测试系统的静态特性是指被测量恒定不变或非常缓慢变化的情况下，测试装置输出量与输入量之间的关系。

测试系统理想的静态特性为输入输出之间呈线性关系：

$$y = Sx \quad (2-2)$$

上式中的  $S$  为常数，表示测试系统的灵敏度。测试系统实际的静态特性并非单纯的线性关系，通常用非线性、迟滞性、灵敏度和负载作用等来表征测试系统实际的静态特性。

### 1. 非线性

测试系统在进行静态测量时，其实际的输出量与输入量之间呈非线性关系，如图 2-3 所示。非线性是对静态测量偏离线性的度量，由下式表示：

$$\text{非线性度} = \frac{B}{A} \times 100\% \quad (2-3)$$

式中  $A$ ——测试系统的量程；

$B$ ——测量范围内最大的非线性偏差。

非线性是造成测试系统静态测量误差的因素之一。

### 2. 迟滞性

测试系统在同样的测试条件下，输入量从小到大改变时测得的值与输入量从大到小改变时测得的值不同的现象称之为迟滞性，如图 2-4 所示。迟滞性也被称为回程误差，也是造成静态测量误差的因素之一。迟滞性用测试系统量程范围内最大回程误差值  $H$  与量程  $A$  的比值来度量：

$$\text{迟滞性} = \frac{H}{A} \times 100\% \quad (2-4)$$

测试系统在进行静态测量时产生回程误差的原因是系统有滞后现象或有不工作区。测试系统中磁性材料的磁化、一般材料的受力变形、转换元件的摩擦力及间隙等均是静态测量产生回程误差的可能因素；不工作区也称死区，即对系统输出无影响的输入变化范围。

### 3. 灵敏度

测试系统的灵敏度  $S$  是反映系统输入量的变化引起输出量变化的大小，灵敏度的定义如下：

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (2-5)$$

式中  $dx$ ——输入量的微小变化；

$dy$ ——输出量的微小变化。

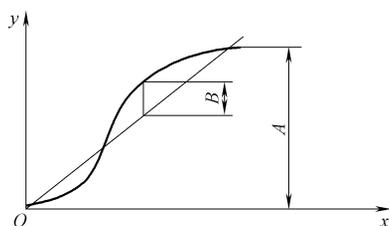


图 2-3 静态测量的非线性

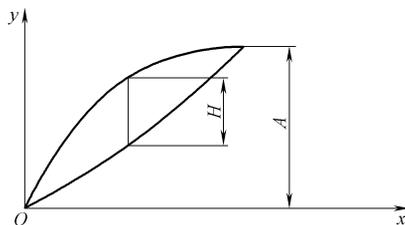


图 2-4 静态测量的迟滞性



理想的线性系统，其灵敏度为一常数（直线斜率）；对非线性度很小的测试系统来说，在量程范围内其灵敏度也近似于常数；对非线性测试系统来说，其灵敏度则随输入量的变化而改变。

#### 4. 负载作用

测试装置接入被测对象后，从被测对象中吸取了一部分能量，从而改变了被测参数原真实数值，这种现象称之为负载作用。

测试装置的输入阻抗（广义）大，从被测对象吸取的能量就小，对测量结果的影响（负载作用）也就小。比如，电压表测量电压时，如果电压表的输入阻抗很大，从被测电路流入电压表测量电路的电流就很微小，对被测电路电压原值的影响就可忽略不计；热电偶温度计测量温度时，如果热电偶的“阻抗”很大，从被测对象中吸取的热量很微小，其测量值受负载作用的影响也可以忽略。

## 二、测试系统的动态特性

测试系统的动态特性是指被测量瞬间变化或连续不断变化的情况下，测试装置输入与输出之间的关系。换句话说，测试系统的动态特性就是测试系统对随时间变化的输入量（被测量）的响应特性。可以通过数学方法和实验方法来分析与确定测试系统的动态特性。

### （一）数学方法

用数学方法研究测试系统动态特性的基本步骤如下。

- ① 根据测试系统的物理特性建立数学模型。
- ② 根据数学模型建立常系数线性微分方程。
- ③ 对微分方程进行拉氏变换，以求解微分方程，得到测试系统的传递函数。
- ④ 利用传递函数分析测试系统的频率响应和瞬态响应。

#### 1. 测试系统的传递函数

不同物理特性的测试系统有不同的数学模型，我们暂不考虑测试系统的具体物理特性，先求得测试系统通用型的传递函数。

（1）测试系统常系数微分方程 不考虑测试系统的具体物理特性，可以用常系数的线性系统表示测试系统的数学模型，则测试系统动态特性的常系数微分方程的一般表达式为

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中  $y(t)$ ——系统输出量；

$x(t)$ ——系统输入量；

$a_0, a_1, \dots, a_n$  和  $b_0, b_1, \dots, b_n$ ——与系统物理特性参数有关的常数。

（2）求微分方程的拉氏变换 拉氏变换是一种积分变换，拉氏变换是为了求解微分方程，有关拉氏变换的概念和性质请参阅相关的教材。根据拉氏变换的线性性质和微分性质，并设定输入量  $x(t)$ 、输出量  $y(t)$  及其各阶导数初值均为 0，得到上述微分方程的拉氏变



换为

$$\begin{aligned} & a_n s^n Y(s) + a_{n-1} s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) \\ & = b_m s^m X(s) + b_{m-1} s^{m-1} X(s) + \cdots + b_1 s X(s) + b_0 X(s) \end{aligned} \quad (2-7)$$

整理后得

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0) X(s) \quad (2-8)$$

式中  $X(s)$ ——输入量的拉氏变换;

$Y(s)$ ——输出量的拉氏变换;

$s$ ——拉氏变换的复参变量。

(3) 求传递函数 常系数线性系统且初始值为 0 的测试系统, 其传递函数  $H(s)$  是系统输出量拉氏变换与输入量拉氏变换之比:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (2-9)$$

需要说明的是, 传递函数不反映系统的物理特性, 只是表达了系统输入与输出之间的传递特性。通过传递函数可以进一步分析不同物理特性测试系统对动态信号的响应特性。

## 2. 测试系统的动态特性分析

根据常系数微分方程微分的阶数分, 常用的测试系统有零阶、一阶和二阶。下面对各阶测试系统分别进行分析。

(1) 零阶系统 测试系统输入与输出的表达式不含微分项, 这样的测试系统称其为零阶系统。

1) 零阶系统的输入输出表达式。零阶系统是指其常系数微分方程中的  $a_0$ 、 $b_0$  以外的系数都为 0, 即

$$y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t) \quad (2-10)$$

式中  $\frac{b_0}{a_0}$ ——反映了零阶系统的灵敏度。

2) 零阶系统的特性。从零阶系统的输入输出表达式可看出, 其输出量只与即时的输入量有关, 与时间和输入量信号的形式无关。

需要说明的是, 零阶系统的输入输出表达式 [式 (2-10)] 与我们前面已接触到的线性系统在静态测量中的表达式的形式一样, 但所表达的意义是有区别的。在测试系统静态特性分析中, 该式是表示系统在进行静态测量时输入量与输出量之间的线性关系; 而零阶系统是针对随时间变化的输入量而言, 该表达式表示零阶测试系统的输出量的值只与输入量的值有一一对应的关系, 而输入量在什么时间输入、输入信号的形式如何均不会影响系统的输出量。

将某种零阶测试系统等效为测量位移的电位计, 如图 2-5 所示。

如果电位计的电阻在长度  $L$  上是线性均匀的, 则有

$$V_0 = \frac{E_0}{L} x \quad (2-11)$$

式中  $x$ ——测试系统输入量;



$V_0$ ——测试系统输出量；  
 $E_0$ ——电位计电源；  
 $\frac{E_0}{L}$ ——电位计的灵敏度。

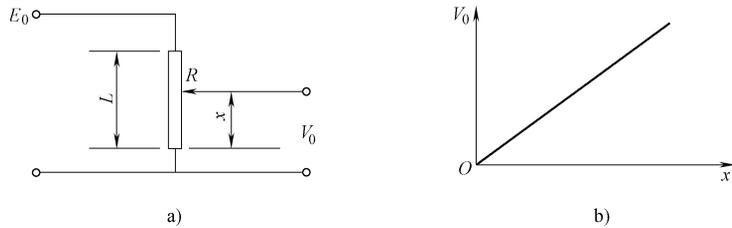


图 2-5 零阶测试系统实例

a) 零阶系统等效电路 b) 零阶系统输出特性曲线

$E_0$ —电源  $R$ —等效电阻  $x$ —位移（输入）  $V_0$ —输出电压  $L$ —等效电阻长度

(2) 一阶系统 测试系统输入与输出的表达式只含一阶微分项，这样的测试系统称其为一阶系统。

1) 一阶系统的输入输出表达式。一阶系统是指其常系数微分方程中的  $a_1$ 、 $b_0$  以上的系数都为 0，即

$$a_1 \frac{dy(t)}{dx(t)} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (2-12)$$

典型的一阶系统如图 2-6 所示。

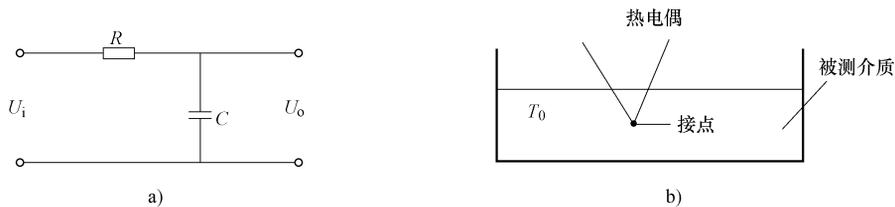


图 2-6 典型的一阶系统

a) RC 电路 b) 热电偶测量温度

等效为 RC 电路的一阶测试系统可以建立如下常系数微分方程：

$$RC \frac{dU_o}{dt} + U_o = U_i \quad (2-13)$$

式中  $U_i$ ——系统的输入电压；

$U_o$ ——系统的输出电压；

$RC$ ——系统的时间常数。

等效为热电偶测量温度的测试系统，可以得到如下—阶微分方程：

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_o(t) \quad (2-14)$$

式中  $T_o$ ——被测温度（系统的输入量）；

$T$ ——测得的温度（系统的输出量）；



$\tau$ ——系统的时间常数。

2) 一阶系统的传递函数。将一阶系统的常系数微分方程 (2-12) 等式两边同时除以  $a_0$ , 得到下式:

$$\frac{a_1 \frac{dy(t)}{dx(t)} + y(t)}{a_0} = \frac{b_0}{a_0} x(t) \quad (2-15)$$

令 
$$\tau = \frac{a_1}{a_0}, \quad S = \frac{b_0}{a_0}$$

式中  $\tau$ ——一阶系统的时间常数;

$S$ ——一阶系统的灵敏度。

为讨论方便, 取  $S = 1$ , 则一阶系统的常系数微分方程一般表达式为

$$\tau \frac{dy(t)}{dx(t)} + y(t) = x(t) \quad (2-16)$$

对式 (2-16) 两边取拉氏变换得

$$\tau s Y(s) + Y(s) = X(s)$$

于是, 一阶系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2-17)$$

3) 一阶系统的频率响应。对测试系统输入一个稳态的正弦波激励信号, 其输出量通常与输入量同波形、同频率, 但其幅值和相位可能会因输入信号频率的变化而有所改变。测试系统输出的幅值和相位随输入信号频率变化的特性称之为频率响应。

从式 (2-17) 所表示的一阶系统的传递函数可知, 求得拉氏变换的复参变量  $s$  就可以根据传递函数得到频率响应函数。 $s$  包含实变量  $\beta$  和虚变量  $j\omega$ :

$$s = \beta + j\omega$$

对照复数的三角函数表示法:

$$z = A(\cos\theta + j\sin\theta)$$

以输入正弦波  $x(t) = A\sin\omega t$  作为分析频率响应的输入信号时, 拉氏变换复参变量为

$$s = j\omega$$

代入式 (2-17) 得频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau j\omega + 1} \quad (2-18)$$

根据上式的频率响应函数可求得一阶系统的幅频率特性  $A(\omega)$  和相频率特性  $\Phi(\omega)$ :

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}} \quad (2-19)$$

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\tau\omega) \quad (2-20)$$

一阶系统的幅频特性曲线和相频特性曲线如图 2-7、图 2-8 所示。

分析一阶系统的幅频特性和相频特性, 对一阶系统的动态特性有如下认识。

① 一阶系统在进行动态测量时, 其输出量会有幅值衰减及相位滞后 (失真), 即会产生动态测量误差。

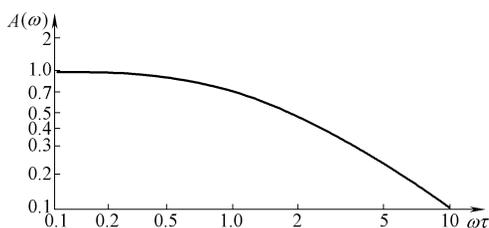


图 2-7 一阶系统幅频特性

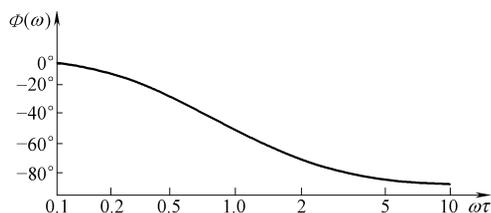


图 2-8 一阶系统相频特性

② 随输入信号频率的提高，其输出量幅值衰减及相位滞后会增加，产生的动态测量误差会增大。测试系统的动态测量误差不能超出允许的范围，因此，一阶系统对动态信号进行测量时有一个可测试的频率范围。

③ 当  $\omega\tau < 0.3$  时，输出量的振幅和相位失真都较小； $\omega$  是输入信号的角频率， $\tau$  是表征一阶系统物理特征的参量， $\tau$  越小，测试系统的可测试频率范围就越宽。

④ 当  $\omega\tau = 1$  时， $A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ ； $\Phi(\omega) = \pi/4$ 。此点称之为半功率点（-3dB 点）。

4) 一阶系统的瞬态响应。输入量瞬间变化时，测试系统输出量的响应情况称之为瞬态响应。可以用阶跃信号、斜坡信号、脉冲信号作为分析系统瞬态响应的激励信号。下面我们利用阶跃信号作为输入信号参数，分析一阶系统的瞬态响应特性。

阶跃信号的函数表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ A & t > 0 \end{cases} \quad (2-21)$$

对阶跃函数  $x(t) = A$  求拉氏变换：

$$X(s) = \frac{A}{s}$$

代入一阶系统的传递函数式 (2-17) 得

$$Y(s) = \frac{A}{(\tau s + 1)s} \quad (2-22)$$

求式 (2-22) 的拉氏反变换得

$$y(t) = A(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2-23)$$

根据式 (2-23) 做出的一阶系统阶跃响应特性曲线如图 2-9 所示。

分析一阶系统的阶跃响应特性曲线，我们可得到如下的认识。

① 曲线的变化率取决于  $\tau$  值的大小，因此将  $\tau$  称之为时间常数。 $\tau$  反映了系统响应的快慢，是表征一阶系统动态特性的重要参数。

②  $\tau$  值越小，曲线趋于  $A$  值（稳定值）的时间就越短，即输入输出的差值越小（动态误差越小）。

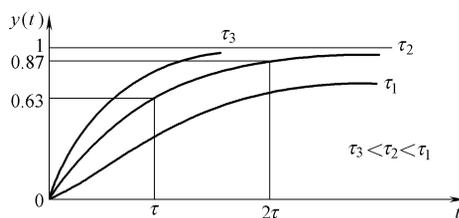


图 2-9 一阶系统的阶跃响应



③ 当  $t = \tau$  时,  $y(\tau) = 0.63A$ , 即仅达到了稳定值的 63%; 当  $t = 3\tau$ 、 $4\tau$ 、 $5\tau$  时, 输出量分别为  $y(3\tau) = 0.95A$ ;  $y(4\tau) = 0.98A$ ;  $y(5\tau) = 0.99A$ 。

通常以  $3\tau$  或  $4\tau$  作为系统响应快慢的指标。

(3) 二阶系统 测试系统输入与输出的表达式含有二阶微分项, 这样的测试系统称其为二阶系统。

1) 二阶系统的输入输出表达式。二阶系统是指常系数微分方程中,  $a_2$ 、 $b_0$  以上的系数都为 0, 即

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dx(t)^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dx(t)} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (2-24)$$

典型的二阶系统如图 2-10 所示。

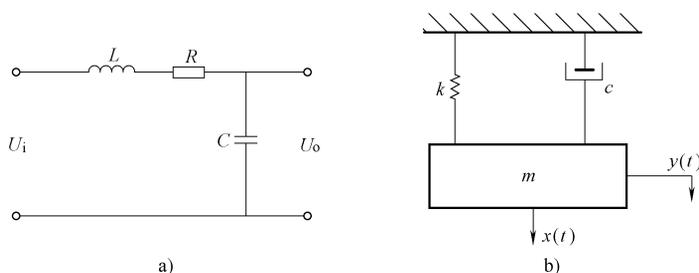


图 2-10 典型的二阶系统

a) LRC 电路 b) 弹簧-阻尼-质量

等效为 RLC 电路的测试系统, 可以建立如下常系数微分方程:

$$LC \frac{d^2 U_o}{dt^2} + RC \frac{dU_o}{dt} + U_o = U_i \quad (2-25)$$

式中  $U_i$ ——系统的输入电压;

$U_o$ ——系统的输出电压;

$R$ 、 $L$ 、 $C$ ——系统的等效电阻、电感、电容。

等效为弹簧-阻尼-质量的测试系统, 可以得到如下二阶微分方程:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dx(t)^2} + c \frac{dy(t)}{dx(t)} + ky(t) = x(t) \quad (2-26)$$

式中  $m$ ——系统等效质量;

$c$ ——系统等效阻尼;

$k$ ——系统等效弹簧。

2) 二阶系统的传递函数。将二阶系统常系数微分方程 (2-24) 等式两边同时除以  $a_0$  得

$$\frac{a_2 d^2 y(t)}{a_0 dx(t)^2} + \frac{a_1 dy(t)}{a_0 dx(t)} + y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t) \quad (2-27)$$

令  $S = b_0/a_0$ ,  $S$  为二阶系统的灵敏度, 为讨论方便, 取  $S = 1$ , 两边取拉氏变换:

$$\frac{a_2}{a_0} s^2 Y(s) + \frac{a_1}{a_0} s Y(s) + Y(s) = X(s) \quad (2-28)$$



传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\frac{a_2}{a_0}s^2 + \frac{a_1}{a_0}s + 1} \quad (2-29)$$

设  $\omega_n^2 = \frac{a_0}{a_2}$  (系统的固有频率),  $\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0a_2}}$  (系统的阻尼率), 则二阶系统的传递函数可写为

$$H(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1} \quad (2-30)$$

3) 二阶系统的频率响应。仍以正弦波信号  $x(t) = A\sin\omega t$  作为分析二阶系统频率响应的输入信号参数。将  $s = j\omega$  代入上式, 得频率响应函数:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta j \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (2-31)$$

根据频率响应函数得到幅频特性:

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (2-32)$$

由频率响应函数求得相频特性:

$$\Phi(\omega) = -\arctan\left[\frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right] \quad (2-33)$$

二阶系统的幅频特性曲线和相频特性曲线如图 2-11、图 2-12 所示。

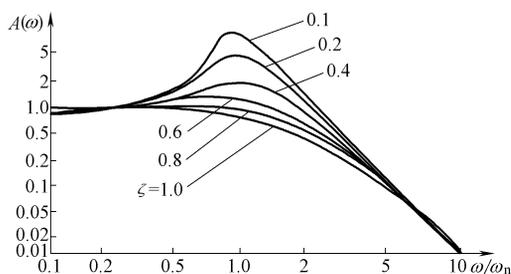


图 2-11 二阶系统的幅频特性

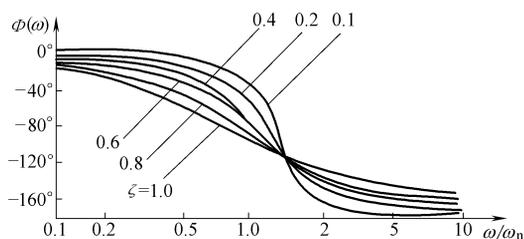


图 2-12 二阶系统的相频特性

根据二阶系统的幅频特性和相频特性, 讨论二阶系统的动态特性。

①  $\zeta$  反映了二阶系统的阻尼特性,  $\omega_n$  反映了二阶系统的固有频率, 两者均为二阶系统的特性参数。

② 当  $\zeta = 1$  时为临界阻尼,  $\zeta < 1$  为欠阻尼,  $\zeta > 1$  为过阻尼; 当  $\zeta \geq 1$  时, 系统表现为一阶系统的特征; 当  $\zeta < 1$  时, 系统有幅值放大失真。



③  $\zeta = 0.6 \sim 0.8$  时,  $A(\omega) = 1$  (不失真) 的频率范围最大,  $\Phi(\omega)$  和  $\omega/\omega_n$  曲线近似于直线, 即系统稳态响应的动态误差较小 ( $\omega = 0 \sim 0.58\omega_n$ ,  $A(\omega)$  误差小于 5%)。

④ 系统的固有频率  $\omega_n$  越大, 保持动态误差在一定范围内的工作频率就越宽。但  $\omega_n$  不能过大, 因为  $\omega_n$  ( $\omega_n^2 = a_0/b_0$ ) 增大时, 系统的灵敏度 ( $b_0/a_0$ ) 会下降。

4) 二阶系统的瞬态响应。用阶跃信号作为测试系统的输入量, 分析二阶系统的瞬态响应特性, 求解二阶系统阶跃响应的方法如同二阶系统的阶跃响应。将阶跃函数求拉氏变换后代入二阶系统的传递函数, 再进行拉氏反变换, 得到二阶系统的阶跃响应函数:

$$y(t) = A \left\{ 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left[ \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \arctan \left( \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \right\} \quad (2-34)$$

二阶系统的阶跃响应特性曲线如图 2-13 所示。

根据二阶系统阶跃响应特性曲线, 分析二阶系统的动态特性如下。

① 当  $\zeta < 1$  时, 二阶系统将出现以  $\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n$  为角频率的正弦衰减振荡;  $\zeta \geq 1$  时不出现振荡。

② 无论  $\zeta$  为何值 (是否产生振荡),  $y(t)$  都需经过一段时间才能达到稳态值。

③  $\zeta = 0.6 \sim 0.8$  时, 到达输入值的时间较短,  $\zeta$  过大或过小, 都会使响应速度下降, 动态误差增大。

④ 当  $\zeta$  一定时,  $\omega_n$  越大, 则响应速度越快。

(4) 测试系统动态特性小结 我们用数学的方法对测试系统的动态特性进行了研究, 各种类型的测试系统动态特性小结如下。

① 零阶系统是最理想的测试系统, 在动态测量时, 它可以不失真地反映被测量。因此, 理想的零阶系统不产生动态误差。实际上, 测量装置的传感器或测量电路中有电容或电感, 或者具有等效的电容或电感作用, 因此, 零阶系统只是在变化较慢的动态测量时才不会产生动态误差; 由于零阶系统中的电容或电感量很小, 使动态误差在允许值之内的可测量频率范围可以很大。

② 一阶系统的传感器和测量电路具有等效的电容作用, 动态测量时产生滞后, 进而产生动态测量误差, 其特征参数是时间常数  $\tau$ 。

③ 二阶系统具有等效的电容、电感作用, 当电感作用不明显时, 二阶系统表现为一阶系统的特征, 而当电感作用明显时, 表现为振荡的特征。二阶系统的特征参数是固有频率  $\omega_n$  和阻尼率  $\zeta$ 。

## (二) 实验方法

在实际工作中, 通常用实验方法来确定某个测试装置的特性。使用实验方法研究测试系统的动态特性的原因有两点:

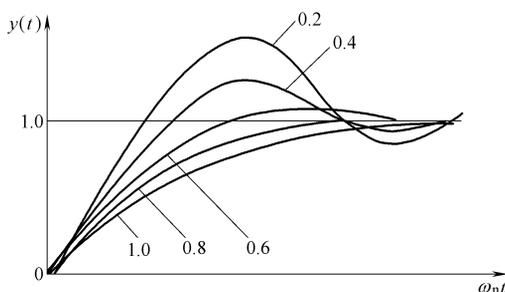


图 2-13 二阶系统的阶跃响应



- ① 具体的测量装置其数学模型和微分方程很难建立，故求解困难。
  - ② 用实验方法可测定和校正某个系统的特性参数，以便于准确测量。
- 与数学研究方法相似，实验方法也可用频率响应法和瞬态响应法求得系统的特征参数。

**1. 频率响应法**

频率响应法是对测试装置输入一个正弦波激励信号，并逐步改变信号的频率，测得相应频率下的输出量（幅值和相位），然后做出输入输出信号幅值比曲线、相位变化曲线，即：

输入  $x(t) = X_i \sin \omega t$ ;

输出  $y(t) = X_o \sin(\omega t + \Phi)$ 。

改变  $\omega$ ，测量输出量的  $X_o$  和  $\Phi$ ，测得系统的幅频特性  $A(\omega)$  和相频特性  $\Phi(\omega)$ 。

(1) 一阶系统 纵坐标  $A(\omega) = X_o/X_i$ ，横坐标  $f = \omega/2\pi$ ，做出幅频特性曲线如图 2-14 所示；纵坐标  $\Phi(\omega)$ ，横坐标  $f = \omega/2\pi$ ，做出相频特性曲线如图 2-15 所示。

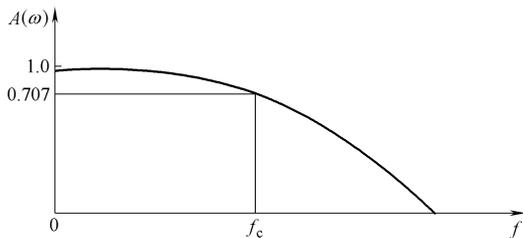


图 2-14 幅频特性曲线

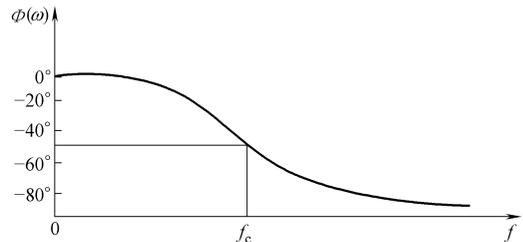


图 2-15 相频特性曲线

根据测得的幅频特性曲线或相频特性曲线可求得系统的特性参数  $\tau$ 。

1) 用幅频特性求解  $\tau$ 。从幅频特性曲线中找到半功率点，即  $A(\omega) = 0.707$  所对应的激励信号频率  $f_c$ ，根据  $\omega\tau = 1$  求解  $\tau$ ：

$$\tau = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2f\pi} \tag{2-35}$$

2) 用相频特性求解  $\tau$ 。从相频特性曲线中找到  $\Phi(\omega) = \pi/4$  所对应的激励信号频率  $f_c$ ，根据  $\omega\tau = 1$  求解  $\tau$ 。

(2) 二阶系统 阻尼率  $\zeta \geq 1$  时，表现出一阶系统的特征，用频率响应法不能求得二阶系统的特征参数。对于  $\zeta < 1$  的二阶系统，可通过下述方法求得系统的固有频率  $\omega_n$  和阻尼率  $\zeta$ 。

纵坐标  $A(\omega) = X_o/X_i$ ，横坐标  $f = \omega/2\pi$ ，作出幅频特性曲线如图 2-16 所示。

从二阶系统幅频特性曲线图上找到  $A_0$  ( $f=0$  时的输出量)、 $A_r$  (在激励信号频率范围内的最大输出量)，根据下式可求得二阶系统的阻尼率  $\zeta$ ：

$$\frac{A_0}{A_r} = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1-\zeta^2}} \tag{2-36}$$

根据下式可求得二阶系统的固有频率  $\omega_n$ ：

$$\omega = \omega_n \sqrt{1-2\zeta^2} \tag{2-37}$$

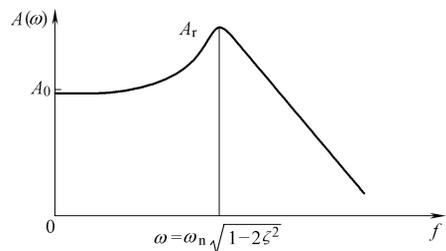


图 2-16 二阶系统幅频特性曲线



## 2. 瞬态响应法

与数学方法一样,实验方法的激励信号也可以用斜坡信号、脉冲信号、阶跃输入信号等,一般采用阶跃函数和脉冲函数。当对测试装置输入阶跃激励信号时,用记录某个或某几个瞬间的输出量 $f(t_i)$ 或记录 $f(t)$ 波形,再计算得到相应的系统特性参数。

(1) 一阶系统 一阶系统特征参数的确定方法如下。

1) 用 $y(t)$ 瞬态值确定 $\tau$ 。当输入阶跃激励信号时,记录 $y(t)$ 曲线,找到 $y(t) = 0.63A$ 所对应的 $t$ 即为 $\tau$ 。

此方法比较简单,可直接记录 $y(t) = 0.63A$ 所对应的时间得到时间常数 $\tau$ 。有时准确记录 $y(t) = 0.63A$ 时的时间较为困难,可通过记录输出量达到稳定值前的某个值时的时间,利用下式求得 $\tau$ :

$$y(t) = A(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2-38)$$

2) 用 $Z-t$ 曲线确定 $\tau$ 。用 $y(t)$ 确定 $\tau$ 未考虑响应的全过程,精度不高,因此,对精度要求较高时,通常用 $Z-t$ 曲线方法。 $Z-t$ 曲线方法如下。

为使计算过程简化,取幅值 $A = 1$ ,一阶系统的输出表达式为

$$y(t) = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

对上式进行简化:

$$1 - y(t) = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

两边取自然对数:

$$\ln[1 - y(t)] = -\frac{t}{\tau}$$

令

$$Z = \ln[1 - y(t)]$$

则

$$Z = -\frac{t}{\tau} \quad (2-39)$$

$Z$ 与 $t$ 呈线性关系,根据系统输出量达到稳定值过程中各典型时间对应的 $y(t)$ 计算得到 $Z$ ,做出 $Z-t$ 曲线,如图2-17所示。从 $Z-t$ 曲线中通过对应的 $\Delta Z$ 、 $\Delta t$ 计算曲线斜率求得 $\tau$ 。

由于考虑了瞬态响应的全过程,提高了实验测量的精度。

(2) 二阶系统 用数学方法分析测试系统的动态特性时,我们已知道如果二阶系统的 $\zeta < 1$ ,二阶系统的阶跃响应将出现以阻尼固有角频率 $\omega_d$  ( $\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ )做正弦衰减振荡(图2-18)。

对式(2-34)求导,并令 $y'(t) = 0$ ,求得各振荡峰值所对应的时间为 $t_p = 0, \pi/\omega_d, 2\pi/\omega_d, \dots$ 将 $t_p = \pi/\omega_d$ 代入式(2-34)求得最大振荡峰值 $M_1$ 与阻尼率 $\zeta$ 的关系为

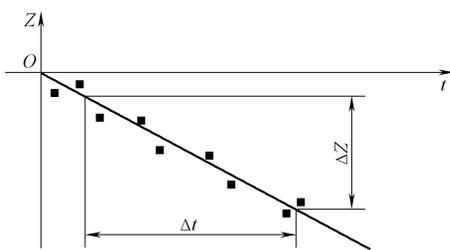


图 2-17  $Z-t$  曲线求 $\tau$

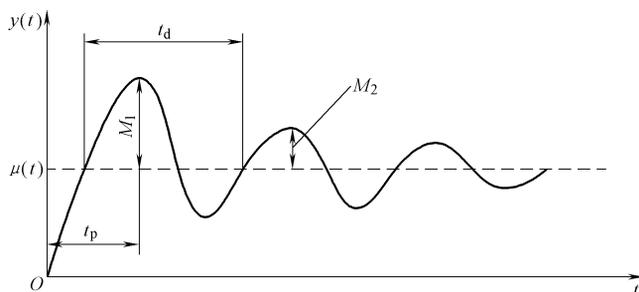


图 2-18 二阶系统阶跃响应测试曲线

$$M_1 = e^{-\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \quad (2-40)$$

于是可根据下式求得阻尼率  $\zeta$  和固有频率  $\omega_n$ ：

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln M_1}\right)^2 + 1}} \quad (2-41)$$

$$\omega_n = \frac{\pi}{\sqrt{1 - \zeta^2} t_p} \quad (2-42)$$

如果可测得较长的瞬态响应过程（获得多个振荡峰值），则还可根据下式求得阻尼率  $\zeta$ ：

$$\delta_n = \ln \frac{M_i}{M_{i+n}} \quad (2-43)$$

$$\zeta = \frac{\delta_n}{\sqrt{\delta_n^2 + 4\pi^2 n^2}} \quad (2-44)$$

式中  $M_i$ ——第  $i$  个峰值；

$n$ ——两个峰值相隔的周期数。

### 思考题

1. 测试系统的基本组成有哪些？各组成部分的作用是什么？
2. 工程测量对测试系统有哪些基本要求？
3. 测量精度是如何定义的？一般所说的可知真值是指哪些？
4. 什么是测量系统的静态特性？表征系统静态特性的参数是哪些？
5. 什么是测量系统的动态特性？分析系统动态特性的基本方法有哪些？
6. 何谓传递函数？传递函数的作用是什么？
7. 何谓零阶系统？它与系统的静态特性有什么异同？
8. 何谓一阶系统？如何表征一阶系统的动态特性？
9. 何谓二阶系统？如何表征二阶系统的动态特性？
10. 何谓测试系统的频率响应和阶跃响应？在系统动态分析中起何作用？
11. 如何通过实验的方法确定测量装置的动态特性参数？

# 第三章

## 测量误差分析与数据处理

### 第一节 误差的基本概念

在第二章中已提到了测量精度。在实际测量过程中，测量精度的高低由测量误差的大小来表示。实际上，任何测量结果都存在误差，换句话说，误差自始至终存在于一切测量过程中，这就是“误差公理”。分析测量误差产生的原因及服从的规律，其目的是在测量实践中能正确地进行测量；合理地设计实验方法、编排实验程序；合理地选择仪器、组织测量过程。对测量数据进行适当的处理，以进一步减小或消除测量误差。

#### 一、误差的表示方法

##### 1. 绝对误差

绝对误差  $\delta$  反映测量值偏离真值的程度，用测量值  $X$  与相对真值  $A$  的差值表示。

$$\delta = X - A \quad (3-1)$$

绝对误差反映了测量值与相对真值差值的大小，但用来衡量测量误差的大小程度并不确切。比如，测量值以 m 计，绝对误差为 0.5mm，测量值以 mm 计，绝对误差为 0.05mm，很明显，绝对误差前者大于后者，但要说测量的误差程度则后者要大于前者。因此，在实际测量中，通常不用绝对误差来衡量误差的大小。

##### 2. 相对误差

相对误差  $\rho_X$  以绝对误差与相对真值的比值表示：

$$\rho_X = \frac{X - A}{A} \times 100\% = \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (3-2)$$

相对误差以实际值做对比，无论测量的量值的大小如何，均能真实地反映测量误差的程度，因而在测量过程中被广泛采用。

##### 3. 引用误差

引用误差  $\rho_Y$  以测量装置的最大测量误差值  $\delta_{\max}$  与量程  $B$  的比值表示：



$$\rho_Y = \frac{\delta_{\max}}{B} \times 100\% \quad (3-3)$$

引用误差用来表示测量装置可能产生的最大相对误差，测量仪表的精度等级就是以引用误差值来表示的。比如，某仪器的引用误差为 0.5%，则该仪器的精度等级为 0.5 级。

从引用误差的定义中可知，测量仪器精度等级高（引用误差值小），并不表示其产生的误差就一定小。下面通过一个例子来加深对精度等级、量程和测量误差的认识。

**例 3-1** 有两台测力仪，其中一台量程为 100kg，精度等级为 2.0；另一台量程为 150kg，精度等级为 1.5。如果测量的力的测量范围为 0~80kg，选用哪个仪器可使误差更小？

**解：**第一台测力仪最大的相对误差为

$$\rho_{X1} = \frac{\delta_{\max1}}{X} \times 100\% = \frac{B_1 \rho_{Y1}}{X} \times 100\% = \frac{100 \times 0.02}{80} \times 100\% = 2.5\%$$

第二台测力仪最大的相对误差为

$$\rho_{X2} = \frac{\delta_{\max2}}{X} \times 100\% = \frac{B_2 \rho_{Y2}}{X} \times 100\% = \frac{150 \times 0.015}{80} \times 100\% = 2.8\%$$

**答：**量程为 100kg、精度等级为 2.0 的测力仪其相对误差较小。测量范围在 0~80kg 时，应该选择它较合适。如果测量范围超过 100kg，那就得选择量程为 150kg、精度等级为 1.5 的测力仪，因为量程为 100kg 的测力仪其量程不够，不能满足测量仪器的基本要求。

由本例可知，选用测量仪器时应综合考虑其测量范围和精度等级。

对于应用于动态测量的测量装置，则还必须考虑其可测的频率范围。

## 二、误差的来源

在测试过程中，产生测量误差的原因比较复杂，测量装置、测量环境、测量方法及测量人员操作等均有可能造成测量误差。

### 1. 工具和测量装置的误差

测量过程中由所用的工具和测量装置本身造成的误差，主要原因有：

- ① 测量装置因加工、安装及调整的偏差所带来的测量误差。
- ② 测量装置输入输出的非线性、内部运动件之间的摩擦和间隙带来的迟滞性等所造成的静态测量误差。
- ③ 测量装置本身所具有的滞后性、阻尼特性和固有频率等造成的动态测量误差。

### 2. 工作条件及环境误差

测量过程中因测试条件和环境因素所造成的误差，比如，在测量过程中，环境的温度、湿度、气压、振动、电场、磁场、气流和辐射等，都有可能对测试设备、对某种被测对象的测量过程造成干扰，并使测量结果产生误差。

### 3. 方法或理论误差

测量方法或测量依据的测量原理本身造成的误差，主要有：

- ① 测量方法不正确而造成的测量误差，即在测量中未按正确的方法安装仪表、未按正确的方法和步骤进行测量，由此而造成测量误差。



② 测量原理本身不正确而造成的测量误差，比如：用压力表测量发动机进气管压力来反映进气流量，但压力还受温度影响，因此，如果不考虑温度影响因素，仅以测得的压力确定进气流量参数，这必将造成测量误差。

#### 4. 人员和操作误差

由测量人员的测量操作原因造成的测量误差，主要有：

① 测量人员生理特性带来的测量误差，比如，测量人员有色盲、近视、斜视和听觉不良等缺陷，就可能对有些测量结果造成影响。

② 测量人员的习惯不同和精神状态的变化，或责任心的松懈等也会带来测量误差。

### 三、误差的分类

根据误差的统计特征，可将测量误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

#### 1. 系统误差

在测量过程中，测量条件及对象相同时，其测量误差的绝对值和符号保持不变，或在测量条件改变时，测量误差也按一定的规律变化，这种误差称之为系统误差。

产生系统误差的主要原因有工具和测量装置的误差、测量条件与环境因素影响、测量方法和测量原理有缺陷、测量人员的操作习惯不当或责任心不强等。

#### 2. 随机误差

在测量过程中，测量的条件及对象均相同，但测量误差的绝对值和符号不可预定（随机的），这种误差称之为随机误差。就随机误差的个体而言无规律可循，但其总体上符合统计规律。

造成随机误差的原因很复杂，不能指明是哪一个具体的原因，总体上讲，随机误差由许多不确定的、未知的、微小的综合因素所造成。

#### 3. 粗大误差（过失误差）

测量误差在数值上明显超出了规定条件下预期的值，这种误差称之为粗大误差。由于粗大误差通常是测量人员粗心大意或操作不当造成的差错，所以也被称为过失误差。

造成粗大误差的主要原因是测量过程中的操作错误、读数和记录出错、计算失误等。

### 四、精度的表示方法

在第二章已提出了精度的定义：测量精度是指测量值偏离真值的程度，即精度高低的衡量标准是误差的大小。在测量过程中，经常会听到有关精度的表示是“这个测量结果很精确”“这台仪器精确度很高”之类的话，实际上，“精确度”包含了正确度和精密度，其另一种表述是“准确度”。

#### 1. 正确度

正确度反映测量结果中系统误差的大小程度，即在规定的条件下，测量中所有系统误差的综合。测量结果的系统误差小，我们就说其正确度高。

#### 2. 精密度

精密度反映测量结果中随机误差的大小程度，即在相同条件下对同一对象进行多次测量



时，各测量值彼此分散的程度。测量结果的随机误差小，我们就说其精密度高。

### 3. 准确度

准确度综合反映系统误差和随机误差的大小程度，即综合反映了测量结果与真值的符合程度。测量结果的系统误差和随机误差均小时，我们才说测量值准确。

图 3-1 可帮助我们更好地理解精度的不同表示方式。图中同心圆的圆心表示真值，黑点表示测量值的分布，曲线表示测量值分布概率密度。图 3-1a 表示测量结果的系统误差很小，即正确度较高，但测量值很分散（随机误差较大）；图 3-1b 表示测量结果的随机误差很小，即精密度较高，但测量值整体偏离度较大（系统误差较大）；图 3-1c 表示测量结果的系统误差与随机误差均很小，即准确度较高。

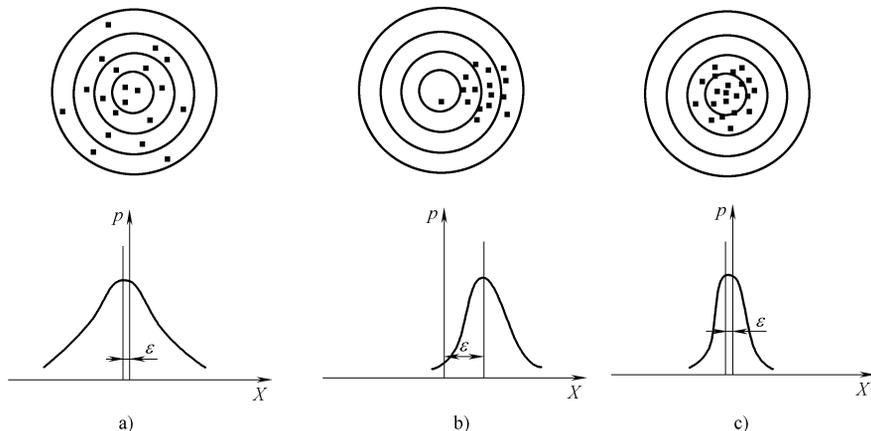


图 3-1 精度的表示方式

a) 正确度高 b) 精密度高 c) 准确度高  
 $p$ —测量值分布概率  $\epsilon$ —系统误差  $X$ —测量值

## 第二节 随机误差的基本特征及计算方法

### 一、随机误差统计直方图

为得到随机误差的统计规律，对某一被测对象进行多次测量，并使测量结果只含有随机误差，然后根据测量数据做出统计直方图，从中了解随机误差统计规律。

#### 1. 随机误差统计直方图的绘制

用测力仪对某测量对象的受力情况重复测量  $n$  次。为保证测量结果只含随机误差，测量在相同的条件下进行。设实际受力  $A = 836\text{N}$ ，测量次数  $n = 150$  次。

(1) 记录测量值 将所有测量值从小到大分成若干个区间，各区间取一个中心值，并将区间号和相应的区间中心值记录于表 3-1 中的第一列和第二列中。本例各区间只有一个测量值，因此表中第二列就是测量值  $x_i$ 。

(2) 计算误差及误差出现频率 用各区间的中心值与实际值相减，得到该区间测量值



的绝对误差  $\delta_i$ ，并统计误差为  $\delta_i$  的次数  $m_i$ 、计算误差为  $\delta_i$  的出现频率  $f_i$ 。本例用各测量值  $x_i$  计算  $\delta_i$  ( $\delta_i = x_i - A$ )，并得到相应的次数  $m_i$  和频率  $f_i$  ( $f_i = m_i/n$ )，分别填入表 3-1 中的第三、第四和第五列中。

表 3-1 测量值与误差记录表

区间号	测量值 $x_i/N$	绝对误差 $\delta_i$	次数 $m_i$	频率 $f_i$ (%)
1	831	-5	1	0.66
2	832	-4	3	2.00
3	833	-3	8	5.33
4	834	-2	18	12.00
5	835	-1	28	18.66
6	836	0	34	22.66
7	837	1	29	19.33
8	838	2	17	11.33
9	839	3	9	6.00
10	840	4	2	1.32
11	841	5	1	0.66

(3) 绘直方图 以绝对误差  $\delta$  为横坐标，分小区间  $\Delta\delta_i$ ，本例  $\delta_i = 1N$ ；以  $y_i = f_i/\Delta\delta_i$  为纵坐标，绘出直方图如图 3-2 所示。

### 2. 随机误差统计直方图分析

分析随机误差统计直方图，我们得到如下几点认识。

① 图中小长方形的面积  $f_i = y_i \times \Delta\delta_i$  为出现  $\delta_i$  的频率，直方图纵坐标  $y_i = f_i/\Delta\delta_i$  则为单位长度的频率（频率密度），反映了测量值随机误差的分布密度。

② 正负误差的频率相近， $\delta_i$  小的频率高，即随机误差呈正态分布。

③ 当测量次数增加 ( $n \uparrow$ )，绝对误差小区间减小 ( $\Delta\delta \downarrow$ )，当  $n \rightarrow \infty$  时， $\Delta\delta \rightarrow 0$ ，直方图的棱角趋于光滑的曲线。

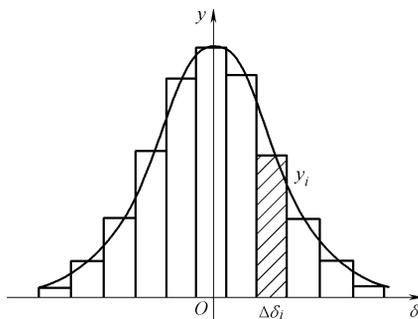


图 3-2 随机误差统计直方图

## 二、随机误差的分布与特征

### 1. 随机误差的分布密度

图 3-2 所示的随机误差统计直方图反映了随机误差呈正态分布，这是随机误差最常见的分布形式。1795 年，高斯 (C. F. Gauss) 根据误差分布曲线推出了概率密度函数：

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (3-4)$$

式中  $\delta$ ——绝对误差；

$\sigma$ ——标准误差。

### 2. 随机误差的特征

根据随机误差的分布密度函数和随机误差统计直方图，可得出正态分布的随机误差具有



如下特性。

(1) 单峰性 单峰性是指绝对值小的随机误差出现的机会多，随机误差绝对值越大，出现的机会就越少。

(2) 对称性 对称性是指随机误差其绝对值相同的正误差和负误差出现的机会相等。

(3) 抵偿性 抵偿性是指随机误差的正误差和负误差具有互相抵销的作用，当测量的次数增加到无限多次时，随机误差的算术平均值趋于零，即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = 0$$

(4) 有界性 在一定的测量条件下，随机误差的绝对值不会超过一定的范围。测量中如果出现误差超界，则该测量值可能包含系统误差或粗大误差。

### 三、标准误差与概率积分

#### 1. 标准误差的定义

标准误差  $\sigma$  是表征随机误差分布特征的重要参数，其定义如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \quad (3-5)$$

式中  $\delta_i$ ——各测量值的绝对误差；

$n$ ——测量次数。

从标准误差的定义中可知， $\sigma$  就是随机误差的均方根值，因而通常将其称为均方根误差。

#### 2. 标准误差与误差分布

不同标准误差的误差分布曲线如图 3-3 所示。

从图中可知， $\sigma$  越小，误差分布曲线越陡，即小误差出现的概率越大，大误差出现的概率则越小。因此， $\sigma$  是反映随机误差分布情况的参数，其值的大小表示了测量的精密度高低。

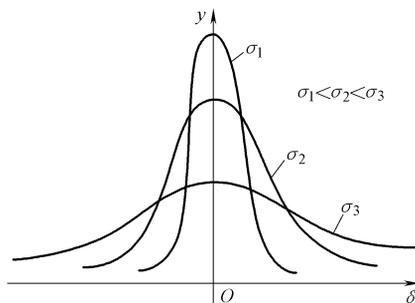


图 3-3 不同标准误差的误差分布曲线

#### 3. 概率积分

由式 (3-4) 概率分布密度函数  $y = f(\delta)$  可知，随机误差落在  $d\delta$  区间的概率为  $f(\delta) d\delta$ ，而随机误差落在  $-\delta \sim +\delta$  之间的概率为

$$P(-\delta, +\delta) = \int_{-\delta}^{+\delta} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (3-6)$$

令

$$t = \frac{\delta}{\sqrt{2}\sigma}$$

代入上式，以变换积分形式：



$$P = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-t^2} dt \quad (3-7)$$

将式 (3-7) 中的  $e^{-t^2}$  按级数展开:

$$e^{-t^2} = 1 - \frac{t^2}{1!} + \frac{t^4}{2!} - \frac{t^6}{3!} + \dots \quad (3-8)$$

将式 (3-8) 代入式 (3-7) 后积分得

$$P = \frac{2}{\pi} \left( t - \frac{t^3}{3 \times 1!} + \frac{t^5}{5 \times 2!} - \frac{t^7}{7 \times 3!} + \dots \right) \quad (3-9)$$

求随机误差落在  $-C\sigma \sim +C\sigma$  之间 (图 3-4) 的概率, 即  $\delta = C\sigma$ , 于是:

$$t = \frac{\delta}{\sqrt{2}\sigma} = \frac{C\sigma}{\sqrt{2}\sigma} = \frac{C}{\sqrt{2}}$$

代入式 (3-9),  $C$  取不同的值, 便可求得各概率值 (表 3-2)。

表 3-2 不同误差范围的误差概率

$C$	1	1.96	2	2.53	3
$P$	0.6827	0.95	0.9545	0.99	0.9973

表 3-2 及图 3-4 中的符号意义:  $C\sigma$  为置信限,  $C$  为置信系数,  $-C\sigma \sim +C\sigma$  为置信区间,  $P$  为置信概率 (置信度)。

从表中可知, 随机误差在  $\pm 1.96\sigma$  区间内的概率为 95%, 即随机误差超过  $\pm 1.96\sigma$  的可能性只有 5%。置信度为 99% 的随机误差的极限为  $\pm 2.53\sigma$ , 置信度为 99.73% 的极限误差为  $\pm 3\sigma$ 。

通常把  $\pm 3\sigma$  作为随机误差的极限误差, 即把绝对值超过  $3\sigma$  的误差排除在随机误差之外, 即误差绝对值大于  $3\sigma$ , 就不是随机误差了 (可能是过失误差或系统误差), 这样的界定置信度为 99.73%, 误判的可能性只有 0.27%。

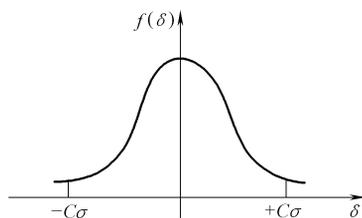


图 3-4 随机误差概率积分

#### 四、随机误差的计算方法

计算随机误差的作用主要体现在三个方面: 其一是通过统计计算得到算术平均值、标准误差等, 以便找到一个与真值更为接近 (误差更小) 的测量值; 其二是估计误差的范围和测量的精密密度; 其三是为查找系统误差和粗大误差提供线索和依据。

##### 1. 算术平均值 ( $\bar{X}$ )

在相同的条件下对同一对象进行多次测量, 将各次测量结果相加并除以测量次数, 便得到算术平均值:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3-10)$$

通常用算术平均值作为测量值, 以减小测量误差。下面我们分析算术平均值为什么比各



次测量值更接近于真值。

某次测量值  $x_i$  的绝对误差为  $\delta_i = x_i - A$ ，即

$$x_i = A + \delta_i$$

$n$  次测量之和为

$$\sum_{i=1}^n x_i = nA + \sum_{i=1}^n \delta_i$$

上式等式两边同除  $n$  得

$$\bar{X} = A + \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} \quad (3-11)$$

而随机误差具有抵偿性，即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = 0$$

因此就有  $n \rightarrow \infty$  时， $\bar{X} \rightarrow A$ 。

从上面的分析得出这样的结论：在同一条件下测量次数越多，各测量值的算术平均值就越接近于真值（误差越小）。因此，采用多次测量，取其均值，是提高测量精度的有效手段。

## 2. 偏差 ( $\nu_i$ )

偏差也称残差，是测量值  $x_i$  与多次测量算术平均值之间的差值：

$$\nu_i = x_i - \bar{X} \quad (3-12)$$

比较绝对误差的表达式：

$$\delta_i = x_i - A$$

可以看出，在测量次数有限 ( $n \neq \infty$ ) 时， $\bar{X} \neq A$ ，所以  $\nu_i \neq \delta_i$ 。

为得到偏差  $\nu_i$  与绝对误差  $\delta_i$  的关系，将式 (3-11) 代入式 (3-12) 得

$$\nu_i = x_i - \left( A + \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} \right) = \delta_i - \bar{\delta} \quad (3-13)$$

从式 (3-12) 可知，每次测量值的偏差与绝对误差之间相差一个绝对误差的平均值。

## 3. 标准误差的计算

从标准误差的定义 (式 3-5) 可知， $\sigma$  等于绝对误差  $\delta$  的均方根值。实际测量中如果真值  $A$  未知，各测量值的绝对误差  $\delta_i$  就不可求，因而  $\sigma$  不能从式 (3-5) 求得。实际测量过程中，通常采用标准法、绝对差法和极差法来计算  $\sigma$ 。

(1) 标准法 标准法也称贝塞尔 (Bessel) 公式，其表达式如下：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n-1}} \quad (3-14)$$

标准法通过可求的测量值偏差  $\nu_i$  计算  $\sigma$ ，用标准法计算  $\sigma$  精度较高，是实际测量中常用



的计算方法。

(2) 绝对差法 绝对差法也称佩特斯 (Peters) 公式。利用标准法计算  $\sigma$  要多次平方求和再开方, 当测量数据较多时, 计算较为复杂。佩特斯公式无需对  $\nu_i$  求平方和, 其表达式为

$$\sigma = \frac{5 \sum |\nu_i|}{4 \sqrt{n(n-1)}} \quad (3-15)$$

绝对差法计算较标准法简单, 在精度要求不高时, 可用绝对差法计算  $\sigma$ 。

(3) 极差法 极差法是在测量值  $x_1, x_2, \dots, x_n$  中找到最大值和最小值  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ , 然后求得极差:

$$R_n = x_{\max} - x_{\min} \quad (3-16)$$

再由下式求得  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{R_n}{d_n} \quad (3-17)$$

式 (3-17) 中的  $d_n$  为极差系数, 由表 3-3 中查得。

极差法不需要像标准法和绝对差法那样要进行统计计算, 计算方法很简单。当测量次数  $n < 10$  时, 极差法计算得到的标准误差  $\sigma$  其精度与标准法相当。

表 3-3 极差系数

$n$	$d_n$	$n$	$d_n$	$n$	$d_n$
1	—	11	3.17	21	3.78
2	1.13	12	3.26	22	3.82
3	1.69	13	3.34	23	3.86
4	2.06	14	3.41	24	3.90
5	2.33	15	3.47	25	3.93
6	2.53	16	3.53	26	3.96
7	2.70	17	3.59	27	4.00
8	2.85	18	3.64	28	4.03
9	2.97	19	3.69	29	4.06
10	3.08	20	3.74	30	4.09

#### 4. 算术平均值的标准误差

如前所述, 当测量次数有限时, 算术平均值与真值不相等 ( $\bar{X} \neq A$ ), 即算术平均值与真值之间有误差  $\Delta$ :

$$\Delta = \bar{X} - A$$

算术平均值的标准误差可由下式求得:

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3-18)$$

从式 (3-18) 可知, 算术平均值的标准误差比每次测量值的标准误差小了  $\sqrt{n}$  倍。

**例 3-2** 用一电阻应变仪检测某轴的受力, 为提高测量精度, 在相同的测量条件下, 重复测量了 10 次, 各次测量值见表 3-4, 试确定测量的最佳值, 并通过计算标准误差确定测量的极限误差和误差范围。



表 3-4 测量值数据

测量值/N	121.0	120.0	120.7	120.3	120.6	121.0	120.8	120.2	120.5	120.9
偏差 $\nu_i$	0.4	-0.6	0.1	-0.3	0	0.4	0.2	-0.4	-0.1	0.3

解:

计算测量值的算术平均值  $\bar{X}$ :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 120.6 \text{ N}$$

计算各测量值的偏差  $\nu_i$ :

$$\nu_i = x_i - \bar{X}$$

各测量值的偏差见表 3-4, 再计算偏差的平方和:

$$\sum_{i=1}^{10} \nu_i^2 = 1.08 \text{ N}$$

计算标准误差  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} \nu_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1.08}{10-1}} = 0.35 \text{ N}$$

计算算术平均值的标准误差  $\sigma_{\bar{X}}$ :

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{10}} = 0.11 \text{ N}$$

计算  $3\sigma$ 、 $3\sigma_{\bar{X}}$

$$3\sigma = 0.35 \times 3 = 1.05 \text{ N}$$

$$3\sigma_{\bar{X}} = 0.11 \times 3 = 0.33 \text{ N}$$

答: 测量的最佳值为  $(120.6 \pm 0.33) \text{ N}$ , 每次测量的标准误差为  $0.35 \text{ N}$ , 算术平均值的标准误差为  $0.11 \text{ N}$ , 每次测量的极限误差为  $1.05 \text{ N}$ , 算术平均值的极限误差为  $0.33 \text{ N}$ , 误差的范围为  $\pm 0.33 \text{ N}$ 。

如果误差范围 ( $3\sigma_{\bar{X}}$ ) 大于允许的最大误差, 即还未达到所要求的测量精度, 可通过增加测量次数, 使  $\sigma_{\bar{X}}$  减小。需要注意的是, 各次测量应在同一条件下进行, 以确保各次测量只含有随机误差。

## 五、误差传递函数

实际测量中, 有时需要通过一个或多个测量参数依据一定的函数关系计算得到所需的结果。比如, 测量圆柱体的体积  $V$ , 可通过测量圆柱体的直径  $D$  和高度  $L$ , 根据圆柱体的计算公式计算得到圆柱体的体积  $V$ 。圆柱体的直径  $D$  和高度  $L$  由直接测量得到, 而对圆柱体的体积来说, 则需要通过圆柱体的计算公式计算得到, 因此, 圆柱体的体积属于间接测量。直接测量值存在误差, 必然会影响间接测量结果。

一个或数个测量参数通过一定的函数关系得到一个计算值, 计算值的误差取决于测量值



的误差和计算值与测量值之间的函数关系。误差传递是指直接测量值的误差通过函数关系的传递，成为计算值的误差；误差传递函数则是表达计算值误差与直接测量值误差之间的函数关系。

### 1. 绝对误差传递函数的一般表达式

设各直接测量参数为  $x_1, x_2, \dots, x_m$ ，计算量为  $y$ ，即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

如直接测量值的绝对误差分别为  $\delta_{x_1}, \delta_{x_2}, \dots, \delta_{x_m}$ ，计算量  $y$  的误差为  $\delta_y$ ，则有

$$y + \delta_y = f(x_1 + \delta_{x_1}, x_2 + \delta_{x_2}, \dots, x_m + \delta_{x_m})$$

上式右边按泰勒级数展开，并略去高阶微量后得

$$y + \delta_y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \delta_{x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \delta_{x_2} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \delta_{x_m}$$

于是得绝对误差传递函数的一般表达式为

$$\delta_y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \delta_{x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \delta_{x_2} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \delta_{x_m} \quad (3-19)$$

### 2. 标准误差传递函数的一般表达式

计算量  $y$  由  $m$  个直接测量参数计算得到，即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

设  $m$  个直接测量参数都进行了  $n$  次测量，且各测量参数的随机误差相互独立，则可推导出标准误差传递函数的一般表达式为

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 \sigma_{x_m}^2} \quad (3-20)$$

### 3. 误差传递函数的实例

(1) 相加函数关系 计算量由两个直接测量值相加得到，其函数关系为

$$y = x_1 + x_2$$

求函数对  $x_1, x_2$  的偏微分：

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = 1, \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} = 1$$

根据式 (3-19) 得： $\delta_y = \delta_{x_1} + \delta_{x_2}$

根据式 (3-20) 得： $\sigma_y = \sqrt{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2}$

(2) 相乘函数关系 计算量由两个直接测量值相乘得到，其函数关系为

$$y = x_1 x_2$$

求函数对  $x_1, x_2$  的偏微分：

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = x_2, \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} = x_1$$

根据式 (3-19) 得：

$$\delta_y = x_2 \delta_{x_1} + x_1 \delta_{x_2}$$

根据式 (3-20) 得：



$$\sigma_y = \sqrt{x_2^2 \sigma_{x1}^2 + x_1^2 \sigma_{x2}^2}$$

(3) 相除函数关系 计算量由两个直接测量值相除得到, 其函数关系为

$$y = x_1/x_2$$

求函数对  $x_1$ 、 $x_2$  的偏微分:

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = \frac{1}{x_2}, \quad \frac{\partial f}{\partial x_2} = -\frac{x_1}{x_2^2}$$

根据式 (3-19) 得:

$$\delta_y = \frac{\delta_{x1}}{x_2} + \frac{x_1}{x_2} \delta_{x2} = \frac{x_2 \delta_{x1} + x_1 \delta_{x2}}{x_2}$$

根据式 (3-20) 得:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{1}{x_2}\right)^2 \sigma_{x1}^2 + \left(-\frac{x_1}{x_2^2}\right)^2 \sigma_{x2}^2} = \frac{1}{x_2} \sqrt{\sigma_{x1}^2 + \left(\frac{x_1}{x_2}\right)^2 \sigma_{x2}^2}$$

(4) 指数函数关系 计算量由直接测量值的乘方或开方求得, 其函数关系为

$$y = ax^b$$

求函数对  $x$  的微分:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = abx^{b-1}$$

根据式 (3-19) 得:

$$\delta_y = abx^{b-1} \delta_x$$

根据式 (3-20) 得:

$$\sigma_y = \sqrt{(abx^{b-1})^2 \sigma_x^2} = abx^{b-1} \sigma_x$$

(5) 对数函数关系 计算量由直接测量值的对数求得, 其函数关系为

$$y = a \ln x$$

求函数对  $x$  的微分:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{a}{x}$$

根据式 (3-19) 得:

$$\delta_y = \frac{a}{x} \delta_x$$

根据式 (3-20) 得:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{a}{x}\right)^2 \sigma_x^2} = \frac{a}{x} \sigma_x$$

### 第三节 系统误差

测量结果除了有不可避免的随机误差外, 可能还包含有系统误差。系统误差不可能用处理随机误差的方法来减小误差和估计误差的大小, 而是需要通过经验和适当的方法找出其规



律和原因，以便在测量过程中减小或消除系统误差，或通过对测量数据进行校正的方法来减小测量误差。

## 一、系统误差的分类

系统误差可分为固定系统误差和未定系统误差两类。

### 1. 固定系统误差

在测量过程中，出现的误差数值和符号都不变的误差即为固定系统误差。固定系统误差也称已定系统误差。

### 2. 未定系统误差

测量过程中出现误差的数值和符号变化不定，或按一定的规律变化的系统误差。未定系统误差按其误差的变化规律大致可分为线性变化系统误差、周期性变化系统误差和复杂规律变化系统误差三种类型。

(1) 线性变化系统误差 测量过程中，随着时间或测量次数的增加，测量值误差累进增大或减小，按线性规律变化，这种误差称之为线性变化系统误差，也称累进变化系统误差。

(2) 周期性变化系统误差 测量过程中，测量值误差忽大忽小，其数值和符号呈周期性变化，这种误差称之为周期性变化系统误差。

(3) 复杂规律变化的系统误差 测量过程中，测量值误差的变化规律比较复杂，比如，包含线性与周期性变化的复合型变化、按指数规律变化、按对数规律变化等。此类不是按简单的线性变化或周期性变化的误差统称为复杂规律变化系统误差。

## 二、系统误差对测量结果的影响

### 1. 固定系统误差的影响

(1) 对算术平均值的影响 设某次测量结果含有固定系统误差  $\varepsilon_0$ ，包含系统误差的测量值为  $x_{0i}$ ，其算术平均值为  $\bar{X}_0$ ；不含系统误差的测量值为  $x_i$ ，算术平均值为  $\bar{X}$ 。于是有

$$x_{01} = x_1 + \varepsilon_0$$

$$x_{02} = x_2 + \varepsilon_0$$

.....

$$x_{0n} = x_n + \varepsilon_0$$

将上述  $n$  式相加：

$$\sum x_{0i} = \sum x_i + n\varepsilon_0$$

上式等号两边同除  $n$ ：

$$\bar{X}_0 = \bar{X} + \varepsilon_0 \quad (3-21)$$

从式 (3-21) 可知，测量结果含有固定系统误差的算术平均值与不含系统误差的算术平均值就差一个固定误差值，如果已知  $\varepsilon_0$ ，则可在测量结果中引入  $-\varepsilon_0$  来消除误差。

(2) 对偏差（残差） $\nu_i$  的影响 根据偏差的定义和式 (3-21) 得

$$\nu_i = x_i - \bar{X} = (x_{0i} - \varepsilon_0) - (\bar{X}_0 - \varepsilon_0) = x_{0i} - \bar{X}_0$$

即

$$\nu_i = \nu_{0i} \quad (3-22)$$



从式 (3-22) 可看出, 固定系统误差  $\varepsilon_0$  对偏差  $\nu_i$  无影响, 故不影响标准误差  $\sigma$ , 即固定系统误差  $\varepsilon_0$  不影响测量结果的精密度。从图 3-5 可见, 有固定系统误差的误差分布只是平移了  $\varepsilon_0$ , 误差分布曲线的形状则没有变化。因此, 用处理随机误差的数学方法不可能发现固定系统误差。

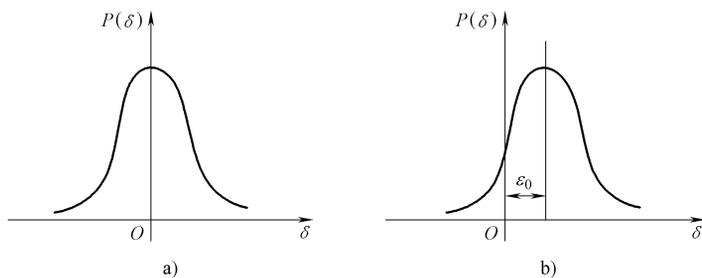


图 3-5 固定系统误差对误差分布的影响

a) 无固定系统误差的误差分布 b) 有固定系统误差的误差分布

## 2. 未定系统误差的影响

(1) 对算术平均值的影响 设有一系列测得值  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$ , 所含有的未定系统误差分别为  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ , 则有

$$x_{01} = x_1 + \varepsilon_1$$

$$x_{02} = x_2 + \varepsilon_2$$

.....

$$x_{0n} = x_n + \varepsilon_n$$

上述  $n$  式相加

$$\sum x_{0i} = \sum x_i + \sum \varepsilon_i$$

再除  $n$

$$\bar{X}_0 = \bar{X} + \bar{\varepsilon} \quad (3-23)$$

从式 (3-21) 可知, 测量结果含有未定系统误差的算术平均值与不含系统误差的算术平均值之间相差一个未定系统误差的平均值。由于  $\varepsilon_i$  不定, 其均值难以确定, 因此无法通过引入一个确定值来消除系统误差对算术平均值的影响。

(2) 对偏差 (残差)  $\nu_i$  的影响 根据偏差的定义及式 (3-23) 得

$$\nu_i = x_i - \bar{X} = (x_{0i} - \varepsilon_i) - (\bar{X}_0 - \bar{\varepsilon}) = x_{0i} - \bar{X}_0 + \bar{\varepsilon} - \varepsilon_i$$

即

$$\nu_i = \nu_{i0} + \bar{\varepsilon} - \varepsilon_i \quad (3-24)$$

由于  $\varepsilon_i \neq \bar{\varepsilon}$ , 所以  $\nu_{0i} \neq \nu_i$

因此, 未定系统误差影响偏差  $\nu_i$  和标准误差  $\sigma$ , 即会影响测量的精密度。

## 三、系统误差的发现

要消除系统误差对测量结果的影响, 首先得发现测量结果有系统误差存在, 然后才能根据系统误差所属的类型分析误差产生的原因, 并采取相应的措施来消除系统误差。



可通过对测量结果观察法和统计核算法来发现是否有系统误差存在。

### 1. 偏差 $\nu_{0i}$ 观察法

偏差观察法有列表观察和绘图观察两种方法。

(1) 列表观察 列表观察是按测量的顺序将各测量值和偏差  $\nu_{0i}$  列于表中，然后观察  $\nu_{0i}$  的变化规律。如果  $\nu_{0i}$  逐渐递增或递减，符号始末相反，则说明有线性系统误差存在；如果  $\nu_{0i}$  符号正负交替变化，则说明有周期性系统误差存在。

**例 3-3** 某温度测量，在相同条件下重复测量 10 次，测量结果见表 3-5，试判断测量有无系统误差存在。

表 3-5 列表观察系统误差

测量序号	测量值 $x_i/^\circ\text{C}$	偏差 $\nu_{0i}/^\circ\text{C}$	测量序号	测量值 $x_i/^\circ\text{C}$	偏差 $\nu_{0i}/^\circ\text{C}$
1	20.06	-0.06	6	20.12	0
2	20.07	-0.05	7	20.14	+0.02
3	20.06	-0.06	8	20.18	+0.06
4	20.08	-0.04	9	20.18	+0.06
5	20.10	-0.02	10	20.21	+0.09

**解：**计算 10 次测量的算术平均值后，求得各测量值的偏差，并列于表中。

**答：**观察表 3-5 中的  $\nu_{0i}$ ，按测量先后次序有规律递增，且符号始末相反，因此，可以判定该温度测量有线性系统误差存在。

(2) 绘图观察 记录各测量值并计算其算术平均值，然后以测量序号  $n$  为横坐标，测量值  $x_i$  为纵坐标，做出算术平均值水平线后，将各测量值依次绘于图中，观察测量值与算术平均值之差的分布情况，做出有无系统误差存在的判断及识别系统误差的类型。

绘图观察法判断系统误差示例如图 3-6 所示。

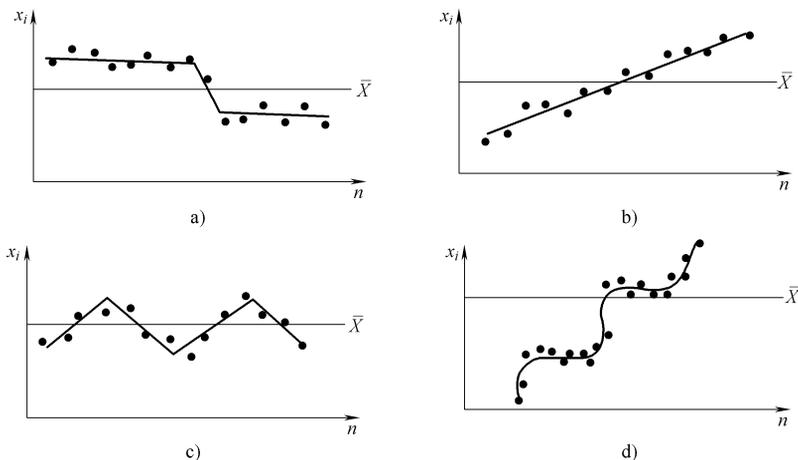


图 3-6 绘图观察法判断系统误差

- a) 有线性系统误差存在    b) 有线性系统误差存在  
c) 有周期性系统误差存在    d) 有周期性和线性系统误差存在



偏差观察法在随机误差比较大时就很难对有无系统误差存在做出准确的判断，需要通过其他更为灵敏的判断方法。

### 2. 偏差核算法

偏差核算法也称马利可夫判据，可判断测量结果中无线性系统误差存在，方法如下。对被测对象进行  $n$  次测量，并计算  $n$  个测量值的算术平均值  $\bar{X}$ ，然后求各测量值的偏差  $\nu_{0i}$ 。将各偏差按测量顺序分成前后两组，并求两组的差值  $\Delta$ ：

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \nu_{0i} - \sum_{i=k+1}^n \nu_{0i} \quad (3-25)$$

$n$  为偶数时， $k = n/2$ ； $n$  为奇数时， $k = (n+1)/2$ 。

如果  $\Delta$  显著不为 0，则测量结果有线性系统误差存在。

下面对马利可夫判据的可信度做一说明。

由式 (3-24) 移项式  $\nu_{0i} = \nu_i + \varepsilon_i - \bar{\varepsilon}$

代入式 (3-25) 得

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \nu_i + \sum_{i=1}^k (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}) - \sum_{i=k+1}^n \nu_i - \sum_{i=k+1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})$$

当  $n$  足够大时

$$\sum_{i=1}^k \nu_i = \sum_{i=k+1}^n \nu_i = 0$$

所以有

$$\Delta = \sum_{i=1}^k (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}) - \sum_{i=k+1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}) \quad (3-26)$$

由式 (3-26) 可知，前后两部分偏差的差值取决于系统误差，而线性系统误差前后两组的符号相反，所以随着测量次数  $n$  的增加， $\Delta$  会随之增大（显著不为 0）。

**例 3-4** 用马利可夫判据判断表 3-5 所列测量结果有无线性系统误差存在。

**解：**本例  $n = 10$ ， $k = 5$ ，于是

$$\sum_{i=1}^5 \nu_{0i} = -0.06 - 0.05 - 0.06 - 0.04 - 0.02 = -0.23$$

$$\sum_{i=5}^{10} \nu_{0i} = 0.00 + 0.02 + 0.06 + 0.06 + 0.09 = +0.23$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^k \nu_{0i} - \sum_{i=k+1}^n \nu_{0i} = -0.23 - (0.23) = -0.46$$

**答：** $\Delta$  显著不为 0，所以，测量结果存在线性系统误差。

### 3. 阿贝-赫梅特判据

阿贝-赫梅特判据用于判断测量结果中是否存在无周期性系统误差，判断方法如下。

计算  $n$  个测量值的偏差和标准误差，并代入下式：

$$\left| \sum_{i=1}^n \nu_i \nu_{i+1} \right| > \sqrt{n-1} \sigma^2 \quad (3-27)$$

如果上式成立，则测量结果有周期性系统误差存在。



**例 3-5** 对某电感测量 10 次，测量结果见表 3-6，试判断该测量有无系统误差。

**表 3-6** 电感量测量结果记录表

测量序号	测量值	偏差 $\nu_i$	$\nu_i^2$	$\nu_i\nu_{i+1}$
1	50.74	-0.06	0.0036	+0.0024
2	50.76	-0.04	0.0016	-0.0008
3	50.82	+0.02	0.0004	+0.0010
4	50.85	+0.05	0.0025	+0.0015
5	50.83	+0.03	0.0009	-0.0018
6	50.74	-0.06	0.0036	+0.0030
7	50.75	-0.05	0.0025	-0.0005
8	50.81	+0.01	0.0001	+0.0005
9	50.85	+0.05	0.0025	+0.0025
10	50.85	+0.05	0.0025	

**解：**计算测量值的算术平均值  $\bar{X}$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 50.80$$

计算各测量值偏差  $\nu_i$ 、 $\nu_i^2$  和  $\nu_i\nu_{i+1}$ ，并将其列于表 3-6 中，于是得

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{10} \nu_i^2}{n-1} = \frac{0.0202}{9-1} = 0.00224$$

$$\left| \sum_{i=1}^9 \nu_i\nu_{i+1} \right| = 0.0078$$

$$\left| \sum_{i=1}^9 \nu_i\nu_{i+1} \right| = 0.0078 > \sqrt{n-1}\sigma^2 = \sqrt{9} \times 0.00224 = 0.0067$$

**答：**根据阿贝-赫梅特判据，可以判定该测量结果有周期性系统误差存在。

#### 四、系统误差的消除

通过观察与分析判断，如果发现测量结果有系统误差存在，就可根据系统误差的类型，分析造成系统误差的原因，并采取适当的措施减小或消除系统误差。

##### 1. 通过调校测量设备和测试方法减小或消除系统误差

(1) 调校设备 发现测量结果有系统误差存在，分析原因如果是测量设备的原因，就需要通过调校设备来减小或消除误差。比如，测量结果总是偏大或偏小，经分析发现是测量装置未调零位，那么通过对测量装置的重新调零就可消除固定系统误差；又如，测量结果在加载和减载时差别过大，分析原因可能是测量装置机械传动机构间隙过大造成的，通过对测量装置间隙的调整就可以减小或消除系统误差。

(2) 调整测量方法 如果系统误差是测量方法、测试环境等原因造成的，就需要通过调整测量方法和测试环境来减小或消除系统误差。比如，测量结果存在线性系统误差，经分析是由于环境温度变化造成的，就可通过温度修正或调整测量环境温度等方法来减小或消除



误差。

### 2. 通过对测量数据的处理来减小或消除系统误差

一些系统误差可用替代法、相消法等方法通过对测量数据的处理来减小或消除误差。

(1) 替代法 替代法是用一个可调的已知量来替代被测量，即测量装置对被测量进行测量后，再对可调的已知量进行测量，使已知量与被测量为同一示值，并以已知量替代被测量。

(2) 相消法 对于固定系统误差，调整测量方法测量两次，使两次系统误差的符号相反，取其平均值来抵销系统误差  $\varepsilon_0$ ，即：

$$\begin{aligned} x_{01} &= x + \varepsilon_0, \quad x_{02} = x - \varepsilon_0 \\ x_{01} + x_{02} &= x + \varepsilon_0 + x - \varepsilon_0 = 2x \end{aligned}$$

所以

$$\frac{x_{01} + x_{02}}{2} \approx x$$

两次测量值  $x_{01}$ 、 $x_{02}$  的平均值  $x$  已不包含固定系统误差了。

对于周期性系统误差，则可取相隔半周期的两次测量值（图 3-7），然后取平均值作为测量结果，即

$$\frac{x_{01} + x_{02}}{2} = \frac{x + \varepsilon_1 + x - \varepsilon_2}{2} = x + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2}$$

相隔半周期的两测量值误差绝对值相近（ $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$ ），所以有

$$\frac{x_{01} + x_{02}}{2} \approx x$$

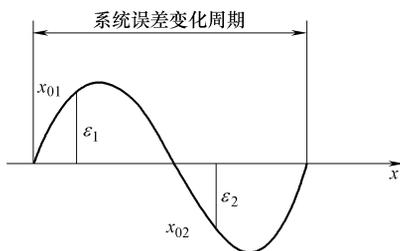


图 3-7 周期性误差相消法取值示意图

## 五、粗大误差的发现与消除

粗大误差的测量值属于异常值，应予以剔除。判断粗大误差必须有充分的依据，通常采用  $3\sigma$  法（拉依达准则），也可用格罗布斯准则来确定某测量值是否属于粗大误差。

### 1. 拉依达准则

当某个测量值的偏差大于 3 倍的标准误差时，即  $\nu_i > 3\sigma$ ，则认为该测量值含有粗大误差，应予以剔除。在前面随机误差的概率分析中我们知道了随机误差在  $\pm 3\sigma$  范围内的概率为 99.73%，也就是说，将偏差大于  $3\sigma$  的测量值认定为粗大误差的误判率只有 0.27%，可见依据拉依达准则判断粗大误差的可信度是很高的。

可以证明，当  $n < 10$  时，测量值的偏差总是在  $3\sigma$  以内。因此， $3\sigma$  法不适用于测量次数小于 10 次的粗大误差判断。

### 2. 格罗布斯准则

如果某个测量值的偏差大于格罗布斯鉴别值  $\Phi(n)$ ，则该测量值含有粗大误差，应予以剔除。 $\Phi(n)$  由下式求得：

$$\Phi(n) = T(n, \alpha) \hat{\sigma}_x \quad (3-28)$$



式中,  $T(n, \alpha)$  为格罗布斯系数, 可根据测量次数  $n$  和显著水平  $\alpha$  由表 3-7 查得;  $\hat{\sigma}_x$  为误差估计值, 一般  $\hat{\sigma}_x = \sigma$ 。

表 3-7 格罗布斯准则鉴定系数  $T(n, \alpha)$

$n \backslash \alpha$	$\alpha$		$n \backslash \alpha$	$\alpha$	
	0.05	0.01		0.05	0.01
3	1.153	1.155	17	2.475	2.785
4	1.463	1.492	18	2.504	2.821
5	1.672	1.749	19	2.532	2.854
6	1.822	1.944	20	2.557	2.884
7	1.938	2.097	21	2.580	2.912
8	2.032	2.321	22	2.603	2.939
9	2.110	2.323	23	2.624	2.963
10	2.176	2.410	24	2.644	2.987
11	2.234	2.485	25	2.663	3.009
12	2.285	2.550	30	2.745	3.103
13	2.331	2.607	35	2.811	3.178
14	2.371	2.659	40	2.866	3.240
15	2.409	2.705	45	2.914	3.292
16	2.443	2.747	50	2.956	3.336

注:  $\alpha = 1 - P$ ,  $P$  为随机误差的置信度 (置信概率)。

利用以上两准则判断某测量值包含粗大误差, 并予以剔除后, 应重新计算  $\bar{X}$ ,  $\sigma$  等, 然后重新检验粗大误差是否存在, 直到粗大误差全部剔除为止。

## 第四节 测试数据的处理及表示方法

### 一、有效数字

测量和计算过程中, 代表测量值和计算结果的有效数字应能保证一定的准确度, 又不会造成不必要的烦琐计算。

#### 1. 有效数字的确定

(1) 测量值有效数字的确定 测量值的有效数字只应保留一位不准确数字。比如, 指针式电压表的最小刻度单位是 1V, 如果指针在两刻度之间时, 我们只能根据指针的位置从 0.1 ~ 0.9V 这 9 个数中选取一位, 因为这 9 个数就是通过估计得到的不准确数字。因此, 用该电压表测量, 如果记录示值为 10.52V, 则数字中的 0.02V 是毫无意义的。

(2) 一列数中“0”是否为有效数的确定 在一列数中的“0”是否为有效数字, 这与其在数列中的位置有关。

非 0 数字前的“0”不作为有效数字, 比如, 数字 0.025 只能算作 2 位有效数字; 非 0 数字中间的“0”则为有效数字, 比如, 数字 0.205 是 3 位有效数字; 非 0 数字后的“0”是否为有效数字则取决于测量装置的最大示值误差  $\delta_{\max}$ , 比如, 数字 2.00 对于  $\delta_{\max} < 0.005$  的为 3 位有效数字, 对于  $\delta_{\max} < 0.05$  的则为 2 位有效数字。



## 2. 有效数字化整规则

有效数字的化整一般遵循这样的规则：有效数字后的第一位逢 6 进 1，逢 4 舍去；逢 5 时，最后一位有效数字为偶数舍去，奇数则进 1。

逢 5 进舍的原则可使化整后的数字为偶数，而化整后引入的误差也不会超过末位有效数字的 0.5。比如，有 27.025、27.035 两个数，取四位有效数字应分别为 27.02、27.04。

## 3. 有效数字运算规则

(1) 加减法 在加减运算时，各数所保留的小数点后的位数，应与各数中小数点后位数最少的数相同，或比最少者多一位，但结果仍与小数点位数最少者相同。

比如，求 105.73、56.3、2.412、0.078 各数之和。

应为： $105.7 + 56.3 + 2.4 + 0.1 = 164.5$

或为： $105.73 + 56.3 + 2.41 + 0.08 = 164.52 \approx 164.5$

(2) 乘除法 在乘除运算时，各数保留的位数，应以有效数字位数最少的数为准，所得的结果的有效数字仍与最少者相同。

比如，求 0.013、2.41、1.732 三个数之积。

应为： $0.013 \times 2.4 \times 1.7 = 0.053$

当有两相近数相减时，则不能简单地按上述规则取有效数字。比如：

$$y = \frac{2}{x_1 - x_2}$$

如果  $x_1 = 2.3831$ 、 $x_2 = 2.3825$ ，取 5 位数时， $y = 3333$ ；取 4 位数时， $y = 2000$ ；取 3 位数时， $y = \infty$ 。可见，两相近数字相减时，数字位应尽量取多。

## 二、测试数据的表示方法

试验中得到的一系列测量数据，需要通过精选、归纳和整理测试数据，用统计及解析的数学方法对数据进行处理和分析，以得到被测量的变化规律，并导出相关参量之间的对应关系，以便从定性或定量两方面揭示测试对象的本质。

用测试数据来反映被测量的变化规律，其表示方法有表格法、图形法和公式法三种。在实际测试过程中，根据需要选择一种数据表示方法，有时则需要两种或三种方法并用。

(1) 表格法 表格法是将一组测试数据按一定的顺序，一一对应地列于表格中，通过一系列的数据表示被测量之间的函数关系。比如，测量某种液体不同温度时的密度，将各温度值按递增或递减的顺序列于表中，将各温度下测得的液体密度值填入与测量温度相对应的位置。两个参数中温度为自变量，密度为因变量。

测试数据表格按其作用与形式分，有测试数据记录表和测试结果分析表两种。

1) 测试数据记录表。测试数据记录表也称原始记录表，用于测试过程中记录测量值。为了便于日后对测试结果的分析处理，以及保障表格数据准确度和可信度，测试数据记录表应注明测试目的、内容摘要、测试日期、环境条件、测试仪器、原始数据、测量数据、结果分析、参加人员和负责人等。

2) 测试结果分析表。测试结果分析表是对测量原始数据进行整理后得到的表格。测试



结果分析表通常只反映测试的结论，简单明了地表示测试结果的几个变量之间的关系。例如，表 3-8 表示了蓄电池电解液密度与电解液结冰时的温度之间的对应关系。

表 3-8 蓄电池电解液密度与冰点的关系

电解液密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.31
冻结温度/°C	-7	-14	-25	-50	-66	-70

用表格法表示测试数据时应注意如下几点。

- ① 数据的写法应整齐统一，数值为 0 时记“0”，无值的格应记“-”。
- ② 同竖行小数点应对齐，数值过大或过小时，应以  $\times 10^n$  表示。
- ③ 有效数字位数取舍适当。

表格法表示数据比较简单、具体，便于比较，但不能对数据进行深入的分析研究，通常是作为图示法和公式法处理数据的基础。

(2) 图示法 图示法通常以表格数据为基础，将测量值按照自变量和因变量的对应关系在适当的坐标系中绘制成几何图形或曲线，最常见的是以描点绘制成的曲线，如图 3-8 所示。

通过图形表示测量值的变化规律，及相关数据之间的函数关系，比表格更加直观，变化趋势（上升或下降）、最大值与最小值以及变化周期等从图中均可以看得很清楚。但图示法不能对数据进行进一步的数学分析。

用图示法表示测试数据时坐标分度应适当，使图形能明显而又确切地反映测量值的变化规律，并能确保从图中读数的精度。

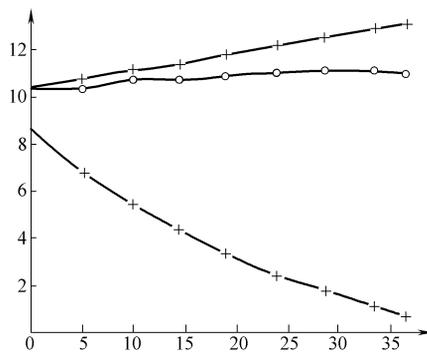


图 3-8 图示法表示测量数据

(3) 公式法 公式法用函数关系式反映测试数据的变化规律，可简明扼要地表达相关数据之间的关系，并可进行必要的数学运算，以研究各测量值之间的关系。

公式法以表格法和图形法为基础，其一般步骤如下。

1) 根据测试结果分析表描绘曲线。对测试数据记录表进行整理，然后以自变量为横坐标，因变量为纵坐标，描点绘出曲线。

2) 确定公式的基本形式。对所描曲线进行分析，根据曲线所表示的自变量与因变量之间的对应关系确定公式的基本形式。

3) 确定公式中的常数。

公式的基本形式确定后，通过拟合的方法确定公式中的常数，以获得反映测试数据变化规律的函数表达式。

4) 检验公式的准确性。检验所得到的公式是否真正反映测试结果，方法如下。

① 将数据（自变量）代入公式计算，并将计算结果与实测值比较，看公式是否能反映测量结果。

② 根据测得的一系列数据计算相关系数，分析被测参量  $x$  和  $y$  的相关性，因为只有  $x$



和  $y$  相关时，确定的公式  $y=f(x)$  才有意义。

③ 进行误差估计，以检验公式和实测值的误差是否在允许的范围之内。

### 三、一元线性与非线性回归

如果被测参量  $x$  和  $y$  存在某种确定的关系，根据其测得的一系列数据，通过数学处理方法得到这两个变量之间的关系式，这一过程称之为拟合，所得到的关系式称之为经验公式或拟合方程。

如果  $x$ 、 $y$  之间是线性关系，则称之为直线拟合或一元线性回归；如果  $x$ 、 $y$  之间是某种非线性关系，则称之为曲线拟合或一元非线性回归。

#### 1. 一元线性回归

设被测参量之间关系为  $y=f(x)$ ，并有一系列测量数据：

$$x_1, x_2, \dots, x_n \text{ 和 } y_1, y_2, \dots, y_n$$

如果两变量之间是线性关系，则可用线性方程表达：

$$y = a_0 + a_1 x \quad (3-29)$$

式 (3-29) 是直线拟合方程的一般表达式，一元线性回归就是根据测试数据确定常数  $a_0$ 、 $a_1$ 。

常数  $a_0$ 、 $a_1$  的确定方法有图解法、端值法、平均法和最小二乘法等多种。

(1) 图解法 根据一系列测量数据在  $x$ 、 $y$  直角坐标系中绘出直线，取得直线的斜率和截距（图 3-9），即可得到常数  $a_0$ 、 $a_1$ ：

$$a_0 = b, a_1 = \pm \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

上式中的  $\Delta X$  和  $\Delta Y$  为按坐标分度取得的绝对值，并非纯几何长度。

当  $\alpha$  为锐角时， $a_1$  取正值； $\alpha$  为钝角时， $a_1$  取负值。

求得  $a_0$  和  $a_1$  后，将其代入式 (3-29) 即得到图解法拟合方程。

(2) 端值法 端值法以测量的起点和终点为依据，取起点  $(x_1, y_1)$  和终点  $(x_n, y_n)$  代入式 (3-29)：

$$y_1 = a_0 + a_1 x_1$$

$$y_n = a_0 + a_1 x_n$$

解方程组得

$$a_1 = \frac{y_n - y_1}{x_n - x_1} \quad (3-30)$$

$$a_0 = y_n - a_1 x_n \quad (3-31)$$

将根据式 (3-30) 和式 (3-31) 求得的  $a_0$  和  $a_1$  代入式 (3-29) 便得到端值法拟合

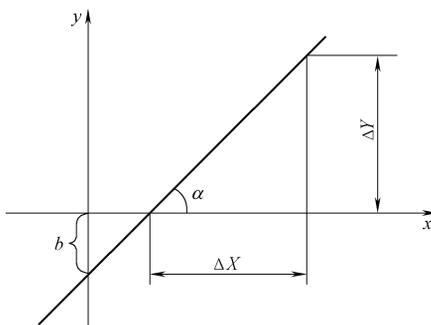


图 3-9 图解法求拟合方程



方程。

端值法比较简单，但拟合直线只取决于始端和终端两个测量点，容易造成拟合方程偏离实际的测量结果。

(3) 平均法 平均法以所有测量值为依据，将全部测量数据均代入式 (3-29)：

$$y_1 = a_0 + a_1 x_1$$

$$y_2 = a_0 + a_1 x_2$$

.....

$$y_n = a_0 + a_1 x_n$$

将上述方程分成两组，分别相加：

$$\sum_{i=1}^k y_i = k a_0 + a_1 \sum_{i=1}^k x_i$$

$$\sum_{i=k+1}^n y_i = (n - k) a_0 + a_1 \sum_{i=k+1}^n x_i$$

$n$  为偶数时， $k = n/2$ ； $n$  为奇数时， $k = (n + 1)/2$ 。

将以上两式分别除  $k$  和  $n - k$  得

$$\bar{Y}_1 = a_0 + a_1 \bar{X}_1$$

$$\bar{Y}_2 = a_0 + a_1 \bar{X}_2$$

解上述方程组得

$$a_1 = \frac{\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1}{\bar{X}_2 - \bar{X}_1} \quad (3-32)$$

$$a_0 = \bar{Y}_1 - a_1 \bar{X}_1 \quad (3-33)$$

将根据式 (3-32) 和式 (3-33) 求得的  $a_0$  和  $a_1$  代入式 (3-29) 即得到平均法拟合方程。

平均法依据所有的测量值得到拟合方程，拟合直线的精度要比端值法高。

(4) 最小二乘法 最小二乘法在线性拟合中的几何意义如图 3-10 所示。当实测值与拟合直线之间的偏差的平方和（图中正方形的面积之和）最小时，拟合的直线最可靠。

最小二乘法的数学表达式为

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \min$$

对于线性方程  $y = a_0 + a_1 x$ ，根据最小二乘法原理，有如下表达式：

$$u = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 = \min \quad (3-34)$$

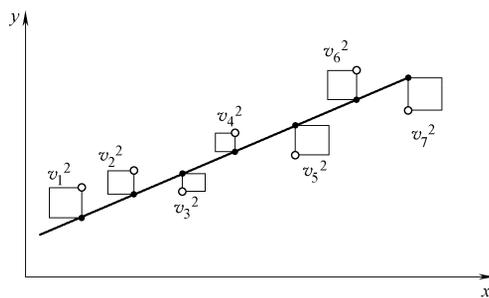


图 3-10 最小二乘法的几何意义



将式 (3-34) 分别对  $a_0$ 、 $a_1$  求偏导数得

$$\frac{\partial \hat{a}}{\partial a_0} = 2(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) - \cdots - 2(y_n - a_0 - a_1 x_n)$$

$$\frac{\partial \hat{a}}{\partial a_1} = 2x_1(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2x_2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) - \cdots - 2x_n(y_n - a_0 - a_1 x_n)$$

为满足式 (3-34) 条件, 令

$$\frac{\partial u}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial a_1} = 0$$

则有

$$-2(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) - \cdots - 2(y_n - a_0 - a_1 x_n) = 0$$

$$-2x_1(y_1 - a_0 - a_1 x_1) - 2x_2(y_2 - a_0 - a_1 x_2) - \cdots - 2x_n(y_n - a_0 - a_1 x_n) = 0$$

整理后得:

$$na_0 + (\sum x_i) a_1 = \sum y_i$$

$$(\sum x_i) a_0 + (\sum x_i^2) a_1 = \sum x_i y_i$$

解上述方程组后得

$$a_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3-35)$$

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3-36)$$

将根据式 (3-35) 和式 (3-36) 求得的  $a_0$ 、 $a_1$  代入  $y = a_0 + a_1 x$  即得到最小二乘法拟合方程。最小二乘法拟合直线的精度最高, 因此应用较为广泛。

## 2. 线性回归的检验

(1) 线性回归的相关性检验 测量参数  $x$ 、 $y$  通过线性回归得到的线性关系是否真实, 除了依靠专业知识和经验判断外, 用数学的方法 (相关分析) 求得相关系数  $r$ , 根据  $r$  可检验两检测参数  $x$ 、 $y$  的线性相关程度。相关系数  $r$  的定义如下:

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} l_{yy}}} = \frac{\sum (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{X})^2 \sum (y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3-37)$$

式中,  $l_{xx} = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}$ ,  $l_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{n}$ ,  $l_{yy} = \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$ 。

相关系数  $r$  的物理意义如图 3-11 所示。如果  $r = \pm 1$ , 则  $y$ 、 $x$  严格线性相关, 测量值都落在拟合直线上, 如图 3-11a、f; 如果  $r = 0$ , 则有两种情况, 一种是  $y$ 、 $x$  之间完全没有相关性, 如图 3-11c, 另一种是  $y$ 、 $x$  之间为非线性关系, 如图 3-11d; 只有当相关系数的绝对值大于最小相关系数  $|r| > r_{\min}$ , 线性回归方程才有意义。测量  $n$  次, 显著水平为 0.05 和 0.01 的最小相关系数见表 3-9。

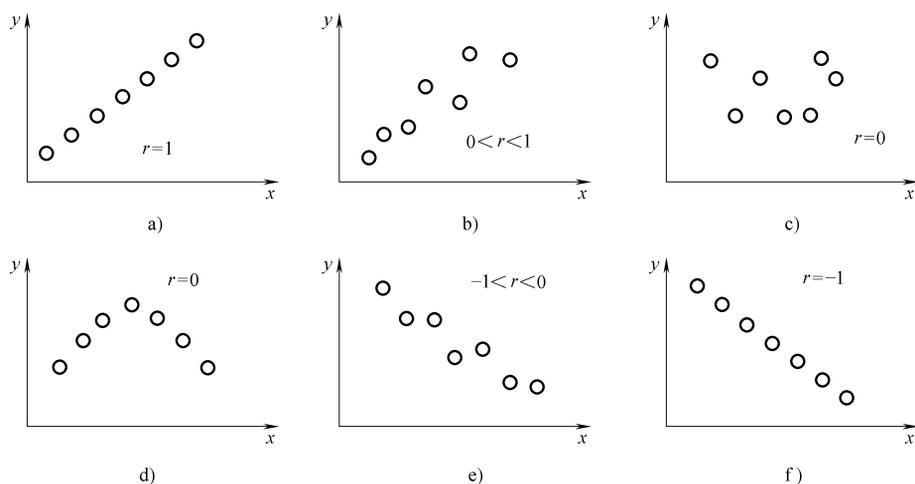


图 3-11 相关系数的物理意义

表 3-9 不同测量次数下的最小相关系数

n-2	α		n-2	α	
	0.05	0.01		0.05	0.01
1	0.997	1.000	21	0.413	0.526
2	0.950	0.990	22	0.404	0.515
3	0.878	0.959	23	0.395	0.505
4	0.811	0.917	24	0.388	0.496
5	0.754	0.874	25	0.381	0.487
6	0.707	0.834	26	0.374	0.478
7	0.666	0.798	27	0.367	0.470
8	0.632	0.765	28	0.361	0.463
9	0.602	0.725	29	0.355	0.456
10	0.576	0.708	30	0.349	0.449
11	0.553	0.684	35	0.325	0.418
12	0.532	0.661	40	0.304	0.393
13	0.514	0.641	45	0.288	0.372
14	0.497	0.623	50	0.273	0.354
15	0.482	0.606	60	0.250	0.325
16	0.468	0.590	70	0.232	0.302
17	0.456	0.575	80	0.217	0.283
18	0.444	0.561	90	0.205	0.267
19	0.433	0.549	100	0.195	0.254
20	0.423	0.537	200	0.138	0.181

注:  $\alpha = 1 - P$ ,  $P$  为随机误差的置信度 (置信概率)。

(2) 拟合方程的精度检验 拟合方程的精度用标准误差  $\sigma_y$  来衡量:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-2}} \quad (3-38)$$

式 (3-38) 中  $v_i$  为拟合偏差 (测量值与计算值的差值):

$$v_i = y_i - (a_0 + a_1 x_i)$$

$\sigma_y$  越小, 说明  $y$ 、 $x$  线性拟合精度越高。



**例 3-6** 对一压力传感器的线性度进行检验，施加已知的压力，用数字电压表读数。为减小测量误差，每个已知压力都测量 5 次，并求得其平均值，见表 3-10。试用端值法、平均法、最小二乘法拟合线性方程，并检验其拟合精度和相关性。

**表 3-10** 压力传感器线性度检验测量值

施加的压力 $x_i/10\text{Pa}$	20	40	60	80	100
电压表读数 $y_i/\text{mV}$ (5 次平均)	10.043	20.003	30.153	40.128	50.072

解：

(1) 端值法 方法如下：

将端点值  $x_1 = 20$ 、 $y_1 = 10.043$  和  $x_5 = 100$ 、 $y_5 = 50.072$  代入式 (3-30)、式 (3-31) 得

$$a_1 = (50.072 - 10.043) / (100 - 20) = 0.50036$$

$$a_0 = 50.072 - 0.50036 \times 100 = 0.036$$

拟合的线性方程为

$$y = 0.036 + 0.5004x$$

计算该拟合方程的标准误差  $\sigma_y$ ，计算值  $y'_i$  和拟合偏差  $\nu_i$  见表 3-11。

**表 3-11** 端值法拟合方程计算值与拟合偏差

计算值 $y'_i$	10.044	20.052	30.060	40.068	50.076
拟合偏差 $\nu_i$	-0.001	-0.049	+0.093	+0.060	-0.004

$$\sum \nu_i^2 = 0.014667$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{0.014667}{5-2}} = 0.0699$$

(2) 平均法 方法如下：

$$\bar{X}_1 = \frac{20+40+60}{3} = 40, \quad \bar{X}_2 = \frac{80+100}{2} = 90$$

$$\bar{Y}_1 = \frac{10.043+20.003+30.153}{3} = 20.066, \quad \bar{Y}_2 = \frac{40.128+50.072}{2} = 45.100$$

将  $\bar{X}_1$ 、 $\bar{X}_2$ 、 $\bar{Y}_1$ 、 $\bar{Y}_2$  代入式 (3-32)、式 (3-33) 得

$$a_1 = (45.100 - 20.066) / (90 - 40) = 0.50068$$

$$a_0 = 20.066 - 0.50068 \times 40 = 0.0388$$

拟合的线性方程为

$$y = 0.0388 + 0.5007x$$

计算该拟合方程的标准误差，计算值  $y'_i$  和拟合偏差  $\nu_i$  见表 3-12。

**表 3-12** 平均法拟合方程计算值与拟合偏差

计算值 $y'_i$	10.053	20.067	30.081	40.095	50.109
拟合偏差 $\nu_i$	-0.010	-0.064	0.072	0.033	-0.037

$$\sum \nu_i^2 = 0.011838$$



$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{0.011838}{5-2}} = 0.063$$

(3) 最小二乘法 方法如下:

$$\sum x_i = 20 + 40 + 60 + 80 + 100 = 300$$

$$\sum y_i = 10.043 + 20.003 + 30.153 + 40.128 + 50.072 = 150.399$$

$$\sum x_i^2 = 20^2 + 40^2 + 60^2 + 80^2 + 100^2 = 22000$$

$$\sum x_i y_i = 20 \times 10.043 + 40 \times 20.003 + 60 \times 30.153 + 80 \times 40.128 + 100 \times 50.072 = 11027.60$$

根据式 (3-35)、式 (3-36) 得

$$a_0 = \frac{150.399 \times 22000 - 300 \times 11027.60}{5 \times 22000 - 300^2} = 0.025$$

$$a_1 = \frac{5 \times 11027.60 - 300 \times 150.399}{5 \times 22000 - 300^2} = 0.5009$$

拟合的线性方程为

$$y = 0.025 + 0.5009x$$

计算该拟合方程的标准误差, 计算值  $y'_i$  和拟合偏差  $\nu_i$  见表 3-13。

表 3-13 最小二乘法拟合方程计算值与拟合偏差

计算值 $y'_i$	10.043	20.061	30.079	40.097	50.115
拟合偏差 $\nu_i$	0	-0.058	0.074	0.031	-0.043

$$\sum \nu_i^2 = 0.01165$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum \nu_i^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{0.01165}{5-2}} = 0.062$$

各拟合方程的标准误差  $\sigma$  比较:

端值法 (0.068) > 平均法 (0.063) > 最小二乘法 (0.062)

相关性检验:

$$\sum x_i = 300, \quad \sum x_i^2 = 22000, \quad (\sum x_i)^2 = 90000$$

$$\sum y_i = 150.399, \quad \sum y_i^2 = 5527.6468, \quad (\sum y_i)^2 = 22619.8592$$

$$l_{xx} = \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/n = 22000 - 90000/5 = 4000$$

$$l_{xy} = \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)/n = 11027.6 - 300 \times 150.399/5 = 2003.66$$

$$l_{yy} = \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2/n = 5527.6468 - 22619.8592/5 = 1003.6750$$

$$r = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx} l_{yy}}} = \frac{2003.66}{\sqrt{4000 \times 1003.6750}} \approx 1$$

答: 从本例可以看出, 用最小二乘法拟合的方程误差最小,  $r \approx 1$ , 因此  $x$ 、 $y$  线性相关, 即测试数据的线性回归是合理的。

### 3. 一元非线性回归

实际测量中,  $x$ 、 $y$  之间并非线性关系, 而是某种曲线关系。对于  $x$ 、 $y$  的非线性关系的



拟合即为一元非线性回归。非线性回归通常用变量代换的方式，将其转换为线性拟合，具体过程如下。

① 根据经验和专业知识选择符合实际的曲线及方程的形式，或根据测试数据绘出的曲线图确定函数的类型。图 3-12 列出了几种典型的参考曲线和方程。

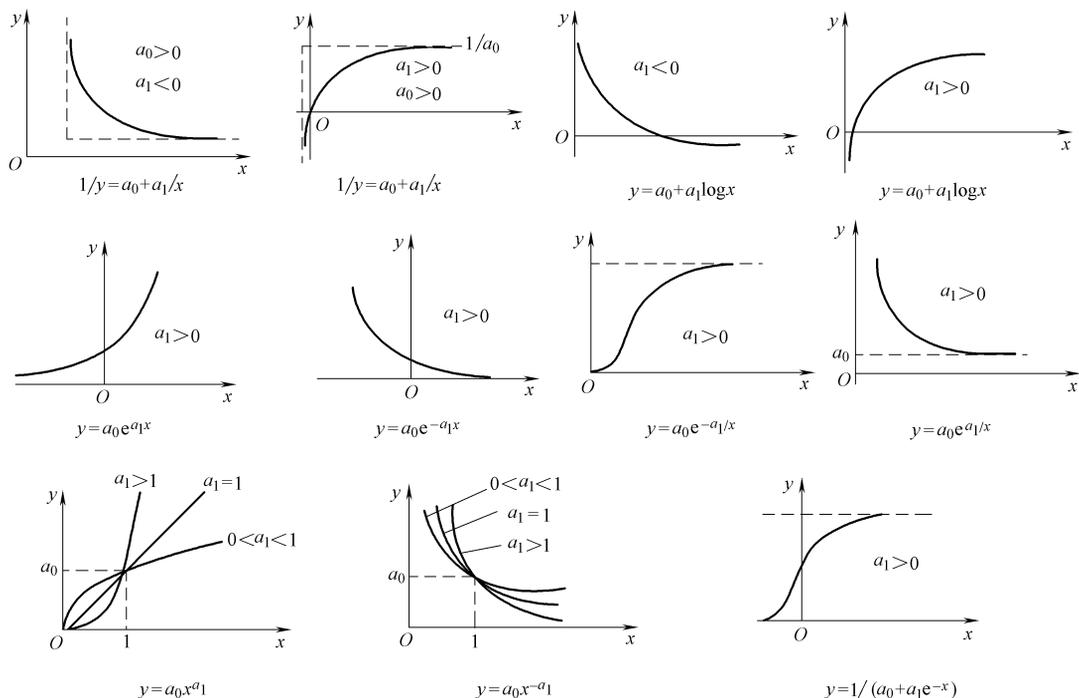


图 3-12 典型参考曲线与方程

- ② 曲线化直，即进行适当的坐标变换，使曲线变为直线，原曲线方程变为直线方程。
- ③ 根据变换后的直线方程，进行一元线性回归，获得方程中的未知量。
- ④ 将方程再变回曲线方程，即为最后获得的与曲线图形对应的曲线方程。

**例 3-7** 测得某变压器油在不同温度下的黏度见表 3-14，试求出黏度  $y_i$  与温度  $x_i$  之间的关系式。

表 3-14 变压器油不同温度下的黏度测量值

温度	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
黏度	4.24	3.51	2.92	2.52	2.20	2.00	1.81	1.70	1.60	1.50	1.43	1.37	1.32	1.29	1.25

**解：**可利用测量数据绘点作图，根据图中的曲线确定黏度  $y_i$  与温度  $x_i$  之间的函数类型。本例根据经验确定黏度  $y_i$  与温度  $x_i$  之间的函数类型为

$$y = a_0 x^{a_1}$$

等式两边取自然对数得

$$\ln y = \ln a_0 + a_1 \ln x$$

令  $y' = \ln y$ ,  $x' = \ln x$ ,  $a'_0 = \ln a_0$



得  $y' = a'_0 + a_1 x'$

上式为直线方程，根据此方程进行线性拟合。

利用最小二乘法求解  $a'_0$ 、 $a_1$ ：

$$a'_0 = \frac{\sum y'_i \sum x_i'^2 - \sum x'_i \sum x'_i y'_i}{n \sum x_i'^2 - (\sum x'_i)^2}$$

$$a_1 = \frac{n \sum x'_i y'_i - \sum x'_i \sum y'_i}{n \sum x_i'^2 - (\sum x'_i)^2}$$

计算  $x'$ 、 $y'$  等，并列于表 3-15 中。

表 3-15 最小二乘法求解  $a'_0$ 、 $a_1$  相关计算数据

序号	$x_i$	$y_i$	$x'_i = \ln x_i$	$y'_i = \ln y_i$	$x_i'^2$	$x'_i y'_i$
1	10	4.24	2.3026	1.4446	5.30190	3.32623
2	15	3.51	2.7081	1.2556	7.33354	3.40027
3	20	2.92	2.9957	1.0716	8.97441	3.21018
4	25	2.52	3.2189	0.9243	10.36116	2.97507
5	30	2.20	3.4012	0.7885	11.56814	2.68170
6	35	2.00	3.5553	0.6931	12.64050	2.46438
7	40	1.81	3.6889	0.5933	13.60783	2.18871
8	45	1.70	3.8067	0.5306	14.49068	2.01992
9	50	1.60	3.9120	0.4700	15.30392	1.83867
10	55	1.50	4.0073	0.4055	16.05872	1.62483
11	60	1.43	4.0943	0.3577	16.76366	1.46444
12	65	1.37	4.1744	0.3148	17.42551	1.31414
13	70	1.32	4.2485	0.2776	18.04971	1.17952
14	75	1.29	4.3175	0.2546	18.64070	1.09941
15	80	1.25	4.3820	0.2231	19.20216	0.97782
$\Sigma$	675	30.66	54.8134	9.6049	205.72254	31.76529

于是：

$$a'_0 = \frac{9.6049 \times 205.7225 - 54.8134 \times 31.76529}{15 \times 205.72254 - 54.8134^2} = 2.8868$$

$$a_1 = \frac{15 \times 31.76529 - 54.8134 \times 9.6049}{15 \times 205.72254 - 54.8134^2} = -0.6148$$

代入后得直线方程：

$$\ln y = 2.8868 - 0.6148 \ln x$$

换回原来的函数形式：

$$y = e^{2.8868} x^{-0.6148}$$

$$y = 17.936x^{-0.6148}$$

### 思考题

1. 研究误差的目的是什么？有哪些因素会引起测量误差？



2. 绝对误差、相对误差、引用误差是如何定义的? 如何根据仪器的精度等级和测量范围选择适当的仪器?
3. 测量中可能产生的误差有哪些类型? 各种误差的特点和产生的原因有哪些?
4. 服从正态分布的随机误差具有哪些特点?
5. 为什么可用算术平均值作为测量的最佳值? 其测量条件是什么?
6. 标准误差是如何定义的? 标准误差在测量与误差分析中有何意义?
7. 偏差与绝对误差有何不同? 如何通过多次测量和计算得到最可靠的测量值并估计测量误差范围?
8. 系统误差对测量结果有什么影响? 如何发现和消除系统误差?
9. 如何从测量数据中发现粗大误差? 如何将测量结果中的粗大误差消除?
10. 何谓误差传递和误差传递函数? 绝对误差和标准误差的传递函数的形式如何?
11. 何为有效数字? 测量及数据处理过程中如何确定、化整和运算有效数字?
12. 测量数据的表示方法有哪些? 各有什么特点?
13. 一元线性回归的作用是什么? 如何检验一元线性回归的真实性和拟合精度?
14. 两被测参量值呈非线性关系(一元非线性关系)时, 如何根据测量数据建立拟合方程(一元非线性回归)?

# 第四章

## 信号分析基础

### 第一节 信号分析概述

#### 一、信号分析的作用与方式

##### 1. 信号分析的作用

动态测量过程中，被测物理量瞬间变化或连续不断变化，测试装置通过传感器获得的是随时间变化的动态电信号。经信号调理电路处理成易于显示和记录的电信号后，通过适当的变换，以显现动态信号的构成及特征，并从中获得所需的信息，这就是信号分析的作用。

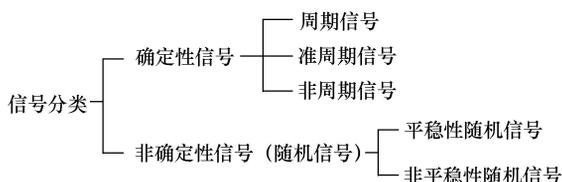
信号处理与分析是测试技术的重要组成部分。信号处理是信号分析的基础，信号处理过程可能会使信号的结构和成分改变。比如，经滤波电路滤波后的信号其频率成分会发生改变，放大电路会改变信号的幅值，整形调理电路则会改变信号的波形。信号分析则是对某个确定的信号或不确定的信号通过某种方法改变信号的表达形式，以揭示信号的构成、特征等信息。信号分析过程不改变信号的结构与成分，却可以使我们更好地认识被测对象的本质，从测量信号中获得更多的信息。

##### 2. 信号分析的方式

信号分析有多种方式，不同的分析方式可从信号中获取不同的信息。以时间作为自变量的为时域分析，以频率作为自变量的为频域分析；按分析的量值不同分，有信号的幅值分析、相位分析、功率分析和能量分析等；按信号分析的作用或目的不同分，有信号的相关分析、频谱分析、概率密度分析和能量密度分析等。

#### 二、测试信号的分类

动态测量中，所获信号可分为确定性信号和非确定性信号两大类，这两类信号又有不同的形式：



在实际测量过程中，所获得的信号可能是多种形式信号混合在一起的复合信号。下面对各类信号做一说明。

### 1. 确定性信号

确定性信号是指信号的变化具有某种规律，它可以用明确的数学关系式描述。确定性信号又可分为周期信号、准周期信号和非周期信号。

(1) 周期信号 周期信号是指在一定的时间里重复出现的信号，它满足如下条件：

$$x(t) = x(t + nT) \quad (4-1)$$

式中  $T$ ——周期；

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

周期信号可分为基本周期信号和复合周期信号。基本周期信号是指按正弦规律变化的信号，可由如下数学关系描述：

$$x(t) = A \sin \omega t$$

式中  $A$ ——信号的幅值；

$\omega$ ——信号的角频率。

复合周期信号由两个或两个以上不同频率的正弦信号组合而成，各正弦信号的周期比为有理数。复合周期信号的变化规律有多种形式，如方波周期信号、三角波周期信号等。

(2) 准周期信号 准周期信号也是由两个或两个以上的正弦信号组合而成的，但各正弦信号周期之比为非有理数。比如， $\sin \omega t$  与  $\sin \sqrt{2} \omega t$ ，两信号的周期之比为  $1/\sqrt{2}$ ，是非有理数，所以由这两个信号组合而成的复合信号为准周期信号，信号不再重复出现。

(3) 非周期信号 除准周期信号和周期信号以外的非周期信号也被称为瞬变信号，信号只是在某段时间里存在，或瞬间变化，不会重复出现。比如，按指数规律衰减的振荡信号、各种波形的单脉冲信号等，其信号值相对时间均有明确的函数关系，但不重复出现。

### 2. 非确定性信号

非确定性信号也被称为随机信号，信号的出现和变化不确定，因而不能用明确的数学关系式描述，但符合一定的统计规律。非确定性信号需要通过统计的方式来描述其特征，根据随机信号的统计特征不同，可将其分为平稳性随机信号和非平稳性随机信号。

(1) 平稳性随机信号 平稳性随机信号的统计参数（如平均值、均方根值、概率密度函数等）不随时间而变，即不管在什么时间段采样，所获得的信号统计参数是相同的。

(2) 非平稳性随机信号 非平稳性随机信号的统计参数随时间而变，即在不同的时间段采样，其信号的统计参数会有所不同。



## 第二节 周期信号分析

### 一、周期信号的傅里叶级数

#### 1. 周期信号的傅里叶级数展开

设  $x(t)$  为周期信号, 其周期为  $T$ 。于是, 信号的频率为  $f=1/T$ , 角频率  $\omega=2\pi f$ 。将  $x(t)$  用傅里叶级数展开:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (4-2)$$

式中:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

将式 4-2 变换形式

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \left( \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \cos n\omega_0 t + \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \sin n\omega_0 t \right)$$

$a_n$  和  $b_n$  的几何意义如图 4-1 所示, 于是有

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\cos \phi = \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}$$

$$\sin \phi = \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}}$$

$$\phi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n}$$

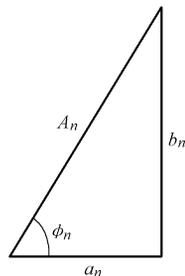


图 4-1  $a_n$  和  $b_n$  的几何意义

于是式 (4-2) 可写成:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n (\cos \phi_n \cos n\omega_0 t + \sin \phi_n \sin n\omega_0 t) \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n (\cos n\omega_0 t - \phi_n) \quad (n=1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (4-3)$$

式 (4-3) 为周期信号傅里叶级数展开的实数形式。从该式可以更清楚地看出, 任一周期信号都可分解为均值与无穷个正弦信号的和。其中:  $a_0/2$  为均值, 它代表了信号的直流分量;  $A_n \cos(n\omega_0 t - \phi_n)$  代表信号的基波;  $A_n \cos(n\omega_0 t - \phi_n)$  则为信号的谐波 ( $n=2, 3, 4, \dots$ )。



式 (4-3) 实际上是周期信号  $x(t)$  在频域中的描述, 其中  $A_n$  表示各频率分量的幅值, 因此, 序列  $A_n (n = 1, 2, 3 \dots)$  为周期信号  $x(t)$  的幅值频谱 (图 4-2), 而序列  $\phi_n (n = 1, 2, 3 \dots)$  为周期信号  $x(t)$  的相位频谱。周期信号的频谱是以  $\omega_0$  成倍数的离散谱。

**例 4-1** 求图 4-3 所示周期方波信号的傅里叶级数。

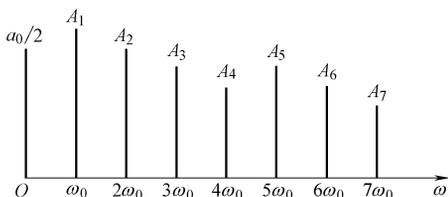


图 4-2 周期信号的幅值频谱示例

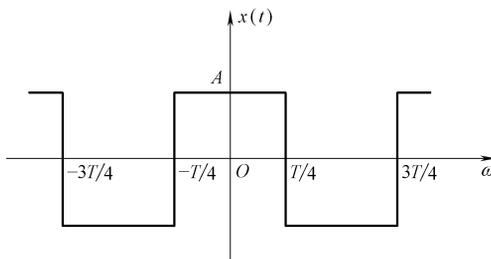


图 4-3 周期方波信号

**解:** 一个周期内 ( $-T/2 \sim T/2$ ) 的方波的数学表达式如下:

$$x(t) = \begin{cases} -A & -T/2 < t < -T/4 \\ A & -T/4 < t < T/4 \\ -A & T/4 < t < T/2 \end{cases}$$

偶函数一周期的积分为 0, 于是:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt = 0$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt = 0$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{-T/4} -A \cos n\omega_0 t dt + \frac{2}{T} \int_{-T/4}^{T/4} A \cos n\omega_0 t dt \\ &\quad + \frac{2}{T} \int_{T/4}^{T/2} -A \cos n\omega_0 t dt \\ &= \frac{4A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) = \frac{4A}{n\pi} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \quad (n = 1, 3, 5 \dots) \end{aligned}$$

代入式 (4-3) 得

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left( \cos\omega_0 t - \frac{1}{3} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t - \dots \right)$$

根据上式得到周期性方波信号的幅值频谱如图 4-4 所示。将所有谐波分量相加, 就是理论上的方波信号。方波信号的级数收敛较慢, 因而需要取较多项才能接近于方波。图 4-5 是取前 5 项和前 7 项的图形, 近似程度还不够高。

从上例可知, 周期信号谐波的幅度总趋势是随谐波次数的增高而减小, 信号的能量主要集中在低频分量, 高次谐波所占能量很少, 可忽略不计。取多少项 (测量中包含的高次谐波分量) 与允许的误差有关。工程上提出了一个信号频带宽度的概念, 将在信号频谱中幅值下降到最大幅值的 1/10 时所对应的频率作为信号的频宽。

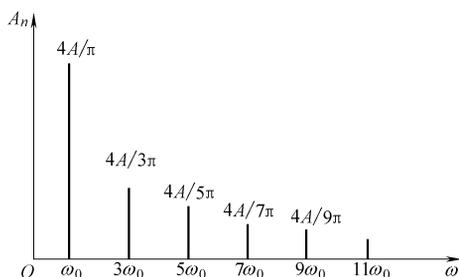


图 4-4 周期方波信号的幅值频谱

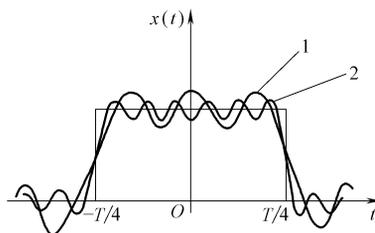


图 4-5 取前 5 项和前 7 项的方波图

1—前 5 项近似方波 2—前 7 项近似方波

在选择测试仪器时, 测量仪器的工作(可测)频率范围必须大于被测信号的频宽, 否则, 测试仪器不能反映被测信号的高频成分, 这将会引起信号失真, 造成较大的测量误差。

## 2. 周期信号傅里叶级数的复数形式

为便于数学运算, 通常将周期信号的傅里叶级数以复数的形式表示。根据欧拉公式  $e^{\pm j\theta} = \cos\theta \pm j\sin\theta$  可得

$$\sin n\omega_0 t = \frac{e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}}{2j}, \quad \cos n\omega_0 t = \frac{e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}}{2}$$

于是周期信号  $x(t)$  的傅氏级数展开可写成如下形式:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots) \quad (4-4)$$

式中:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

$C_n$  ( $|C_n| e^{j\phi_n}$ ) 为复数傅里叶系数, 它的模  $|C_n|$  和相角  $\phi_n$  分别表示信号  $n$  次谐波的幅值和相位, 即

$$|C_n| = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{A_n}{2}$$

$$\phi_n = \arctan \frac{\text{Im}[C_n]}{\text{Re}[C_n]} = \arctan \frac{b_n}{a_n}$$

## 3. 奇偶周期函数的傅氏级数特点

若  $x(t)$  为时间  $t$  的周期性偶函数, 即  $x(t) = x(-t)$ , 则  $b_n = 0$ ,  $x(t)$  的傅氏级数中只有余弦项和常数项, 其中:

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt$$

若  $x(t)$  为时间  $t$  的周期性奇函数, 即  $x(t) = -x(-t)$ , 则  $a_0 = 0$ ,  $a_n = 0$ ,  $x(t)$  的傅氏级数中只有正弦项, 其中:

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt$$



## 二、周期信号的数字特征（平均值、均方值、相关函数）

### 1. 平均值 $\bar{X}$

信号  $x(t)$  的平均值定义如下：

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = \frac{1}{2} a_0 = C_0 \quad (4-5)$$

平均值是信号在一个周期内对时间的平均，它反映了信号的直流分量。在时间域中，信号的交流分量（基波与谐波）以  $\bar{X}$  为中心值上下振荡。

### 2. 均方值 $\bar{X}^2$

信号  $x(t)$  的均方值定义如下：

$$\bar{X}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (4-6)$$

根据电功率的定义  $I^2 R$ 、 $U^2/R$ ，可以将  $I^2$ 、 $U^2$  看成单位电阻上的功率，因此， $x^2(t)$  是反映在  $t$  时刻信号的能量。而均方值  $\bar{X}^2$  实际上反映了信号在时域中的平均功率。

将式 (4-6) 进行适当变换，以获得信号在频域中的能量表达方式：

$$\begin{aligned} \bar{X}^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j\omega_0 t} dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{j\omega_0 t} dt \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n C_{-n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2 \quad (C_n = C_{-n}) \end{aligned}$$

即

$$\bar{X}^2 = C_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} |C_n|^2 = \frac{a_0^2}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^2 \quad (n=1, 2, 3 \dots) \quad (4-7)$$

式 (4-7) 表示信号在频域中的能量分布。其中序列  $|C_n|^2$  ( $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ ) 和  $A_n^2$  ( $n=1, 2, 3 \dots$ ) 表示周期信号  $x(t)$  的实数和复数功率频谱，如图 4-6 所示。

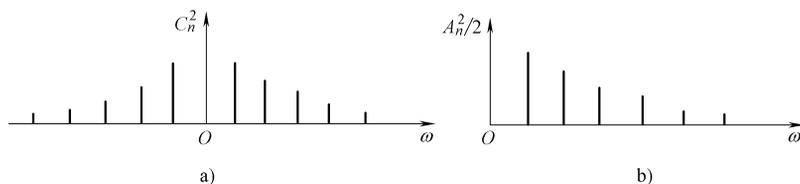


图 4-6 周期信号的功率频谱

a) 复数功率频谱 b) 实数功率频谱

### 3. 相关函数

相关函数是描述两个周期信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的相似程度，两周期信号的互相关函数定义如下：

$$R_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t) x_2(t + \tau) dt \quad (4-8)$$

式中  $\tau$ ——在时间域  $(-\infty, \infty)$  中变化，但与  $t$  无关的连续时间变量，称为时间位移，



如图 4-7 所示。

将周期函数的傅里叶级数代入式 (4-8) 可得

$$\begin{aligned}
 R_{12}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{n2} e^{jn\omega_0(t+\tau)} dt \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{n2} e^{jn\omega_0\tau} \frac{1}{T} \int_0^T x_1(t) e^{jn\omega_0 t} dt \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{n2} \bar{C}_{n1} e^{jn\omega_0\tau} \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C'_n e^{jn\omega_0\tau}
 \end{aligned}$$

(4-9)

式 (4-9) 表示周期信号的互相关函数也为周期函数, 其中  $\bar{C}_{n1}$  是  $C_{n1}$  的共轭复数, 而  $C'_n = C_{n2} \bar{C}_{n1}$ , 其幅值随  $\tau$  值而变, 与互相关函数  $R_{12}(\tau)$  有如下关系:

$$C'_n = \frac{1}{T} \int_0^T R_{12}(\tau) e^{-jn\omega_0\tau} d\tau$$

即, 互相关系数  $C'_n$  由互相关函数的傅里叶级数变换求得。如果  $x_1(t) = x_2(t) = x(t)$ , 则变为自相关函数  $R(\tau)$ :

$$\begin{aligned}
 R(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t+\tau) dt \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \bar{C}_n e^{jn\omega_0\tau} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2 e^{jn\omega_0\tau} \\
 &= C_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} |C_n|^2 \cos n\omega_0\tau
 \end{aligned}$$

(4-10)

当  $\tau=0$  时,  $R(0) = \bar{X}^2$ , 是  $R(\tau)$  的最大值。

自相关函数可用于区别信号的类型。当复合信号中有周期成分时, 其自相关函数有明显的周期性; 如果复合信号无周期信号成分, 则其自相关函数会很快衰减至 0。

### 第三节 非周期信号分析

#### 一、非周期信号的傅里叶积分

##### 1. 非周期信号的傅里叶变换

非周期信号不重复出现, 可将其理解成周期为无穷大的“周期信号”, 这样, 便可沿用周期信号的分析思路来分析非周期信号。

改变周期信号的傅里叶级数的表达形式:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \right] e^{jn\omega_0 t}$$

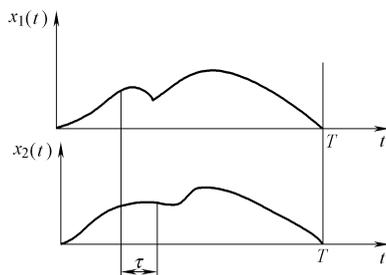


图 4-7 相交函数的时间位移



$$= \frac{\omega_0}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\omega_0 t} \left[ \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \right]$$

当  $T \rightarrow \infty$  时, 频率间隔  $\Delta\omega(\omega_0) \rightarrow d\omega$ ;  $n\omega_0$  (离散)  $\rightarrow \omega$  (连续);  $\Sigma \rightarrow \int$   
于是有

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \right] e^{j\omega t} d\omega$$

将方括号部分写成  $X(j\omega)$ , 就有

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4-11)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4-12)$$

式 (4-11) 为信号  $x(t)$  的傅里叶积分变换, 式 (4-12) 为傅里叶积分反变换。即  $x(t)$  与  $X(\omega)$  互成傅里叶变换对:

$$x(t) \xrightleftharpoons[\text{傅里叶反变换}]{\text{傅里叶变换}} X(\omega)$$

一般情况下,  $X(\omega)$  是一个复数, 表示为

$$X(\omega) = \text{Re}(\omega) + j\text{Im}(\omega) = |X(\omega)| e^{j\phi(\omega)}$$

其中:

$$\text{Re}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos\omega t dt$$

$$\text{Im}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin\omega t dt$$

$$|X(\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}$$

$$\phi(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)}$$

$|X(\omega)|$  为信号  $x(t)$  的幅值谱密度,  $\phi(\omega)$  为信号  $x(t)$  的相位谱密度。

## 2. 周期信号分析与非周期信号分析对比

为更好地理解周期信号和非周期信号的不同特点和掌握信号分析的基本方法, 将它们进行一一对比, 并列于表 4-1。

表 4-1 周期信号与非周期信号对比

	周期信号	非周期信号
信号分析工具	傅里叶级数	傅里叶积分
数学表达形式	$\Sigma$	$\int$
频谱图	离散频谱	连续频谱
频率成分	只包含 $n\omega_0$ 频率成分	包含所有的频率成分 $\omega$
对应的傅里叶系数	$a_n$	$\text{Re}(\omega)$
	$b_n$	$\text{Im}(\omega)$
	$A_n(C_n)$	$X(\omega)$



## 二、非周期信号的能量谱密度和相关函数

### 1. 非周期信号的能量谱密度函数

对于任意一个信号  $x(t)$ ，将其乘积作为它的瞬时功率，那么信号的总能量可表示为

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt$$

根据傅里叶积分反变换式 (4-12) 有

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)|^2 d\omega$$

设：
$$E_x(\omega) = |X(\omega)|^2$$

$E_x(\omega)$  为能量谱密度函数，它表示单位频率中所具有的能量，在频域中， $\omega$  连续变化，信号  $x(t)$  的能量谱密度是一条连续变化的曲线。

### 2. 非周期信号的相关函数

对于非周期信号  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ ，其互相关函数  $R_{12}(\tau)$  定义如下：

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t+\tau) dt \quad (4-13)$$

如果  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  的傅里叶变换分别为  $X_1(\omega)$ 、 $X_2(\omega)$ ，则有

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t+\tau) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{X_1(\omega)} X_2(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

令  $E_{12}(\omega) = \overline{X_1(\omega)} X_2(\omega)$

则有

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t)x_2(t+\tau) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{12}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega$$

$E_{12}(\omega)$  为信号  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  的互能量谱密度函数，它与互相关函数  $R_{12}(\tau)$  成傅里叶变换对：

$$R_{12}(\tau) \xrightleftharpoons[\text{傅里叶反变换}]{\text{傅里叶变换}} E_{12}(j\omega)$$

如果  $x_1(t) = x_2(t) = x(t)$ ，则

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t+\tau) dt$$

为信号  $x(t)$  的自相关函数，且

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (4-14)$$

自相关函数  $R_x(\tau)$  与能量谱密度函数  $E_x(\omega)$  也组成傅里叶变换对：

$$R_x(\tau) \xrightleftharpoons[\text{傅里叶反变换}]{\text{傅里叶变换}} E_x(\omega)$$

当  $\tau = 0$  时，

$$R_x(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_x(\omega) d\omega$$

$R_x(0)$  等于信号  $x(t)$  的总能量。



## 第四节 随机信号分析

### 一、随机信号的基本概念

随机信号指不能用精确的数学关系式描述的信号，因此，不能采用傅里叶变换的分析方法，但它的变化服从统计规律，可以用概率统计特性来描述。为掌握随机信号的分析方法，必须先了解随机信号的一些基本概念。

#### 1. 样本函数

对随机信号进行一段时间的采样记录，获得一个时间历程  $x_i(t)$  称之为样本函数。用曲线图形方式记录的若干个样本函数如图 4-8 所示。

#### 2. 总体

在同样的条件下，对随机信号重复观测，得到互不相同的各样本函数  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$ ,  $\dots$ ,  $x_i(t)$  的全体称为总体。

#### 3. 总体平均

随机信号各样本在某一时刻  $t_k$  (图 4-8) 的值相加，再除以样本函数的个数  $N$  得到的值称之为总体平均。随机信号的总体平均数学表达式如下：

$$\mu_x(t_k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_k) \quad (4-15)$$

#### 4. 随机信号的相关性

随机信号的相关性定义如下：

$$R_x(t_k, t_k + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t_k) x_i(t_k + \tau) \quad (4-16)$$

式 (4-16) 表示  $t_k$  和  $t_k + \tau$  (图 4-8) 两个时刻的瞬时值乘积的总体平均值，反映随机信号在  $t_k$  和  $t_k + \tau$  两个不同时刻的相关性。

#### 5. 各态历经性随机过程

平稳性随机信号中，还有一类随机过程具有这样的特性：其单个样本函数在整个时间域上取平均值与总体平均参数相等，这种随机信号称之为各态历经性随机过程。工程上遇到的随机信号大都可以当作各态历经随机过程来处理。

### 二、随机信号的均值、均方值和均方差

对于各态历经性随机过程，可以通过单个样本函数统计分析 (图 4-9)，随机信号的平均值、均方值、均方差等统计参数的定义与意义如下。

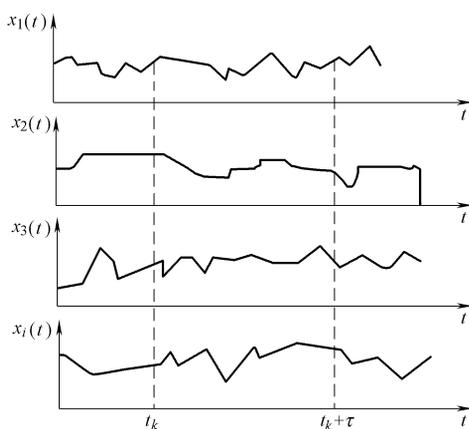


图 4-8 随机信号的样本函数



### 1. 随机信号的平均值

随机信号的平均值定义如下:

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (4-17)$$

式中  $x(t)$ ——随机信号的样本函数;

$T$ ——记录时间。

平均值  $\mu_x$  反映了随机信号的直流分量。

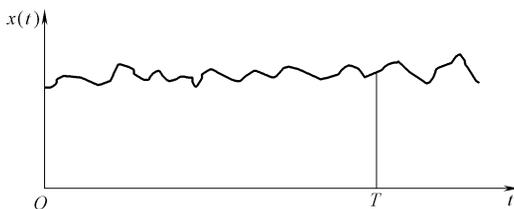


图 4-9 各态历经性随机过程统计

### 2. 随机信号的均方值

随机信号的均方值定义如下:

$$\psi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (4-18)$$

均方值  $\psi_x^2$  是样本函数  $x(t)$  的乘积在样本记录时间内的平均值, 它实际上反映了随机信号的能量(强度)。

### 3. 随机信号的均方差

随机信号的均方差值定义如下:

$$\sigma_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt \quad (4-19)$$

均方差  $\sigma_x^2$  反映随机信号的波动分量。 $\sigma_x^2$  的平方根即为标准差  $\sigma_x$ , 表示随机信号以平均值为中心的分散程度。

根据式(4-19), 可以得到平均值、均方值和均方差之间的关系:

$$\sigma_x^2 = \psi_x^2 - \mu_x^2 \quad (4-20)$$

实际测量过程中, 记录时间是有限的 ( $T \neq \infty$ ), 以有限记录长度的样本函数所计算得到的平均值、均方值和均方差实际上是随机信号的估计值, 记为  $\hat{\mu}_x$ 、 $\hat{\psi}_x$ 、 $\hat{\sigma}_x$ 。

## 三、随机信号的概率密度函数

随机信号的概率密度函数表示信号落在指定范围内的概率, 用来表征随机信号幅值的统计特性。

### 1. 随机信号的概率

某一样本函数  $x(t)$  在记录时间  $T$  内,  $x(t)$  取值在  $(x, x + \Delta x)$  区间内的时间长度分别为  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$ 、 $\Delta t_3 \dots$ , 总时间为  $T_x (= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots)$ , 如图 4-10 所示。当  $T$  趋于无穷大时, 比值  $T_x/T$  即为  $x(t)$  落在  $(x, x + \Delta x)$  区间内的概率, 记为

$$P(x, x + \Delta x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \quad (4-21)$$

### 2. 随机信号的概率密度

随机信号落在  $(x, x + \Delta x)$  区间内的概率与  $\Delta x$  大小相关。当  $\Delta x$  趋于 0 时, 即为随

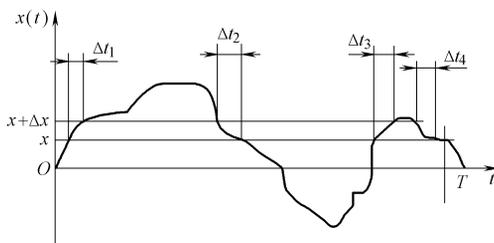


图 4-10 随机信号的概率密度



机信号的概率密度。概率密度函数的定义如下：

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x, x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (4-22)$$

不同的随机信号，其概率密度函数也不同。借助于不同的概率密度图形，可以认识和区分各种不同的信号。

### 3. 概率密度与 $\mu_x$ 、 $\psi_x^2$ 的关系

随机信号的概率密度与平均值  $\mu_x$  和均方值  $\psi_x^2$  有如下关系：

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx \quad (4-23)$$

$$\psi_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx \quad (4-24)$$

## 四、随机信号的相关函数与功率谱密度函数

### 1. 自相关函数

随机信号的自相关函数用来描述信号在  $t$  时刻和  $t + \tau$  时刻的依从关系，可以用下式表示：

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau) dt \quad (4-25)$$

自相关函数  $R_x(\tau)$  是信号在时域中特性的平均度量，它随时间位移  $\tau$  而变。当  $\tau = 0$  时，取得最大值，并有  $R_x(0) = \psi_x^2$ 。

### 2. 功率谱密度函数

自相关函数的傅里叶变换可得自功率谱密度函数，简称自功率谱或自谱，记为

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4-26)$$

$S_x(\omega)$  表示单位频带宽度上的平均功率，它的傅里叶反变换可求得  $R_x(\tau)$ ：

$$R_x(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_x(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (4-27)$$

$R_x(\tau)$  与  $S_x(\omega)$  组成傅氏变换对：

$$R_x(\tau) \xrightleftharpoons[\text{傅里叶反变换}]{\text{傅里叶变换}} S_x(\omega)$$

$R_x(\tau)$  与  $S_x(\omega)$  包含的信息相同，但  $R_x(\tau)$  是在时域中分析信号， $S_x(\omega)$  则是在频域中反映信号的特性。

### 3. 单边功率谱密度函数

因为自相关函数  $R_x(\tau)$  是偶函数，所以  $S(\omega)$  是非负实偶函数。 $S(\omega)$  是整个频域  $(-\infty, +\infty)$  的功率谱，通常称之为双边谱。实际应用中，用定义在非负频率  $(0, +\infty)$  上的谱更为方便，这种功率谱称之为单边谱。考虑到能量的等效，单边功率谱  $G_x(\omega)$  与双边功率谱  $S(\omega)$  有如下关系：

$$G_x(\omega) = 2S(\omega) \quad (4-28)$$



图 4-11 表示了单边功率谱和双边功率谱的关系。

#### 4. 互相关函数

设有随机信号  $x(t)$ 、 $y(t)$ ，它们的互相关函数义为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt \quad (4-29)$$

随机信号的互相关函数用来描述两个信号的相关性，它具有如下性质：

$$R_{xy}(\tau) = R_{yx}(-\tau) \quad (4-30)$$

$$|R_{xy}(\tau)|^2 \leq R_x(0)R_y(0) \quad (4-31)$$

$$|R_{xy}(\tau)| \leq \frac{1}{2}[R_x(0) + R_y(0)] \quad (4-32)$$

如果  $x(t)$  和  $y(t)$  是统计互相独立的，则有

$$R_{xy}(\tau) = \mu_x \mu_y \quad (4-33)$$

#### 5. 互功率谱密度函数

互相关函数  $R_{xy}(\tau)$  傅里叶变换可得到互功率谱密度函数  $S_{xy}(\omega)$ ：

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (4-34)$$

互相关函数与互功率谱密度函数组成傅里叶变换对：

$$R_{xy}(\tau) \xrightleftharpoons[\text{傅里叶反变换}]{\text{傅里叶变换}} S_{xy}(\omega)$$

在应用互功率谱密度时，通常引用相干函数，它可由式 (4-35) 求得：

$$\gamma_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_x(\omega)S_y(\omega)} \quad (4-35)$$

$\gamma_{xy}^2(\omega)$  大于等于 0，小于等于 1，用于表示在输出信号  $Y(\omega)$  的总能量中，由输入信号  $X(\omega)$  引起的那一部分能量所占的比例。如果  $\gamma_{xy}^2(\omega) = 0$ ，则表示  $y(t)$  与  $x(t)$  互不相干；如果  $\gamma_{xy}^2(\omega) = 1$ ，则表示  $y(t)$  与  $x(t)$  完全相干；如果在所有的  $\omega$  下都有  $\gamma_{xy}^2(\omega) = 0$ ，则  $y(t)$ 、 $x(t)$  是统计互相独立的。

在测量中，相干函数  $\gamma_{xy}^2(\omega)$  可用于判断测量精度，衡量噪声的影响程度等。

### 思 考 题

1. 测试过程中信号分析起何作用？信号分析与信号处理有何不同？
2. 动态信号如何分类？不同频率的基本周期信号复合是否一定就是周期信号？
3. 周期信号的傅里叶级数展开的物理意义是什么？它对仪器选择有什么启示？
4. 周期信号具有哪些数字特征？它们在信号分析中有何作用？
5. 与周期信号相比，分析非周期信号的不同点有哪些？

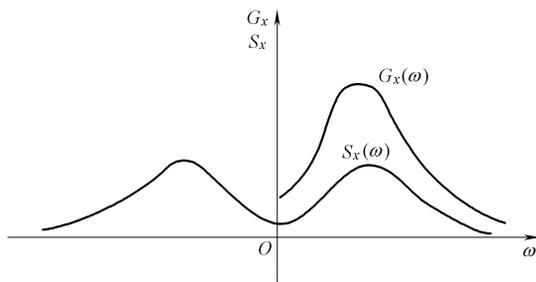


图 4-11 单边功率谱和双边功率谱



6. 非周期信号的能量谱密度函数如何定义? 与自相关函数有何关系?
7. 如何描述随机信号? 随机信号的相关性是如何定义的?
8. 何谓各态历经性随机信号?
9. 随机信号的统计参数有哪些? 其物理意义是什么?
10. 相干函数的物理意义是什么? 如何求得相干函数? 在实际测量中的作用是什么?

# 第五章

## 传 感 器

### 第一节 概 述

#### 一、传感器组成及类型

##### 1. 传感器的组成

在测试系统中，传感器的作用相当于人的感觉器官。人要通过眼睛（视觉）、耳朵（听觉）、鼻子（嗅觉）和皮肤（触觉）去感知周围的环境和事物，测试系统则需要通过传感器来“感知”被测物理量，将其转换为易于检测、传输或处理的电信号。

不同用途和不同类型的传感器，其结构形式和具体的组成部件会有所不同，但从总体上讲，传感器主要由传感元件和相应的辅件组成，如图 5-1 所示。

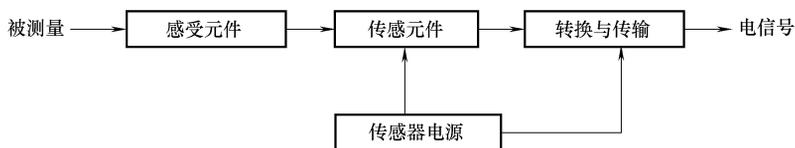


图 5-1 传感器的基本组成

**感受元件：**直接感受被测量，并将被测量按某种确定的对应关系传递给传感元件。一些传感器的感受元件与传感元件合二为一。

**传感元件：**也称之为敏感元件，是传感器的核心，用于将被测量转换为与被测量有对应关系的电量（电压、电流、脉冲频率等）或电路参量（电阻、电容、电感等）的变化。

**转换与传输：**将传感元件根据被测量所变化的电阻、电容、电感等转换为相应的电信号输出。一些传感器直接由传感元件产生电信号，无需转换与传输电路。

**传感器电源：**向传感器中传感元件和信号转换与传输电路提供电能。不是所有的传感器都必须有电源，对于传感元件（如电压晶体、电感线圈等）可自行产生电信号的发电类传感器，有的就无需电源。



## 2. 传感器的分类

传感器的种类繁多，下面通过不同的分类方法对各种各样的传感器予以概括。

(1) 按敏感元件的类型分类 按传感器敏感元件所属的不同类型分，有压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器、热电式传感器、应变式传感器和电位计式传感器等。

1) 压电式传感器。采用压电材料，依据压电效应将被测物理量转变为电信号的一类传感器。

2) 磁电式传感器。依据电磁感应原理将被测物理量转变为电信号的一类传感器。

3) 光电式传感器。通过光电效应将被测物理量转变为电信号的一类传感器。

4) 热电式传感器。采用热电偶（两种不同的金属连接成闭合回路），通过热电效应将被测物理量转变为电信号的一类传感器。

5) 应变式传感器。利用导体或半导体的电阻应变效应，将被测物理量转变为传感器电阻的变化，再通过测量电路转变为电信号的一类传感器。

6) 电位计式传感器。采用电位计的结构形式，将被测物理量转变为电信号的一类传感器。

由于某一种类型的敏感元件可用于多种物理量的测量，而测量同一种物理量的敏感元件又可制成不同用途的传感器，如果按用途命名传感器，传感器的种类则有许许多多。

(2) 按信号变换特征分类 按敏感元件信号转换的特征分，传感器可分为结构型和物性型两大类。

1) 结构型传感器。结构型传感器通过其敏感元件的结构产生部分变化或变化后引起场（力场、电场、磁场）的变化将被测量转换为电信号。比如，电位计式传感器、电感类传感器、电容类传感器等均属于结构型传感器。

2) 物性型传感器。物性型传感器通过敏感元件自身物性的改变产生反映被测量的电信号。热敏电阻式传感器、光电式传感器、压电式传感器等均属于物性型传感器。

(3) 按信号转换的原理分类 按传感器产生电信号的工作原理不同分，可将传感器分为参量式和发电式两大类。

1) 参量式传感器。参量式传感器其敏感元件随被测物理量的变化产生相应的电路参数（电阻、电容、电感等）变化，再由测量电路转换为相应的电信号。电阻类传感器、电感类传感器及电容类传感器均属于参量式传感器。

2) 发电式传感器。发电式传感器其敏感元件随被测物理量的变化直接产生相应的电信号。光电式传感器、磁电式传感器、压电式传感器、热电式传感器和霍尔效应式传感器等均属于发电式传感器。

(4) 按能量关系分类 按敏感元件与被测对象之间的能量关系分，传感器可分为能量转换型和能量控制型两种类型。

1) 能量转换型传感器。传感器敏感元件通过吸收被测对象部分能量产生相应的电信号，工作中有能量的传递，易造成误差。如热电偶式温度传感器、弹性压力计式压力传感器等均属于能量转换型传感器。

2) 能量控制型传感器。传感器由外部供给能量，敏感元件随被测量的改变控制外部能



量的变化而使传感器产生相应的电信号。比如，参量式传感器由传感器电源提供能量产生电信号，均属于能量控制型传感器。

(5) 按输出信号的形式分类 按传感器输出电信号的形式分，可分为模拟式传感器和数字式传感器两大类。

1) 模拟式传感器。随被测量的变化传感器输出连续变化的电信号，由电信号的幅值(大小)反映被测量。

2) 数字式传感器。传感器输出脉冲式电信号，由电信号的高低电平或脉冲信号的频率反映被测量。

## 二、传感器的基本要求与特性标定

### 1. 传感器的基本要求

传感器是测试系统的输入环节，其性能直接影响着测试系统的准确性和可靠性，因此要求传感器必须真实地反映被测对象的相关信息，输出能准确表达被测量的电信号。各种传感器尽管其原理、结构不同，使用环境、条件、目的不同，各自的技术指标也不尽相同，但都有相同的基本要求。

- ① 输入、输出之间要有确定的函数关系。
- ② 稳定性好、抗干扰能力强、重复性好。
- ③ 精度和灵敏度高。
- ④ 动态特性好。
- ⑤ 环境适应性好、方向性要求不高(加载、卸载及安装时)。
- ⑥ 机械、热、电等过载能力强。
- ⑦ 结构、加工工艺简单，成本低，互换性好。
- ⑧ 使用维修方便，易于校准。

### 2. 传感器的基本特性与标定

(1) 传感器的基本特性 传感器在测试系统中是相对独立的系统，在设计、制造及选用传感器时，都要涉及传感器的性能指标。传感器的性能指标包括静态特性指标和动态特性指标。传感器静态特性评价指标有线性度、迟滞性、精密度和灵敏度等，动态特性的性能参数有响应时间(时间常数)、固有频率、阻尼系数等。相关内容参见第二章。

(2) 传感器的标定 传感器的特性标定是指通过实验的方法确定传感器特性的过程，确定传感器静态特性指标的过程称之为传感器的静态标定，而确定传感器动态特性参数的过程则称之为动态标定。

在传感器的研制、产品性能评价过程中通常需要对传感器进行特性标定，当传感器与测量电路及显示装置组成测试系统时，则需要对整个测试系统进行静、动态特性的标定。

## 第二节 电阻类传感器

电阻类传感器是一种参量式传感器，它将被测量转换为电阻的变化，再通过测量电路转



换为电信号。根据结构与工作原理的不同分，电阻类传感器有电位计式、电阻应变片式、热敏电阻式等多种类型。

## 一、电位计（变阻器）式传感器

电位计式传感器的敏感元件是电阻和随被测量移动的滑片（或称电刷），电位计电阻有绕线式和非绕线式，可直接测量平移、转动等位移量。

### 1. 绕线式电位计

(1) 绕线式电位计的结构形式 绕线式电位计的电阻由电阻丝绕制在固定形状的骨架上形成，有直线位移、角位移和非线性等不同的类型，如图 5-2 所示。

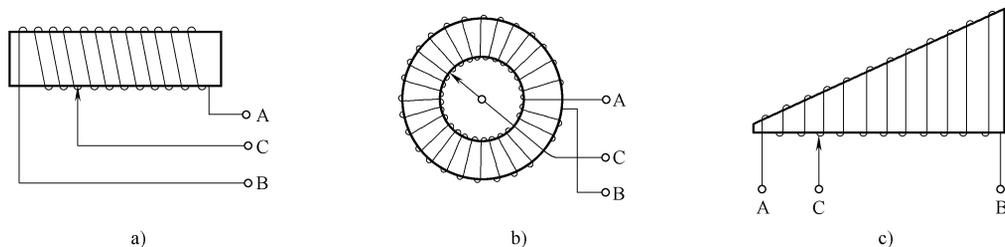


图 5-2 绕线式电位计的类型

a) 直线位移型 b) 角位移型 c) 非线性型（变骨架）

直线位移型电位计其电阻沿长度方向均布，用于测量平移；角位移型电位计的电阻由电阻丝均匀地绕制在圆环或扇形骨架上形成，用于测量角位移；非线性型电位计的输出量与位移呈非线性关系，有变骨架式、变节距式、分路电阻式如电位给定式等不同的形式。

(2) 绕线式电位计的工作原理 直线位移型电位计的工作原理如图 5-3 所示。

根据欧姆定律，对于沿长度方向电阻均匀分布的电位计，电阻有如下关系：

$$R = \frac{L\rho}{A} \quad (5-1)$$

$$R_x = \frac{x\rho}{A} \quad (5-2)$$

式中  $R$ ——电位计电阻 ( $\Omega$ )；  
 $\rho$ ——电阻率 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )；  
 $L$ ——电位计电阻的长度 (m)；  
 $A$ ——电阻丝的截面积 ( $\text{mm}^2$ )；  
 $x$ ——电位计滑片的位移 (m)。

于是就有

$$\frac{R_x}{R} = \frac{x\rho}{A} \frac{A}{L\rho} = \frac{x}{L}$$

$$R_x = \frac{x}{L}R \quad (5-3)$$

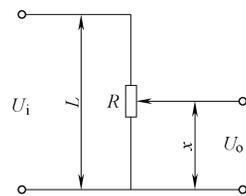


图 5-3 直线位移型电位计原理



当电位计的负载电阻  $R_L$  足够大时, 负载电流  $I_L \approx 0$ , 将式 (5-3) 两边同乘以电流  $I$ :

$$R_x I = \frac{x}{L} RI$$

得:

$$U_o = \frac{x}{L} U_i = \frac{U_i}{L} x \quad (5-4)$$

令:

$$S = \frac{U_i}{L}$$

则有:

$$U_o = Sx \quad (5-5)$$

式 (5-5) 即为电位计的空载特性, 其中  $S$  为电位计的灵敏度。从式 (5-5) 可知, 电位计的输出电压与位移呈线性关系。

(3) 电位计产生测量误差的因素 影响绕线式电位计测量精度的因素主要有负载电流、绕线的螺距、电源电压及环境温度等。

1) 负载电流。电位计接入测量电路后 (图 5-4), 其负载电阻  $R_L \neq \infty$ , 因此,  $I_L \neq 0$ 。

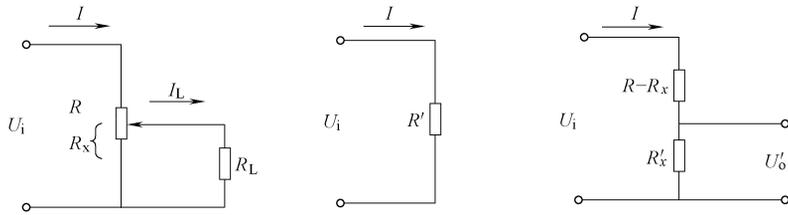


图 5-4 有负载电流时的电位计原理

$R'$ —带负载电位计等效电阻  $R'_x$ —带负载电阻的等效  $R_x$

由图 5-4 可知:

$$R'_x = \frac{R_x R_L}{R_x + R_L}$$

$$R' = R - R_x + R'_x = \frac{RR_x + RR_L - R_x^2 - R_x R_L + R_x R_L}{R_x + R_L} = \frac{RR_x + RR_L - R_x^2}{R_x + R_L}$$

根据式 (5-3) 和式 (5-4) 可得电位计的负载特性:

$$U'_o = \frac{R'_x}{R'} U_i = \frac{R_x R_L}{R_x + R_L} \frac{R_x + R_L}{RR_x + RR_L - R_x^2} U_i = \frac{R_x R_L}{RR_x + RR_L - R_x^2} U_i \quad (5-6)$$

为得到更为明确电位计负载特性, 将式 (5-6) 做适当简化, 并令

$$X = \frac{R_x}{R_L} \left( \frac{R_x}{R_L} = \frac{x}{L} \text{ 相对位移} \right); m = \frac{R}{R_L}$$

则有



$$U'_o = \frac{R_x R_L}{R R_L + R_x (R - R_x)} U_i = \frac{\frac{R_x}{R}}{1 + \frac{R_x R}{R R_L} \left(1 - \frac{R_x}{R}\right)} U_i = \frac{X}{1 + X m (1 - X)} U_i \quad (5-7)$$

从式 (5-7) 可知, 只有当  $R_L \rightarrow \infty$  时, 才有  $m \rightarrow 0$ ,  $U'_o \rightarrow U_i X = U_o$ 。

当  $R_L \neq \infty$ , 负载电流不可忽略时, 负载电流产生的相对误差如下:

$$\rho_x = \frac{U'_o - U_o}{U_o} \times 100\% = \left[1 - \frac{1}{1 + m X (1 - X)}\right] \times 100\% \quad (5-8)$$

从式 (5-8) 可知, 负载电阻  $R_L$  大, 负载电流所引起的误差就小, 要保证在整个行程范围内的负载误差  $< 1\% \sim 2\%$ , 需要  $R_L > (10 \sim 20) R$ 。

2) 金属丝绕线螺距。绕线式电位计金属丝有螺距, 因此电刷从接触到移开某匝电阻丝有一段距离, 会使  $R_x$  和  $U_o$  呈阶梯变化, 如图 5-5 所示。

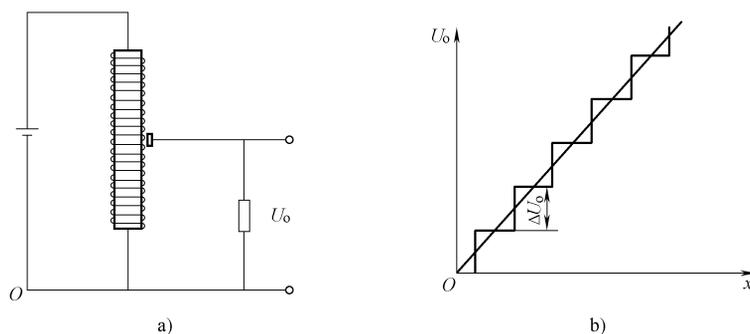


图 5-5 绕线式电位计的阶梯误差

a) 绕线式电位计螺距 b) 绕线式电位计输出特性

绕线式电位计的分辨率  $e_y$  为

$$e_y = \frac{U_{om}}{\frac{W}{U_{om}}} \times 100\% = \frac{1}{W} \times 100\% \quad (5-9)$$

式中  $U_{om}$ ——电位计最高输出电压;

$W$ ——电阻丝匝数。

绕线式电位计的阶梯误差 (原理误差) 为

$$\rho_j = \pm \frac{1}{2} \frac{U_{om}}{W} \times 100\% = \pm \frac{1}{2W} \times 100\% \quad (5-10)$$

从式 (5-9)、式 (5-10) 可知, 电位计电阻在相同长度下, 匝数多, 螺距小, 其分辨率高, 阶梯误差也小。

3) 电源电压。测量过程中, 电源电压  $U_i$  的波动, 将直接引起电位计输出电压  $U_o$  的变化, 造成测量误差。减小电源电压波动造成的测量误差的措施如下。

① 采用稳压电路, 使  $U_i$  稳定不变, 以减小电源电压波动引起的测量误差。



② 采用相对电压方式 ( $U_s/U_b$ ), 如图 5-6 所示。当电源电压  $U_i$  变化时, 电压  $U_s$  随之变化, 但  $U_b$  也变, 从而使  $U_s/U_b$  基本不变。

4) 温度。当环境温度变化时, 电阻丝电阻值会随之变化, 从而造成测量误差。减小温度对传感器测量误差的措施如下。

① 增加温度传感器, 用以进行温度修正。

② 在测量电路中增加温度补偿电阻, 以抵销温度变化时电位计电阻的改变量。

(4) 绕线式电位计的特点 绕线式电位计的优点是结构简单、使用方便、稳定性好、直线性好, 适用于较大位移的测量; 其缺点是分辨率受线径和螺距的影响 (一般  $>20\mu\text{m}$ )、能耗较高、 $R_x$  呈阶梯变化、耐磨性差、寿命较短等。

## 2. 非绕线式电位计

由于绕线式电位计式传感器存在较多的缺点, 性能优良的非绕线式电位计应用日渐增多。非绕线式电位计常用的有薄膜式和导电塑料式。

(1) 薄膜式电位计 薄膜式电位计通常有两种: 一种是炭膜电位计, 另一种为金属膜电位计。

炭膜电位计是在绝缘骨架表面上喷涂一层均匀的电阻液, 经烘干聚合后而制成电阻膜。电阻液由石墨、炭墨、树脂材料配制而成。这种电位计的优点是分辨率高、耐磨性较好、工艺简单、成本较低、线性度较好, 其缺点是接触电阻大、噪声大。

金属膜电位计是在玻璃或胶木基体上, 用高温蒸镀或电镀方法, 涂覆一层金属膜而制成的。相比于绕线式电位计, 金属膜电位计无阶梯误差, 还具有耐温、寿命长、精度高等特点。金属膜电位计的电阻值不大, 因而其应用范围受到一定的限制。

(2) 导电塑料式电位计 导电塑料式电位计的电阻由塑料粉及导电材料的粉末 (合金、石墨、炭黑等) 压制而成, 其特点是线性好、灵敏度高、使用寿命长, 但导电塑料式电位计的精度不高, 导电塑料的耐温和耐湿性差, 接触电阻也相对较大。

## 二、电阻应变式传感器

电阻应变式传感器利用敏感元件的电阻应变效应将被测量转换为相应的电阻变化。导体或半导体材料在受到外界力 (拉力或压力) 作用时产生机械变形, 导致其阻值变化, 这种因形变而使其阻值发生变化的现象称为电阻的应变效应。

电阻应变式传感器可用于测量力、位移、扭矩和加速度等, 按敏感元件的材料不同分, 有金属应变片和半导体应变片两种类型。

### 1. 金属应变片

(1) 金属丝应变原理 根据欧姆定律, 金属丝的电阻为

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (5-11)$$

式中  $l$ ——金属丝的长度;

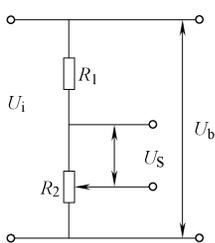


图 5-6 相对电压法  
消除电压波动误差

$R_1$ —串联电阻

$R_2$ —电位计电阻



$A$ ——金属丝的截面积;

$\rho$ ——金属丝的电阻率

式 (5-11) 表达了金属丝的电阻与其电阻率及几何尺寸有关, 当金属丝受外力作用时, 这三者都会发生变化, 因而会引起电阻的变化。对式 (5-11) 求全微分:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

将  $A = \pi r^2$  代入求解全微分得

$$dR = \frac{\rho}{\pi r^2} dl - 2 \frac{\rho l}{\pi r^3} dr + \frac{l}{\pi r^2} d\rho = \frac{\rho l}{\pi r^2} \left( \frac{dl}{l} - \frac{2dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \right) = R \left( \frac{dl}{l} - \frac{2dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \right)$$

于是有

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{2dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5-12)$$

式 (5-12) 中,  $dl/l = \varepsilon$ , 为金属丝的纵向相对变形, 称之为纵向应变;  $dr/r$  为金属丝的横向相对变形, 称之为横向应变。横向应变与纵向应变的关系为

$$\frac{d\gamma}{\gamma} = -\nu \frac{dl}{l} \quad (5-13)$$

式中  $\nu$ ——泊松系数 (泊松比), 负号表示纵向应变与横向应变的变化相反。

$\frac{d\rho}{\rho}$ ——金属丝电阻率相对变化, 它与金属丝轴向正应力  $\sigma$  有关 (压阻效应):

$$\frac{d\rho}{\rho} = \lambda \sigma = \lambda E \varepsilon \quad (5-14)$$

式中  $\lambda$ ——压阻系数, 与材料有关;

$E$ ——弹性模量,  $E = \sigma/\varepsilon$ 。

将式 (5-13)、式 (5-14) 代入式 (5-12), 于是有

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{2\nu dl}{l} + \lambda E \varepsilon = (1 + 2\nu + \lambda E) \varepsilon \quad (5-15)$$

设:  $S = 1 + 2\nu + \lambda E$

$S$  为电阻应变片的灵敏度。对于金属丝, 主要是形变起作用, 压阻效应 ( $\lambda E \varepsilon$ ) 可以忽略。于是有

$$S \approx 1 + 2\nu \quad (5-16)$$

$$\frac{dR}{R} = S \varepsilon \quad (5-17)$$

在一定的变形范围内, 金属丝的灵敏度为一常数 ( $S = C$ ), 因此, 应变片的应变与电阻的相对变化呈线性关系。

(2) 金属应变片的结构 金属应变片主要有丝式应变片和箔式应变片两种结构形式, 金属丝和金属箔根据需要可以制作成各种形状。

1) 金属丝式应变片。将电阻率较高的金属丝绕成栅状, 并粘贴在基片上。上面覆一层薄膜, 使它们变成一个整体, 如图 5-7 所示。

2) 金属箔式应变片。金属箔式应变片是利用光刻、腐蚀等工艺制成一种很薄的金属箔

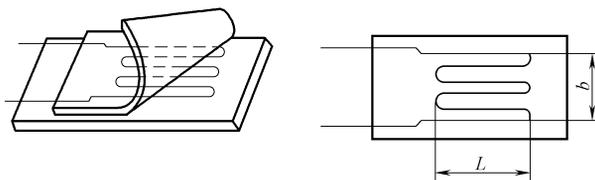


图 5-7 金属丝式应变片结构

栅，其结构如图 5-8 所示。金属箔式应变片的优点是表面积和截面积之比较大，散热条件好。允许通过的电流较大，可制成各种需要的形状。便于大批量生产。因此，金属箔式应变片有逐渐取代金属丝式应变片的趋势。

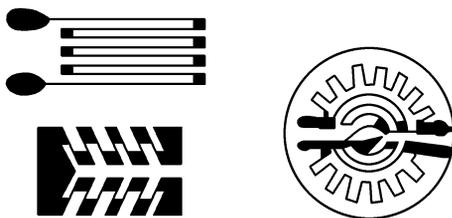


图 5-8 金属箔式应变片结构

(3) 金属应变片的特点 金属应变片的特点总结如下。

1) 灵敏度。金属丝做成应变片后，由于基片传递变形有失真，其灵敏度要小于线材的灵敏度。

2) 横向效应。应变片敏感栅圆弧部分对测量纵向应变有横向尺寸变化，产生相反的电阻变化，从而使应变片的灵敏度有所下降。

3) 线性度。理论上应变与电阻相对变化呈线性关系，但实际上存在非线性关系。为满足测量精度要求，金属应变片的非线性应小于  $(0.05 \sim 0.1)\%$ 。

4) 迟滞性。金属应变片的迟滞性包括机械滞后和热滞后。机械滞后是指应变片在加、卸载时应变  $\varepsilon$  与电阻相对变化曲线不重合；热滞后是指应变片在中高温时，由于温度变化而使示值有滞后差值。

5) 零漂和蠕变。零漂是指应变片在不承载、温度恒定不变的情况下，其电阻值随时间发生改变；蠕变则是指应变片在温度恒定不变，长时间加一恒定载荷（保持某一应变）的情况下，其指示值随时间发生变化。零漂和蠕变都是衡量应变片相对于时间的稳定性，它们主要是对长时间测量带来一定的误差。

6) 应变极限。应变片所能测量的最大应变值。当超出其应变极限时，测量值将严重失真而失去意义。

## 2. 半导体应变片

(1) 半导体应变原理 半导体应变片的工作原理是基于半导体材料的压阻效应。所谓压阻效应是指半导体材料在某一轴向受外力作用时，其电阻率发生变化的现象。

半导体的压阻效应的实质：单晶半导体材料在外力作用下，其原子点阵排列规律会发生改变，从而使载流子迁移及载流子浓度发生变化，导致其电阻率变化。

半导体应变片的电阻应变效应同样符合式 (5-15)，即

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu + \lambda E) \varepsilon$$

对于半导体应变片来说，其形变效应  $(1 + 2\nu)$  很小，而压阻效应  $(\lambda E)$  明显，通常



半导体的压阻效应明显大于其形变效应。因此，半导体应变片的形变效应可忽略不计，其灵敏度  $S \approx \lambda E$ 。也就是说，半导体应变片主要是其压阻效应起作用，这一点正好与金属应变片相反。

(2) 半导体应变片的结构 半导体应变片主要由敏感元件（半导体敏感栅）、基片、连接片和引线等组成，如图 5-9 所示。

半导体应变片用锗或硅等半导体材料作为敏感栅，通常采用单片。

(3) 半导体应变片的特点 半导体应变片的特点总结如下。

1) 灵敏度高。半导体应变片的最大优点是灵敏度高，一般高于金属电阻丝应变片 50 ~ 70 倍。这是半导体应变片使用较广的主要原因。

2) 机械滞后、横向效应小。由于半导体应变片主要是压阻效应起作用，形变对电阻的改变可忽略不计，基片等变形因素对其电阻的影响不大，机械滞后小、横向效应不明显。

3) 体积小。半导体应变片的结构尺寸较小，使其布置方便灵活，这也是它应用广泛的原因之一。

4) 温度稳定性差。因为半导体应变片主要是压阻效应起作用，故温度对其电阻的影响就比较大。减小温度影响的措施有加温度补偿应变片，通过电桥实现温度补偿，以消除或减小温度变化所带来的误差；应变片本身采用特定的材料和结构，用以减小或消除温度变化所带来的误差。

5) 非线性较大。压阻效应转换方式其非线性较大，这容易造成测量误差。在测量电路设计和测量装置调校时都应考虑此因素。

### 3. 电阻应变式传感器的应用

(1) 测定构件的受力情况 将电阻应变片直接粘贴在被测构件上，通过应变片引线连接测量电路或监测设备，用以监测构件的受力变形情况。

(2) 各类应变式传感器 将电阻应变片贴于某种结构形式的弹性元件上，制成不同用途的传感器，用于测量力、压力、位移、加速度和转矩等。典型的应变式传感器结构原理如图 5-10 所示。

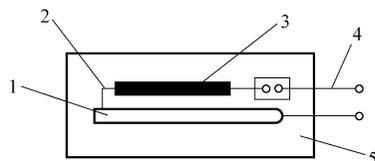


图 5-9 半导体应变片结构

1—连接片 2—内引线 3—敏感栅 4—外引线 5—基片

## 三、其他电阻类传感器

除了电位计式传感器和电阻应变式传感器外，电阻类传感器还有热敏电阻式、磁敏电阻式、湿敏电阻式和光敏电阻式等多种形式。

### 1. 热敏电阻式传感器

热敏电阻式传感器的敏感元件其电阻随温度而变，用于直接测量温度或测量与温度有某种关系的其他物理量。按热敏元件的材料不同分，热敏电阻式传感器主要有金属热敏电阻（热电阻）和半导体热敏电阻两种类型。

(1) 金属热敏电阻 金属热敏电阻在温度升高时，金属晶格中无序运动的自由电子运

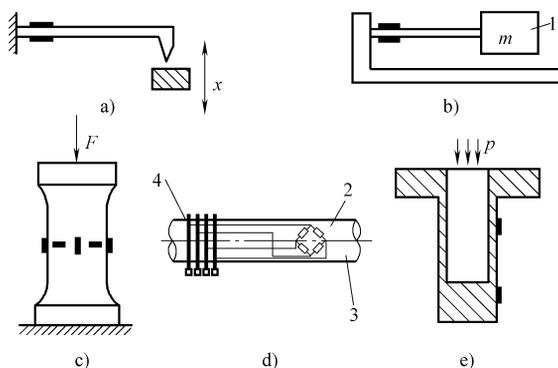


图 5-10 典型的应变式传感器

a) 位移传感器 b) 加速度传感器 c) 测力传感器 d) 转矩传感器 e) 筒式压力传感器

1—质块 2—应变片 3—回转轴 4—集电环

动能增加，使其做定向运动（形成电流）所需的电场强度增大。也就是说，温度上升时金属的导电能力下降（电阻率上升）了。

金属热敏电阻通常用镍、铜、铂和银等金属丝绕制而成，具有正温度系数，其电阻值较小。

(2) 半导体热敏电阻 半导体热敏电阻在温度变化时，其半导体晶体中的电子与空穴（载流子）数量发生变化，使其导电能力（电阻率）改变，即其电阻  $R$  随温度的改变发生了变化。通过不同的掺杂和烧结工艺，可使半导体热敏电阻得到不同的温度特性，如图 5-11 所示。

PTC 热敏电阻的电阻值随温度上升而增大，用作正温度系数温度传感器；NTC 热敏电阻的电阻值随温度上升而减小，可用作负温度系数温度传感器；CTR 热敏电阻的电阻值在某一临界温度下会产生跃变，这种半导体敏感元件可用作热敏开关。

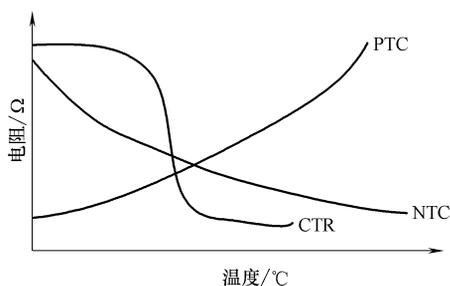


图 5-11 半导体热敏电阻的温度特性

相比于金属热敏电阻，半导体热敏电阻具有灵敏度高、响应特性好、电阻值和温度测量范围大等优点，因此使用较为广泛。

## 2. 磁敏电阻式传感器

磁敏电阻式传感器利用了敏感元件在磁场力的作用下其电阻会发生变化的特性，用于测量位移、角度、转速、电量和磁场强度等。磁敏元件有半导体和铁磁材料两种。

(1) 半导体磁敏元件 半导体磁敏元件电阻变化原理：元件在磁场中受洛伦兹力的作用，使一些载流子发生偏转而呈现出电阻的变化，电阻变化的大小与磁场的强度和方向有关。

(2) 铁磁材料磁敏元件 铁磁材料在磁场中被磁化后，其导电能力随磁化强度与方向而变，当磁化方向平行于电流流方向时，其电阻值最大；垂直于电流流方向时，电阻值



最小。

### 3. 湿敏电阻式传感器

湿敏电阻式传感器的敏感元件具有电阻随湿度不同而变化的特性，用于空气湿度的测量和监控。

湿敏电阻式传感器的湿敏元件是利用湿敏材料吸收空气中的水分而导致本身电阻值发生变化的原理制成的。常用的湿敏元件有氯化锂湿敏元件、半导体陶瓷湿敏元件、热敏电阻湿敏元件和高分子膜湿敏元件等。

### 4. 光敏电阻式传感器

光敏电阻式传感器其敏感元件的电阻会随光照度的变化而改变，利用这一特性，可用于测量光照度、转速及其他相关的物理量。

光敏电阻式传感器的敏感元件有半导体光敏电阻、光敏二极管和光敏晶体管等不同的形式。光敏电阻利用半导体元件受光后空穴与电子（光生载流子）数量的变化，使其导电能力产生相应的改变；光敏二极管则是利用了二极管反向电阻随光照度改变的特性，其原理与光敏电阻相似，差别在于光敏二极管有 PN 结；光敏晶体管原理与光敏二极管相似，由于有两个 PN 结，可像普通晶体管那样具有电流放大的作用。

### 5. 气敏电阻式传感器

气敏电阻式传感器利用半导体气敏元件接触某些气体时其电阻会发生变化的特性，用来检测特定气体的成分或者测量其浓度等。

气敏电阻式传感器常用的气敏半导体材料有氧化锡（ $\text{SnO}_2$ ）、氧化锰（ $\text{MnO}_2$ ）、氧化铁和氧化镍等金属氧化物。在正常情况下，这些气敏材料处于氧离子缺位（N 型半导体）的状态，当它们遇到电离能较小且易于失去电子的可燃性气体分子（如氧、氢、一氧化碳、烷、醚、醇、苯以及天然气、沼气等）时，电子就会从气体分子向半导体迁移，使半导体的载流子数量增加，电导率增加。如果是 P 型半导体，其晶格处于阳离子缺位状态，因而在遇到敏感气体分子时，其电阻值会增大。

## 第三节 电感类传感器

电感类传感器也是一种参量型传感器，它利用线圈的电感（自感或互感）随被测量变化的特性，将被测参量转换为相应的电感量，并通过测量电路转换成电信号。根据其结构与原理的不同分，有自感式、互感式和电涡流式等不同的形式。

### 一、自感式电感传感器

自感式传感器利用电感线圈的自感随被测量而变的特性，可用于位移、压强、液位等参数的测量。根据工作方式的不同，自感式传感器有变磁路气隙式和变磁路截面式两种类型。

#### 1. 变气隙式

变气隙式自感传感器如图 5-12 所示。



根据电感的定义,线圈的电感量  $L$  与线圈匝数  $W$ 、磁通量  $\Phi$  和线圈电流有如下关系:

$$L = \frac{W\Phi}{I}$$

根据磁路的欧姆定律,磁通量与磁动势  $WI$  和磁路磁阻  $R_m$  的关系为

$$\Phi = \frac{WI}{R_m}$$

$$\text{于是有} \quad L = \frac{W^2}{R_m} \quad (5-18)$$

不考虑漏磁损失,磁路的磁阻包括铁心的磁阻  $R_{l_1}$ 、衔铁的磁阻  $R_{l_2}$  和空气隙的磁阻  $R_\delta$ , 即

$$R_m = R_{l_1} + R_{l_2} + R_\delta$$

$$R_{l_1} = \frac{l_1}{\mu A_1}; \quad R_{l_2} = \frac{l_2}{\mu A_2}; \quad R_\delta = \frac{2\delta}{\mu_0 A_0}$$

式中  $l_1$ ——铁心磁路的长度 (m);

$l_2$ ——衔铁磁路的长度 (m);

$A_1$ 、 $A_2$ ——铁心与衔铁磁导截面积 ( $\text{m}^2$ );

$\mu$ ——铁心与衔铁磁导率 (H/m);

$\delta$ ——空气隙长度 (m);

$A_0$ ——空气隙导磁截面积 ( $\text{m}^2$ );

$\mu_0$ ——真空磁导率 (H/m)。

与空气中的磁阻相比,铁心和衔铁的磁阻可忽略不计,于是:

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (5-19)$$

将式 (5-19) 代入式 (5-18) 得

$$L = \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta} \quad (5-20)$$

从式 (5-20) 可知,变气隙式自感传感器其电感量  $L$  随气隙  $\delta$  成反比 (非线性变化),如图 5-13 所示。

对式 (5-20) 求微分:

$$dL = -\frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta^2} d\delta$$

得变气隙自感式传感器的灵敏度为

$$S = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta^2} \quad (5-21)$$

从式 (5-21) 可知,变气隙自感式传感器其灵敏度  $S$  是变化的,且与空气隙  $\delta$  的平方成反比。

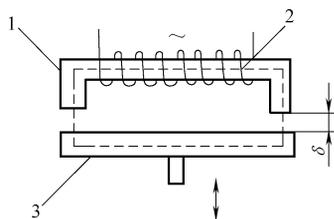


图 5-12 变气隙式自感传感器

1—铁心 2—线圈 3—衔铁

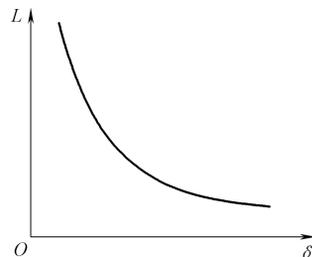


图 5-13 变气隙式  
电感传感器特性曲线



为改善非线性并提高灵敏度，变气隙自感传感器应在小的气隙变化范围内工作，通常规定  $\delta$  在 0.001 ~ 1mm 的范围内。实际使用中，通常采用差动结构，其原理与特性如图 5-14 所示。

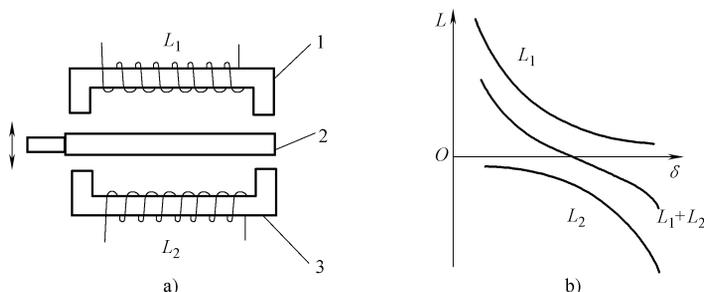


图 5-14 差动型自感传感器

a) 传感器组成 b) 传感器特性  
1—上铁心 2—衔铁 3—下铁心

差动结构形式的变气隙式自感传感器的衔铁移动时，两线圈磁路的气隙一个增加，一个减小，两线圈的电感一个减小，另一个则增加。两个线圈接于电桥或其他形式的测量电路中，其电感量改变对输出信号的作用是相加，因此，传感器的灵敏度可提高一倍，线性度也得以提高。

## 2. 变截面式

变截面式自感传感器如图 5-15 所示。

变截面式自感传感器磁路的空气隙  $\delta$  不变，通过改变磁路截面的面积  $A$  使线圈的电感量变化。其关系式如下：

$$L = \frac{W^2 \mu_0 A}{2\delta} \quad (5-22)$$

由上式可见，磁路的截面积与线圈的电感成正比关系。

对上式微分：

$$dL = \frac{W^2 \mu_0}{2\delta} dA$$

得灵敏度  $S$  关系式为

$$S = \frac{dL}{dA} = \frac{W^2 \mu_0}{2\delta} \quad (5-23)$$

从式 (5-23) 可知，变截面式自感传感器的灵敏度  $S$  不随被测量的变化而改变，但由于空气中的磁导率  $\mu_0$  很小，其灵敏度较低，因此，只适用于大位移量的测量。

## 二、互感式电感传感器

互感式传感器是将被测量的变化转换为变压器互感的变化，变压器一次绕组输入交流电

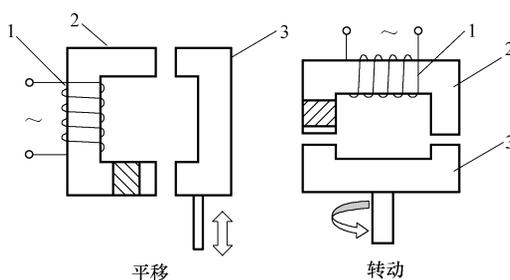


图 5-15 变截面式自感传感器

1—线圈 2—铁心 3—衔铁



压，二次绕组通过互感产生相应的电动势。互感式传感器通常采用两个二次绕组组成差动结构，所以也被称为差动变压器式传感器。

差动变压器式传感器有变气隙式和螺管式等不同的结构形式（图 5-16），其工作原理相似，可用于位移、振动、加速度等物理量的测量。

### 1. 差动变压器式传感器工作原理

变压器的一次、二次绕组绕于同一个铁心上，当一次绕组输入交流电  $i_1$  时，二次绕组产生的互感电动势  $e_{12}$  与一次、二次绕组的互感系数  $M$  和一次电流的变化率  $di_1/dt$  有如下关系：

$$e_{12} = M \frac{di_1}{dt}$$

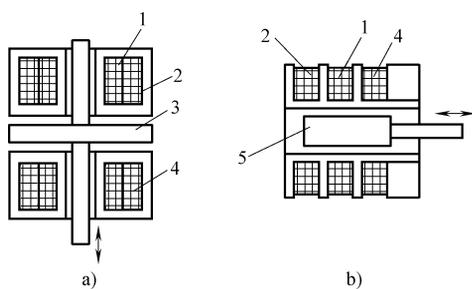


图 5-16 差动变压器式传感器

a) 变气隙式 b) 螺管式

1—一次绕组 2、4—二次绕组 3—衔铁 5—铁心

图 5-16b 差动变压器式传感器的等效电路如图 5-17 所示。变压器两个二次绕组匝数相同，反极性串联后使传感器的输出电压  $u_0$  等于二次绕组互感电动势之差 ( $u_0 = e_1 - e_2$ )。当传感器一次绕组  $W$  通入交流电  $i_1$  时，二次绕组  $W_1$  和  $W_2$  便产生互感电动势  $e_1$ 、 $e_2$ 。铁心处于中间位置（无位移）时，两二次绕组的互感系数  $M_1$ 、 $M_2$  相等，其互感电动势大小相等，故  $u_0 = 0$ （图 5-18a）；铁心上移时， $M_1$  增大、 $M_2$  减小，故  $e_1 \neq e_2$ ， $u_0 \neq 0$ ， $u_0$  的幅值随铁心上移量  $x$  的增加而增大（图 5-18b）；铁心下移时， $M_1$  减小、 $M_2$  增大，也使  $e_1 \neq e_2$ ， $u_0$  的幅值随铁心下移量  $x$  的增加而增大（图 5-18c）。

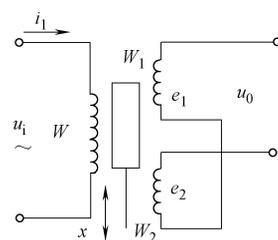


图 5-17 差动变压器电路原理

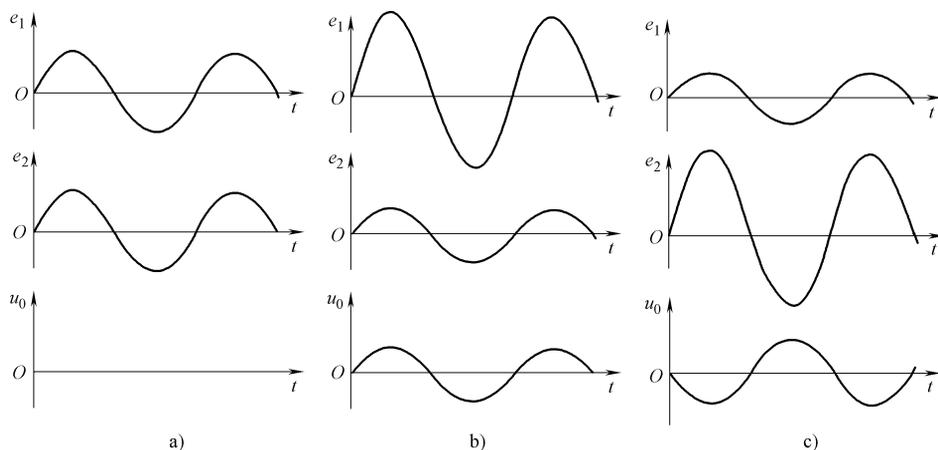


图 5-18 差动变压器式传感器工作电压波形

a) 铁心未移动 b) 铁心上移 c) 铁心下移

差动变压器式传感器的输出特性如图 5-19 所示。差动变压器式传感器的电压是交流量，如果用交流电压表指示，则输出量只能反映位移的大小，而不能反映位移的方向；同时，交



流电压输出存在一定的零点残余电压（活动铁心位于中间位置时，输出  $u_0 \neq 0$ ）。因此，差动变压器式传感器的测量电路必须具有分辨位移方向，又能补偿零点残余电压的功能。差动变压器式传感器的测量电路通常采用差动整流电路和相敏检波电路。

### 2. 差动变压器式传感器的特点

差动变压器式传感器具有较好的线性度，较大的测量范围，可以测量  $\pm 100\text{mm}$  的机械位移量；测量精度较高；此外，它还具有灵敏度高、结构简单、性能可靠和输出功率大等优点，因此被广泛应用于直线位移，以及可以转换为位移变化的压力、重量、振动、加速度和应变等参数的测量。差动变压器式传感器的缺点是体积大，响应速度较慢。

## 三、电涡流式传感器

电感线圈通入交流电时，产生的交变磁场会使置于磁场中的金属板产生感应电流。在金属板上形成闭合回路的感应电流（称之为电涡流）产生交变磁场，并对原线圈磁场产生影响，使线圈的阻抗发生变化。这种基于金属板“电涡流效应”的传感器有高频反射式和低频透射式两种类型。

### 1. 高频反射式

高频反射式电涡流传感器原理如图 5-20 所示。当感应线圈通入高频的交流电  $i_0$  时，电涡流  $i_w$  只在金属板的表面形成，电涡流产生的磁场  $\Phi_w$  对线圈电流产生的磁场  $\Phi_0$  造成影响，从而使线圈  $w$  的阻抗  $Z$  发生变化。

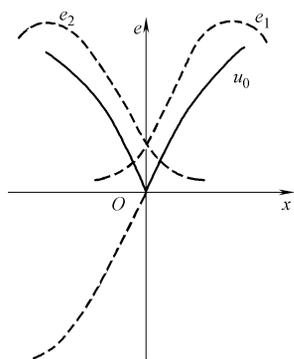


图 5-19 差动变压器式传感器输出特性

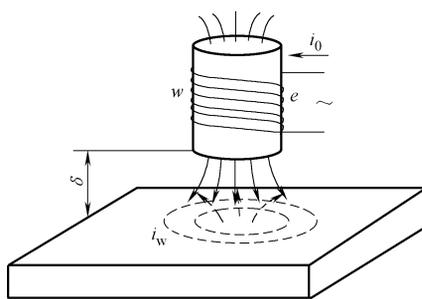


图 5-20 高频反射式涡流传感器原理

电涡流的大小（电涡流对线圈阻抗  $Z$  的影响程度）与线圈至金属板之间的距离  $\delta$ 、金属板的导电率  $\rho$ 、磁导率  $\mu$ 、电流  $i_0$  的幅值  $I$  和角频率  $\omega$  等因素相关，即  $Z$  是  $\delta$ 、 $\rho$ 、 $\mu$ 、 $I$ 、 $\omega$  等的函数：

$$Z = f(\rho, \mu, \delta, I, \omega)$$

如果保持其他参数不变，只是其中某个参数改变，传感器线圈的阻抗  $Z$  就仅仅是这个参数的单值函数，通过测量电路就可实现多种非电量的测量。比如，高频反射式电涡流传感器可以用于测量位移和振动（改变  $\delta$ ），也可以用于测构件的应力、材料的硬度或零件的探伤（改变  $\rho$ 、 $\mu$ ）等。



## 2. 低频透射式

低频透射式电涡流传感器原理如图 5-21 所示。当感应线圈  $w_1$  通入低频激励电流  $i_1$  时，其产生的磁场  $\Phi_1$  使金属板内部产生电涡流  $i_w$ ，电涡流产生的磁场  $\Phi_w$  对金属板另一侧的线圈  $w_2$  产生影响，使其电感发生变化。

对某一确定结构参数的传感器而言，电涡流对线圈的影响程度只与金属板的材料和厚度  $h$  有关。因此，低频透射式传感器通常用来测量厚度。

## 3. 电涡流式传感器的特点

电涡流式传感器可以进行非接触式测量，且具有输出阻抗小，输出功率大，过载能力强，灵敏度高，环境适应性好等特点。电涡流式传感器的缺点是体积较大，精度不高（ $<5\%$ ），动态响应较差。

与其他类型的传感器相比，电感类传感器的优点是结构简单，工作可靠，分辨率高，测量精度较高，输出功率较大；其不足是响应速度较慢，线性范围小。

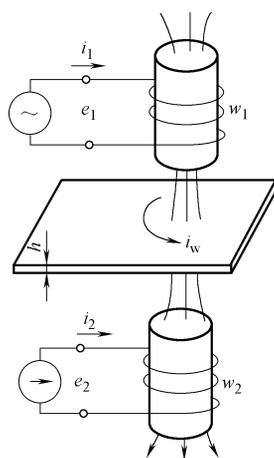


图 5-21 低频透射式涡流传感器原理

## 第四节 电容类传感器

电容类传感器利用传感器敏感元件的电容参量随被测量变化特性，将被测参量转换为相应的电容参量，并通过测量电路转换为相应的电信号。电容类传感器也是参量型传感器，有变气隙式、变面积式和变介电常数式等不同的结构形式。

### 一、变极板间隙式电容传感器

#### 1. 变极板间隙式电容传感器原理

平板式电容器由两个平行的极板构成，如图 5-22 所示。设极板之间的电场  $E$  是均匀的，并忽略极板边缘效应，电容器的电容量  $C$  有如下关系：

$$C = \frac{\varepsilon A}{\delta} \quad (5-24)$$

式中  $\varepsilon$ ——极板间介质的介电常数（F/m）；

$A$ ——极板面积（ $\text{m}^2$ ）；

$\delta$ ——极板间距离（m）。

极板间介质的介电常数为  $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ ，其中  $\varepsilon_0$  为真空的介电常数（ $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ）， $\varepsilon_r$  为相对介电常数，空气的介电常数与真空的介电常数很相近，因此，其相对介电常数  $\varepsilon_r \approx 1$ 。

变极板间隙式电容传感器如图 5-23 所示。构成电容器极板的面积固定，极板之间的介质也不变（介质为空气），通过活动极板随被测量移动而使极板之间的气隙  $\delta$  改变，电容值

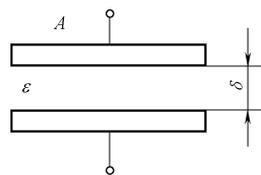


图 5-22 平板式电容器



随之改变。

从式 (5-24) 可知, 电容  $C$  与极板之间的间隙  $\delta$  成反比, 因此, 传感器电容值与位移量之间为非线性关系。

对式 (5-24) 进行微分:

$$dC = -\frac{\varepsilon A}{\delta^2} d\delta$$

得变极板间隙式电容传感器的灵敏度  $S$  为

$$S = \frac{dC}{d\delta} = -\frac{\varepsilon A}{\delta^2} \quad (5-25)$$

传感器的灵敏度  $S$  与极板间间隙  $\delta$  的平方成反比, 在  $\delta$  很小时, 传感器才有较高的灵敏度和较小的非线性误差。

## 2. 差动结构的电容传感器

为提高传感器的灵敏度和减小非线性, 变极板间隙式电容传感器通常采用差动结构形式, 如图 5-24 所示。

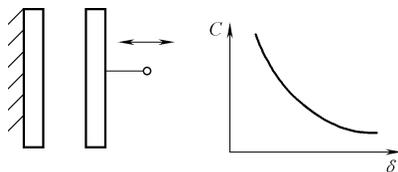


图 5-23 变间隙式电容传感器

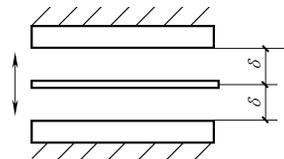


图 5-24 差动结构的变间隙式电容传感器

两固定极板中间位置有一活动极板, 构成两个容量相等的电容器。当活动极板随被测量移动时, 两个电容器的电容量一增一减, 在测量电路中对电信号的作用是相加的, 因而使传感器灵敏度提高一倍:

$$S = \frac{dC}{d\delta} = -2 \frac{\varepsilon A}{\delta^2}$$

变间隙式电容传感器常用于测量位移, 也可用于测量能转换为位移量的其他物理量, 如压力、振动等。

## 二、变极板面积式电容传感器

变极板面积式电容传感器其极板之间的间隙和介质保持不变, 构成电容的极板有效面积随被测量改变而使电容量改变。

根据式 (5-24) 可知, 变极板面积式电容传感器其电容量与极板有效面积之间成正比关系。对式 (5-24) 微分得

$$dC = \frac{\varepsilon}{\delta} dA$$

变极板面积式电容传感器其极板有效面积的改变量  $dA$  与传感器电容量的改变量  $dC$  成



线性关系。根据传感器结构与测量对象的不同，变极板面积式电容传感器分角位移型、线位移型和筒型等不同的形式，如图 5-25 所示。

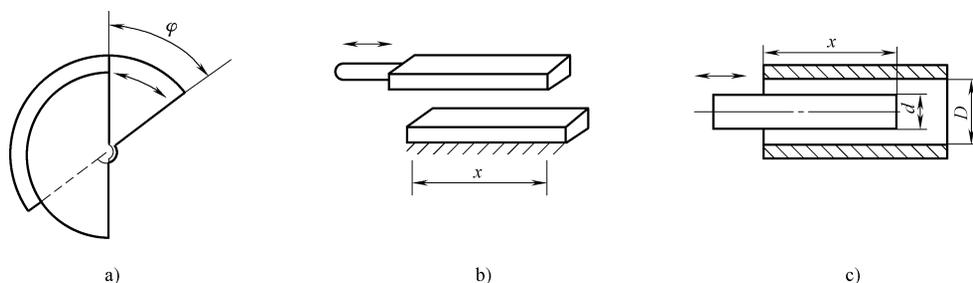


图 5-25 变极板面积式电容传感器

a) 角位移型 b) 线位移型 c) 筒型

### 1. 角位移型变面积电容传感器

角位移型电容传感器如图 5-25a 所示，其电容器极板有效面积  $A$  为

$$A = \frac{\theta r^2}{2}$$

式中  $\theta$ ——极板重合部分的角度；

$r$ ——极板的有效半径。

于是：

$$C = \frac{\epsilon r^2}{2\delta} \theta$$

$$dC = \frac{\epsilon r^2}{2\delta} d\theta$$

$$S = \frac{dC}{d\theta} = \frac{\epsilon r^2}{2\delta} \quad (5-26)$$

即角位移型电容传感器的电容量与角位移量呈线性关系，其灵敏度为常数。

### 2. 线位移型变面积电容传感器

线位移型电容传感器如图 5-25b 所示，其电容器极板有效面积  $A$  为

$$A = b \cdot x$$

式中  $b$ ——极板的宽度；

$x$ ——极板的重合长度。

于是：

$$C = \frac{\epsilon b}{\delta} x$$

$$dC = \frac{\epsilon b}{\delta} dx$$

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{\epsilon b}{\delta} \quad (5-27)$$

即线位移型电容传感器的电容量与线位移量呈线性关系，其灵敏度也为常数。



### 3. 筒型变面积电容传感器

筒型电容传感器如图 5-25c 所示，其电容器极板有效面积  $A$  为

$$A = \frac{2\pi x}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}$$

式中  $D$ ——圆筒的孔径；

$d$ ——圆柱的外径；

$x$ ——极板的重合长度。

于是：

$$C = \frac{2\varepsilon\pi}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}x$$

$$dC = \frac{2\varepsilon\pi}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}dx$$

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{2\varepsilon\pi}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (5-28)$$

筒型电容传感器也用于测量线位移，其电容量与线位移量也呈线性关系。测量线位移时，其灵敏度也为常数。

变极板面积式电容传感器用于直线位移、角位移，以及可转换为位移的其他物理量的测量。角位移型、线位移型和筒型这三种变面积式电容传感器的优点是线性好，缺点是灵敏度相对较低，适应于较大位移量的测量。

## 三、变介电常数式电容传感器

变介电常数式电容传感器其极板的有效面积和极板的间隙保持不变，通过极板之间介质的介电常数随被测量改变而使电容量改变。变介电常数式电容传感器主要有平板型和筒型两种形式。

### 1. 平板型变介电常数电容传感器

将被测对象放置在两极板之间，作为电容器介质的平板型变介电常数电容传感器如图 5-26 所示。传感器电容  $C$  的表达式如下：

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{(a-d) + \frac{d}{\varepsilon_r}}$$

式中  $A$ ——极板的面积 ( $\text{m}^2$ )；

$a$ ——极板的间距 ( $\text{m}$ )；

$d$ ——被测对象的厚度 ( $\text{m}$ )。

被测对象（介质）的相对介电常数  $\varepsilon_r$  与其材质、温度、湿度等有关，对于一定厚度的介质，传感器电容量只与介质的  $\varepsilon_r$  有一一对应的关系。因此，通过传感器电容量  $C$  随  $\varepsilon_r$  而

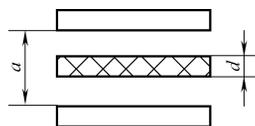


图 5-26 平板型变介电常数电容传感器



变,可测量被测对象的材质、温度和湿度等。

变介质相对介电常数  $\varepsilon_r$  的灵敏度为

$$S = \frac{dC}{d\varepsilon_r} = \frac{\varepsilon_0 A}{\left[ (a-d)\varepsilon_r + \frac{d}{\varepsilon_r} \right]^2} \quad (5-29)$$

如果被测对象的相对介电常数保持不变,则传感器电容量只与介质的厚度  $d$  有关,因此,变介电常数式电容传感器也可用于厚度测量。

## 2. 筒型变介电常数电容传感器

用于测量液面高度的筒型变介电常数电容传感器如图 5-27 所示,其电容由两个同心圆筒构成。空气介质部分的电容量  $C_1$  和液体介质部分的电容量  $C_2$  分别为

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_0(h-x)}{\ln(R_1/R_2)}$$

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon x}{\ln(R_1/R_2)}$$

传感器的电容量  $C$  为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0(h-x)}{\ln(R_1/R_2)} + \frac{2\pi\varepsilon x}{\ln(R_1/R_2)} = \frac{2\pi\varepsilon_0 h}{\ln(R_1/R_2)} + \frac{2\pi(\varepsilon - \varepsilon_0)x}{\ln(R_1/R_2)}$$

对上式进行微分得

$$dC = \frac{2\pi(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\ln(R_1/R_2)} dx$$

传感器的灵敏度为

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{2\pi(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\ln(R_1/R_2)} \quad (5-30)$$

传感器电容量  $C$  与液面高度  $x$  呈线性关系,其灵敏度  $S$  为常数。

与电阻、电感等参量式传感器相比,电容类传感器的主要优点如下。

- ① 输入能量较小,而灵敏度相对较高。
- ② 电参量相对变化大,  $\Delta C/C \geq 100\%$  (金属应变片  $\Delta R/R < 1\%$ , 半导体应变片  $\Delta R/R \leq 20\%$ ), 因此,传感器的信噪比大,稳定性好。
- ③ 动态特性好,能量损耗较小。
- ④ 结构简单,电容式传感器主要结构就是两块金属电极和绝缘层,其环境的适应性好,在振动、辐射环境中仍能可靠工作。

电容类传感器的主要缺点如下。

- ① 非线性较大,除了变气隙式电容传感器被测位移量与传感器电容变化量存在非线性外,传感器电容参量与测量电路之间电压信号转换也存在较大的非线性。
- ② 由于传感器本身的电容量较小,电缆分布电容对传感器的影响很大,这使得其使用受到了较大的限制。

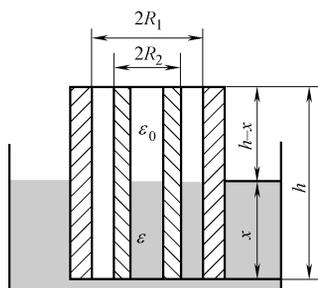


图 5-27 筒型变介电常数式电容传感器

$R_1$ —内筒外圆半径  $R_2$ —外筒内圆半径



## 第五节 发电类传感器

发电类传感器通过某种“发电”方式，将被测物理量直接转换为电量。根据转换电量的原理不同分，发电式传感器有多种。本节主要介绍较为常见的几种，如压电式、磁电式、光电式、热电式和霍尔效应式等。

### 一、压电式传感器

压电式传感器是基于电压材料的压电效应将被测量转换为电量。

#### 1. 压电效应

压电材料在机械力的作用下发生形变时，其内部产生极化现象，使材料表面产生正、负电荷，去掉外力，形变恢复，电荷又重新消失，这种现象称之为压电效应。

常见的压电材料有石英晶体、酒石酸钾钠、钛酸钠、钛酸铅和钛酸钡等。

以石英晶体（ $\text{SiO}_2$ ）为例，天然结构的石英晶体为六角形晶柱，晶柱的中心线为  $z$  轴（或称光轴），垂直于  $z$  轴并通过棱角的轴线称  $x$  轴（或称电轴），按右手坐标系垂直于棱面的轴线为  $y$  轴（或称机械轴）。从晶体上沿轴线切下薄片称之为晶体切片，如图 5-28 所示。

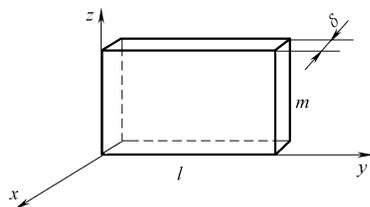


图 5-28 石英晶体切片

晶体切片的压电效应如图 5-29 所示。沿  $z$  轴方向作用力时不产生压电效应，沿  $x$  轴方向施力（压或拉），晶体切片厚度方向变形，在与  $x$  轴垂直的表平面上产生电荷；沿  $y$  轴方向施力（压或拉），晶体切片也在与  $x$  轴垂直的表平面上产生电荷。

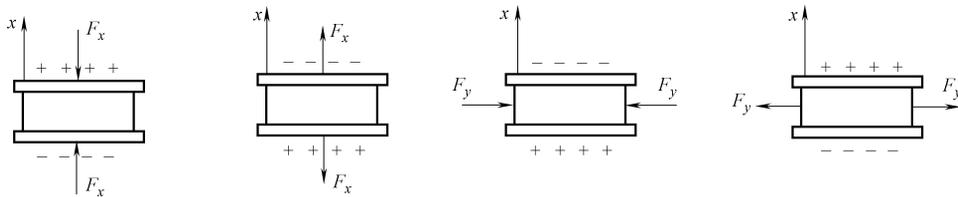


图 5-29 晶体切片的压电效应

晶体表面电荷量的大小为

$$q = DF \tag{5-31}$$

式中  $q$ ——晶体表面的电荷量；

$D$ ——压电常数，与材质和切片的方向有关；

$F$ ——作用于压电晶体的力。

从式（5-31）可知，压电晶体表面的电荷量与作用于压电晶体的力成正比关系。

#### 2. 压电式传感器原理

（1）压电式晶体的输出电压 集聚电荷的晶体切片两侧的电荷量大小相等，方向相反，而晶体片绝缘性很高，因此晶体片就相当于一个电容器（图 5-30），其电容量  $C_q$  为



$$C_q = \frac{\varepsilon A}{\delta} \quad (5-32)$$

式中  $\varepsilon$ ——压电晶体的介电常数；  
 $A$ ——晶片（构成极板）的面积；  
 $\delta$ ——晶片的厚度。

晶片等效电容器的电容量  $C$  与电压  $U_q$  及电荷  $q$  有如下关系：

$$U_q = \frac{q}{C_q}$$

将式 (5-31)、式 (5-32) 代入得

$$U_q = \frac{D\delta}{\varepsilon A} F \quad (5-33)$$

对某种压电晶片而言， $D\delta/\varepsilon A$  为一常数，因此，从集聚电荷的压电晶片两侧引出的电压  $U_q$  与作用于晶片的力  $F$  成正比关系。

(2) 压电晶体的等效电路 压电式传感器的等效电路如图 5-31 所示。当以输出的电荷量大小来反映其受力大小时，压电晶体可等效为电荷源与电容并联，传感器将与电荷放大器相连接；如果以传感器输出的电压信号反映被测量，则压电晶体可等效为电压源与电容串联，传感器需要连接电压放大器。

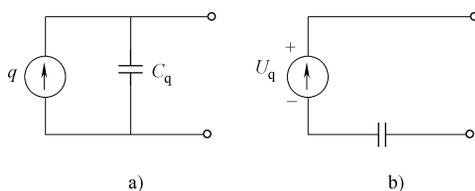


图 5-31 压电式传感器的等效电路

a) 电荷源等效电路 b) 电压源等效电路

(3) 压电晶片的组合方式 为提高传感器的输出，压电式敏感元件通常由两片以上的压电晶片串联或并联而成。

串联组合方式将  $n$  片晶片串联相接后，其总的电荷量  $q_n$  不变，等效电容量  $C_n$  减小  $n$  倍，电压输出  $U_n$  增加  $n$  倍，适用于以电压为输出信号的传感器。串联组合方式其等效的电容量小，时间常数小，动态响应较好。

并联组合方式将  $n$  片晶片并联相接后，其总的电荷量  $q_n$  增加  $n$  倍，等效电容量  $C_n$  也增加  $n$  倍，电压输出  $U_n$  没有变化，适用于以电荷量为输出信号的传感器。由于其等效电容量大，有较大的时间常数，并联组合方式一般用于测量缓变的物理量。

### 3. 压电式传感器的特点

压电式传感器用于力、压力的测量，以及可转换为力和压力的其他物理量（如位移、振动加速度和振动频率等）的测量，具有体积小、重量轻、结构简单、工作可靠以及高频响应特性好等优点。但外力作用在压电元件上产生的电荷会因漏电而消失，因此其低频特性差，不能用于静态测量。

## 二、光电式传感器

光电式传感器利用其敏感元件的光电效应，将光能量转换为相应的电效应。光电效应可分为外光电效应和内光电效应。



## 1. 外光电效应

物质在光线作用下，其内部的电子逸出物体表面向外发射的现象称为外光电效应。基于外光电效应的元器件有光电管和光电倍增管等。

(1) 光电管 光电管的组成与测量原理如图 5-32 所示。由半圆形金属片制成的阴极和位于阴极轴心的金属丝制成的阳极封装于抽成真空的玻璃壳内。当光线照射到阴极上时，光能量传递给了阴极材料的自由电子。当电子获得的能量足够大时，就会克服金属表面的束缚而逸出，形成电子发射。光电管在工作时，其阳极的电位高于阴极，从阴极表面逸出的电子被阳极吸引，在光电管内形成空间电子流（光电流）。光照度强，阴极材料自由电子获得的能量多，单位时间从阴极发射的电子数量也多，光电流就大。此电流通过测量电路的电阻  $R_L$ ，输出一个与光照度相对应的电压信号。

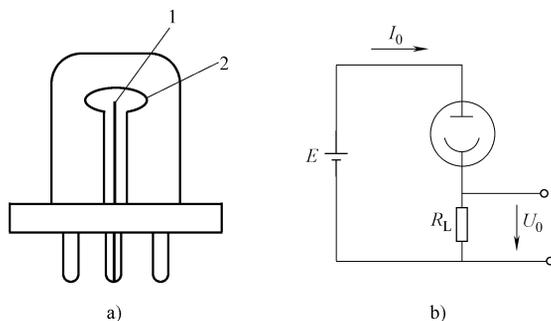


图 5-32 光电管

a) 结构形式 b) 电路原理  
1—阳极 2—阴极

(2) 光电倍增管 由于光电管的灵敏度较低，实际测量中，通常使用有较高灵敏度的光电倍增管。光电倍增管也有阴极和阳极，其工作原理同光电管相似。为提高灵敏度，增加了 10~15 级倍增电极，通过倍增电极的二次发射来倍增电子数量，从而获得更高的电压信号。

## 2. 内光电效应

物质在光线作用下，其电导率发生变化（光电导效应）或产生光电动势（光生伏特效应）的效应称为内光电效应。

(1) 光电导效应 半导体材料受到光照时，会产生电子-空穴对，使其导电性能增强，光线越强，阻值越低，这种光照后电阻率发生变化的现象称为光电导效应。基于光电导效应的光电元件有光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等，可以用作光敏电阻式传感器的敏感元件。这种基于光电导效应的光敏电阻式传感器属于参量型传感器，已在本章第二节提及。

(2) 光生伏特效应 半导体材料 PN 结受到光照时，产生一定方向的电动势，光线越强，电动势越高，这种光照后产生光生电动势现象称之为光生伏特效应。基于光生伏特效应的光电元件有光电池。

光电池的原理如图 5-33 所示。当光线照射 PN 结时，产生电子和空穴（光生载流子），在 PN 结内电场  $E_n$  的作用下，光生载流子产生漂移运动。P 区的光生电子被移向 N 区，空穴留在了 P 区，从而使 P 区带正电荷，N 区带负电荷，形成电位差（光生电动势）。

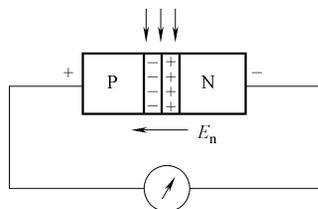


图 5-33 光电池原理

光电池的材料有硅、锗、硒、硫化镉、硫化镉、砷化镓



和氧化亚铜等。硅光电池具有转换效率高、性能稳定、频率特性好、光谱范围大和耐高温辐射等优点，所以应用广泛。硒光电池的光谱峰值位于人眼的视觉范围，因而在测试仪器中也有较多的应用。

### 3. 光电式传感器类型

光电元件在测量中不接触被测对象，因此光电式传感器通常用于非接触式测量。根据输出信号的方式不同，光电式传感器可分为模拟式和脉冲式两大类。

(1) 模拟式光电传感器 模拟式光电传感器的工作原理是基于光电元件的光电特性，其光通量随被测量而变，光电元件产生与光通量相对应的电信号，即传感器的输出电量是被测物理量的函数。这一类光电传感器依据光源、被测对象和光电元件的关系，又可分为辐射式、透射式、反射式和遮光式四种类型，如图 5-34 所示。

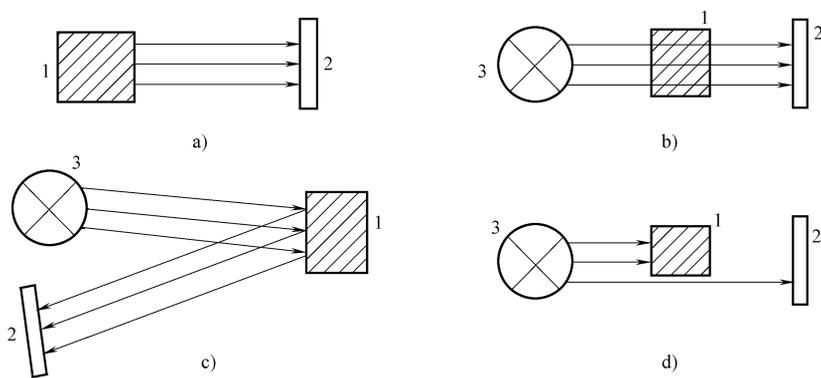


图 5-34 光电传感器的几种类型

a) 辐射式 b) 透射式 c) 反射式 d) 遮光式

1—被测对象 2—光电元件 3—恒定光源

1) 辐射式。被测物体本身就是光源，它可以直接照射在光电元件上，也可以经过一定的光路后作用在光电元件上。光电元件的输出可反映光源的某种物理量，典型的应用有光电高温计、比色高温计、红外侦察和红外遥感、光照度计等。

2) 透射式。传感器有一恒定的光源，被测物体位于恒定光源和光电元件之间，根据被测对象对光的吸收程度或对其谱线的选择来测定被测参量。透射式光电传感器的典型应用有测量液体、气体的透明度、混浊度，对气体进行成分分析，测定液体中某种物质的含量等。

3) 反射式。传感器恒定光源发出的光投射到被测物体上，被测物体把部分光反射到光电元件上，反射的光通量与被测物表面状态和性质有关，因而光电元件输出的电量就反映了被测对象的某种物理量。反射式光电传感器的典型应用有测量零件的表面粗糙度、表面缺陷、表面位移等。

4) 遮光式。被测物体位于恒定光源与光电元件之间，光源发出的光照射到光电元件上，被测对象会遮去一部分光通量，使作用在光电元件上的光通量与被测对象的位置有关。遮光式光电传感器可以用于测量物体的长度、厚度、线位移、角位移和振动等。

(2) 脉冲式光电传感器 脉冲式光电传感器的工作方式是光电元件的输出仅有高电平和低电平两种稳定状态，或者说是“通”和“断”的开关状态，因此对光电特性的线性度



要求不高。脉冲式光电传感器的基本组成部件是恒光源、光学通道和光电元件，从光源照射到光电元件的光学通道有反射式和遮光式两种形式。

脉冲式光电传感器不存在非线性误差，结构简单，应用较为广泛。典型的应用有零件或产品的自动计数、转速测量、转角测量、光控开关、电子计算机的光电输入设备、光电编码器及光电报警装置等。

#### 4. 光电式传感器的特点

光电式传感器的特点是灵敏度高、体积小、重量轻、性能稳定，且可实现非接触式测量；其缺点是抗污能力较差，光电元件、光源或光学通道有灰尘或脏污等影响光通量时，传感器就会产生较大的误差或不能正常工作。

### 三、磁电式传感器

磁电式传感器通过磁电效应将被测物理量的变化转换为电信号。根据法拉第电磁感应定律：通过回路所包围的面积磁通量发生变化时，回路中产生的电动势  $e$  与磁通量  $\Phi$  相对时间的变化率成正比。具有  $W$  匝的线圈其感应电动势为

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (5-34)$$

式 (5-34) 中的负号表示感应电动势的方向与磁通量的变化相反。对于磁电式传感器，通常使其磁动势保持不变，通过线圈的运动（动圈式）或改变磁路的磁阻（磁阻式）的方式使磁通量发生变化，以使线圈产生相应的感应电动势。

#### 1. 动圈式磁电传感器

动圈式磁电传感器将被测物理量转换为感应线圈的移动，使通过线圈的磁通量发生变化而产生感应电动势。根据线圈移动方式的不同，动圈式传感器有线位移型和角位移型两种，如图 5-35 所示。

(1) 线位移型 当线圈随被测量在磁场中做直线运动时（图 5-35a），通过线圈的磁通量发生变化，线圈的感应电动势  $e$  为

$$e = WBlv\sin\theta \quad (5-35)$$

式中  $W$ ——线圈的有效匝数；

$B$ ——磁场的磁感应强度；

$l$ ——单匝线圈的长度；

$v$ ——线圈运动速度；

$\theta$ ——线圈运动方向与磁场方向的夹角，通常  $\theta = \pi/2$ 。

由于传感器线圈的匝数  $W$ 、单匝线圈的长度  $l$  及磁感应强度  $B$  均为定值，感应线圈的电动势  $e$  只与线圈的直线运动速度  $v$  成正比关系。

(2) 角位移型 当线圈随被测量在磁场中做旋转运动时（图 5-35b），通过线圈的磁通

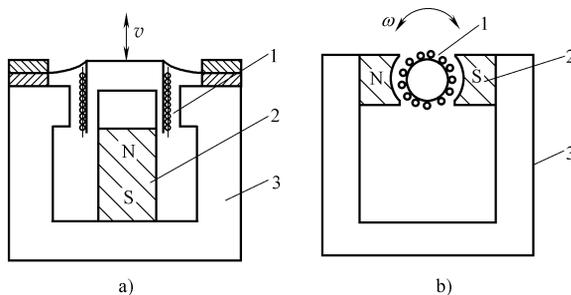


图 5-35 动圈式磁电传感器

a) 线位移型 b) 角位移型

1—线圈 2—永久磁铁 3—导磁板



量发生变化，线圈的感应电动势  $e$  为

$$e = WBA\omega \quad (5-36)$$

式中  $W$ ——线圈的有效匝数；

$B$ ——磁场的磁感应强度；

$A$ ——单匝线圈的截面积；

$\omega$ ——线圈运动速度。

由于  $W$ 、 $A$ 、 $B$  均为定值，感应线圈的电动势  $e$  只与线圈的角速度  $\omega$  成正比关系。

## 2. 磁阻式磁电传感器

磁阻式磁电传感器将被测物理量转换为磁路磁阻的变化，使通过线圈的磁通量发生变化而产生感应电动势。磁阻式传感器磁路的磁阻大小主要取决于磁路中空气隙的大小，通常采用导磁体运动的方式来改变磁路中的空气隙。图 5-36 所示两种改变空气隙大小的方式是采用导磁块做直线运动和用导磁转子做旋转运动。

磁阻式传感器的线圈、永久磁铁及铁心等固定不动，导磁块或导磁转子随被测物理量的变化做直线运动或转动时，磁路的磁阻因空气隙的变化而改变，使通过线圈的磁通量改变而产生感应电动势。

由导磁块做直线运动的磁阻式传感器通常用于测量振动、加速度等物理量，导磁转子做旋转运动的磁阻式传感器被用于计数、测量转速等。

## 3. 磁电式传感器的特点

磁电式传感器结构简单、工作可靠，在工程测量和自动控制系统中应用较为广泛。磁电式传感器只能用于动态测量，当被测对象的速度 ( $v$ 、 $\omega$ ) 太低时，其感应电动势  $e$  太弱，也不能测量。

## 四、热电式传感器

热电式传感器利用其敏感元件的热电效应，将被测对象的部分热量转换为反映其温度高低的电信号。

### 1. 热电效应

两种不同材料的导体串成一闭合回路（称之为热电偶，如图 5-37 所示），如果两接点的温度不同，在回路中就会有电流产生，这种由于温度不同而产生电动势的现象称之为热电效应。这种由热电效应所产生的电动势实际上包含了接触电动势和温差电动势两部分。

(1) 接触电动势 两种不同材料的导体接触后，其接触表面就会有自由电子的扩散运动。由于不同材料的导体其自由电子的密度不同，密度高的导体向密度低的导体扩散的电子数量多，使其接触表面电子数减少而呈正极，密度低的导体

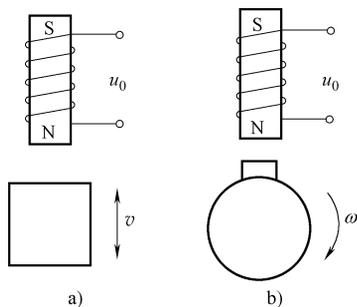


图 5-36 磁阻式磁电传感器

a) 导磁块式 b) 导磁转子式

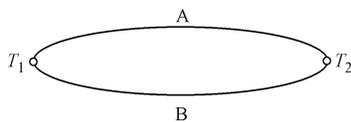


图 5-37 热电偶



其接触表面电子数则会增加而呈负极。于是，两种不同材料的导体接触表面就形成了电位差，此电位差称之为接触电动势。

电子扩散的速率与温度和导体的材料有关，因此，不同材料的导体、在不同的温度下，其接触电动势会有所不同。

(2) 温差电动势 同种导体其两端的温度不同时，导体在温度高端其内部自由电子具有较大的动能，因而总体上电子从温度高端向温度低端迁移，使得温度高端失去电子而电位升高，温度低端则得到电子而电位降低，从而在导体两端产生电位差，这个电位差称之为温差电动势。

温差电动势  $e$  与导体的材料和冷热端的温度差有关：

$$e = \alpha(T_1 - T_2) \quad (5-37)$$

式中  $\alpha$ ——热电偶系数（与导体的材料有关）；

$T$ ——导体两端的绝对温度。

## 2. 热电偶温度测量原理

对固定材料的热电偶来说，其电动势的大小只与两接点的温度有关，且两端的温度差越大，热电偶产生的电动势也越大。通常将热电偶的冷端（非测量端）温度固定，热电偶的电动势就成为热端（测量端）温度的单值函数了。

热电偶通常以冷端温度为  $0^\circ\text{C}$  标定，但实际测量中，受环境和热端温度的影响，冷端的温度不能恒定为  $0^\circ\text{C}$ ，这会造成热电偶电动势不能准确反映被测温度。为此，需要对冷端进行温度补偿。通常采用如下方法。

- ① 冷端恒温。通常将热电偶冷端置于恒温器中，使其温度固定在  $0^\circ\text{C}$ 。
- ② 冷端温度校正。在仪表上进行温度调校，以弥补冷端温度不为  $0^\circ\text{C}$  所造成的偏差。
- ③ 设补偿导线。使冷端远离温度测量对象，通常将冷端设置在已知温度的地点。
- ④ 采用热电偶冷端补偿器。即在测量电路中串联一个随冷端温度而变的直流电压来抵消冷端温度变化所产生的影响。

## 3. 热电式传感器的特点

热电偶测量温度具有简单、可靠、灵敏、测量精度较高和信号便于远距离传送等优点，因此在温度测量中有着较为广泛的应用。

# 五、霍尔效应式传感器

霍尔效应式传感器利用半导体元件的霍尔效应，将被测物理量转换为相应的电压或电压脉冲。

## 1. 霍尔效应

置于磁场中的半导体（称霍尔元件）有电流流过时，在垂直于电流和磁场的方向上将产生电动势，这种物理现象称为霍尔效应。

霍尔效应的原理如图 5-38 所示。在外电场力的作用下，半导体中的载流子做定向运动（即形成电流），在磁场中运动的电荷又会受到磁场力的作用，这个力称之为洛仑兹力。洛仑兹力的方向垂直于电荷运动的方向，使运动的电子发生偏转，在霍尔元件的一侧形成负电



荷的累积,另一侧则累积了正电荷(空穴)。于是,在霍尔元件的两侧就形成了电位差,这个电位差称之为霍尔电压。霍尔电压  $U_H$  的大小与电流  $I$ 、磁感应强度  $B$  成正比,与霍尔元件的厚度  $d$  成反比:

$$U_H = \frac{R_H}{d} IB \quad (5-38)$$

式中  $R_H$ ——霍尔系数,与霍尔元件的材料有关。

## 2. 霍尔效应式传感器

从式(5-38)可知,改变  $I$  或  $B$ , 均可使  $U_H$  产生相应的变化。霍尔效应传感器通常采用固定电流  $I$ , 磁感应强度  $B$  随被测物理量变化的形式,霍尔元件产生的霍尔电压  $U_H$  反映被测物理量。改变  $B$  的方式有变磁路磁阻式、动铁或动元件式等,几种典型的霍尔效应式传感器原理如图 5-39 所示。

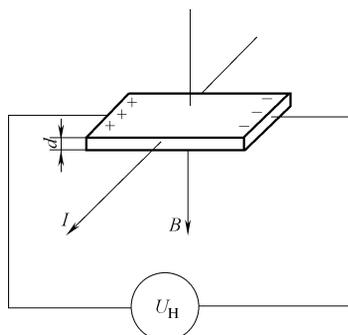


图 5-38 霍尔效应

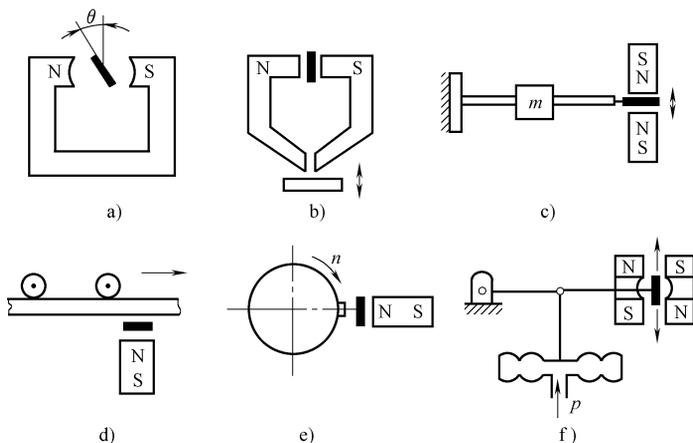


图 5-39 几种典型的霍尔效应式传感器原理

a) 角位移 b) 线位移 c) 加速度 d) 计数 e) 转速 f) 压力

霍尔效应式传感器根据其电压输出的形式不同可分为线性型和开关型两种。

(1) 线性型霍尔效应式传感器 线性型霍尔效应式传感器霍尔元件的输出与线性放大器连接,输出与被测物理量变化相对应的电压信号。线性型霍尔效应式传感器用各种方式将被测量转换为通过霍尔元件的磁感应强度变化,并产生相应的电压信号。线性型霍尔效应传感器可用于非接触测距、磁场测量、磁力探伤和振动等测量。

(2) 开关型霍尔效应式传感器 开关型霍尔效应传感器是将霍尔元件产生的霍尔电压经开关电路处理后,输出只有高电平和低电平变化的数字信号。开关型霍尔效应式传感器利用不同的转换方式,将被测量转换为通过霍尔元件磁通量的变化,产生脉动的电压信号。开关型霍尔效应式传感器通常用于测量位移、转速、计数等。

## 3. 霍尔式传感器的特点

霍尔式传感器结构简单,测量精度较高。相比于磁电式传感器,具有信号稳定的优点;与光电式传感器相比,则具有抗污能力强等特点。因此,对于磁电式传感器、光电式传感器



和霍尔式传感器均可测量的一些物理量（如汽车发动机曲轴的位置、发动机的转速等），霍尔式传感器的应用比例在逐渐增加。

### 思 考 题

1. 传感器一般由哪几部分组成，各组成部分的作用是什么？
2. 按不同的分类方法归类，都有哪些种类的传感器？对传感器一般有哪些要求？
3. 电位计式传感器一般有哪几种类型？线性线绕式电位计产生测量误差的原因有哪些？
4. 何为应变效应？金属应变片和半导体应变片有何异同？
5. 电阻应变片都有哪些应用？
6. 电感类传感器有哪些种类？电感类传感器的特点是什么？
7. 变气隙式自感型电感传感器如何减小其非线性和提高其灵敏度？
8. 电涡流式传感器的基本原理是什么？两种形式的电涡流传感器是如何工作的？
9. 互感式传感器（差动变压器型）的基本组成部件是什么？差动变压器如何将测量转换为电压信号？
10. 电容类传感器有哪些类型？其基本特点是什么？
11. 如何提高变气隙式电容传感器的灵敏度和线性度？
12. 何谓压电效应？压电传感器如何将测量转换为电信号？
13. 压电晶体有什么样的等效电路？压电传感器具有什么特点？
14. 压电传感器有哪几种组合方式？各需配置什么放大电路？
15. 何谓外光电效应和内光电效应？基于光电效应的敏感元件如何产生电信号？
16. 光电式传感器有哪些类型？光电传感器的特点是什么？
17. 磁电式传感器有哪些种类？其特点是什么？
18. 何谓热电效应？热电偶产生电动势的实质是什么？
19. 何谓霍尔效应？霍尔效应传感器的电信号是如何产生的？
20. 霍尔式传感器有哪些类型？其特点是什么？

# 第六章

## 测量电路

测量电路也称中间变换器或信号调理电路，其作用是将传感器所转换的物理量做进一步的处理，以便于显示器显示和记录器记录，或送计算机进行数据处理。测量电路的信号处理功能包括信号的转换、放大、运算、滤波、整形、调制与解调、模数（A/D）与数模（D/A）转换等。本章讨论测量电路中常用的电桥、滤波器、调制与解调器，以及电压与电荷放大器等的的作用与工作原理，但不涉及这些中间变换器具体的电路。

### 第一节 电 桥

电桥的作用是将电感、电容、电阻等参数的变化转换为电压或电流信号，以便于显示或经放大后显示。电桥是电感类传感器、电容类传感器及电阻应变式传感器等参量式传感器使用最多的信号处理电路。按供桥电源的不同分，有直流电桥和交流电桥两大类。

#### 一、直流电桥

直流电桥的基本形式如图 6-1 所示。电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  组成四个桥臂，从  $a$ 、 $c$  端接入直流电源，从  $b$ 、 $d$  两端输出电压。

##### 1. 输出表达式

当电桥输出端连接输入阻抗较大的仪表或放大器时，可视为开路（ $R_L \approx \infty$ ），输出电流  $I_L \approx 0$ 。桥路电流  $I_1$ 、 $I_2$  为

$$I_1 = \frac{U_i}{R_1 + R_2}, \quad I_2 = \frac{U_i}{R_3 + R_4}$$

桥臂  $a$ 、 $b$  和  $a$ 、 $d$  之间的电压为

$$U_{ab} = I_1 R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_i$$

$$U_{ad} = I_2 R_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_i$$

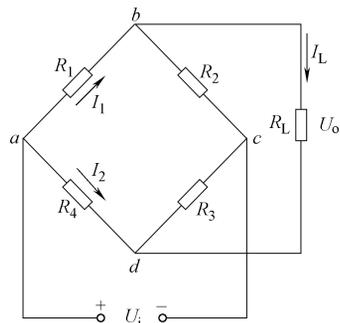


图 6-1 直流电桥



输出电压  $U_o$  为

$$U_o = U_{ab} + U_{ab} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_i = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_i \quad (6-1)$$

从式 (6-1) 可知, 要使电桥处于平衡状态 (输出电压为 0), 应满足如下条件:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (6-2)$$

设原处于平衡状态下的电桥其四个桥臂电阻均发生了变化, 即

$$R_1 = R_1 + \Delta R_1, R_2 = R_2 + \Delta R_2, R_3 = R_3 + \Delta R_3, R_4 = R_4 + \Delta R_4$$

代入式 (6-1) 则有

$$U_o = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} U_i$$

将上式展开, 根据式 (6-2), 并略去  $\Delta R$  二阶微量, 可得电桥的输出电压与各桥臂电阻之间更为明确的关系式:

$$U_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_i \quad (6-3)$$

式 (6-3) 即为直流电桥的输出表达式。对输出对称电桥 ( $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ ) 和等臂电桥 ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ), 电桥的输出表达式可写成:

$$U_o = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_i \quad (6-4)$$

式 (6-4) 表示直流电桥的四个桥臂其电阻变化对电桥输出电压的影响, 其中相邻两桥臂电阻变化时对输出电压的影响相反, 而相对桥臂电阻变化对输出电压的影响是相同的。

## 2. 电桥不同工作方式的输出电压

电桥工作方式不同, 其输出电压的灵敏度也不同。以电阻应变式传感器的等臂电桥 ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ) 为例, 分析在不同的接桥方式下电桥的输出电压。

(1) 单臂 单臂电桥是指电桥只有一个桥臂是传感器电阻, 其他三个桥臂为常值电阻。如果  $R_1$  为应变片, 其余的为常值电阻, 则有

$$\Delta R_1 = \Delta R, \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$$

代入式 (6-4) 得

$$U_o = \frac{\Delta R}{4R} U_i$$

(2) 半桥 半桥电桥其两个桥臂是传感器电阻, 其他两个桥臂为常值电阻。半桥电桥有相邻臂和相对臂两种接桥方式, 应变片的贴片方式实例如图 6-2 所示。

1) 相邻臂  $R_1、R_2$  为应变片,  $R_3、R_4$  为常值电阻。

相邻臂电桥工作方式通常有两种, 一种是用作温度补偿, 另一种是通过差动工作方式来提高灵敏度。

① 温度补偿工作方式。其应变片贴片方式及受力如图 6-2a 所示,  $R_1$  为工作片 (测量片),  $R_2$  用作温度补偿片, 就有

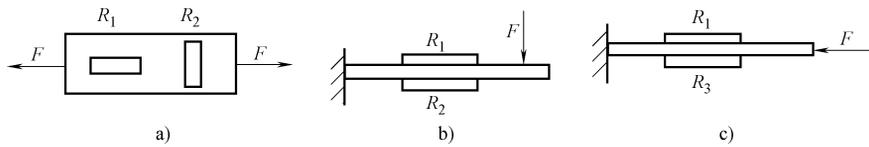


图 6-2 应变片的贴片方式

a)  $R_1$  工作片、 $R_2$  温度补偿片 b)  $R_1$ 、 $R_2$  工作片 (差动) c)  $R_1$ 、 $R_3$  工作片 (相对臂)

$$\Delta R_1 = \Delta R, \Delta R_2 = -\mu\Delta R, \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$$

代入式 (6-4) 得

$$U_o = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) U_i = \frac{(1+\mu)\Delta R}{4R} U_i$$

横向贴片的补偿片与测量片的温度系数一样, 温度变化时其电阻变化对输出电压的影响相互抵销了, 而在被测力的作用下, 补偿片的电阻变化为  $-\mu\Delta R$ , 还有增加灵敏度的作用。

② 差动工作方式。其应变片贴片方式及受力如图 6-2b 所示,  $R_1$ 、 $R_2$  均为工作片, 就有

$$\Delta R_1 = \Delta R, \Delta R_2 = -\Delta R$$

代入式 (6-4) 得

$$U_o = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) U_i = \frac{\Delta R}{2R} U_i$$

由上式可见, 等臂电桥两相邻工作臂为差动工作方式时, 其灵敏度可提高一倍。如果相邻臂工作片的电阻变化相同, 则电桥的输出电压始终为 0。

2) 相对臂。 $R_1$ 、 $R_3$  为应变片,  $R_2$ 、 $R_4$  为常值电阻。

当应变片贴片方式和受力如图 6-2c 所示时, 就有

$$\Delta R_1 = \Delta R, \Delta R_3 = \Delta R, \Delta R_2 = \Delta R_4 = 0$$

代入式 (6-4) 得

$$U_o = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) U_i = \frac{\Delta R}{2R} U_i$$

相对臂为传感器, 两传感器的电阻随被测量的变化相同时, 其灵敏度可提高一倍。如果两传感器的电阻随被测量变化相反, 则电桥的输出电压始终为 0。

(3) 全桥 全桥电桥是指其四个桥臂均连接传感器电阻。图 6-3 是全桥应变片的两种贴片和受力方式。

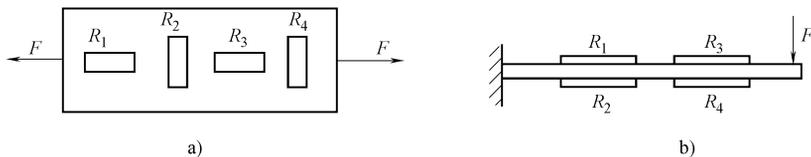


图 6-3 全桥应变片贴片方式

a)  $R_1$ 、 $R_3$  工作片,  $R_2$ 、 $R_4$  温度补偿片 b)  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_2$ 、 $R_4$  工作片 (双差动)

①  $R_1$ 、 $R_3$  为工作片,  $R_2$ 、 $R_4$  为补偿片 (图 6-3a), 就有

$$\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R, \Delta R_2 = \Delta R_4 = \mu\Delta R$$



代入式 (6-4) 得

$$U_o = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_i = \frac{(1 + \mu) \Delta R}{2R} U_i$$

②  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  均为工作片 (图 6-3b), 就有

$$\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R, \quad \Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$$

代入式 (6-4) 得

$$U_o = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_i = \frac{\Delta R}{R} U_i$$

从上述几个例子分析表明, 将传感器电阻连接成半桥或全桥, 可提高其输出电压。实际上, 半桥或全桥工作方式还可减小传感器的非线性误差。从式 (6-4) 和图 6-1 可知, 每个桥臂的电阻变化对电桥输出电压的影响都是与相对桥臂相同, 而与相邻桥臂相反。因此, 传感器电阻连接成半桥或全桥的接桥方式是, 变化趋势相同的两个电阻应连接成相对桥臂; 变化趋势相异 (差动) 的两个电阻应连接成相邻桥臂。

直流电桥的优点是所需的高稳定性直流电源较易获得; 电桥输出是直流电压, 可以用直流仪表显示测量结果; 对从传感器到测量仪表的连接导线要求较低; 电桥的平衡电路简单。直流电桥的缺点是直流放大器比较复杂, 易受零漂和接地电位的影响。

## 二、交流电桥

电阻类传感器可以用上述直流电桥进行信号的调理, 对于电感类传感器和电容类传感器, 则需要用交流电桥。交流电桥的电源是交流电, 电桥的桥臂不是纯电阻, 还包括电感或电容, 因而四个桥臂是由阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 、 $Z_4$  组成, 如图 6-4 所示。

### 1. 交流电桥的平衡条件

以复阻抗  $Z$  代替电阻  $R$ , 且电源电压和输出电压分别用复数  $\dot{U}_i$ 、 $\dot{U}_o$  表示, 就可以用直流电桥分析方法得到式 (6-5)。

$$\dot{U}_o = \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \dot{U}_i \quad (6-5)$$

于是, 交流电桥的平衡条件为

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad (6-6)$$

将复阻抗用指数形式  $Z = |Z| e^{j\phi}$  表示, 则式 (6-6) 可表示为

$$|Z_1| |Z_3| e^{j(\phi_1 + \phi_3)} = |Z_2| |Z_4| e^{j(\phi_2 + \phi_4)} \quad (6-7)$$

因此, 交流电桥处于平衡状态的条件是

$$|Z_1| |Z_3| = |Z_2| |Z_4| \quad (6-8)$$

$$\phi_1 + \phi_3 = \phi_2 + \phi_4 \quad (6-9)$$

式 (6-8) 和式 (6-9) 表示交流电桥平衡条件是相对两臂阻抗模的乘积相等, 同时相对两臂阻抗的相位角之和相等。

### 2. 电感电桥

典型电感电桥如图 6-5 所示, 其中  $R_1$ 、 $R_4$  可看成是电感线圈的有功电阻。实际上, 传



感器及测量电路具有分布电容，但电容值很小，在此将其忽略。

图 6-5 所示的电感电桥四个桥臂的阻抗分别为

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + j\omega L_1, & Z_4 &= R_4 + j\omega L_2 \\ Z_2 &= R_2, & Z_3 &= R_3 \end{aligned}$$

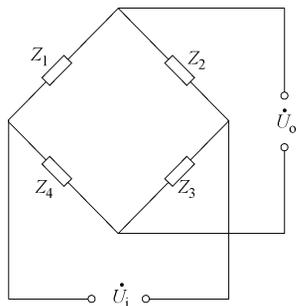


图 6-4 交流电桥

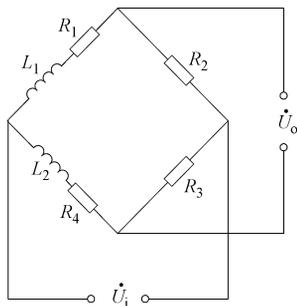


图 6-5 电感电桥

根据交流电桥的平衡条件有

$$(R_1 + j\omega L_1)R_3 = (R_4 + j\omega L_2)R_2$$

整理后得

$$R_1 R_3 + j\omega L_1 R_3 = R_2 R_4 + j\omega L_2 R_2$$

两复数相等，其实部、虚部及复角均相等，由此，电感电桥的平衡条件为

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (6-10)$$

$$L_1 R_3 = L_2 R_2 \quad \text{或} \quad \frac{L_1}{L_2} = \frac{R_2}{R_3} \quad (6-11)$$

由于  $Z_2$ 、 $Z_3$  为纯电阻， $\phi_2 = \phi_3 = 0$ ， $Z_1$ 、 $Z_4$  两桥臂为性质相同的电感（ $\phi_1 = \phi_4$ ）即满足相角平衡条件。

从上述分析可知，电感电桥除满足电阻平衡条件外，还需满足电感平衡条件。

### 3. 电容电桥

典型电容电桥如图 6-6 所示，其中  $R_1$ 、 $R_4$  可看成是电容介质的损耗电阻。

图 6-6 所示的电容电桥四个桥臂的阻抗分别为

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}, & Z_4 &= R_4 + \frac{1}{j\omega C_2} \\ Z_2 &= R_2, & Z_3 &= R_3 \end{aligned}$$

根据交流电桥的平衡条件有

$$\left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}\right)R_3 = \left(R_4 + \frac{1}{j\omega C_2}\right)R_2$$

整理后得

$$R_1 R_3 + \frac{R_3}{j\omega C_1} = R_2 R_4 + \frac{R_2}{j\omega C_2}$$

因此，电容电桥的平衡条件为

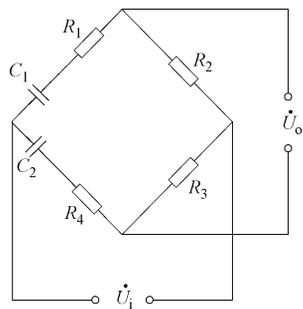


图 6-6 电容电桥



$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (6-12)$$

$$\frac{R_3}{C_1} = \frac{R_2}{C_2} \text{ 或 } \frac{C_2}{C_1} = \frac{R_2}{R_3} \quad (6-13)$$

由于  $\phi_2 = \phi_3 = 0$ ，只要  $Z_1$ 、 $Z_4$  两桥臂为性质相同的电容 ( $\phi_1 = \phi_4$ )，即可满足相角平衡条件。

从上述分析可知，电容电桥除满足电阻平衡条件外，还需满足电容平衡条件。

需要注意的是，交流电桥的电源应具有良好的电压和频率稳定性，否则，当电源电压波形畸变（包含了高次谐波成分）时，电桥对基波达到了平衡，但对高次谐波而言，电桥则处于非平衡状态，即高次谐波使电桥有电压输出，会造成测量误差。

### 三、变压器电桥

变压器电桥实际上就是一种电感式电桥，它将变压器的绕组作为电桥的桥臂，有图 6-7 所示的两种形式。

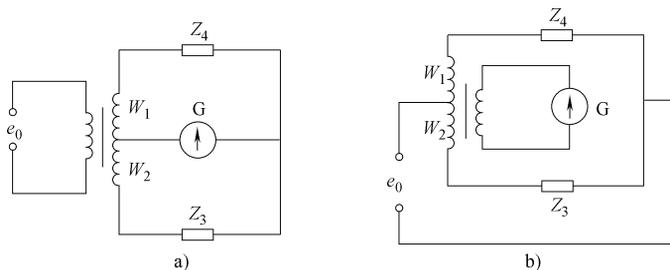


图 6-7 变压器电桥

a) 二次绕组为桥臂的电桥 b) 一次绕组为桥臂的电桥

#### 1. 二次绕组为桥臂的变压器电桥

如图 6-7a 所示，变压器的二级绕组  $W_1$ 、 $W_2$  接入电桥，其阻抗分别为  $Z_1$ 、 $Z_2$ ，与阻抗  $Z_3$ 、 $Z_4$  组成四个桥臂。电桥处于平衡状态时 ( $Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$ ) 输出电压为 0。

$Z_3$ 、 $Z_4$  通常设为相等且恒定不变，而变压器的二级绕组  $W_1$ 、 $W_2$  的阻抗  $Z_1$ 、 $Z_2$  则会随变压器铁心的移动而改变。比如，当变压器铁心随被测量上移时， $W_1$ 、 $W_2$  的互感发生改变，使  $Z_1 \rightarrow Z_1 + \Delta Z$ ， $Z_2 \rightarrow Z_2 - \Delta Z$ ，电桥失去平衡而有电压输出。

#### 2. 一次绕组为桥臂的变压器电桥

如图 6-7b 所示，变压器的一次绕组  $W_1$ 、 $W_2$  接入电桥，其阻抗分别为  $Z_1$ 、 $Z_2$ ，与阻抗  $Z_3$ 、 $Z_4$  组成四个桥臂。电桥处于平衡状态时， $W_1$ 、 $W_2$  产生的感应电动势大小相等、方向相反，互相抵销而使二次绕组无感应电动势，其输出电压为 0。

当变压器铁心随被测量上下移动时，电桥失去平衡，使二次绕组产生感应电动势，并输出与铁心移动量相对应的电压。

上述电桥中的变压器，就是差动变压器式传感器，通过其铁心随被测量的移动转换为绕组互感（桥臂感抗）的变化，并通过电桥转换为电压或电流输出。

变压器电桥的特点是精度和灵敏度较高，性能较为稳定，频率范围较宽。



## 四、平衡式电桥

### 1. 非平衡式电桥的不足

上述电桥均是在电桥失去平衡时才有输出，也就是说，测量过程电桥是在不平衡的状态下工作。这种非平衡式电桥的共同缺点是当电源电压不稳定、环境温度有变化时，会引起电桥输出电压的变化，从而造成测量误差。

### 2. 平衡式电桥的测量原理

平衡式电桥的原理如图 6-8 所示。在测量前，电桥处于平衡状态。测量过程中，当电桥的某桥臂电阻随被测量改变时，电桥失去平衡，通过调节电位器，使电桥重新回到平衡状态。电位器上的标度与电桥电阻的变化成正比，其指示值即反映了被测量数值。

### 3. 平衡式电桥的特点

平衡式电桥是在电桥处于平衡状态时读数，其测量误差取决于电位器本身的精度以及与被测量之间的线性度，而与电桥电源的电压无关。因此，与非平衡式电桥相比，平衡式电桥的测量精度较高。

平衡式电桥适用于静态测量，常以手动方式调平衡。也有由控制电路通过伺服电动机驱动电位器的方式实现自动调平衡。

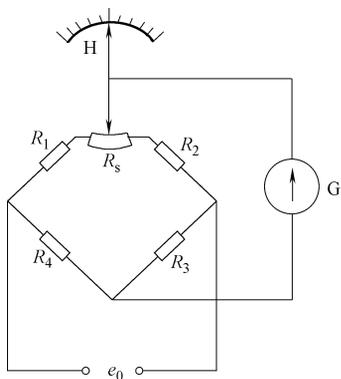


图 6-8 平衡式电桥的原理

## 第二节 滤波器

滤波器是一种能让信号中特定的频率成分通过，抑制或极大地衰减其他频率成分的信号调理电路。在测试系统中，滤波器通常用作滤除干扰噪声或选择有用信号等。按滤波器的选频率功能分，有带通滤波器、高通滤波器和低通滤波器等；按滤波器电路的构成分，可分为无源滤波器和有源滤波器两大类。无源滤波器由电阻  $R$ 、电容  $C$  及电感  $L$  组成，也称被动式滤波器；有源滤波器由  $R$ 、 $C$  元件，运算放大器及电源等组成，也称主动式滤波器。

### 一、理想滤波器

理想的滤波器能让信号中需要的频率成分毫无衰减地通过，而将噪声和不需要的频率成分完全衰减掉。理想的带通滤波器、低通滤波器和高通滤波器如图 6-9 所示。

#### 1. 理想的带通滤波器

理想的带通滤波器（图 6-9a）可以使输入信号其频率在  $\omega_{C1} \sim \omega_{C2}$  范围内的正弦分量无衰减地通过，而频率低于  $\omega_{C1}$  和高于  $\omega_{C2}$  的信号分量则被完全衰减掉。

$f_{C1}$ （ $=\omega_{C1}/2\pi$ ）和  $f_{C2}$ （ $=\omega_{C2}/2\pi$ ）称之为带通滤波器的截止频率。两截止频率之间的频率范围称之为通频带或带宽。带通滤波器的通频带（带宽）为  $B=f_{C2}-f_{C1}$ 。

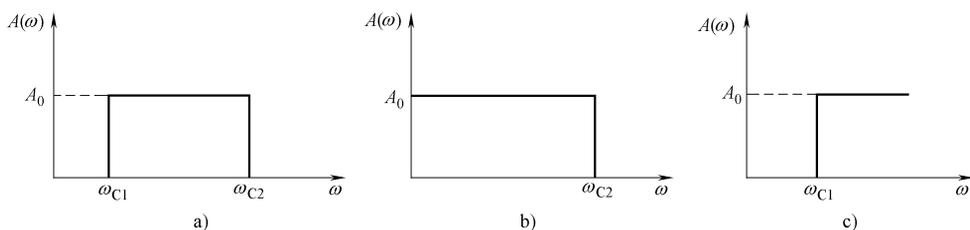


图 6-9 理想滤波器

a) 理想带通滤波器 b) 理想低通滤波器 c) 理想高通滤波器

## 2. 理想的低通滤波器

如果  $\omega_{c1} = 0$ ，则为理想的低通滤波器（图 6-9b）。低通滤波器只允许频率在  $0 \sim \omega_{c2}$  范围内的信号通过，高于  $\omega_{c2}$  的信号分量则被完全衰减掉。

## 3. 理想的高通滤波器

如果  $\omega_{c2} \rightarrow \infty$ ，则为理想的高通滤波器（图 6-9c）。高通滤波器则是将信号中低于  $\omega_{c1}$  的频率成分完全衰减掉，而使高于  $\omega_{c2}$  的信号分量毫无衰减地通过。

## 二、实际滤波器

对于理想滤波器，由截止频率就可说明其性能。理想滤波器在通频带内的幅频特性为一常数（幅值均为  $A_0$ ），而在通频带之外的幅频特性则为零（幅值均为 0）。但是，实际的滤波器不可能有这样理想的特性。图 6-10 表示了实际带通滤波器的特性，它与理想滤波器之间有着较大的差别。实际滤波器的性能需要比理想滤波器复杂得多的参数来反映。

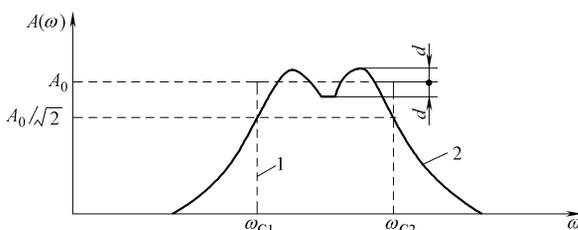


图 6-10 实际带通滤波器特性曲线

1—理想带通滤波器特性曲线 2—实际带通滤波器特性曲线

### 1. 实际滤波器的基本参数

#### (1) 平均值 $A_0$ 和纹波幅度 $d$

实际滤波器在通频带内的幅频特性并不是常数，而是在某个范围内上下波动。纹波的中间值即为通频带内幅值的平均值  $A_0$ ，纹波幅度  $d$  与平均值  $A_0$  相比越小越好，应远小于  $-3\text{dB}$  ( $d \ll A_0/\sqrt{2}$ )。

(2) 截止频率  $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$  实际滤波器的频率特性曲线并没有明显的转折点，通常是以  $A(\omega)$  衰减至  $-3\text{dB}$  ( $A(\omega) = A_0/\sqrt{2}$ ) 所对应的频率称为截止频率  $f_{c1}$  ( $= \omega_{c1}/2\pi$ ) 和  $f_{c2}$  ( $= \omega_{c2}/2\pi$ )。如果以信号的幅值平方表示信号的功率，该截止频率（也称  $-3\text{dB}$  频率）所对应的点正好是半功率点。

(3) 带宽  $B$  与品质因素  $Q$  以  $-3\text{dB}$  频率确定的实际滤波器的带宽  $B$  ( $= f_{c2} - f_{c1}$ ) 也称  $-3\text{dB}$  带宽。滤波器在用作信号频率分析时，带宽  $B$  决定了滤波器分离信号中相邻频率成分的能力（频率分辨力）。品质因素  $Q$  是中心频率  $f_0$  ( $= \sqrt{f_{c1}f_{c2}}$ ) 与带宽  $B$  的比值：

$$Q = f_0/B$$



滤波器的  $Q$  值越大, 其频率的分辨率就越高。

(4) 倍频程选择性  $W$  实际滤波器在截止频率之外的幅频特性是逐渐衰减的, 这里的幅频特性曲线的倾斜程度 (幅值衰减得快慢) 决定了滤波器对通频带外频率成分的衰减能力 (选频能力)。倍频程选择性用频率变化一个倍频程时的衰减量来反映滤波器的选择性, 衰减量大, 表明滤波器的选择性好。倍频程选择性  $W$  可由下式求得:

$$W = -20 \log \frac{A(2f_{C2})}{A(f_{C2})} \quad (6-14)$$

或

$$W = -20 \log \frac{A(f_{C1}/2)}{A(f_{C1})} \quad (6-15)$$

(5) 滤波器因素  $\lambda$  滤波器因素  $\lambda$  是滤波器选择性的另一种表示方式。  $\lambda$  由下式求得:

$$\lambda = \frac{B_{-60\text{dB}}}{B_{-3\text{dB}}} \quad (6-16)$$

式 (6-16) 中,  $B_{-60\text{dB}}$  是指  $A(\omega)$  衰减为  $-60\text{dB}$  ( $A_0/1000$ ) 所对应的带宽;  $B_{-3\text{dB}}$  是指  $A(\omega)$  衰减为  $-3\text{dB}$  ( $A_0/\sqrt{2}$ ) 所对应的带宽。

理想带通滤波器  $\lambda = 1$ , 通常使用的滤波器  $1 < \lambda < 5$ 。

## 2. RC 滤波器

由电阻  $R$  和电容  $C$  组成的 RC 滤波器使用较多, 下面通过对 RC 滤波器的特性分析, 以便对实际滤波器有更多的了解。

(1) RC 低通滤波器 RC 低通滤波器典型的电路及特性如图 6-11 所示。

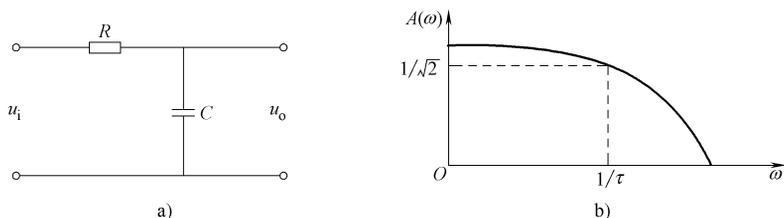


图 6-11 RC 低通滤波器

a) 典型电路 b) 幅频特性

低通滤波器的输入信号为  $u_i$ , 输出信号电压为  $u_o$ , 电路的微分方程如下:

$$RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (6-17)$$

设  $\tau = RC$ , 并对式 (6-17) 求拉氏变换, 得到 RC 低通滤波器的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

由上式可得 RC 低通滤波器的幅频特性  $A(\omega)$  和相频率特性  $\Phi(\omega)$ :

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}} \quad (6-18)$$

$$\Phi(\omega) = -\arctan(\tau\omega) \quad (6-19)$$



由式 (6-18) 和图 6-11b 的幅频特性可知, 当  $\omega = 1/\tau$  时,  $A(\omega) = 1/\sqrt{2}$ , 此为  $-3\text{dB}$  截止频率  $f_{C2}$ 。

$$f_{C2} = \frac{\omega_{C2}}{2\pi} = \frac{1/\tau}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$$

由上式可知, 适当改变  $R$ 、 $C$  参数, 就可以改变 RC 低通滤波器的截止频率。

当  $\omega \ll 1/\tau$  时,  $A(\omega) = 1$ , 信号几乎不受衰减地通过滤波器。在此低频区, RC 低通滤波器是一个不失真的传输系统。

当  $\omega \gg 1/\tau$  时, 输出信号电压  $u_o$  与输入信号电压  $u_i$  的积分成正比:

$$u_o = \frac{1}{RC} \int u_i dt \quad (6-20)$$

此时, RC 低通滤波器起着积分器的作用。

(2) RC 高通滤波器 RC 高通滤波器典型的电路及特性如图 6-12 所示。电路的方程如下:

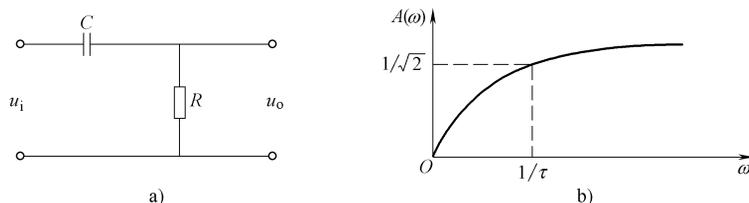


图 6-12 RC 高通滤波器

a) 典型电路 b) 幅频特性

$$u_o + \frac{1}{RC} \int u_o dt = u_i \quad (6-21)$$

设  $\tau = RC$ , 并对式 (6-20) 求拉氏变换, 得到 RC 高通滤波器的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{j\omega\tau}{1 + j\omega\tau}$$

由上式可得 RC 高通滤波器的幅频特性  $A(\omega)$  和相频率特性  $\Phi(\omega)$ :

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{\tau\omega}{\sqrt{1 + (\tau\omega)^2}} \quad (6-22)$$

$$\Phi(\omega) = \arctan(1/\tau\omega) \quad (6-23)$$

在  $\omega = 1/\tau$  时,  $A(\omega) = 1/\sqrt{2}$ 。因此, RC 高通滤波器的  $-3\text{dB}$  截止频率  $f_{C1}$  为

$$f_{C1} = \frac{\omega_{C1}}{2\pi} = \frac{1/\tau}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$$

RC 高通滤波器截止频率的高低也完全取决于  $RC$  参数。

当  $\omega \gg 1/\tau$  时,  $A(\omega) = 1$ , 信号几乎不受衰减地通过滤波器。在此高频区, RC 高通滤波器也是一个不失真的传输系统。

当  $\omega \ll 1/\tau$  时, RC 高通滤波器的输出信号电压  $u_o$  与输入信号电压  $u_i$  的微分成正比, 滤波电路起微分器的作用。



(3) RC 带通滤波器 RC 带通滤波器由 RC 低通滤波器和 RC 高通滤波器串联而成，典型的 RC 带通滤波器及特性如图 6-13 所示。

设 RC 高通、低通滤波器的传递函数分别为  $H_1(j\omega)$ 、 $H_2(j\omega)$ ，则串联后的带通滤波器的传递函数为

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= H_1(j\omega)H_2(j\omega) \\ &= \frac{j\omega\tau_1}{1+j\omega\tau_1} \frac{1}{1+j\omega\tau} \end{aligned}$$

RC 带通滤波器的幅频特性  $A(\omega)$  和相频率特性  $\Phi(\omega)$  为

$$A(\omega) = \frac{\tau_1\omega}{\sqrt{1+(\omega\tau_2)^2}} \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \quad (6-24)$$

$$\begin{aligned} \Phi(\omega) &= \Phi_1(\omega) + \Phi_2(\omega) \\ &= \arctan(1/\tau_1\omega) - \arctan(\tau_2\omega) \end{aligned} \quad (6-25)$$

由图 6-13 可知， $A(\omega) = 1/\sqrt{2}$  有  $f_{C1}$ 、 $f_{C2}$  两处。其中  $f_{C1}$  为高通滤波器的低端截止频率， $f_{C2}$  为低通滤波器的高端截止频率。

$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}, \quad f_{C2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

RC 带通滤波器的  $-3\text{dB}$  带宽为  $B = f_{C2} - f_{C1}$ ，调节  $R_1$ 、 $C_1$  和  $R_2$ 、 $C_2$  就可改变滤波器的带宽。实际上，当高、低通 RC 滤波电路串联时，需要消除两级耦合时的相互影响。因为直接连接后一级成为前一级的“负载”，而前一级又成了后一级的信号源内阻。通常用射极输出器或用运算放大器进行隔离，这种形式的带通滤波器也称为有源滤波器。有源滤波器中的运算放大器既可作为高、低通滤波电路的级间隔离，同时还起到了信号的放大作用。

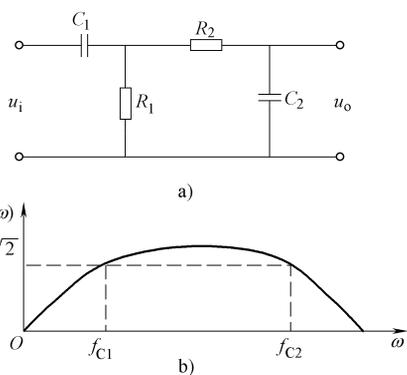


图 6-13 RC 带通滤波器及特性

a) 典型电路 b) 幅频特性

### 第三节 放 大 器

测量电路中放大器的作用是将信号源的信号进行电压放大、功率放大或其他的处理，以驱动显示器或记录仪，显示或记录被测量。理想的放大器应该是，不吸收信号源的能量；不干扰信号源的工作状态；为线性装置，放大倍数与输入量无关；动态响应好，无相位移动；在给定的频率范围内，幅频特性为常数；能带动一定的负载。实际放大器很难达到完全理想化的程度，但信号通过放大器后的失真程度必须控制在允许的范围之内，以确保测量装置的精度。



## 一、运算放大器

运算放大器是一种通过反馈来控制其响应特性的直接耦合式直流放大集成电路，具有高增益、高输入阻抗、低输出阻抗的特点，可用于信号放大、有源滤波及其他的信号处理，在测量装置中得到了广泛的运用。

### 1. 运算放大器的基本放大功能

运算放大器的基本放大电路如图 6-14 所示。许多由运算放大器组成的功能电路都是在这两种基本放大电路的基础上组合和演变而来的。

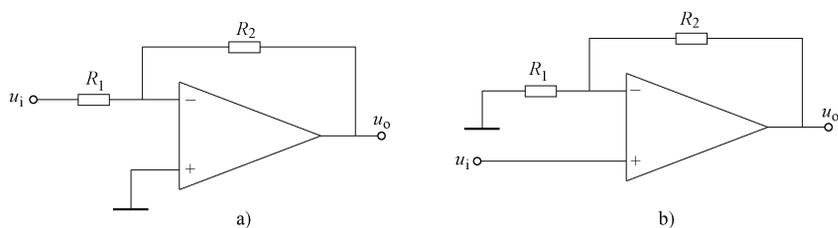


图 6-14 基本放大电路

a) 反相放大器 b) 同相放大器

(1) 反相放大器 由运算放大器组成的反相放大器电路如图 6-14a 所示，其电路特点是输入信号和反馈信号均加在运算放大器的反相输入端。反相放大器的电压增益  $A_V$  为

$$A_V = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6-26)$$

(2) 同相放大器 由运算放大器组成的同相放大器电路如图 6-14b 所示，其电路特点是输入信号加在同相输入端，而反馈信号加在反相输入端。同相放大器的电压增益  $A_V$  为

$$A_V = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (6-27)$$

### 2. 运算放大器的其他功能

运算放大器除了放大功能外，还可用作其他形式的信号处理。

(1) 加法器 由运算放大器组成的加法器电路如图 6-15 所示。该电路的输出电压  $u_o$  与输入信号电压  $u_1$ 、 $u_2$ ……之和成正比，即

$$u_o = -R_f \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{R_i} \quad (6-28)$$

式中， $n$  为输入的信号电压数量。

(2) 积分器 由运算放大器组成的积分器电路如图 6-16 所示。该电路的输出电压  $u_o$  与输入信号电压  $u_i$  的积分成正比，即

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C_f} \int_0^t u_i dt \quad (6-29)$$

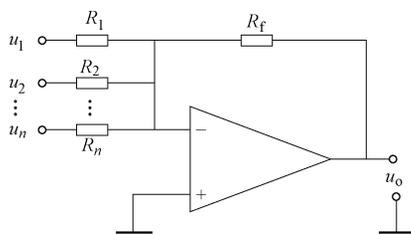


图 6-15 加法器



(3) 微分器 由运算放大器组成的微分器电路如图 6-17 所示。该电路的输出电压  $u_o$  与输入信号电压  $u_i$  的微分成正比, 即

$$u_o = -R_f C_1 \frac{du_i}{dt} \quad (6-30)$$

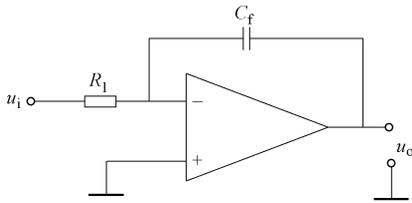


图 6-16 积分器

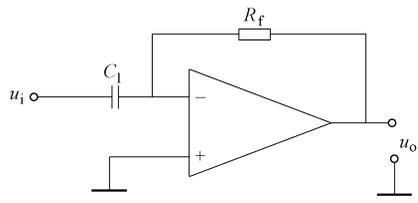


图 6-17 微分器

(4) 比较器 运算放大器还可组成图 6-18 所示的比较器 (施密特触发器)。该电路输入端设有比较电压  $U_{ref}$ , 当输入信号电压  $u_i$  绝对值低于  $U_{ref}$  时, 输出电压  $u_o > 0$ ; 当输入电压  $u_i$  绝对值高于  $U_{ref}$  时, 输出电压  $u_o < 0$ 。比较器的工作电压波形如图 6-19 所示。

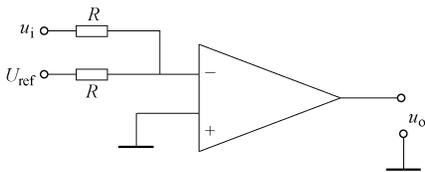


图 6-18 比较器

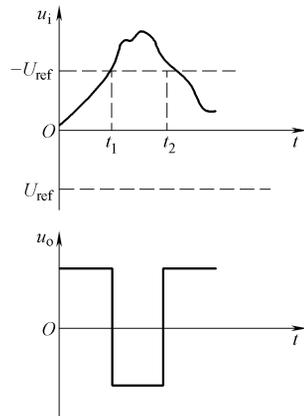


图 6-19 比较器工作电压波形

## 二、电压放大器

电压放大器用于放大传感器较弱的电压信号。不同的测量装置, 由于传感器和显示装置的类型不同、使用的环境和对测量的技术要求不同, 测量电路中所用电压放大器的类型、具体的电路结构等也都不同。这里, 对各种类型电压放大器的电路原理不进行讨论, 只是以压电式传感器的电压放大器前置电路为例, 认识电压放大器的作用以及与传感器之间的关系。

### 1. 压电式传感器连接电压放大器的等效电路

压电式传感器连接电压放大器的等效电路如图 6-20 所示。

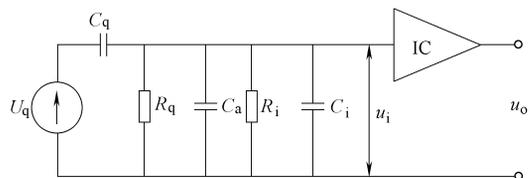


图 6-20 压电式传感器电压放大器等效电路



图中,  $U_q$ 、 $R_q$ 、 $C_q$  分别为压电式传感器的输出电压、漏电阻和等效电容,  $C_a$  为传感器与测量仪器之间的电缆线的电容,  $R_i$ 、 $C_i$  为放大器的输入电阻和输入电容。

对图 6-20 做进一步简化 (图 6-21), 简化等效电路中的  $R$ 、 $C$  分别为

$$R = \frac{R_q R_i}{R_q + R_i}$$

$$C = C_a + C_i$$

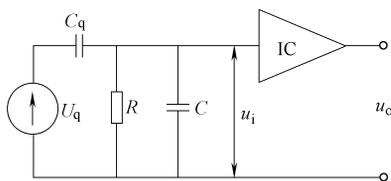


图 6-21 压电传感器电压放大器简化电路

## 2. 电压放大器输入电压

如果作用于压电晶体上的力为  $F = F_m \sin \omega t$ , 则压电晶体上产生的电压为

$$U_q = \frac{q}{C_q} = \frac{DF}{C_q} = \frac{DF_m}{C_q} \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

式中  $D$ ——压电晶体的压电系数;

$U_m$ ——压电晶体产生的电压幅值。

前置放大器输入端电压  $u_i$  的复数形式为

$$\dot{U}_i = DF_m \frac{j\omega R}{1 + j\omega R(C_q + C)} \quad (6-31)$$

$u_i$  的幅值  $U_{im}$  及相位角  $\Phi$  分别为

$$U_{im} = |\dot{U}_i| = \frac{DF_m \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_q + C)^2}} \quad (6-32)$$

$$\Phi = \frac{\pi}{2} - \arctan \omega R (C_q + C) \quad (6-33)$$

当  $\omega R \gg 1$  时, 则  $U_{im}$  为

$$U_{im} \approx \frac{DF_m}{C_q + C_a + C_i} \quad (6-34)$$

从电压放大器输入电压幅值  $U_{im}$  的表达式 (式 6-32、式 6-34) 可以明确如下几点。

① 当  $\omega = 0$  时, 由式 (6-32) 可知, 放大器的输入电压幅值  $U_{im} = 0$ , 即压电式传感器不能用于静态测量。

② 当  $\omega R \rightarrow \infty$  时, 即被测信号的频率足够高、压电晶体的漏电阻及放大器的输入电阻足够大时, 由式 (6-34) 可知, 放大器的输入电压幅值  $U_{im}$  与被测信号的频率无关。这说明压电式传感器连接电压放大器时, 其高频特性较好。

③ 当  $\omega \ll 1$  时, 即测量低频信号, 电压放大器的等效电阻  $R$  也较小时,  $U_{im} \approx DF_m \omega R$ 。放大器的输入电压幅值  $U_{im}$  将会随被测量频率的下降而减小。由此可见, 如果要测量较低频率的被测量, 前置放大器的输入阻抗必须足够大。

④ 从式 (6-34) 可知, 当  $\omega R \gg 1$  时,  $U_{im}$  相对于被测信号频率是常数, 但其灵敏度与电容  $C_q$ 、 $C_a$ 、 $C_i$  有关。对于选定的传感器和放大器, 其电容  $C_q$ 、 $C_i$  是定值, 而传感器与仪



器之间电缆的分布电容  $C_a$  则会因其长度的改变而不同。因此,在设计时,将电缆长度定为一常数,实际使用中,如果更换电缆改变了长度,就需要对测量装置重新进行标定。

### 三、电荷放大器

上述电压放大器的缺点是,  $U_{im}$  随被测量的频率及电缆电容的变化而改变,实际测量中会影响其测量的精度。在一些高精度的测量仪器中,采用了电荷放大器。电荷放大器是一种具有电容负反馈、高输入阻抗、高增益的运算放大器。

#### 1. 压电式传感器连接电荷放大器的等效电路

压电式传感器连接电荷放大器的等效电路如图 6-22 所示。

图中  $C_f$  为电荷放大器的反馈电容,  $K$  表示放大器的开环增益,“-”表示输出与输入反相,其他符号与图 6-20 相同。

由于传感器的漏电阻  $R_q$  和电荷放大器的输入电阻  $R_i$  均很大,可以认为压电式传感器产生的电荷未在  $R_q$  和  $R_i$  上产生泄漏。又根据虚地的概念,将反馈电容折算到放大器输入端的等效电容为  $(1+K)C_f$ 。于是图 6-22 可简化为图 6-23,其中:

$$C = C_q + C_a + C_i + (1+K)C_f$$

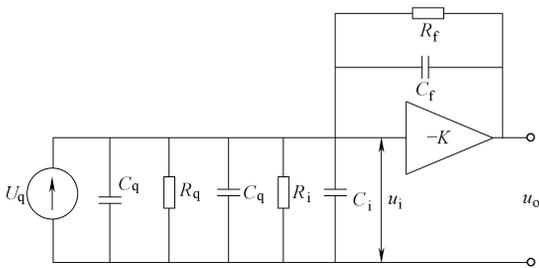


图 6-22 压电式传感器电荷放大器等效电路

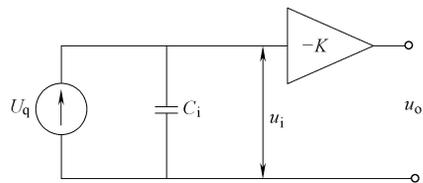


图 6-23 压电式传感器电荷放大器简化电路

#### 2. 电荷放大器输入、输出电压

忽略传感器的漏电阻  $R_q$  和电荷放大器的输入电阻  $R_i$ , 则放大器的输入、输出电压分别为

$$u_i = \frac{q}{C} = \frac{q}{C_q + C_a + C_i + (1+K)C_f} \quad (6-35)$$

$$u_o = -Ku_i = \frac{-Kq}{C_q + C_a + C_i + (1+K)C_f} \quad (6-36)$$

当放大器的增益  $K$  足够大,满足  $(1+K)C_f \gg (C_q + C_a + C_i)$  时,则有

$$u_o = \frac{-Kq}{C_q + C_a + C_i + (1+K)C_f} \approx \frac{-q}{C_f} \quad (6-37)$$

从式 (6-36) 可知,在一定的条件下,电荷放大器的输出电压与传感器的电荷量成正比。也就是说,传感器的输出灵敏度与电缆分布电容  $C_a$  无关,可以不考虑电缆对测量精度和灵敏度的影响。电荷放大器的这一优点扩大了压电式传感器在现场的使用范围,但电缆长



度也不能无限制增加。要使电缆电容保持在可忽略的范围之内，一般取  $KC_f > 10(C_q + C_a + C_i)$ ，长电缆可取  $KC_f > 10C_a$ 。此外，电缆的长度增加，电缆噪声也增大，测量的信噪比降低了。因此，当测量装置的电缆较长时，也需考虑用低噪声的优质电缆，并注意对电缆的安装固定，以避免因电缆的运动而增大噪声。

在电荷放大器中，由于采用电容负反馈，电容的隔直作用使放大器的零漂较大。为此，电荷放大器在反馈电容两端并联一个大电阻  $R_f$ （约  $10^5 \sim 10^7 \text{ k}\Omega$ ），用于提供直流反馈，以减小零漂，使电荷放大器工作稳定。

## 第四节 调制与解调

一些测量由传感器转换得到的是微弱的缓变信号，如果直接进行放大，由于直流放大器的零漂与级间耦合问题较难解决，缓变信号在传输中的干扰与损失也较大，往往需要将缓变信号转换为频率较高的交流信号，进行交流放大后再将其转换到原来的缓变信号。这一信号处理的过程称之为调制与解调，其作用是便于放大微弱的缓变信号，提高测量精度。

根据调制的参数不同分，调制可分为调幅、调频和调相，其调制的信号波形分别称之为调幅波、调频波和调相波。本节只涉及测量装置中使用较多的调幅的调制与解调。

### 一、信号的调制

信号调制过程中，传感器输出的电信号称为调制信号，用于载送被测信号的高频振荡波称为载波。调幅调制电路通常采用乘法器或具有乘法功能的交流电桥进行信号的调制。

#### 1. 交流电桥信号调制表达式

交流电桥调制电路原理如图 6-24 所示。电阻应变式传感器以全桥方式接于电桥的四个桥臂，电桥采用高频交流电源作为载波，电桥的输出电压  $u_o$  为

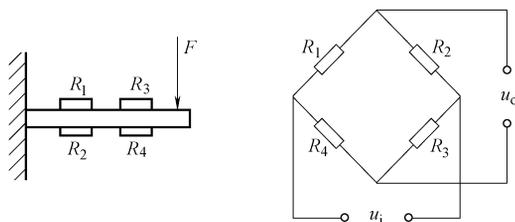


图 6-24 交流电桥调制电路原理

$$u_o = \frac{\Delta R}{R} u_i = S \varepsilon u_i$$

式中  $S$ ——应变片的灵敏度；

$\varepsilon$ ——应变片的应变。设传感器在力  $F$  的作用下，产生动态应变，并呈简谐变化：

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \Omega t$$

式中  $\varepsilon_m$ ——应变幅值；



$\Omega$ ——应变角频率。

如果供桥交流电源的表达式为

$$u_i = U_m \sin \omega t$$

则交流电桥的输出表达式如下：

$$u_o = S \varepsilon u_i = S \varepsilon_m U_m \sin \Omega t \sin \omega t \quad (6-38)$$

## 2. 交流电桥信号调制波形

式(6-38)表示交流电桥的输出 $u_o$ 是高频交流电源信号 $u_i$ 和应变信号 $\varepsilon$ 的乘积,传感器的应变波(调制波)和供桥交流电源(载波)通过电桥合成(调制)为已调波,其波形如图6-25所示。信号的调制过程可以看成载波的高频“载入”了缓变的调制波中,也可以理解为调制波按其幅值的变化规律“调制”了载波的幅值。经调制电路调制后的已调波的频率与载波频率相近,已调波幅值的包络线则反映了调制信号的变化规律。

显然,已调波的包络线与调制信号的符合程度将影响到测量的精度。为使调制过程所造成的误差在允许的范围之内,一般要求载波的频率达到调制波最高频率的7~10倍。比如,动态应变仪的载波频率为10kHz,它的动态应变测量范围为0~1.5kHz。

交流电桥的信号调制原理不仅适用于纯电阻传感器,也适用于电感传感器和电容传感器。调制器输出的高频信号(已调波)送入交流放大器,对信号进行交流放大。

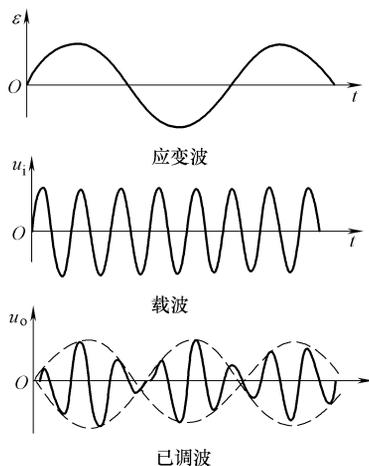


图 6-25 交流电桥的信号调制过程

## 二、信号的解调

交流放大器输出的是放大的调幅波,需要通过“解调”得到反映被测量且已被放大的调制信号。信号的解调过程包括相敏检波与滤波。

### 1. 相敏检波原理

检波是通过整流的方式“检回”反映被测量的电压脉冲,但普通检波只能得到一个方向的电压脉冲,不能反映被测量的正负变化。相敏检波可鉴别输入信号的极性,得到的电压脉冲既可反映被测量的大小变化,也反映了被测量的变化方向。与普通的二极管整流电路一样,相敏检波也有半波相敏检波电路和全波相敏检波电路

(1) 半波相敏检波电路 半波相敏检波电路原理如图6-26所示。其中 $u_x$ 为交流放大电路输出的信号电压, $u_2$ 为控制电压, $u_2 \gg u_x$ ,且与 $u_x$ 同频, $u_2$ 对相敏检波电路的输出电压 $u_y$ 不产生影响。

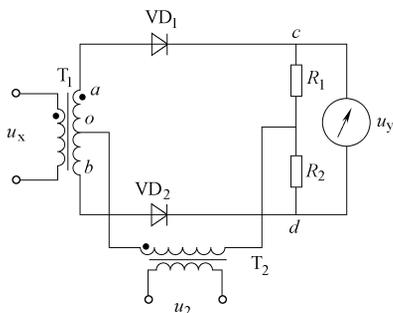


图 6-26 半波相敏检波电路



由于  $u_2$  比  $u_x$  大很多,  $VD_1$ 、 $VD_2$  的导通或截止只取决于  $u_2$ 。 $u_2$  为正半波时,  $VD_1$ 、 $VD_2$  导通;  $u_2$  为负半波时,  $VD_1$ 、 $VD_2$  截止。当  $u_x$  与  $u_2$  同相时, 只有  $u_x$  的正半波能形成通路:  $u_{xa} \rightarrow VD_1 \rightarrow R_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_{x0}$ , 此时  $u_y$  的  $c$  端为正; 当  $u_x$  与  $u_2$  反相时, 只有  $u_x$  的负半波能形成通路:  $u_{xb} \rightarrow VD_2 \rightarrow R_2 \rightarrow u_2 \rightarrow u_{x0}$ , 此时  $u_y$  的  $d$  端为正。半波相敏检波的波形如图 6-27 所示。

(2) 全波相敏检波电路 半波相敏检波只能让  $u_x$  正半波或负半波通过, 调制信号经半波检波后有信号的“丢失”, 因此, 精度要求较高的测量装置采用全波相敏检波。全波相敏检波电路如图 6-28 所示。

全波相敏检波电路与半波相敏检波电路相似, 电路的工作原理如下。

控制电压  $u_2$  为正半波时,  $VD_3$ 、 $VD_4$  导通;  $u_2$  为负半波时,  $VD_1$ 、 $VD_2$  导通。当  $u_x$  与  $u_2$  反相时,  $u_x$  的正半波通路为  $u_{x0} \rightarrow u_y (c \rightarrow d) \rightarrow u_2 (o \rightarrow a) \rightarrow R_1$ 、 $VD_1 \rightarrow u_{xa}$ ,  $u_x$  的负半波通路为  $u_{x0} \rightarrow u_y (c \rightarrow d) \rightarrow u_2 (o \rightarrow b) \rightarrow R_3$ 、 $VD_3 \rightarrow u_{xb}$ , 此时  $u_y$  的  $c$  端为正、 $d$  端为负。当  $u_x$  与  $u_2$  同相时,  $u_x$  的正半波通路为  $u_{xb} \rightarrow R_4$ 、 $VD_4 \rightarrow u_2 (a \rightarrow o) \rightarrow u_y (d \rightarrow c) \rightarrow u_{x0}$ ,  $u_x$  的负半波通路为  $u_{xa} \rightarrow R_2$ 、 $VD_2 \rightarrow u_2 (b \rightarrow o) \rightarrow u_y (d \rightarrow c) \rightarrow u_{x0}$ , 此时  $u_y$  的  $d$  端为正、 $c$  端为负。全波相敏检波的波形如图 6-29 所示。

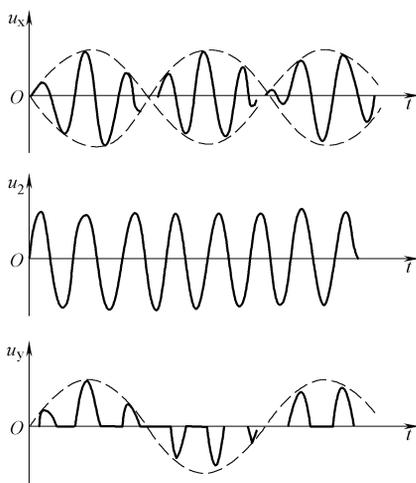


图 6-27 半波相敏检波的波形

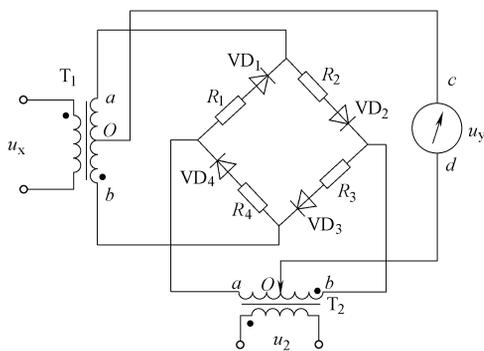


图 6-28 全波相敏检波电路

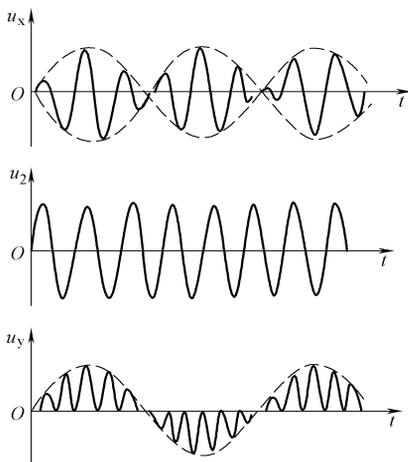


图 6-29 全波相敏检波的波形

## 2. 滤波的作用与原理

通过半波相敏检波或全波相敏检波后的信号包含高频的载波, 需要用低通滤波器将高频载波滤掉, 还原成与被测量变化过程相同的波形。RC 低通滤波器电路及经滤波器滤波后的信号波形如图 6-30 所示。

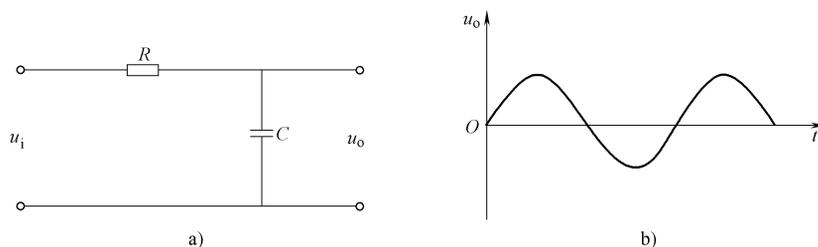


图 6-30 滤波的作用与原理

a) RC 低通滤波器电路 b) 滤波后的信号电压波形

### 思考题

1. 电桥的作用是什么？电桥有哪些种类？
2. 直流电桥有什么样的输出表达式？直流电桥在不同工作方式下的输出有何不同？直流电桥的特点是什么？
3. 交流电桥（电感电桥、电容电桥）的平衡条件是什么？交流电桥具有什么特点？
4. 相比非平衡式电桥，平衡式电桥的工作方式有何不同？平衡式电桥具有什么特点？
5. 滤波器的作用是什么？实际滤波器与理想滤波器有何不同？
6. 实际滤波器特性参数有哪些？各个特性参数表示了滤波器的什么特性？
7. RC 低通、高通及带通滤波器各具有什么样的频率特性？RC 低通、高通滤波器组成带通滤波器时如何消除其相互影响？
8. 放大器起何作用？理想放大器应满足哪些基本要求？
9. 运算放大器有何特点？运算放大器具有哪些基本功能？
10. 压电式传感器连接电压放大器和电荷放大器时，其输出特性有何不同？
11. 何谓调制与解调？测量电路中使用调制与解调的目的是什么？

# 第七章

## 测试技术的应用

测试过程中，同一种物理量的测量可以用不同类型传感器组成的测量系统来测量，某些传感器可以用于不同物理量的测量。在实际测量过程中，采用什么测量方法，使用什么样的测量装置，应以在保证测量精度要求和可靠性的前提下，测量成本最低、使用最方便为原则。

由于传感器技术的发展，现代测试技术所涉及的领域和可测量的物理量十分广泛。本章主要介绍力、位移、转速和温度等几种基本物理量的测量方法及所用的传感器，不涉及测量电路及显示方法。

### 第一节 力的测量

#### 一、力的测量原理

力的测量是一种应用较多的基本测量，力参数除了表征被测对象的承载（受拉或受压）状态外，它也是形成其他相关物理量的基本因素，如弯矩、转矩、应力、功、功率及刚度等，均与力有着直接的关系。在生产、产品检验和试验过程中，通常用所测得的力或与力参数相关的物理量来分析被测对象的受力状况和工作状态、验证设计计算、确定工作过程和分析某些物理现象的机理等。

##### 1. 力的测量基本原理

力的测量是依靠其静力效应和动力效应实现的。静力效应是指物体在力的作用下发生了变形或某种物理效应；动力效应是指物体在力的作用下产生了加速度。

(1) 利用静力效应测力 利用静力效应测力是通过测定物体的变形量或用与内部应力相对应参量的物理效应来确定力的大小与方向。两种利用静力效应测力的基本原理如图 7-1 所示。一种是测力装置（传感器）设有变形量与力成确定函数关系（通常为线性关系）的弹性体，通过测得变形量获得力参数；另一种则无弹性体，利用某种物质在力的作用下变形量甚微，但具有压电效应、压磁效应等与力有关的物理效应，通过这些物理效应将被测力转换为相应的电信号。



(2) 利用动力效应测力 利用动力效应测力原理如图 7-2 所示。已知物体的质量，测定其加速度大小就获得了力参数 ( $F = ma$ )。在工程上，利用动力效应测力、压力及转矩的实际应用很少。

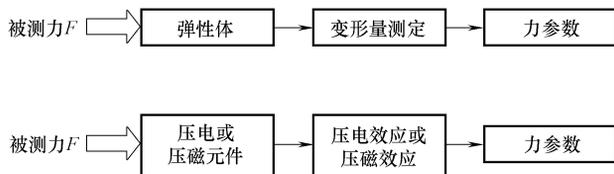


图 7-1 静力效应测力原理

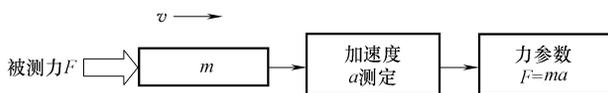


图 7-2 动力效应测力原理

## 2. 力的测量方法

力参数的测量可以用直接比较法，即通过杠杆、滑轮等将被测力与标准质量（砝码）的重量进行比较。直接比较法是有级加载，测量精度取决于砝码的分级密度，并与机械系统摩擦力的影响程度有关，在实际测量中很少采用。间接比较法测力是通过传感器将被测力转换为其他的物理量，然后与标定量进行比较，以获得被测力参数。间接比较法测力有机械式和电子式两种类型。

(1) 机械式测力仪 机械式测力仪利用其内部的弹性体将被测力转换为变形，并直接将变形量标定为相应的力，通过指针和刻度指示力参数。几种典型的机械式测力仪的原理如图 7-3 所示。

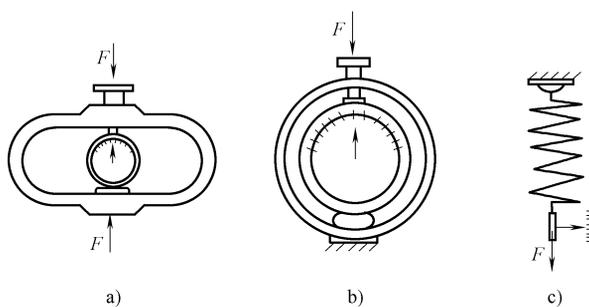


图 7-3 机械式测力仪

a) 扁环式 b) 圆环式 c) 弹簧式

上述三种机械式测力仪的共同特点是测量方法简单，在其弹性范围内，力与其变形量成正比，测量精度较高。这些机械式测力仪的不足是只能用于静态测量，其适用的测量对象很有限。



(2) 电子式测力系统 电子式测力系统利用测力传感器将被测力转换为相应的电信号,再对电信号进行标定。电子式测力装置的基本组成如图 7-4 所示。

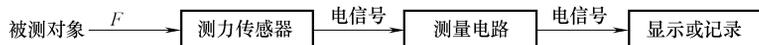


图 7-4 电子测力装置组成

电子测力装置最大的优点是可以进行动态测量,测量结果的显示方式灵活多样,测量数据的传输、存储及进一步的处理方便。

## 二、测力传感器

按其电信号转换的工作原理分,测力传感器有电阻应变式、电感式、电容式和压电式等多种类型。

### 1. 电阻应变式测力传感器

电阻应变式测力传感器的主要组成部件是弹性体和应变片,另外还有加载装置、引线和接线端子等辅件。当传感器的弹性体在被测力作用下产生与力的大小相对应的变形时,贴于弹性体上的应变片电阻发生变化,测量电路(电桥)将应变片的电阻变化转换为相应的电信号输出。根据其弹性体的结构不同分,电阻应变式测力传感器有筒式、杆式、环式、悬臂式和轮辐式等多种形式,如图 7-5 所示。

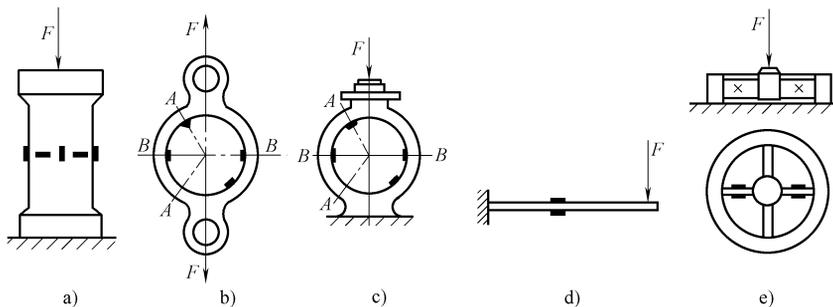


图 7-5 应变片式测力传感器

a) 筒式 b) 杆式 c) 环式 d) 悬臂式 e) 轮辐式

筒式传感器的弹性体为圆筒状,应变片沿圆筒轴线纵向或横向贴于圆筒的薄壁上。筒式测力传感器重量较轻、体积小,适用于载荷小、灵敏度要求较高的测量。

杆式传感器的弹性体为圆柱状,所以也称其为柱式,应变片沿轴线纵向或横向贴于圆柱体的外表面。相比于筒式,柱式传感器结构简单、紧凑,能承受较大载荷。

环式传感器的弹性体为圆环状,应变片沿圆环方向贴于圆环内表面的 A—A、B—B 截面处(该处受弯矩较大)。环式结构灵敏度高、稳定性好,适用于小载荷的测量。

悬臂式传感器弹性体的一端固定,应变片贴于梁的上面和背面。弹性体采用悬臂式结构的应变式测力传感器灵敏度高、小挠度线性好、精度高且容易加工,适用于小载荷的测量。



轮辐式传感器的弹性体形似带有辐条的车轮，辐条按剪切方式工作，应变片沿轮辐轴线成  $45^\circ$  角的方向贴于梁的两个侧面。轮辐式传感器的高度低，其承载大、线性好，可用于大载荷的测量。

## 2. 差动变压器式测力传感器

电感式测力传感器利用其电感与被测力一一对应的关系，将被测力的大小转换为相应的电感量，并通过测量电路将被测力转换为电信号。差动变压器式测力传感器的灵敏度较高，运用较多。差动变压器式测力传感器由变压器、弹性体及相应的辅件组成。弹性体采用薄壁形式的差动变压器式测力传感器如图 7-6 所示。

当被测力通过加载装置使传感器的弹性体变形时，就会使变压器铁心做相应的移动，从而改变了两变压器二次绕组的互感，通过测量电路（差动变压器式传感器的电路原理参见第五章的相关内容）输出一个与被测力相对应的电压信号。

圆形薄壁式弹性体的承载相对较大，一些量程较小或用于测量加速度或振动的差动变压器式传感器通常用变压器铁心两端的弹簧作为弹性体。

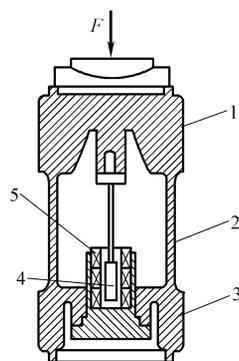


图 7-6 差动变压器式测力传感器

1—传感器上部 2—弹性体 3—传感器下部 4—铁心 5—差动变压器线圈

## 3. 电容式测力传感器

电容式测力传感器利用其电容与被测力一一对应的关系，将被测力的大小转换为相应的电容量，并通过测量电路将被测力转换为电信号。为提高传感器的灵敏度，电容式测力传感器通常采用差动式结构，或采用图 7-7 所示的多电极并联的结构形式。

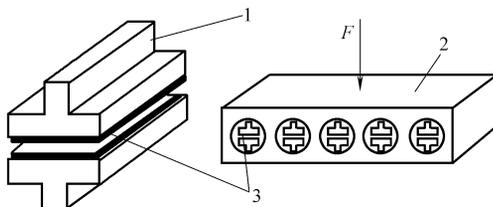


图 7-7 电容式测力传感器

1—丁字形绝缘块 2—弹性体 3—电极

多电极并联结构形式电容式传感器中，其矩形弹性体上有若干个贯通的圆孔，每个圆孔内固定了两个端面平行的丁字形绝缘块，在每个绝缘块端面上贴有铜箔，因此，每个圆孔内形成一个平板式电容器。若干个平板式电容器并联相接。在力  $F$  作用下，弹性体变形使极板间距发生变化，从而改变了传感器的电容量，通过测量电路转换为与力  $F$  相对应的电信号。

## 4. 压电式测力传感器

压电式测力传感器利用压电晶片的压电效应将被测力转换为电信号。压电式测力传感器一例如图 7-8 所示，其基本组成部件有晶片、绝缘套、基座、传力盖和插座等。为提高传感器的灵敏度，采用两个晶片并联，并连接电荷放大器。当外力通过传力盖作用于晶片时，晶片表面就会产生与被测力大小成正比的电荷。

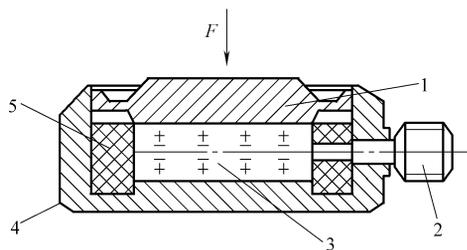


图 7-8 压电式测力传感器

1—传力盖 2—接线端子 3—压电晶片 4—底座 5—绝缘套



图 7-9 所示是具有三向测力功能的压电式测力传感器，适用于车床车削力的测量。传感器的压电元件由三对不同切形的晶片组成，其中一对具有纵向压电效应，用于测量主切削力；另外两对具有横向压电效应，方向互成  $90^\circ$ ，用于测量径向力和进给力。该测力传感器可将空间任意方向的被测力自动分解为互相垂直的分力。

### 三、压力的测量

工程上将流体垂直作用于单位面积上的力称为压力，即物理学中所定义的压强。作用于确定面积上的流体压力很容易转换为作用力，因此压力测量方法与力的测量方法有许多共同点。

#### 1. 压力的测量方法

压力参数的直接比较测量方法多用液柱平衡比较法，比如 U 形管、单管或斜管等压力计。压力参量的间接比较测量方法也有机械式和电子式两类。

(1) 机械式压力计 机械式压力计将导入的被测压力通过其内部的转换元件转换为指针的位移，并将位移标定为压力参数值。几种机械式压力计的原理如图 7-10 所示。

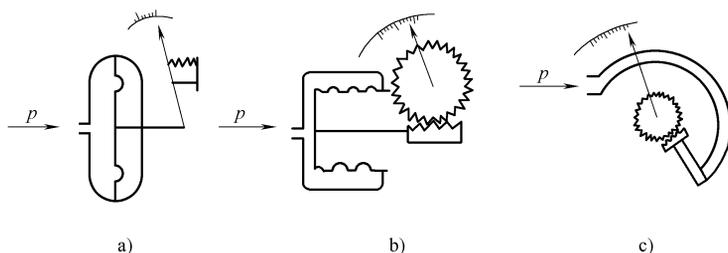


图 7-10 机械式压力计

a) 波纹薄膜式 b) 波纹管式 c) 单弹簧管式

机械式压力计适用于静态测量，其适用的测量对象也很有限。

(2) 电子式压力测量系统 电子式压力测量系统所用的压力传感器除了其压力导入部分与测力传感器的被测力导入装置不同外，其他部分则与测力传感器相同，因此，压力传感器也有应变片式、电感式、电容式、压电式和压磁式等多种。

#### 2. 应变式压力传感器

应变式压力传感器一例如图 7-11 所示。该传感器用于测量气压差 ( $\Delta p = p_2 - p_1$ )，其弹性体为贴有应变片的硅膜片，上下两气室的压差使膜片变形，应变片电阻发生变化，通过测量电路（电桥）转换为与压差  $\Delta p$  相对应的电压。

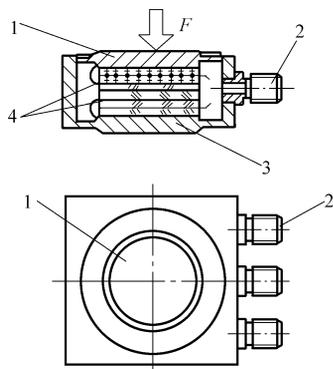


图 7-9 三向压电式测力传感器

1—承力盖 2—接线端子  
3—底座 4—压电晶片



### 3. 差动变压器式压力传感器

图 7-12 所示是差动变压器式压力传感器，也用于测量压差。被测压力  $p_1$  和  $p_2$  导入波纹膜片的两侧，其压差使膜片变形，带动变压器铁心移动，改变了变压器二次绕组的互感，从而使变压器输出一个与被测压差  $\Delta p$  相对应的电压信号。

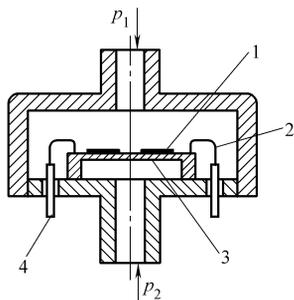


图 7-11 应变式压力传感器

1—应变片 2—引线 3—弹性体 4—接线端子

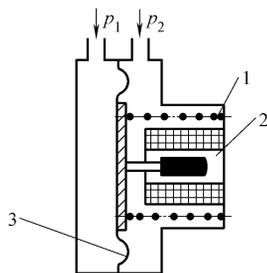


图 7-12 差动变压器式压力传感器

1—弹簧 2—差动变压器 3—波纹薄膜

### 4. 电容式压力传感器

图 7-13a 所示的电容式绝对压力传感器由心杆的端面和膜片构成电容的两个极板。膜片在被测压力作用下产生轴向位移，改变了电容极板之间的间隙，从而使电容容量发生变化，并通过测量电路转换为与被测压力相对应的电压信号。

图 7-13b 所示的电容式相对压力传感器采用差动结构，由金属膜片与两侧玻璃的金属镀层构成两个电容。当压力  $p_1$  和  $p_2$  导入膜片的两侧时，压差使膜片变形，从而使一个电容量增大，另一个则减小，测量电路将电容的变化转换为相应的电压。

### 5. 压电式压力传感器

压电式压力传感器一例如图 7-14 所示。由多片晶片组合成压电敏感元件，各晶片表面

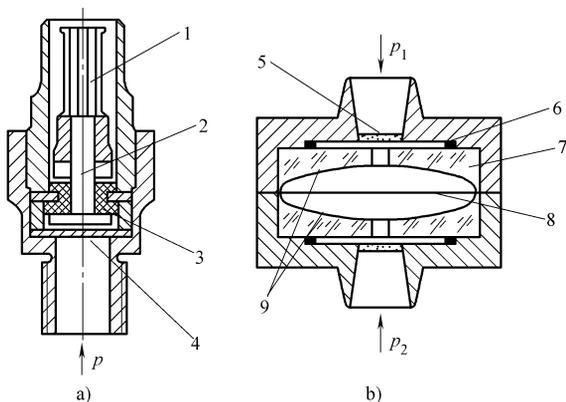


图 7-13 电容式压力传感器

a) 绝对压力传感器 b) 相对压力传感器

1—同轴电缆 2—心杆 3—绝缘体 4—膜片 5—滤清器 6—垫圈  
7—玻璃 8—金属膜片（动极板） 9—金属镀层（定极板）

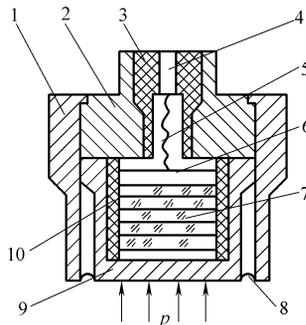


图 7-14 压电式压力传感器

1—外壳 2—基座 3、10—绝缘套 4—接线端子 5—引线 6—电极 7—压电晶片组 8—膜片弹簧 9—承力盖



镀有很薄的金属（常用银或金），以实现晶片之间及晶片与电极之间的连接。通过承力盖和弹簧，使压电元件具有一定的预紧力，以确保晶片之间及晶片与电极之间有良好的接触，并可提高传感器的灵敏度。

被测压力通过承力盖使压电晶片受力变形，产生与压力相对应的电荷，再通过测量电路对信号进行放大。

## 四、转矩的测量

转矩与力和力臂有关，在转矩的作用下，会使受力对象产生旋转运动或扭转变形。

### 1. 转矩的测量方法

转矩也可以用直接比较法测量，也有机械式转矩测量仪，但工程测量中则是采用电子测量的方式进行各种转矩测量。按其传感器的原理不同，电子转矩测量装置有应变式、电感式、光电式、压磁式和电位计式等多种。

### 2. 应变式转矩传感器

应变式转矩传感器组成与原理如图 7-15 所示。应变片按扭转杆扭转时其应变最大的方向贴于扭转杆上，并连接成全桥电路，通过集电环与测量电路相接。振荡器产生固定频率的电压脉冲，并通过集电环向电桥提供激励电压。

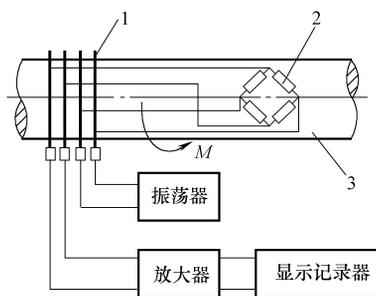


图 7-15 应变式转矩传感器

1—集电环 2—应变片 3—扭转杆

工作时，扭转杆在被测转矩  $M$  的作用下发生扭转变形，应变片的电阻发生相应的变化，电桥便输出与  $M$  相对应的电压信号。

### 3. 电感式转矩传感器

电感式转矩传感器的基本组成与原理如图 7-16 所示。扭转杆一端有 4 个靴形磁极，其上各绕有相同的线圈，并连接成电感式电桥。

工作时，被测转矩使扭转杆发生扭转变形，定子与转子之间产生角位移  $\theta$ ，使磁极 A、D 间的磁阻增大，B、C 间的磁阻减小。各磁极的磁通量产生了差别，使电桥失去平衡而输出一个与被测转矩大小相对应的电压  $U_o$ 。

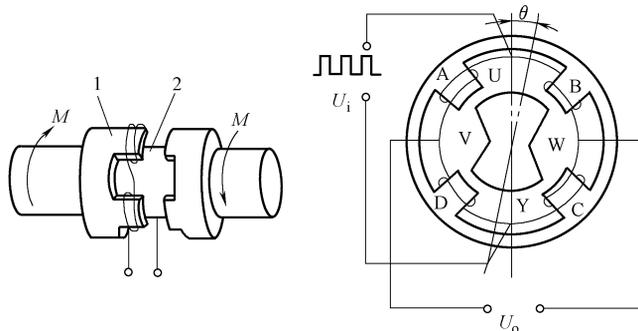


图 7-16 电感式转矩传感器

1—靴形磁极 2—扭力杆



#### 4. 光电式转矩传感器

光电式转矩传感器一例如图 7-17 所示。在扭转杆两端的圆柱面上，设有均匀分布的反射片，形成一个反射环。当反射环随圆柱体转动时，光电管就会产生脉冲电压。A、B 两光电管输出的脉冲电压均输入逻辑电路 3，该电路具有这样的逻辑功能：电脉冲 A 使“逻辑门开”，同步脉冲源输出的计数脉冲通过逻辑电路；电脉冲 B 使“逻辑门关”，即终止计数脉冲通过。

在被测转矩为 0 时，扭转杆未被扭转，两光电管产生的电脉冲 A 与电脉冲 B 同相，逻辑门不打开（打开即关闭），无计数脉冲通过；当被测转矩使扭转杆扭转一个  $\theta$  角度时，电脉冲 A、B 不同相，电脉冲 A 使逻辑门打开，计数脉冲开始通过；电脉冲 B 使逻辑门关闭，计数脉冲立即终止。通过的计数脉冲个数与扭转角成正比，而从计数器显示的就是反映转矩大小的数字。

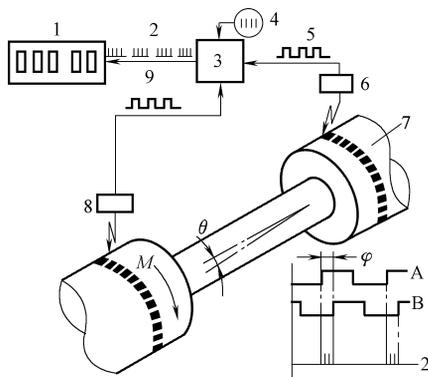


图 7-17 光电式转矩传感器

- 1—数字计数器 2—计数脉冲 3—逻辑电路
- 4—同步脉冲源 5—脉冲 B 6—光电管 B
- 7—扭转杆 8—光电管 A 9—脉冲 A

#### 5. 压磁式转矩传感器

压磁式转矩传感器的组成与原理如图 7-18 所示。线圈  $W_1$ 、 $W_2$  分别为交流电桥的两个桥臂，电桥通入交流电源  $u_i$  后， $W_1$ 、 $W_2$  产生交变磁场使扭转杆沿轴向磁化。

线圈  $W_1$ 、 $W_2$  通过扭转杆耦合，无转矩作用时，扭转杆无扭转变形，电桥处于平衡状态，其输出  $u_o$  为 0。当被测转矩使扭转杆扭转变形时，其磁导率发生变化，线圈  $W_1$ 、 $W_2$  的自感发生变化，使电桥失去平衡，并输出与被测转矩成正比的电压信号。

#### 6. 电位计式转矩传感器

一种运用于汽车电动转向助力电子控制系统的电位计式转矩传感器如图 7-19 所示。驾

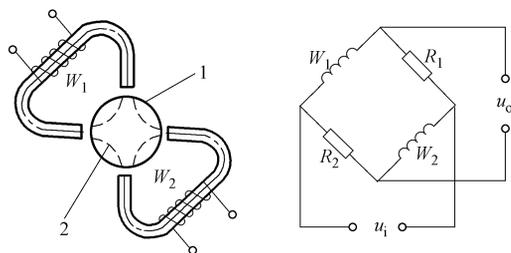


图 7-18 压磁式转矩传感器

- 1—扭转轴 2—轴上磁路

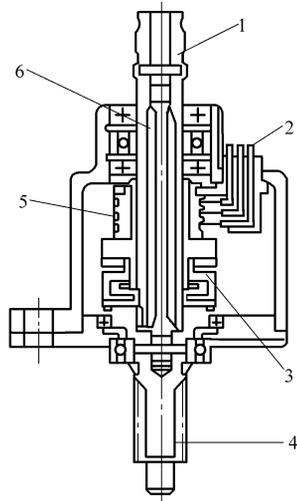


图 7-19 电位计式转矩传感器

- 1—转向轴 2—插接器 3—电位计 4—转向器主动齿轮
- 5—集电环 6—扭转杆



驶人作用于转向盘的转向作用力通过转向轴传递给扭转杆，扭转杆在转矩作用下产生扭转变形时，电位计的滑片与电阻就会有相对的转动，使电位计电阻发生变化，并通过测量电路转换为电压的变化。电位计的工作电流通过集电环引入，与被测转矩相对应的电压信号也通过集电环输出。

## 第二节 位移的测量

### 一、位移测量的特点与类型

位移的测量在机械工程中应用十分广泛，因为机械工程中确定零件的尺寸、监视零件的尺寸误差、物体移动的方向或位置等都需要通过测量位移来实现，此外，许多物理量的测量（如力、转矩、速度和加速度等）都是以位移测量为基础的。

#### 1. 位移测量的特点

位移是反映物体在空间位置变动的矢量，因此位移测量不仅要获得被测对象位移量的大小，还需要测出位移的方向。测量位移时，应当根据不同的测量对象选择测量点和测量方向，并选择适当的测量系统。选择正确的测量点和测量方向，是为了确保测量方向与位移方向重合，使测量结果真实地反映位移量的大小。如果测量方向与位移方向不重合，则测量结果只是该位移量在测量方向上的分量。在测量位移时，应根据不同的被测对象、位移方式、测量环境及要求等，选择适当的位移测量装置，以确保位移测量的精度。

#### 2. 位移测量的类型

位移测量方法多种多样，可按不同的分类方法进行归类。

(1) 按被测对象的运动方式分类 如果按被测对象的运动方式分类，有线位移测量和角位移测量两大类。线位移测量的对象做直线移动，而角位移测量的对象做转动。

(2) 按被测量运动状态分类 如果按被测量运动状态分类，则有静态位移测量和动态位移测量两种类型。静态位移测量的对象是静止不动的，测量的参数通常是被测对象的几何尺寸或尺寸大小的变化；动态位移测量的对象是运动着的，测量过程或测量结果需要考虑被测对象运动的方向。

(3) 按被测参量的作用与形式分类 如果按被测参量的作用与形式分，有零件几何尺寸大小测量、物件形态变化测量、确定物体空间位置测量、构件位置变化距离与方向测量等多种。

(4) 按位移测量的方式分类 如果按位移测量过程的测量方式分类，则有接触式测量和非接触式测量两大类。

### 二、测位移传感器

与同类型的测力传感器相比，测位移传感器的不同点在于传感器直接将被测对象的位移量转换为电量，没有变形（或位移）量与所测力成比例关系的弹性体。可用作位移测量的



传感器有很多,按传感器的原理分有电位计式、电阻应变式、电感式、电容式、霍尔式、磁电式、光电式和压电式等,各种传感器的工作原理参见第五章的相关内容。除了上述测位移传感器外,感应同步器、光栅、磁栅和角度编码器等均可用作位移测量。工程上位移的测量范围很大,从微米级到米级。大位移量的测量可用感应同步器、光栅、磁栅等位移传感器,0.1 $\mu\text{m}$ 的位移变化可用电容式位移传感器来测量。在位移测量系统中,为适应不同的测量对象、满足不同的测量精度要求,选择性能特点适当的测位移传感器十分重要。

### 1. 电位计式位移传感器

相比于其他类型的位移传感器,电位计式位移传感器结构简单、工作可靠、线性度较好,在工程测量和自动控制技术领域中有较多的应用。电位计式位移传感器有滑线式和变阻器式两种,其性能及特点见表7-1。

表 7-1 电位计式位移传感器的性能及特点

形式	滑线式		变阻器	
	线位移	角位移	线位移	角位移
测量范围	1~300mm	0~360°	1~1000mm	0~60r
精确度	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.5\%$
直线性	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.5\%$
特点	分辨力较高,可静态或动态测量		寿命长,分辨力较低,电噪声大	

### 2. 应变式位移传感器

应变式位移传感器结构简单,适用于小位移量的测量,但测量精度易受冲击、温度、湿度等因素的影响。不同形式的应变式位移传感器的性能与特点见表7-2。

表 7-2 不同形式的应变式位移传感器的性能及特点

形式	非粘贴式	粘贴式	半导体
测量范围	$\pm 0.15\%$ 应变	$\pm 0.3\%$ 应变	$\pm 0.25\%$ 应变
精确度	$\pm 0.1\%$	$\pm 2\% \sim 3\%$	$\pm 2\% \sim 3\%$
直线性	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	满刻度 $\pm 20\%$
特点	不牢固	牢固,需温度补偿	灵敏度高,温度影响较大

### 3. 电感式位移传感器

与其他类型的位移传感器相比,电感式位移传感器工作可靠性较高、输出功率较大、分辨率较高、测量的精度较高,但其响应速度较低、线性范围较小。各种形式的电感式位移传感器的性能与特点见表7-3。

### 4. 电容类位移传感器

用于测量位移的电容类传感器有变面积式、变气隙式和变介电常数式等多种形式。与其他类型的位移传感器相比,电容类位移传感器的特点是结构简单、能耗低、动态特性好、非线性相对较大。电容类位移传感器的性能与特点见表7-4。



表 7-3 电感式位移传感器的性能与特点

形式	自感式		差动变压器式	电涡流式
	变气隙型	螺管型		
测量范围	±0.2mm	1.5~2mm	±0.08~75mm	±2.5~±250mm
精确度	±1%	±1%	±0.5%	±1%~3%
直线性	±3%	±3%	±0.5%	<3%
特点	适用于微小位移测量	测量范围较大,动态性能较差	分辨率高,测量范围较大,动态特性较差	结构简单,分辨率较高,非接触测量

表 7-4 电容类位移传感器的性能与特点

形式	变面积式	变间距式
测量范围	$10^{-3} \sim 1000\text{mm}$	$10^{-5} \sim 10\text{mm}$
精确度	±0.005%	0.1%
直线性	±1%	1%
特点	线性度相对较好,测量精度受环境温度、湿度的影响较大	分辨率较高,但测量范围很小,只能在小间隙范围内有较好的线性度

### 5. 发电类位移传感器

磁电式、光电式、霍尔效应式及压电式等发电类传感器均可用作位移测量,光电式和霍尔效应式位移传感器可以用于动态和静态测量,其实际应用相对较多。各种形式的位移传感器的性能与特点见表 7-5。

表 7-5 各种形式的位移传感器的性能与特点

形式	光电式			霍尔式
	非扫描式	扫描式	电荷耦合器件(CCD)	
测量范围	±10mm	0~970mm	0~1500mm	±1.5mm
精确度	±1%	±4%	0.5%	0.5%
特点	非接触式测量,响应速度快,对使用环境和光源有一定的要求	测量范围大,测量功能较多,对光源要求低,抗干扰能力强,精度不高	测量范围大,扫描稳定,抗振动和电磁干扰能力强,可用于图形识别,能耗低	结构简单,动态特性好,精度较高,抗干扰能力较强

### 6. 其他位移传感器

其他可用于测量位移的传感器有感应同步器、光栅式、磁栅式和角度编码器等,这些位移传感器的性能与特点见表 7-6。

表 7-6 其他位移传感器的性能与特点

形式	感应同步器		计量光栅		磁栅	
	直线式	旋转式	直线式	旋转式	长磁尺	圆磁尺
测量范围	$10^{-3} \sim 10000\text{mm}$	0~360°	$10^{-3} \sim 10000\text{mm}$	0~360°	$10^{-3} \sim 10000\text{mm}$	0~360°
精确度	2.5μm/250mm	±0.5" (测角)	2.5μm/250mm	±0.5" (测角)	5μm/1m	±1" (测角)
特点	模拟和数字混合测量系统,数字显示(直线式感应同步器的分辨力可达 1μm)		模拟和数字混合测量系统,数字显示(长光栅分辨力可达 1μm)		测量时工作速度可达 12m/min	



### 三、位移测量示例

#### 1. 电容式位移测量计

图 7-20 所示的位移测量计其电容式位移传感器采用差动结构形式，当活动电极随测量杆一起做轴向移动时，与固定电极形成的电容极板有效面积就会发生一增一减的变化，一个电容量增大，另一个电容量减小。电容量变化与位移量相对应，并通过测量电路变为相应的电压输出。

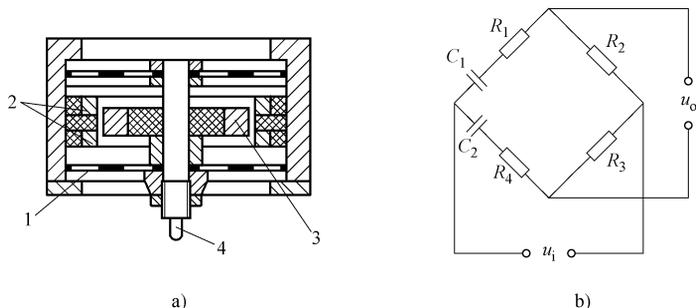


图 7-20 电容式位移测量计原理

a) 传感器结构 b) 传感器电路

1—开槽簧片 2—固定电极 3—活动电极 4—测量杆

该电容式位移测量计为接触式测量，可用于微小位移量的测量，比如，在自动生产线上监测产品部件尺寸，以剔除不合格品、区分正负误差和确定误差的范围。

#### 2. 光电式高度测量装置

(1) 光电式高度传感器的原理 图 7-21 所示是光电式位移传感器，用于动态测量汽车车身相对于车桥的位移（即车身高度）。该光电式位移传感器的主要组成部件是制有特殊透光槽的遮光转子和四个光电耦合器。当遮光转子在某一位置时，四个光电耦合器中经透光槽有光线通过的，光敏晶体管受光而通路（输出 ON 信号），光线被遮光转子挡住的光敏晶体管

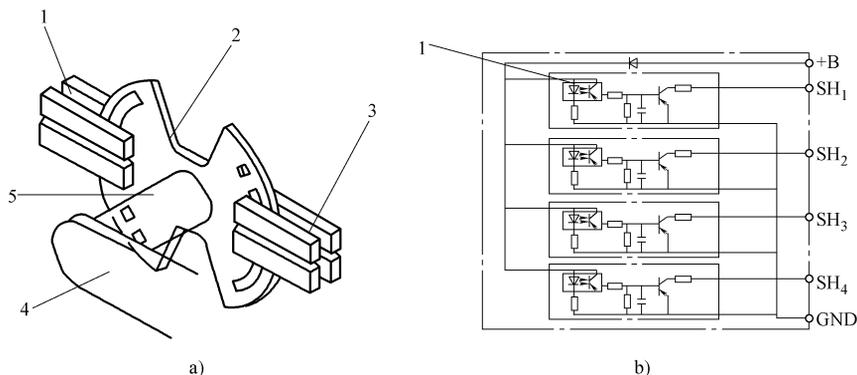


图 7-21 光电式位移传感器

a) 传感器结构 b) 传感器电路

1、3—光电耦合器 2—遮光盘 4—连接杆 5—传感器轴



不受光则不通路（输出 OFF 信号）。遮光转子透光槽的长度和位置分布使得遮光转子在每一个规定的转角范围内，都有与之对应的一组“ON”“OFF”光电信号输出。

(2) 车身高度的测量原理 通过连接杆，将车身的高度变化转变为遮光转子的转动，使车身在每一个高度位置时均对应一组“ON”“OFF”光电信号。表 7-7 所示是将车身高度变化范围划分为 16 个高度区所对应的光电信号。汽车在行驶中，传感器不断地将一组组车身高度信号输送到汽车电子控制器，电子控制器根据采样时间内（一般为 1ms）车身高度在某一区间的频度即可判断车身的高度；根据车身高度变化的幅度和变化的频率，可判断车身的振动情况。

表 7-7 传感器信号与车身高度区间对应关系

车高	传感器信号				车身高度区间
	SH <sub>1</sub>	SH <sub>2</sub>	SH <sub>3</sub>	SH <sub>4</sub>	
高 ↑  ↓ 低	OFF	OFF	ON	OFF	15
	OFF	OFF	ON	ON	14
	ON	OFF	ON	ON	13
	ON	OFF	ON	OFF	12
	ON	OFF	OFF	OFF	11
	ON	OFF	OFF	ON	10
	ON	ON	OFF	ON	9
	ON	ON	OFF	OFF	8
	ON	ON	ON	OFF	7
	ON	ON	ON	ON	6
	OFF	ON	ON	ON	5
	OFF	ON	ON	OFF	4
	OFF	ON	OFF	OFF	3
	OFF	ON	OFF	ON	2
	OFF	OFF	OFF	ON	1
	OFF	OFF	OFF	OFF	0

### 3. 光电式角位移测量装置

(1) 光电式角位移传感器的原理 图 7-22 所示的光电式角位移传感器用于测量汽车转

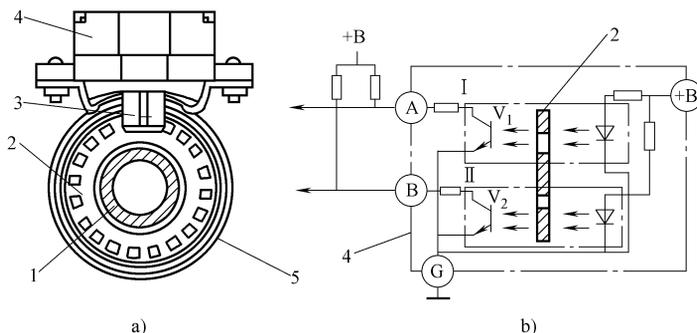


图 7-22 光电式角位移传感器

a) 传感器结构 b) 传感器电路

1—转向器轴 2—遮光盘 3—光电耦合器 4—传感器 5—转向柱



向盘的转动角度和方向，汽车电子控制器可根据此信号判断汽车的转向情况。该光电式角位移传感器的主要组成部件是透光槽均布的遮光盘和两个光电耦合器。当驾驶人转动转向盘时，通过转向轴带动遮光盘转动，光电耦合器便产生脉冲电压。电子控制器根据传感器输出的脉冲个数就可计算转向盘转过的角度。

(2) 转向盘转动方向的判断原理 电子控制器根据传感器的信号判断转动方向的原理如图 7-23 所示。A、B 两个光电耦合器产生的信号脉冲其脉宽相同，但相位相差  $90^\circ$ ，电子控制器以 A 信号从高电平转为低电平（下降沿）时，B 信号是高电平还是低电平来判断转向。如果 A 信号在下降沿时 B 信号是高电平，则为右转向；如果 A 信号在下降沿时 B 信号为低电平，则为左转向。

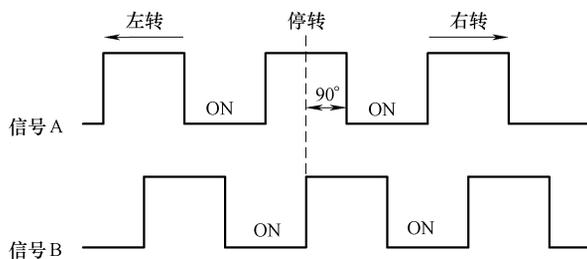


图 7-23 角位移方向判断原理

### 第三节 转速的测量

#### 一、转速的测量方法

转速是表征旋转运动速度的物理量，转速测量就是对被测对象进行旋转角速度的测量。在测试与自动控制领域中，转速的测量往往是测量被测对象的旋转频率，其度量的单位是  $r/min$ 。转速测量的方法有多种，如果按转速测量过程信号的转换特征分，则可将诸多转速测量归为角速度转换方式和旋转频率转换方式两大类。

##### 1. 角速度转换方式转速测量

角速度转换方式转速测量过程如图 7-24 所示。转速测量装置通过传动装置导入被测对象的旋转运动，并通过某种方式将旋转角速度转换为相应的转速示值。

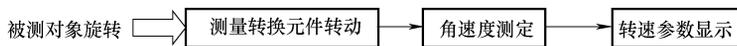


图 7-24 角速度转换测量转速

(1) 磁电式转速仪 磁电式转速仪是一种角速度转换方式的转速测量装置，其原理如图 7-25 所示。

转速仪的永久磁铁在被测对象的驱动下转动，使铝罩产生电涡流，并产生磁场。被测转速越高，铝罩电涡流磁场就越强。铝罩电涡流磁场与永久磁铁磁场的相互作用而产生的转矩



作用在铝罩上，使铝罩克服弹簧力，转动相应的角度，与铝罩一起偏转的指针便指向相应的转速值。

(2) 测速发电机 测速发电机也是一种角速度转换方式的转速测量装置。测速发电机转速测量系统的组成如图 7-26 所示。

交流或直流发电机在被测对象驱动下转动，并产生与旋转角速度相对应的感应电动势，该电动势经测量电路处理后，驱动电压表或电流表显示相应的转速值。

上述测转速装置由机械传动机构和电气信号转换装置组成，因此可以称其为机电式转速测量装置（转速仪）。机电式转速测量装置其转速的导入、信号的转换与显示所需的能量来自被测对象的旋转功率，因此，此类转速测量装置不适用于功率较小的被测对象。

### 2. 旋转频率转换方式转速测量

旋转频率转换方式转速测量原理如图 7-27 所示。转速测量装置通过传感器将被测对象的转速转换为相应频率的电脉冲，经测量电路进行信号处理后，由显示器显示转速参数。

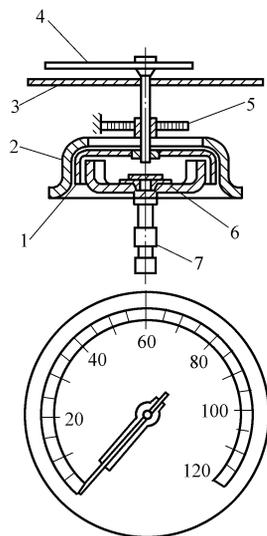


图 7-25 磁电式转速仪

- 1—铝罩 2—罩壳 3—刻度盘
- 4—指针 5—盘形弹簧 6—永久磁铁 7—传动轴

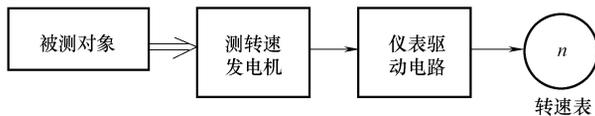


图 7-26 测速发电机转速测量系统组成

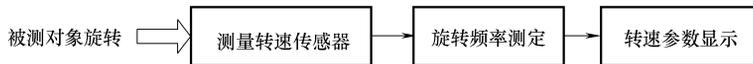


图 7-27 旋转频率转换测量转速

旋转频率转换方式转速测量用到了传感器和电子电路，因此也称其为电子式转速测量装置。电子转速测量装置其形式多种多样，根据传感器的结构与工作原理分，有电磁式、光电式、霍尔效应式和磁阻式等多种；根据测量电路信号处理和显示方式分，有模拟式和数字式之分。

电子式转速测量装置结构简单，传感器安装灵活方便，数字化信号处理和显示，精度高，并可实现非接触式测量，适应性好，因此，在测试与自动控制领域中得到了广泛的应用。

## 二、测转速传感器

### 1. 磁电式转速传感器

磁电式转速传感器的组成与测量原理如图 7-28 所示。导磁转子随被测对象一起转动，



使磁路的磁阻周期性地变化，感应线圈在呈周期性变化磁通量的影响下产生与被测对象转动同频（单齿转子）或倍频（多齿转子）的交变感应电动势。此交变电压信号的频率即反映了被测对象的转速。

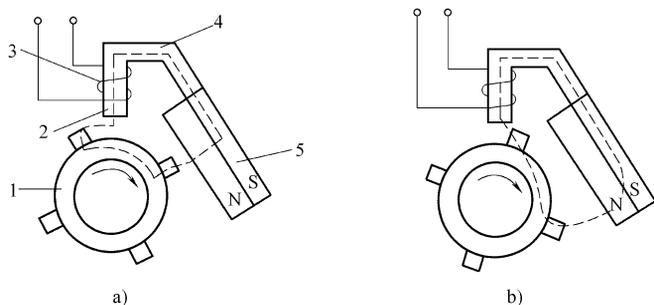


图 7-28 磁电式转速传感器

a) 气隙减小 b) 气隙增大

1—导磁转子 2—铁心 3—感应线圈 4—导磁片 5—永久磁铁

磁电式转速传感器有多种结构形式：

① 导磁转子为传感器的一部分，安装在传感器壳体内。

② 导磁转子与被测对象的旋转体安装在一起，而传感器壳体内只有永久磁铁、导磁板及感应线圈等不动的部件。

③ 直接以被测对象旋转体上的齿圈或凸块作为导磁转子。

磁感应式转速传感器通常用永久磁铁作为磁路的磁动势，但也有少数磁感应式转速传感器采用电磁线圈通入恒定电流的方式产生磁动势。

磁电式转速传感器结构简单、工作可靠，缺点是信号电压会随转速的变化而改变，因此，磁电式转速传感器不适用于转速变化范围太大的测量对象，也不能用于转速太低的转速测量。

## 2. 光电式转速传感器

光电式转速传感器的组成与测量原理如图 7-29 所示。遮光转子随被测对象一起转动，通过遮光转子上均布的缺口（或缝隙）使发光元件发出的光线周期性地通过，光敏元件便产生与被测对象同频（单个缺口）或倍频（多个缺口）的脉冲信号。

上述光电式转速传感器以遮光转子透光方式产生脉冲电信号，遮光转子由被测对象驱动。还有采用反光形式的光电式转速传感器，在转子上设有反光片或直接在被测对象的旋转体上设置反光片，光敏元件通过接收反光产生相应的电脉冲。

光电式转速传感器结构简单、信号电压稳定，可测量很低的转速。光电式转速传感器的缺点是对灰尘、油污等较为敏感，因此光电式转速传感器的防尘密封

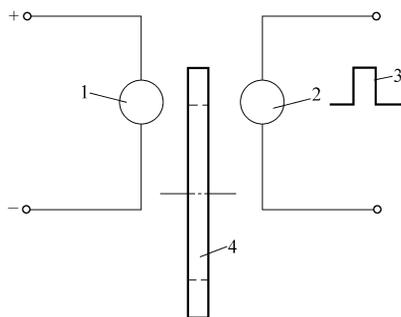


图 7-29 光电式转速传感器

1—发光元件 2—光电元件  
3—信号脉冲 4—遮光转子



性有较高的要求。

### 3. 霍尔效应式转速传感器

霍尔效应式转速传感器的组成与测量原理如图 7-30 所示。当导磁转子随被测对象一起转动时，转子叶片周期性地短路磁路，使穿过霍尔元件的磁通量呈周期性地变化，霍尔元件便产生与被测对象转动同频（单叶片转子）或倍频（多叶片转子）的脉冲电压。此脉冲电压信号的频率即反映了被测对象的转速。

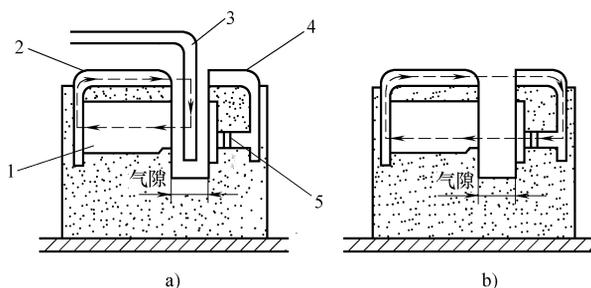


图 7-30 霍尔效应式转速传感器的组成与原理

a) 导磁转子叶片插入 b) 导磁转子叶片离开

1—永久磁铁 2、4—导磁片 3—导磁转子叶片 5—霍尔元件

霍尔效应式转速传感器的结构形式也较多，传感器导磁转子的形式有叶片式、齿轮式；导磁转子的安装形式也有整体、分开和直接利用被测对象旋转体上的齿圈或凹凸记号。

霍尔效应式转速传感器的信号电压稳定，因此，可用于低转速测量，测量的范围较大。

### 4. 舌簧式转速传感器

舌簧式转速传感器的基本组成与原理如图 7-31 所示。舌簧开关的两触点臂被转动的磁极磁化而产生开、合动作（图 7-31b）。当舌簧开关处于 N、S 极性之间时，开关两触点臂被磁化为异性磁极而闭合，而当舌簧开关面对单个磁极作用时，开关两触点臂被磁化为同性磁极而断开。当嵌有磁极的转子随被测对象转动时，舌簧开关就会在磁极的磁力作用下周期性地开闭，输出与转速相对应的电压脉冲，通过测量电路的信号处理后，使显示器显示相应的转速参数。

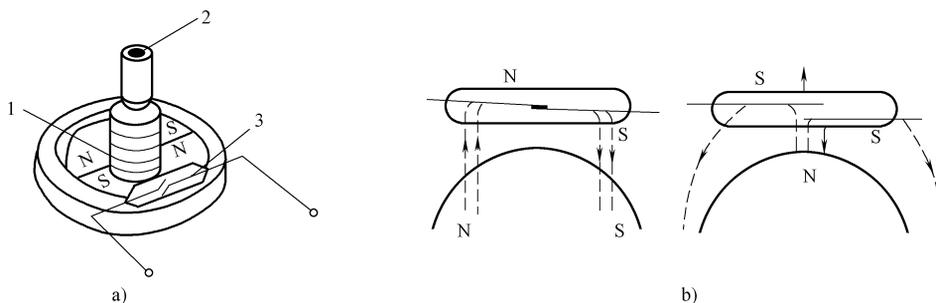


图 7-31 舌簧式转速传感器组成与原理

a) 舌簧式传感器组成 b) 舌簧开关原理

1—磁铁转子 2—接被测对象旋转体 3—舌簧开关



舌簧式转速传感器结构简单，信号电压幅值不受转速变化的影响。一些汽车车速表采用舌簧式转速传感器测量变速器输出轴转速，并将其标定为汽车的行驶速度。

### 5. 磁阻式转速传感器

磁阻式转速传感器的基本组成与原理如图 7-32 所示。当通过磁阻元件（MRE）的磁场强度改变时，元件的电阻会随之改变。将磁阻元件置于转动的多极磁环附近（图 7-32a），在转动磁极交变磁场的影响下，磁阻元件的电阻就会呈周期性变化，通过测量电路（图 7-32b）就可转换为反映被测转速的电脉冲。

磁阻式转速传感器为参量式传感器，为提高传感器的灵敏度，通常将磁阻元件连接到电桥电路中，并通过比较器和放大电路将磁阻元件的电阻变化转变为电压脉冲输出。

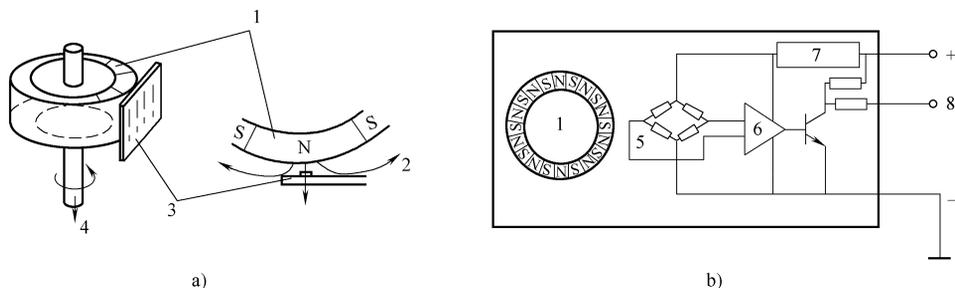


图 7-32 磁阻式转速传感器组成与原理

a) 组成原理 b) 电路原理

1—多极磁环 2—磁力线 3、5—磁阻元件 4—传感器轴 6—比较器 7—稳压电路 8—信号输出

## 第四节 温度的测量

### 一、温度的测量原理

温度是反映物体冷热状态的物理量，在科学研究、工程测试领域中，需要通过温度测量来获得重要的热工参量。在一些自动控制系统中，需要通过温度状态的监测来实现设定的控制过程。

#### 1. 温度的基本概念

温度用于度量物体的冷热程度。温度的宏观概念建立在热平衡基础上，即两个物体处于热平衡状态时，就会有某一共同的物理性质，表征这个物理性质的量就是温度。也就是说，处于热平衡状态的两个物体具有相同的温度。如果两个物体的温度不同，则就会有热交换，热量将从温度高的物体传递到温度低的物体上。从微观上看，温度是物体内部分子运动平均动能大小的度量。物体温度越高，其内部分子的动能越大，运动激烈程度越高；物体温度越低，其内部分子的动能越小，运动激烈程度越低。

#### 2. 温度测量基本原理

温度是一个抽象的物理量，不能像测量长度和质量那样通过与标准量的比较就可得到测



量结果。但是，温度会影响物体的状态、性质和某些物理现象。比如，物体的几何尺寸、弹性、黏度、密度、电导率、热导率、热容量、热电势及辐射强度等都与温度有关。因此，通过适当的方法测量一个与温度有关的物理量的大小和变化，就可获得相应的温度值或温度的变化情况，这就是温度测量的基本原理。需要强调的是，温度测量所选择的被测物理参量的变化应只与温度有关，如果还有其他的影响因素，则与温度相比其影响应可忽略不计，或其影响是可测（可知）的。

### 3. 温度的测量方法

温度测量有直接用温度计进行温度测量和通过温度传感器进行温度测量两种类型。温度计将随被测温度变化的物理量直接标定为温度值。温度计有液体式（如水银式温度计）、固体式（如双金属式温度计）、压力式（如波登管式温度计）等多种。温度传感器则是将随被测温度变化的物理量转换为电信号，再经测量电路进行信号处理后送显示器或控制器。

按是否接触被测对象分，有接触式温度测量和非接触式温度测量两种测量方式。

(1) 接触式温度测量 接触式测温是基于热平衡原理，即感温元件直接与被测介质接触，当感温元件与被测对象处于同一热平衡状态（具有相同的温度）时，便可以得到被测物体的温度。接触式测温时，由于温度计（温度传感器）的感温元件与被测物体相接触，吸收被测物体的热量，往往容易使被测物体的热平衡受到破坏。因此，接触式测温不适于小物体的温度测量。

(2) 非接触式温度测量 非接触式测温其温度计（温度传感器）的感温元件不直接与被测物体相接触，而是利用物体的热辐射原理或电磁原理感受被测物体的温度。非接触方法测温时，温度计的感温元件与被测物体有一定的距离，靠接收被测物体的辐射能实现测温，所以不会破坏被测物体的热平衡状态，具有较好的动态响应。非接触式测量的缺点是精度较低。

## 二、测温度传感器

### 1. 热膨胀式温度传感器

热膨胀式温度传感器利用物体热膨胀的物理现象，将被测温度转换为相应的电信号。按膨胀物体的物态的转换方式不同，大致可分为液体膨胀式、固体膨胀式和压力式等几种类型。

(1) 液体膨胀式温度传感器 液体膨胀式温度传感器利用液体受热体积膨胀的特性，将被测温度变化转换为液体的体积变化，并将体积变化转换为相应的电信号。一种用作温度开关的水银式温度传感器如图 7-33 所示。当被测温度上升至设定值时，随温度上升而升高的水银柱将触点接通，传感器即输出被测温度达到了设定值的电信号。

这种水银式温度传感器结构简单，若在玻璃管上标以刻度就可直接读取被测温度值，且灵敏度和精度较高。水银式温度传感器的缺点是易破碎、热惯性大，且水银溢出会造成污染，电信号只是输出开关量信号。

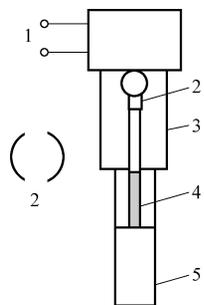


图 7-33 液体膨胀式温度传感器

- 1—输出端子 2—触点
- 3—玻璃管 4—水银柱
- 5—感温包



(2) 固体膨胀式温度传感器 固体膨胀式温度传感器利用固体材料热胀冷缩的特性，将被测温度变化转换为物体的变形（伸缩或弯曲），并将这种变形转换为相应的电信号。一种采用双金属片作为温度敏感元件的温度传感器如图 7-34 所示。

由两种热膨胀系数不同的金属叠成的双金属片在受热时会发生弯曲，双金属片上绕有加热线圈，加热线圈与温度指示表和常闭触点串联。接通电源后，加热线圈通电产生热量使双金属片受热弯曲，并最终使触点张开；加热线圈不通电时，双金属片又冷却伸直，并使触点重新闭合，如此反复，形成脉动电流（图 7-35）。传热套筒外侧直接感受被测温度，并将热量传递给双金属片，使其向上弯曲而改变触点的接触压力。温度低时，触点的接触压力大，加热线圈需通电较长时间，使双金属片受热得到较大的弯曲后触点才能断开，而触点断开后只需较短的时间又可闭合，使得电路中形成宽脉冲电流。温度升高时，使触点的压力减小，双金属片稍有受热弯曲就可使触点断开，触点闭合时间相对较短，使得电路中的电流脉宽减小。这一脉宽与被测温度高低相对应的脉冲电流通过温度指示表，驱动指示表指示相应的温度值。

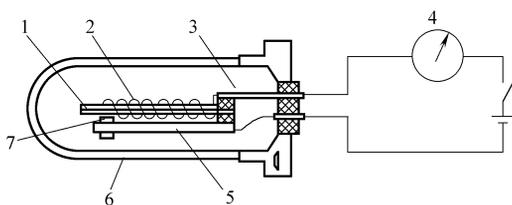


图 7-34 双金属式温度传感器

1—双金属片 2—加热线圈 3—导电片 4—温度指示表 5—固定触点臂 6—传热套筒 7—触点

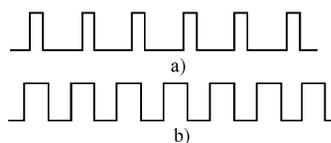


图 7-35 温度传感器工作电流波形

a) 温度高时电流波形  
b) 温度低时电流波形

双金属式温度传感器的缺点是测量精度不高，工作的可靠性较差。因此，这种双金属式温度传感器用作温度测量已较为少见，但作为温度控制开关则有较多的应用。开关式双金属温度传感器一例如图 7-36 所示。温控开关的双金属片上无加热线圈，当所监控的温度达到设定值时，双金属片的弯曲程度使触点张开（触点常闭型）或闭合（触点常开型），传感器输出端子输出温度已达到设定值信号，或直接控制相关电路的通断，实现温度控制或极限温度报警。

(3) 压力式温度传感器 压力式温度传感器利用一定质量的液体或气体在定容条件下其压力与温度呈现某种确定关系的特性，将被测温度转换为相应的压力，再将压力转换为电信号。压力式温度传感器示例如图 7-37 所示。

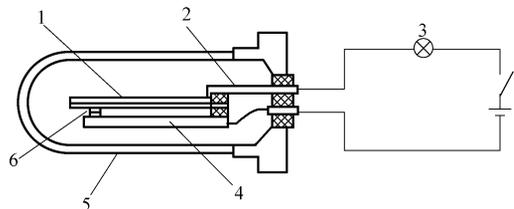


图 7-36 双金属式温控开关

1—双金属片 2—导电片 3—温度报警灯  
4—固定触点臂 5—传热套筒 6—触点

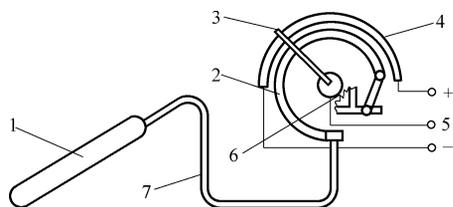


图 7-37 压力式温度传感器

1—感温包 2—弹簧管 3—电位计滑片 4—电位计电阻 5—输出端子 6—传动机构 7—毛细管



感温筒、毛细管及弹簧管的内腔共同形成一个封闭的容器，其中充满了某种气体或液体。感温筒置于被测介质中，当被测温度升高时，感温筒内的气体或液体的压力增大，压力的变化经毛细管传入弹簧管，弹簧管在压力的作用下发生变形，通过传动机构带动电位计滑片转动，使电位计输出相应的电压信号。如果电位计换作指针和刻度，就是可直接测量温度的压力式温度计了。

压力式温度传感器结构简单、具有一定的抗振能力，但毛细管弹簧管内的介质会受环境温度的影响，且环境压力的变化也会造成弹簧管内外压差的改变，这些都会造成测量误差。因此，这种压力式温度传感器的测量精度不高。

## 2. 热敏电阻式温度传感器

热敏电阻式温度传感器利用其敏感元件的电阻值随温度变化的特性，将被测对象的温度转换为相应的电信号。根据传感器敏感元件的不同，热敏电阻式温度传感器可分为热电阻式和半导体式两种类型。

(1) 热电阻式温度传感器 热电阻式温度传感器利用金属导体的电阻随温度变化的特性，将被测温度的变化转换为相应的电阻值，并通过测量电路转换为相应的电信号。热电阻式温度传感器按其结构分，有绕线型、薄膜型和厚膜型，其中绕线型的热电阻式温度传感器应用相对较多。绕线型热电阻由金属丝（镍、铜、铂、银等）绕制在绝缘绕线架上，再罩上适当的外壳构成。在一定的温度变化范围内，绕线电阻的温度特性可近似地表示为

$$R_t = R_0(1 + \alpha T) \quad (7-1)$$

式中  $T$ ——测量温度（℃）；

$\alpha$ ——电阻丝的温度系数；

$R_0$ ——电阻丝在 0℃ 时的电阻值；

$R_t$ ——电阻丝在  $T$ ℃ 时的电阻值。

各种金属的温度系统见表 7-8。

表 7-8 各种金属的温度系数

材料	铜	银	铂	镍
温度系数 $\alpha$	0.0043	0.0041	0.0039	0.0068

绕线式温度传感器其精度在  $\pm 1\%$  以内，响应较慢，其电阻值一般不大。

(2) 半导体式温度传感器 半导体式温度传感器利用半导体的电阻随温度显著变化的特性，将被测温度的变化转换为相应的电阻值。半导体热敏电阻由金属氧化物按一定的比例混合烧结而成，有球状、片状或柱状等。一种球状热敏电阻的半导体式温度传感器如图 7-38 所示。

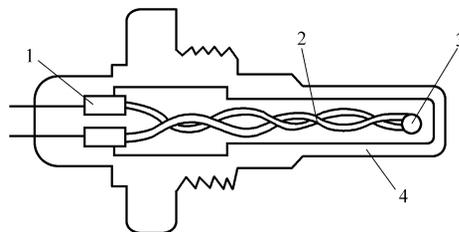


图 7-38 半导体式温度传感器的组成

1—接线端子 2—引线 3—热敏电阻 4—传感套筒



不同的材料,采用不同的烧结工艺,可使半导体热敏电阻呈现不同的温度特性(图7-39),适用于不同的温度测量(表7-9)。

电阻值随温度的上升而减小的半导体可制成负温度系数的热敏电阻(NTC),其电阻  $R_t$  与被测温度  $T$  的关系可由下式表示。

$$R_t = R_0 e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (7-2)$$

式中  $R_0$ ——电阻丝在  $0^\circ\text{C}$  时的电阻值;

$B$ ——热敏电阻的材料常数

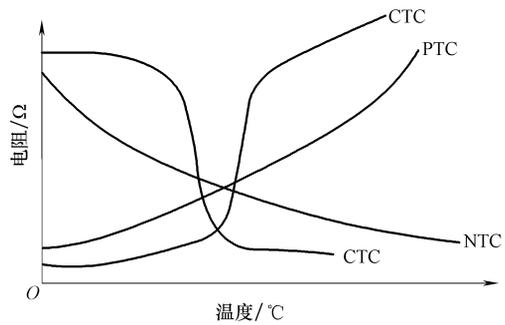


图 7-39 半导体热敏电阻的温度特性

表 7-9 各种半导体热敏电阻的温度测量范围

热敏电阻种类	温度测量范围	基本材料
负温度系数热敏电阻(NTC)	超低温: $1 \times 10^{-3} \sim 100\text{K}$ 低温: $-130 \sim 0^\circ\text{C}$ 常温: $-50 \sim 350^\circ\text{C}$ 中温: $150 \sim 750^\circ\text{C}$ 高温: $500 \sim 1300^\circ\text{C}$ $1300 \sim 2000^\circ\text{C}$	碳、锗、硅 常用组成中添加铜,以降低电阻 锰、镍、钴、铁等金属氧化物的烧结体 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 加过渡族金属氧化物的烧结体 $\text{ZrO}_2$ 与 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 的复合烧结体 $\text{ZrO}_2$ 与 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 的复合烧结体(短时间测量)
正温度系数热敏电阻(PTC)	$-50 \sim 150^\circ\text{C}$	以 $\text{BaTiO}_3$ 为主,加适量稀土元素的烧结体
电阻突变型热敏电阻(CTC)	$0 \sim 350^\circ\text{C}$	$\text{BaO}$ 、 $\text{P}$ 与 $\text{B}$ 的酸性氧化物烧结体, $\text{Si}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{SrO}$ 、 $\text{B}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{La}$ 等氧化物烧结体

在温度测量和自动控制系统中,广泛采用以 NTC 为热敏元件的温度传感器,通过选用不同的材料和烧结工艺,就可使 NTC 适用于不同温度范围的测量与控制,且可确保其有较高的精度。

电阻值随温度上升而增大的半导体则制成正温度系数的热敏电阻(PTC),其电阻  $R_t$  与温度  $T$  的关系可由下式表示:

$$R_t = R_0 e^{B(T - T_0)} \quad (7-3)$$

式中各符号的意义与式(7-2)中的相同。以 PTC 为热敏元件的温度传感器除用作温度测量外,较多地用于电子电路中的温度补偿和温度控制等。

在某一临界温度下电阻值跃变的半导体则可用作热敏开关(CTR)。这种温度传感器虽然不能进行一定范围内的温度测量,但用于监测被测对象温度是否超过设定值则十分有效。因此,以 CTC 为热敏元件的温度传感器被广泛地应用于温度报警、温度自动控制电路中。

半导体式温度传感器的优点是电阻温度系数大、灵敏度较高,可比一般的金属电阻大  $10 \sim 100$  倍;电阻率大、热惯性小、动态特性好;结构简单、体积小。半导体式温度传感器的缺点是非线性较大,对环境温度较为敏感。

(3) 晶体管式温度传感器 晶体管式温度传感器利用 PN 结电压随温度变化的特性,将被测温度变化转换为相应的电信号。根据其结构形式的不同分,有热敏二极管温度传感器、热敏晶体管温度传感器、热敏晶闸管温度传感器等。



晶体管式温度传感器具有体积小、灵敏度高的特点，可用于温度测量和与温度相关的自动控制。

### 3. 热电偶温度传感器

热电偶温度传感器利用热电偶的热电效应，将被测对象的温度参数转换为相应的电势，并通过动圈式仪表、模拟式电位差计、数字式电位差计等显示相应的温度参数。

(1) 热电偶的基本定律 利用热电偶测温时，需要用导线将热电偶与测量仪表连接起来。这些导线和仪表以及它们之间形成的接点会不会影响测量精度呢？了解热电偶的基本定律，可以帮助我们消除疑虑并更好地运用热电偶进行温度测量。热电偶的基本定律包括中间温度定律、中间导体定律、标准电极定律和均质导体定律等。

1) 中间温度定律。中间温度定律是指当热电偶两个接点的温度分别为  $T$  和  $T_0$  时，所产生的热电势等于该热电偶两接点温度为  $T$ 、 $T_n$  和  $T_n$ 、 $T_0$  时所产生的热电势之代数和，如图 7-40 所示。中间温度定律的数学表达式如下。

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (7-4)$$

式中  $T_n$ ——中间温度。

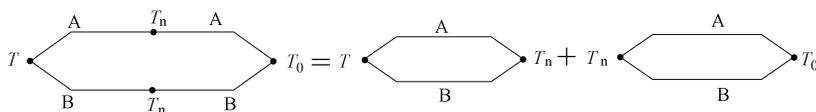


图 7-40 中间温度定律示意

中间温度定律是制定热电偶分度表的理论基础。由于热电偶分度表都是以冷端温度为  $0^\circ\text{C}$  时做出的，但一般工程测量中冷端都不为零，只要得出热端  $T$  与冷端  $T_n$  的热电势，便可利用中间温度定律求出热端温度  $T$ 。

2) 中间导体定律。在热电偶测温回路中，通常要接入导线和测量仪表，这相当于接入了第三导体（图 7-41）。中间导体定律是指在热电偶回路中，只要接入的第三导体两端温度相同，则对回路总的热电势没有影响，即

$$E_{ABC}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_0) \quad (7-5)$$

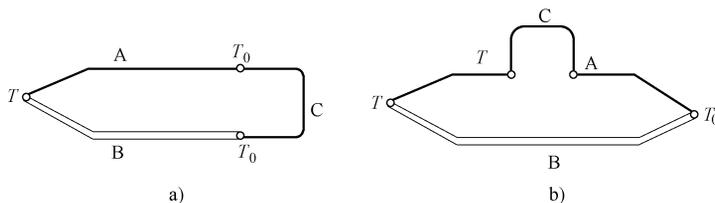


图 7-41 有中间导体的热电偶回路

a) C 导体插入 AB 之间 b) C 导体串联于 A 中间

3) 标准电极定律。如果两种导体 A、B 分别与第三种导体 C 组成的热电偶所产生的热电势已知，则导体 A、B 所组成的热电偶的热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \quad (7-6)$$

这一规律称为标准电极定律，电极 C 称为标准电极。在工程测量中，由于纯铂丝的物



理化学性能稳定，熔点较高，易提纯，所以常将纯铂丝作为标准电极。标准电极定律使得热电偶电极的选配大为简化，因为只要知道某材料与标准电极相配时的热电势，就可使用式(7-6)求出任何两种材料配成热电偶的热电势。

4) 均质导体定律。如果热电偶回路中的两个热电极材料相同，则无论两接点的温度如何，热电动势均为0。这就是均质导体均匀性。

(2) 热电偶的类型 热电偶的类型较多，从1991年开始，我国采用国际计量委员会规定的“1990年国际温标”(ITS—1990)的标准。按此标准，共有八种标准化了的通用热电偶，见表7-10。

表 7-10 标准型通用热电偶的种类

名称	分度号	测温范围/℃	热电动势/mV	特点
铂铑 <sub>30</sub> -铂铑 <sub>6</sub> <sup>①</sup>	B	50 ~ 1820	0.033/100℃ 4.834/1000℃	优点:熔点高,测温上限高,性能稳定,精度高,100℃以下热电动势微小,因而可以不必考虑冷端温度补偿;缺点:价高,热电动势小,线性度差,只能适用于高温测量
铂铑 <sub>13</sub> -铂 <sub>6</sub>	R	-50 ~ 1768	0.647/100℃ 10.506/1000℃	优点:测温上限高,性能稳定,精度高,重复性好,多用于高精密度测量;缺点:价高,热电动势小,不能在金属蒸气和还原性气氛中使用,高温下连续工作时性能会逐渐下降
铂铑 <sub>10</sub> -铂	S	-50 ~ 1768	0.646/100℃ 9.587/1000℃	优点:与R型热电偶相似,但要稍差些;曾经作为国际温标的法定标准热电偶
镍铬-镍硅	K	-270 ~ 1370	4.096/100℃ 41.276/1000℃	优点:热电动势较大,线性好,稳定性好,价廉,多用于工业测量;缺点:材质较硬,在1000℃以上长时间工作热电动势容易漂移
镍铬硅-镍硅	N	-270 ~ 1300	2.744/100℃ 36.256/1000℃	各项性能均比K型热电偶好,适用于工业测量,是一种新型热电偶
镍铬-铜镍	E	-270 ~ 800	6.319/100℃	优点:热电动势大(比K型热电偶大50%左右),线性好,耐高湿度,价廉,多用于工业测量;缺点:不能用于还原性气氛
铁-铜镍	J	-210 ~ 760	5.269/100℃	优点:价廉,在还原性气氛中性能较为稳定;缺点:纯铁容易被腐蚀和氧化
铜-铜镍	T	-270 ~ 400	4.279/100℃	优点:价廉,加工性好,离散性小,性能稳定,线性好,精度高;缺点:在高温时铜容易被氧化,测温上限低,因而多用于低温测量

① 铂铑<sub>30</sub>表示该合金铑的质量分数30%，铂的质量分数70%，以下类推。

按封装的形式分，热电偶有金属套管式、铠装式和薄膜式等。

1) 金属套管式热电偶。金属套管式热电偶是最为普通、使用最为广泛的热电偶，其结构形式和组成如图7-42所示。金属保护套管的作用是保护热电偶工作时不被损坏，延长其使用寿命。

2) 铠装式热电偶。铠装式热电偶将热电偶的双金属线装入金属管内，用无机物进行电气隔离，其结构形式一例如图7-43所示。铠装式热电偶的外径细、响应速度快、柔软性好(可进行一定程度的弯曲)、耐热、耐压、耐冲击。

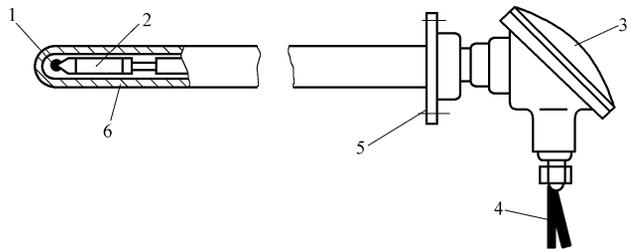


图 7-42 金属套管式热电偶

1—测温接点 2—绝缘套管 3—接线盒 4—导线 5—法兰盘 6—金属保护套管

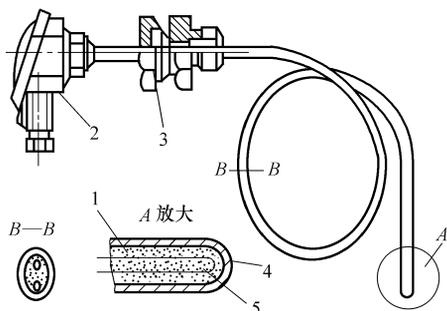


图 7-43 铠装式热电偶

1—填充的无机物 2—接线盒 3—固定螺母 4—金属管 5—热电偶接点

3) 薄膜式热电偶。薄膜式热电偶采用真空蒸镀的方法, 将热电偶材料沉积在绝缘基板上构成热电偶, 其结构示意图如图 7-44 所示。蒸镀方式制成的热电偶很薄 (可以达到  $0.01 \sim 0.1\text{mm}$ ), 结构尺寸可以做得很小, 因此热点的热容量小, 反应时间很短, 适用于动态温度测量; 应用时, 将薄膜热电偶粘贴在被测对象表面, 因而热损失小、测量精度较高。薄膜式热电偶主要用于小面积上的温度测量。

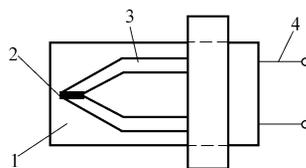


图 7-44 薄膜式热电偶

1—绝缘基板 2—热接点 3—热电极 4—引出线

(3) 热电偶的冷端补偿 从热电效应的原理可知, 热电偶输出的热电动势是热电偶两端温度差值的函数, 为使热电动势成为热端温度的单值函数, 就需要使冷端的温度恒定不变。但实际应用中冷端离热源很近, 易受被测对象和环境温度波动的影响, 使冷端温度难以保持恒定不变。为此, 需要通过适当的措施进行冷端温度的补偿或修正, 以消除冷端温度波动的影响。常用的方法如下。

1) 冷端恒温法。冷端恒温法就是把热电偶的冷端置于某种温度不变的装置中。可将冷端放在冰和水混合的容器中, 保持冷端为  $0^\circ\text{C}$  不变, 这种方法精度高, 但在工程中应用很不方便, 一般只用于实验室。在工程测量中, 通常是将冷端置于某种恒温容器中, 以使冷端温度保持不变。然后采用冷端温度修正的方法, 就可得到冷端为  $0^\circ\text{C}$  时的热电动势。

2) 补偿导线法。为了使冷端远离热源, 免受热源的影响, 就需要加长热电偶使冷端处于恒温或温度变化小的地方。但热电偶做得过长时不但安装不便, 其价格也太高, 因此需要采用一种专门的补偿导线 A'、B' 来加长热电偶 (图 7-45)。补偿导线在规定温度范围内的热电性能应和相配的热电偶的热电性能一致或相近。工业上制成了专用的补偿导线, 并以不同的颜色加以区别。使用时必须注意:

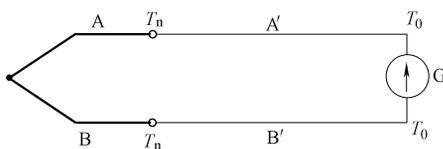


图 7-45 通过补偿导线延长热电偶冷端

- ① 不同的补偿导线只能与相应型号的热电偶配用。
- ② 正负极性不能接错, 否则反而会增大误差。



③ 热电偶与补偿导线两个连接点的温度必须相等，且不得超过规定的温度范围，一般为  $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

3) 电桥补偿法。在热电偶测量回路中串接一个输出电压随温度变化的直流电桥，利用电桥根据温度变化所产生的电势自动补偿热电偶冷端温度波动所产生的热电动势的变化量。这个直流电桥称之为冷端温度补偿器，其电路原理如图 7-46 所示。

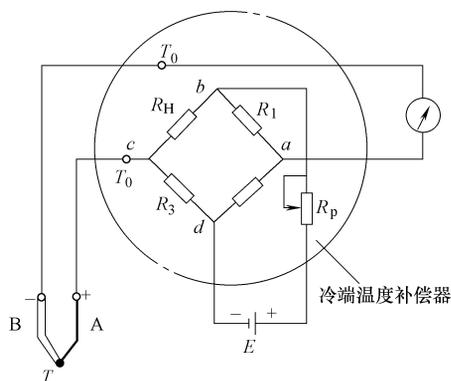


图 7-46 电桥补偿法电路原理

电桥的输出端与热电偶串联，并将热电偶的冷端与电桥置于同一温度场中，桥臂电阻  $R_H$  是温度系数较大的热敏电阻，其余的桥臂电阻其温度系数很小，可以认为是不随温度变化的定值电阻。通常将电桥设计为  $20^{\circ}\text{C}$  时处于平衡状态，此时  $a$ 、 $c$  两点电位相等，电桥输出电压为 0。当温度不等于  $20^{\circ}\text{C}$  时，如果热电偶由于冷端温度变化使热电偶的输出电势产生的变化量为  $\Delta E$ ，而此时由于  $R_H$  阻值变化已使电桥处于非平衡状态，电桥从  $a$ 、 $c$  两端输出电压  $\Delta E'$ ， $\Delta E'$  与  $\Delta E$  大小相等，方向相反，这样便实现了热电偶冷端温度的自动补偿。

采用冷端温度补偿器比冷端恒温法等更方便，但使用中应注意以下几点。

- ① 不同型号的补偿器只能与相应的热电偶配用。
- ② 只能在规定的温度范围内使用，一般为  $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- ③ 注意正负极不能接反。

4) 显示仪表零位调整法。当热电偶通过补偿导线连接显示仪表时，如果热电偶冷端温度已知且变化不大，可预先用零位调整器旋钮将显示仪表的指针从初始刻度调整到已知的冷端温度值上，这样，测量时显示仪表的示值就是被测对象的实际温度。

显示仪表零位调整法精度不太高，但方法简便，因而在精度要求不高的温度测量中经常被采用。

(4) 热电偶的串并联 将两支或两支以上的热电偶并联或串联，用以测量多个热点的温度或提高灵敏度。

1) 热电偶并联测温电路。热电偶并联测温电路如图 7-47 所示，用于测量多点的平均温度。 $n$  支热电偶的正极和负极分别连接在一起，形成同极性并联测温电路，如果各支热电偶产生的热电动势分别为  $E_1, E_2, \dots, E_n$ ，且各支热电偶电阻均相等，则  $n$  支热电偶并联测温电路的总热电动势  $E_{nb}$  就等于  $n$  支热电偶热电动势的平均值，即

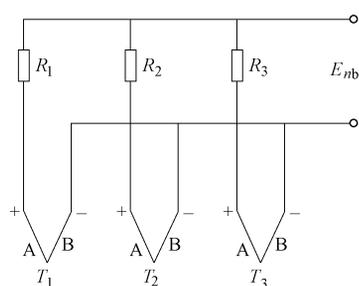


图 7-47 热电偶并联测温电路

$$E_{nb} = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n} \quad (7-7)$$

2) 热电偶串联测温电路。热电偶同极性串联测温电路如图 7-48 所示。同极性串联方式



也可用于测量多点的平均温度，如果各支热电偶产生的热电动势分别为  $E_1, E_2, \dots, E_n$ ，则  $n$  支热电偶同极性串联测温电路的总热电动势  $E_{nc}$  为

$$E_{nc} = E_1 + E_2 + \dots + E_n \quad (7-8)$$

如果各支热电偶产生的热电动势均相等，则总热电动势  $E_{nc}$  就是单支热电偶所产生的热电动势的  $n$  倍。可见，同极性串联热电偶测温电路的另一个作用是提高传感器的输出电压。

热电偶反极性串联测温电路如图 7-49 所示。反极性串联方式用于测量两点间的温差，通常采用相同热电偶并配用相同的补偿导线。工作时，两支热电偶产生极性相反的热电动势，输入指示表的是两热电动势的差值，这一差值反映了两支热电偶热端温度差。

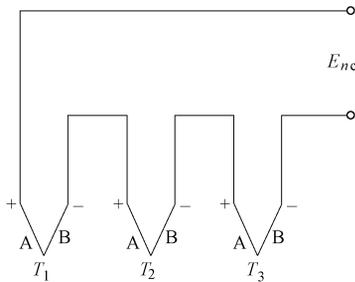


图 7-48 热电偶同极性串联测温电路

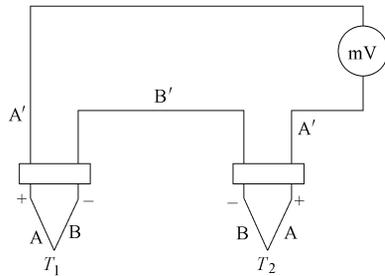


图 7-49 热电偶反极性串联测温电路

热电偶的串并联一般限于多个热电偶的材料相同，且其冷端温度也相同。热电偶并联测温电路中，如果有某支热电偶断路，测温电路不会中断工作，但会引起较大的测量误差。热电偶串联测温电路中，如果有某支热电偶断路，测温电路将中断工作。

### 思考题

1. 静力效应测力与动力效应测力的基本原理有何不同？
2. 各种测力（压力）传感器是如何将被测力转换为电信号的？压电式传感器如何实现多向测力？
3. 常见的测转矩传感器有哪些？这些转矩传感器是如何将被测转矩转换为电信号的？
4. 位移测量有何特点？常用的测位移传感器有哪些？各自的特点是什么？
5. 光电式车身高度传感器的车身高度信号是如何产生的？如何根据车身高度信号判断车身的高度和车身的振动情况？
6. 光电式角位移传感器是如何产生转角信号的？怎样根据转角信号判断转动的方向？
7. 转速的测量方法有哪些？常用的测转速传感器如何将转速转换为电信号？各种测转速传感器都有什么特点？
8. 接触式温度测量和非接触式温度测量其测温原理有何不同？不同类型的测温传感器是如何将温度转换为电信号的？
9. 热电偶的基本定律有哪些？这些基本定律对热电偶温度测量的应用有哪些指导作用？
10. 热电偶为什么要进行冷端温度补偿？热电偶冷端温度补偿方法有哪些？

# 第八章

## 计算机测试技术简介

### 第一节 计算机测试系统的组成

现代测试技术的一个显著特点是计算机技术的应用，计算机测试系统用具有信号分析与处理功能的微处理器或计算机系统替代传统的信号调理电路和显示与记录设备，使得测试系统的设计更加方便灵活，测试系统的信号分析处理功能更加强大，并向着自动化、智能化方向发展。智能仪器、虚拟仪器及网络化测试系统等，均是计算机测试技术应用的具体实例。

#### 一、计算机测试系统的构成与特点

##### 1. 计算机测试系统的基本组成

计算机测试系统的基本组成如图 8-1 所示。相比于传统的测试系统，计算机测试系统除信号调理电路外，还包括信号采集与保持、模数转换及其他计算机硬件设备，在其只读存储器（ROM）中，还储存有计算机系统程序和应用程序。

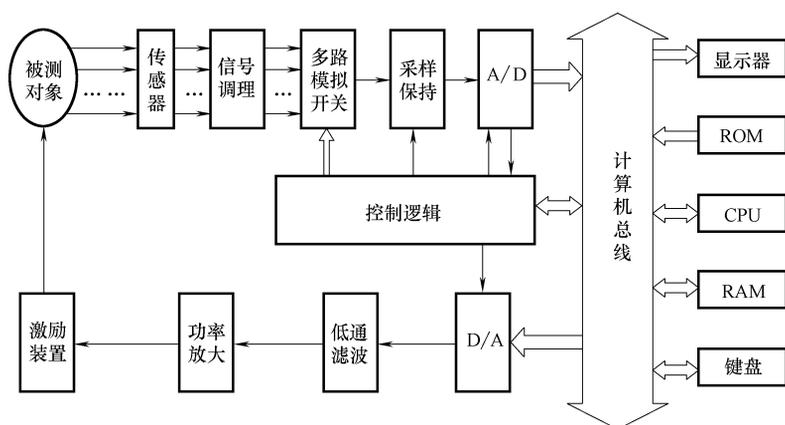


图 8-1 计算机测试系统的基本组成

A/D—模数转换器 ROM—只读存储器 CPU—中央微处理器 RAM—随机存储器 D/A—数模转换器



## 2. 计算机测试系统的特点

计算机测试系统利用计算机系统丰富的软、硬件资源实现多功能、自动化和智能化的测试，信号的采集和处理速度快、信息量大、储存方便。相比于传统的测试系统，计算机测试系统具有如下优点。

(1) 性能价格比高 计算机测试系统通常具有多项测试功能和综合分析处理能力，但测试系统由软硬件结合组成，电路的元件总数少、工作可靠性高，具有较高的性价比。

(2) 设计方便灵活 要设计新型仪器或现有测试系统改造升级，只需根据现有的计算机测试系统更改少数硬件接口，配备适用的传感器，修改软件即可实现。因此，新的计算机测试系统的研究与开发周期短、成本低。

(3) 具有运算和记忆功能 计算机超强的运算能力和存储器超大容量的存储功能，使得计算机测试系统可进行实时的测量数据统计分析处理，以及时发现系统误差和减小随机误差；对多项测量数据进行综合分析处理，以获得最明确的测量结果；进行实时的补偿和函数转换等运算，以得到准确的测量数据；测试过程获得的大量数据均可以毫无遗漏地记录下来，且可以长时间保存。

(4) 操作方便 操作人员可通过测试系统显示屏幕上的人机交互界面，通过键盘、鼠标或直接触摸等进行操作。显示器还可显示测试程序和步骤、操作方法和注意事项等，使得很复杂的测试过程操作起来却很方便。

(5) 有自动校准功能 计算机测试系统可以自动进行零位校准，在每次测量时，系统控制程序会首先进行零位检验，将零漂数值存入 RAM 中，用于测量时的零位修正。自动校准功能还包括量程的自动校准，计算机通过判断被测量所属的量程，自动切换可编程放大器的放大倍数，并测出放大器增益的变化量，在测量时通过运算加以修正。计算机测试系统的自动校准功能可减小测量误差，简化仪器面板的操纵旋钮。

(6) 有故障自诊断功能 计算机测试系统所设置的故障自诊断程序可通过比较输入计算机的各种信号判断各电路或部件是否正常，当测试系统有故障时，故障自诊断程序就会发出报警，并可提示故障信息，以及时排除故障。

## 二、多路模拟开关

### 1. 多路模拟开关的作用

计算机测试系统通常需要进行多参量的测量，如果多个传感器的信号都采用独立的输入回路（信号调理、采样/保持、模/数转换），则系统使用的元件将成倍增加。这不但使系统的成本高、体积庞大，而且由于模拟器件、阻容元件参数、特性不一致，对系统的校准带来很大麻烦。采用多路模拟开关可将多个传感器信号逐个、分时地接通，送入公用的输入回路进行测量，用以减少系统输入回路的元件数量，简化输入回路。

### 2. 多路模拟开关的原理与技术要求

多路模拟开关原理如图 8-2 所示。计算机 CPU 通过总线将控制信号  $A_0$ 、 $A_1$  及  $A_2$  输入译码器，译码器根据  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  的状态选中  $S_0 \sim S_7$  中的一个开关闭合，以便将当前被选定的输入信号送入采样保持电路。



对多种模拟开关的基本技术要求是，导通电阻小、断开电阻大、切换速率高。由于多路模拟开关与模拟信号源相串联，故在理想条件下，要求开关在导通状态下的电阻为 $0$ （实际 $<100\Omega$ ），而开关在断开状态下的电阻为 $\infty$ （一般 $>10^6\Omega$ ），要求开关接通和断开的时间在 $1\mu\text{s}$ 左右。

现代计算机测试系统中，通常采用 CMOS 场效应模拟电子开关。尽管模拟电子开关的导通电阻受电源、模拟信号电平和环境温度变化的影响会发生改变，但是与传统的机械触点式开关相比，其功耗低、体积小、易于集成、速度快且没有机械式开关的抖动现象。CMOS 场效应模拟电子开关的导通电阻一般在 $200\Omega$ 以下，关断时漏电流一般可达 nA 级甚至 pA 级，开关时间通常为数百 ns。

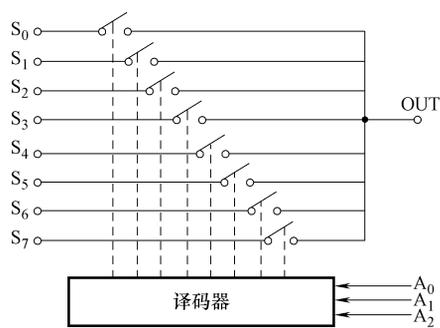


图 8-2 多路模拟开关原理

### 三、模/数转换与数/模转换

#### 1. 模/数与数/模转换的作用

模/数转换器（A/D）是将传感器的模拟信号转换为计算机能接收的数字信号（二进制数），数/模转换（D/A）则是将计算机输出的数字信号转换为相应的模拟信号，以使只能用模拟控制信号控制的执行机构能按计算机的指令动作。可见，A/D 和 D/A 是计算机测试系统中模拟电路和数字电路的接口，是必不可少的组成部件。

A/D 和 D/A 转换器大都采用电压-数字转换方式，输入、输出的模拟电压也都标准化，如单极性 $0\sim 5\text{V}$ 、 $0\sim 10\text{V}$ 或双极性 $\pm 5\text{V}$ 、 $\pm 10\text{V}$ 等，给使用带来极大方便。

#### 2. A/D 转换原理

A/D 转换过程包括采样、量化和编码三个步骤，其转换原理如图 8-3 所示。A/D 转换器输入信号  $x(t)$  为模拟量，输出信号  $x(n)$  为二进制数。

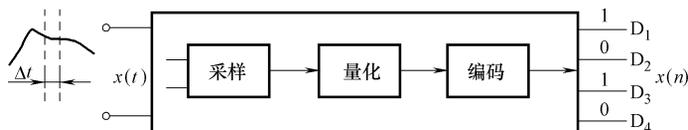


图 8-3 A/D 转换原理

采样过程是 A/D 转换器以一固定的时间间隔对模拟信号进行扫描，取得一系列离散的采样幅值。量化过程是通过舍入或去尾的方法将采样幅值变为一个有限有效数字的数。编码就是将这些代表各采样幅值的有效数字变为二进制数。比如，模拟输入信号的某一个采样幅值量化后的数为 5，A/D 便会输出“0101”这个微处理器可接受的二进制代码。

#### 3. D/A 转换原理

D/A 转换器将输入的数字信号转换为与输入数字量成正比的模拟电压或电流信号输出。为了将数字量表示为模拟量，需要将每一位二进制数代码按其权大小转换成相应的模拟量，



然后根据迭加原理将各位代码对应的模拟分量相加，其和就是与数字量成正比的模拟量。D/A 转换过程如图 8-4 所示。

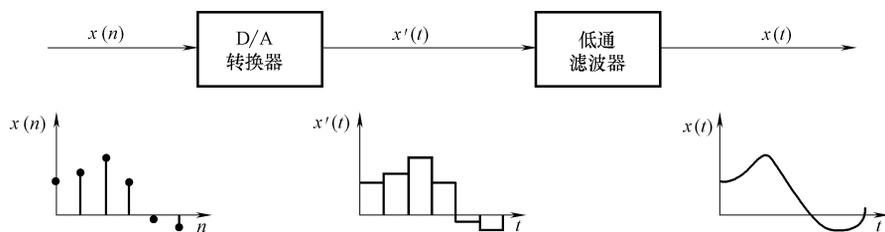


图 8-4 D/A 转换过程

D/A 不断地转换输入的数字信号，得到各个不同时刻的瞬时值，这些瞬时值的集合对一个信号而言在时域中仍是离散的，要将其恢复为原来的时域模拟信号，必须通过保持电路进行波形复原。保持电路输出的信号实际由许多矩形脉冲构成，为了得到光滑的输出信号，还必须通过低通滤波器滤除其中的高频成分，以恢复出原信号。

#### 四、采样保持

##### 1. 采样保持的作用

采样保持的作用是对一连续信号  $x(t)$  以一定的时间间隔快速取其瞬时值后，将该瞬时值保持在记忆元件，以供模数转换器进行量化处理。在 A/D 转换过程中，采样保持可保证 A/D 转换时保持采样值不变，以确保 A/D 转换的精确度。采样保持的工作波形图如图 8-5 所示。

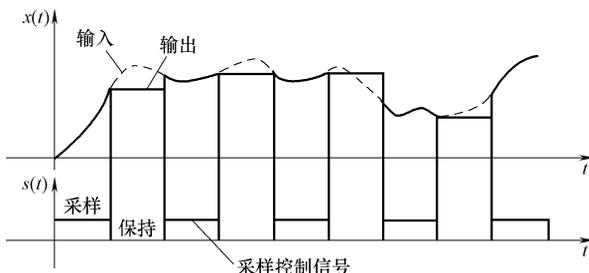


图 8-5 采样保持工作波形

##### 2. 采样保持的原理

采样保持电路的基本原理如图 8-6 所示，主要由起记忆作用的电容 C，输入、输出缓冲放大器以及控制开关 S 等组成。两放大器均接成跟随器形式，采样期间，开关闭合，输入信号电压  $V_x$  通过输入放大器给电容器 C 快速充电；保持控制信号  $V_c$  使开关断开，保持期间，

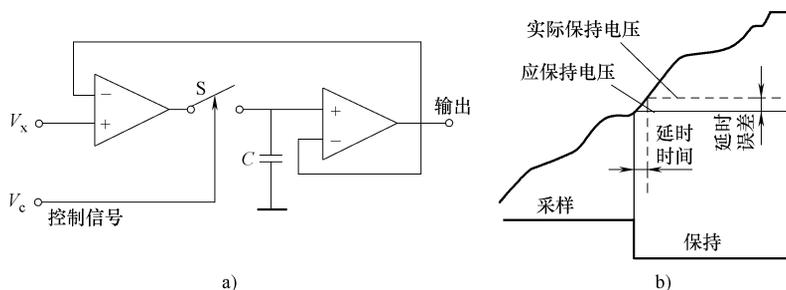


图 8-6 采样保持原理

a) 采样保持电路 b) 采样保持延时引入误差



由于输出缓冲放大器的输入阻抗极高，电容器上存储的电荷将基本维持不变，并通过输出放大器送至 A/D 转换器进行量化处理，保持充电时的最终值供 A/D 转换。

由于开关状态的切换需要一定的时间，实际保持的信号电压会存在一定的误差（图 8-6b），这种时间滞后称为采样保持器的孔径时间。显然，它必须远小于 A/D 的转换时间，同时也必须远小于信号的变化时间。

实际系统中，是否需要采样保持电路，取决于模拟信号的变化频率和 A/D 转换时间，通常对直流或缓变低频信号进行采样时可不用采样保持电路。

## 第二节 智能仪器

### 一、智能仪器概述

#### 1. 智能仪器的特征

智能仪器是一种计算机测试系统，它具有一定的智能作用，可实现对数据的存储、运算、逻辑判断和自动化操作。相对于传统的数字化仪器，智能仪器具有如下特征。

(1) 通过软件控制测量过程 一些数字化仪表已具有自动调零、自动极性判断、量程自动切换、过载自动起保护作用等功能，但随着自动控制功能的增加，仪表系统硬件结构会变得越来越复杂。这使得电子仪表的体积增大、成本上升、工作可靠性下降。智能仪器引入计算机技术，测试系统的计算机和其他硬件在计算机软件的控制下，自动、协调地按设定的程序工作，完成测量和实现各种自动控制功能。当需要增加或改变仪器的功能时，只需改变软件（控制程序），硬件结构可以不改变或进行小的调整即可。

(2) 具有超强的数据处理能力 由于有计算机的强大计算能力和大容量的数据存储功能，智能仪器可以在线进行数据的统计计算、测量值的误差分析、动态信号的时域与频域分析等，使测试系统在测量过程中可及时发现粗大误差和系统误差、在线修正测量结果和估计误差范围以提高测量精度，及时得到更为明确的时域信号和频域信号。

(3) 具有多样化、综合化的测试功能 计算机测试系统只要配有相应的传感器、信号调理电路和计算机控制程序，就可以一机多能，并可通过综合各测量参数得到所需要的测量结果。比如，汽车发动机综合检测仪，它可以同时或选择测量发动机转速、发电机电压、充电电流、点火电压和点火提前角。综合发动机转速、发电机电压和充电电流测量参数，可判断发电机的性能；根据发动机转速、点火电压、点火提前角等测量参数，可以检验点火系统的性能。

智能化仪器不但测量数据多样化，显示也可有数值、曲线图、直方图和图片等多种形式。此外，还可设置故障自诊断、报警等功能。

#### 2. 智能仪器的形式

随着计算机技术的发展和计算机在测试系统中越来越多的应用，智能仪器具体的结构形式也越来越多样化。目前，智能仪器的基本结构形式有微机内置式和微机扩展式两种。

(1) 微机内置式智能仪器 微机内置式智能仪器将单片或多片微机芯片与测量仪器有机地结合成一体形成单机，其结构如图 8-7 所示。在这种智能仪器中，其核心 CPU 通过总



线和接口电路与输入、输出电路及外部设备相连，对测试系统进行控制和进行数据处理。微机内置式智能仪器具有多功能、小型化、低成本和适应性强等特点，被广泛地应用于工业状态检测、科学实验及家用电器等的测量与自动控制。

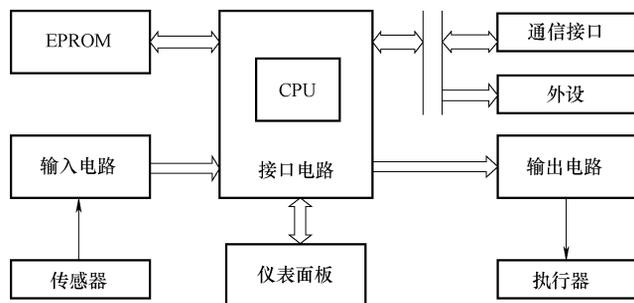


图 8-7 微机内置式智能仪器结构

(2) 微机扩展式智能仪器 微机扩展式智能仪器（简称 PCI）是以 PC 机为核心的扩展型测试仪器，其结构如图 8-8 所示。PCI 充分利用了 PC 机的资源，如磁盘、打印机、绘图仪等硬件以及系统软件、应用软件等，可实现复杂的、高质量要求的测量和数据处理。汽车和一些设备的专用检测仪和故障诊断仪就是 PCI 应用的具体例子。

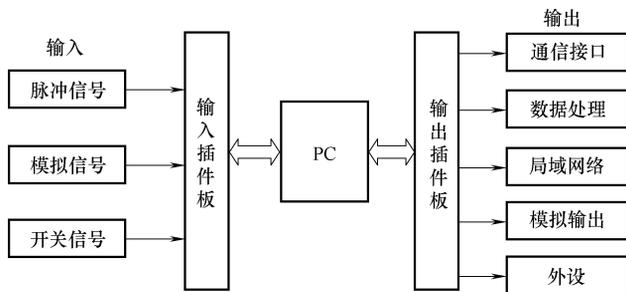


图 8-8 微机扩展式智能仪器结构

## 二、智能仪器的功能模块

智能仪器的核心部件是单片微处理器或单板微处理器。实际测试系统的具体要求和功能千差万别，但输入电路通常包括信号调理、采样保持、模数转换等功能模块。测试系统要显示数据、显示人机交互界面或实现某种自动控制，需要有数模转换、功率放大、驱动电路等功能电路。智能仪器的这些组成部件的结构与原理可参阅相关的书籍，在此，只是对智能仪器的某些基本电路和功能模块做一简介。

### 1. V/I 转换电路

由于电流信号衰减小，抗干扰能力强，适于较远距离的传输，许多工业用智能仪器都是以电流方式配接的。D/A 转换输出的信号有电压和电流两种形式，但电流幅值大都在  $\mu\text{A}$  数量级，所以 D/A 转换器通常需要配接 V/I 转换电路。典型的 V/I 转换电路如图 8-9 所示。

(1) 负载共电源方式 负载共电源方式的 V/I 转换电路（图 8-9a）中，运算放大器两输入端基本上为等电位，由此可得



$$I_o = I_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{V_i}{R_f} \quad (8-1)$$

从上式可知，该电路的输出量  $I_o$  与输入量  $V_i$  成正比，即 V/I 转换电路将电压输入量转换成了电流输出。

(2) 负载共地方式 负载共地方式的 V/I 转换电路 (图 8-9b) 中，运算放大器的输入阻抗很高，放大器的输入电流可以忽略不计，当  $R_2 \gg R_f$  时，流过  $R_2$  的电流与  $I_o$  相比也可以忽略不计，又由于运算放大器的输入端近似等电位，故有下式：

$$V_i + (I_o R_L - V_i) \frac{R_1}{R_1 + R_2} = I_o (R_f + R_L) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

化简后得：

$$I_o = \frac{R_2 V_i}{R_1 + R_2} \quad (8-2)$$

从式 (8-2) 可知，该电路的输出量  $I_o$  也与输入量  $V_i$  成正比。

## 2. 开关量输出电路

智能仪器通过开关控制方式控制只有两种工作状态的执行机构。由于不同的执行机构所要求的控制电压或控制电流有所差别，需要配用与之相适应的开关量输出电路。开关量输出电路的基本结构如图 8-10 所示。

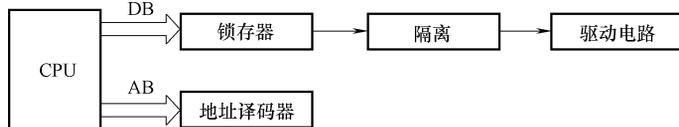


图 8-10 开关量输出电路基本结构

地址译码器根据 CPU 的指令产生开关量输出口地址的锁存命令信号，锁存器用于锁存多位开关信号。为防止干扰，锁存器输出的开关信号通常用光电耦合器或继电器等进行隔离，并通过驱动电路连接执行机构。

## 3. 量程自动转换电路

量程自动转换是智能仪器最基本的功能，它使仪器能根据被测量的大小自动选择适当的量程，从而确保了仪器有适宜的分辨力并可提高测量的精度。量程自动转换电路具体的结构形式有多种，其基本组成有衰减器、放大器、接口及开关驱动电路等。量程自动转换电路一例如图 8-11 所示。

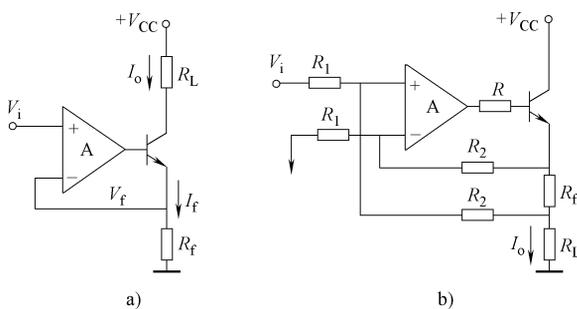


图 8-9 V/I 转换电路

a) 负载共电源方式 b) 负载共地方式

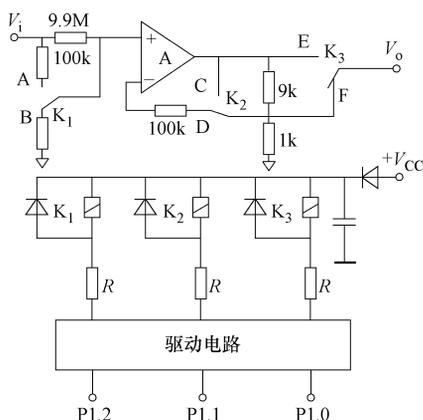


图 8-11 量程自动转换电路



切换开关  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别控制衰减系数、前置放大器增益、放大器输出。 $K_1$  被激励切向 A 时衰减系数为 100，激励撤销切向 B 时衰减系数为 1； $K_2$  被激励切向 C 时放大器增益为 1，激励撤销切向 D 时为 10； $K_3$  在 E、F 位时，放大器分别为直接输出、衰减 10 倍输出。智能仪器 CPU 输出的量程转换指令控制驱动电路工作，使  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  线圈通电或断电，实现三个切换开关状态的不同组合，使该电路形成 200mV、2V、20V、200V 和 1000V 五档量程。该量程自动转换电路量程自动转换阈值见表 8-1。

表 8-1 量程自动转换阈值

档次	量程/V	升量程阈值	降量程阈值	现行量程激励码
1	1000	1050.0	195.00	XXXXX000
2	200	200.00	19.500	XXXXX001
3	20	20.000	1.9500	XXXXX100
4	2	2.0000	0.1950	XXXXX101
5	20mV	0.2000	0.0000	XXXXX111

量程自动转换控制程序流程如图 8-12 所示。量程自动转换程序由主程序完成一次测量后调用，根据测量值是否超出了当前量程范围。如果测量值在高端量程 UL 和低端量程 DL 之间，说明现行量程合适，显示测量结果后返回主程序；如果现行量程不当，则进行量程选择，找到合适的量程后返回主程序，并以新换的量程进行下一次测量。

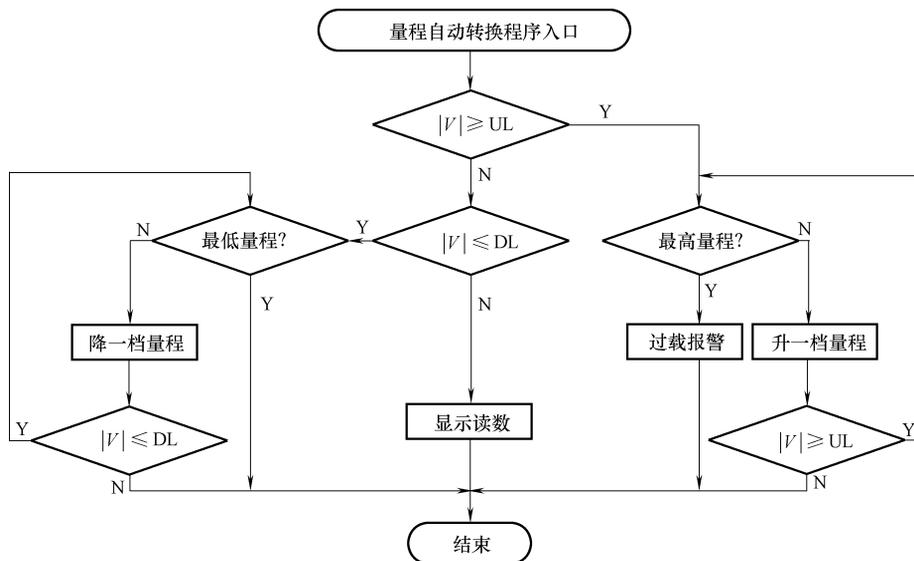


图 8-12 量程自动转换控制程序流程

#### 4. 非线性校正

当测量系统输出量与输入量之间函数关系已知时，测量结果的非线性可利用修正电路来校正。但是，当系统的输出特性不能准确描述时，用硬件来校正就极为困难了。智能仪器可通过软件来进行非线性修正，比如，用查表法和插值法就可校正测量结果的非线性。

当测试系统的输出特性可以用表达式准确表示时，可以用查表法；如果非线性程度严重



或测量范围较宽，则可采用分段插值的方法修正；如果所要求的校正精度较高时，也可采用曲线拟合的方法修正。

### 5. 零位误差与增益误差校正

测量装置因传感器和测量电路中元器件的不稳定而产生温度或时间漂移，造成零位误差和增益误差，这会影响测量精度。一般的仪器采用零位校正机构或校正电路，通过调节旋钮进行零位校正。智能仪器通常采用图 8-13 所示的方式进行零位误差与增益误差校正。

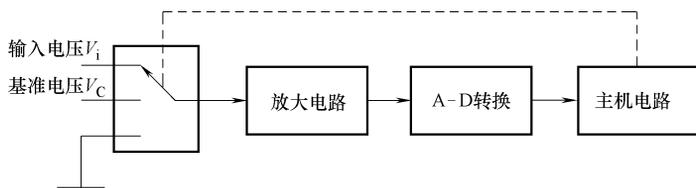


图 8-13 零位误差与增益误差自动校正方式

智能仪器在进行零位校正时，会中断正常的测量过程，并将输出端短路。如果此时输出不为零，则判断为有零位误差。这时，根据系统的增益将输出值折算成输入电路的零位值储存于内存单元，在正常测量时，通过将采样值减去零位值的方法消除零位误差。

智能仪器的增益误差校正通过定时测量基准参数的方法实现的。仪器开机后，或每隔一定的时间测量一次基准参数，建立增益误差校正模型，确定并储存校正模型参数。增益误差校正模型确定后，就可对测量值进行校正，以消除误差。

### 6. 温度误差的补偿

电子仪表的温度校正通常采用温度修正电路，这使线路变得复杂，智能仪器则通过软件进行温度补偿。在智能仪器的存储器中储存有通过理论分析和实验方法建立的温度误差补偿模型、包含修正算法的控制程序以及温度补偿用标准参数。工作时，测试系统根据温度传感器的信号对测量值实时地进行温度补偿。

## 第三节 虚拟仪器

### 一、虚拟仪器概述

#### 1. 虚拟仪器的概念

虚拟仪器（Virtual Instruments, VI）也是现代计算机技术和仪器技术完美结合的产物。虚拟仪器利用安装在计算机上的一组软件与仪器模块相连接，以计算机为核心，充分利用计算机强大的图形界面和数据处理能力提供对测量数据的分析和显示。虚拟仪器不强调每个仪器功能模块就是一台仪器，而是强调选配一个或几个带共性的基本仪器硬件来组成一个通用性硬件平台，通过调用不同的软件实现各种仪器功能。

虚拟仪器技术开发的活跃源于 1986 年美国国家仪器公司（NI）设计的 LabVIEW，它是一种基于图形的开发、调试和运行程序的集成化环境，形成了虚拟仪器的概念。NI 提出的“软件即仪器”的概念，彻底打破了传统仪器只能由生产厂家定义而用户无法改



变的模式，利用虚拟仪器，用户可以很方便地组建自己的自动测试系统。

## 2. 虚拟仪器的优点

虚拟仪器是电子仪器与计算机技术更深层次结合的新型仪器模式，它具有如下优点。

① 融合了计算机强大的硬件资源，突破了传统仪器在数据处理、显示、存储等方面的限制，仪器的功能显著提高。

② 充分利用计算机丰富的软件资源，将部分仪器硬件软件化，提高了系统灵活性。通过软件技术和相应数值算法，实现了对测试数据实时、直接的分析与处理，而良好的图形用户界面（GUI）技术使得仪器界面友好，人机交互方便。

③ 基于计算机总线和模块化仪器总线，硬件实现了模块化、系列化，提高了系统的可靠性，且方便了系统的维护。

④ 基于计算机网络技术和接口技术，互联灵活、方便，可支持各种工业总线标准，利用 VI 技术很容易构建自动测试系统，实现测量、控制过程的智能化、网络化。

⑤ 基于计算机的开放式标准体系结构，虚拟仪器的硬、软件都具有开放性、可重复使用及互换性等特点。因此，用户可根据自己的需要，选用不同厂家的产品，使仪器系统的开发更为灵活、效率更高，缩短了系统组建周期。

## 3. 虚拟仪器的发展趋势

虚拟仪器走的是一条标准化、开放性、多厂商的技术路线，并沿着总线与驱动程序的标准化、硬件与软件的模块化、硬件模块的即插即用化、编程平台的图形化等方向发展。随着计算机网络技术、多媒体技术、分布式技术等飞速发展，虚拟仪器技术的内容会更加丰富，如简化仪器数据传输的 Internet 访问技术 DataSocket、基于组件对象模型（COM）的仪器软硬件互操作技术 OPC、软件开发技术 ActiveX 等。这些技术不仅能有效提高测试系统的性能，而且也为“软件仪器时代”的到来做好了技术上的准备。

此外，可互换虚拟仪器（Interchangeable Virtual Instruments, IVI）也是虚拟仪器领域一个很重要的发展方向。目前，IVI 是基于 VXI 即插即用规范的测试/测量仪器驱动程序建议标准，它允许用户在不更改软件的情况下即可互换测试系统中的多种仪器，比如，从 GPIB 转换到 VXI 或 PXI。这一针对测试系统开发者的 IVI 规范通过提供标准的通用仪器类软件接口可以节省大量工程开发时间，其突出的作用是：

- ① 在关键的生产测试系统发生故障或需要重校时无须离线进行调整。
- ② 可在由不同仪器硬件构成的测试系统上开发单一测试软件系统，以充分利用现有资源。
- ③ 在实验室开发的测试代码可以移植到生产环境中的不同仪器上。

可以相信，随着 VI 技术的进一步提高，虚拟仪器的优势会更加突出，虚拟仪器的应用也将更加广泛。

## 二、虚拟仪器的基本组成

### 1. 虚拟仪器的功能模块

与传统的计算机测试系统一样，虚拟仪器也是由信号的采集与控制、信号的分析与处理、测量结果的显示与储存三大基本功能模块组成的。典型的虚拟仪器各基本功能的构成如



图 8-14 所示。

与传统的计算机测试系统不同的是，虚拟仪器的基本功能模块并不只是针对某种或某几种仪器，它具有通用性。通过编制不同的测试程序形成不同的通用模块组合，可构成各种各样的仪器。

## 2. 虚拟仪器的体系结构

虚拟仪器体系结构可以分为硬件和软件两大部分，如图 8-15 所示。

(1) 虚拟仪器的软件结构 虚拟仪器的软件系统包括 VISA 库、仪器驱动程序、应用软件三部分。

VISA 库 (I/O 函数库) 驻留于计算机系统之中执行仪器总线的特殊功能，是计算机与仪器之间的软件层连接，以实现对仪器的程控。它对于仪器驱动程序开发者来说是一个个可调用的操作函数集。

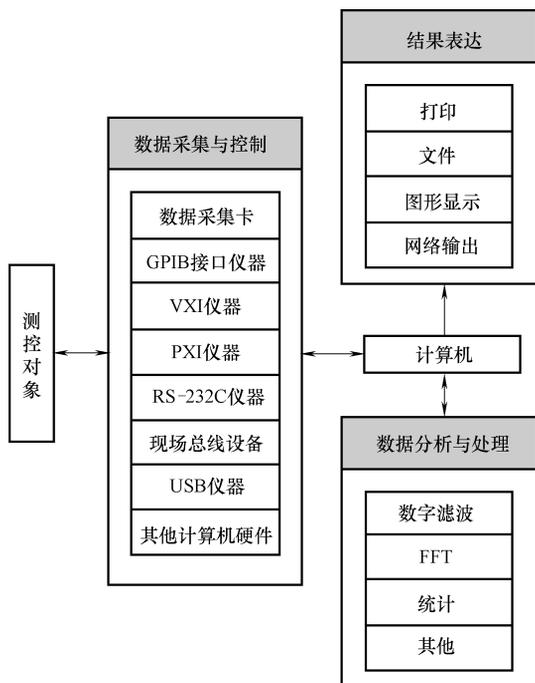


图 8-14 虚拟仪器的功能模块

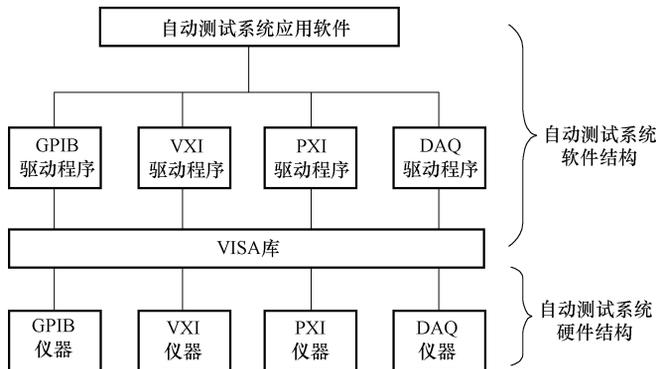


图 8-15 虚拟仪器的体系结构

仪器驱动程序是针对某一特定仪器控制与通信的软件程序集，应用程序通过仪器驱动程序实现对仪器的控制。每个仪器模块都有自己的仪器驱动程序，仪器厂商以源码的形式提供给用户。

应用软件建立在仪器驱动程序之上，直接面对操作用户，通过提供直观友好的测控操作界面、丰富的数据分析与处理功能来完成自动测试任务。应用软件还包括通用数字处理软件，它包括用于数字信号处理的各种功能函数，如频域分析的功率谱估计、快速傅里叶变换 (FFT)、快速哈特莱变换 (FHT)、逆 FFT、逆 FHT 和细化分析，时域分析的相关分析、卷积运算、反卷运算、均方根估计、差分积分运算和排序及数字滤波等。功能函数方便了用户进一步扩展虚拟仪器的功能。

(2) 虚拟仪器的硬件结构 虚拟仪器的硬件系统包括计算机硬件平台和测控功能硬件。



计算机硬件平台可以是各种类型的计算机，如普通台式计算机、便携式计算机、工作站和嵌入式计算机等。计算机管理虚拟仪器的硬、软件资源，是虚拟仪器的硬件基础。测控功能硬件在计算机的控制下完成各种测控任务，按照测控功能硬件的不同，VI可分为 GPIB (General Purpose Interface Bus)、VXI、PXI 和 PC 插卡式四种标准体系结构。

### 三、LabVIEW 虚拟仪器开发系统

#### 1. LabVIEW 的特点

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 是美国 NI 公司开发的一个功能强大的仪器系统开发平台，最近又推出了简体中文版 LabVIEW8. 20。LabVIEW 是一种图形化的程序设计语言，它采用工程人员所熟悉的术语、图标等图形化符号替代基于文字的程序语言，将复杂、烦琐的语言编程简化为简单、直观、易学的图形编程，给不熟悉 C、C++ 等计算机语言的开发者提供了极大的方便，并节约了程序开发的时间。

此外，LabVIEW 还提供调用库函数及代码接口节点等功能，使用户可直接调用其他语言编制成的可执行程序，即 LabVIEW 具有开放性的编程环境。

#### 2. LabVIEW 的结构

LabVIEW 通过图形化编程的方法建立具有某项测试功能的虚拟仪器 (VI)，对于复杂的测试，则按模块化设计概念，将测试任务分解为多项，每项任务再分解为若干子项，直到分解成最简单的测试任务子项为止。每个子任务可建立一个子虚拟仪器，根据分解后的一系列子任务，可建立包含所有任务的多层子虚拟仪器集合，其中每个子虚拟仪器相当于常规程序中的一个程序模块。低层子虚拟仪器可被上一层虚拟仪器无限制调用 (图 8-16)，以完成复杂的测试任务。

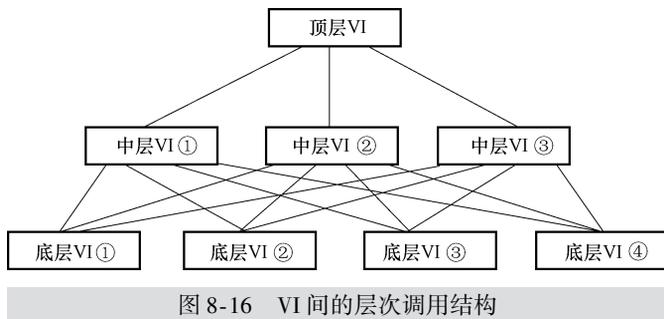


图 8-16 VI 间的层次调用结构

#### 3. 建立 LabVIEW VI

LabVIEW 中的每个 VI 均有两个工作界面，一个称之为前面板 (Front Panel)，另一个称之为框图程序 (Block Diagram)。

前面板是用户进行测试工作时的输入输出界面，可以通过 Control 模板选择多种输入控制部件和指示器部件来构成前面板。控制部件用于接收用户的输入数据到程序，指示部件用于显示程序产生的各种类型的输出。

框图程序是用户用图形编程语言编写程序的界面，用户可以根据制定的测试方案通过 Functions 模板选择不同的图形化节点 (Node)，然后用连线的方式把这些节点连接起来，构



成所需的框图程序。

建立 LabVIEW VI 过程如下。

(1) 设计一个用户界面 从 Control 模板中选择所需的子模板, 再从子模板中选取所需的选项, 利用数以百计内置的、完全可自定义的 VI 目标来交互式地创建一个用户界面 (图 8-17)。

(2) 编制图形化代码 从 Functions 模板中选择所需的选项, 利用其图形化编程和自动代码生成来开发自定义的设计、控制和测试应用程序 (图 8-18)。

(3) 调试和发布 利用集成的图形化调试工具确保正确的操作, 并且将应用程序发布至各种目标设备 (图 8-19)。目标设备可以是台式机、便携式计算机、工业计算机和嵌入式设备等。

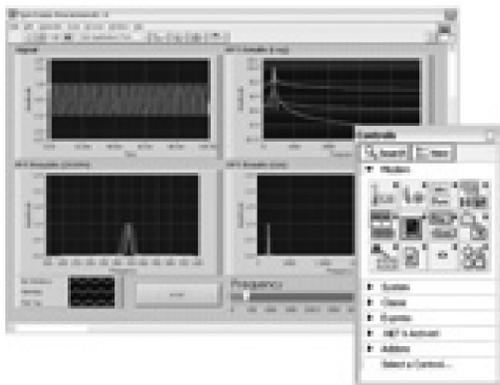


图 8-17 设计用户界面

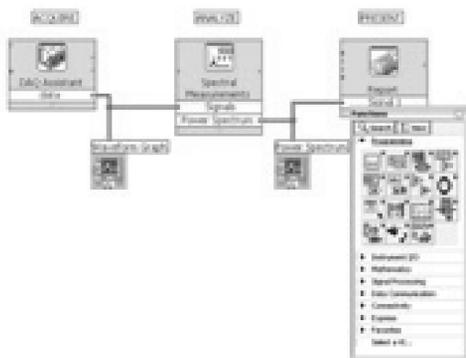


图 8-18 编制图形化界面

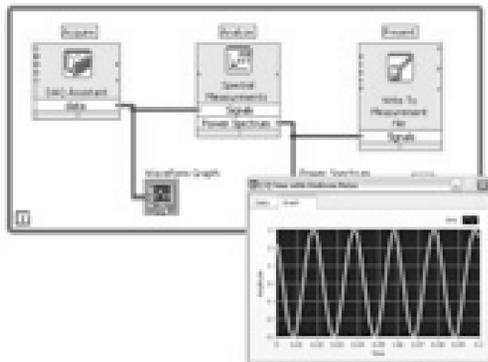


图 8-19 调试和发布

LabVIEW 提供了一个理想的程序设计环境, 不但降低了测试系统开发的难度和开发成本, 而且增强了系统改造和升级的方便灵活性。当需要改变测试系统时, 只需根据具体的目标, 对功能方框做必要的补充、修改, 或者对框图程序的软件结构进行调整, 就可实现测试系统的改造与升级。

## 第四节 网络化测试系统

### 一、网络化测试系统概述

#### 1. 网络化仪器的基本概念

网络化仪器也是一种基于计算机的自动化测试仪器, 它将计算机、高档外设和通信线路等硬件资源以及大型数据库、程序、数据和文件等软件资源纳入网络, 以实现资源的共享。在任何地点、任意时间都能够获取测量信息 (或数据) 的所有硬、软件有机集合即为网络



化仪器。因此，网络化仪器已远远超出了传统独立仪器的范畴，且也不是传统独立仪器的简单组合，而是融入了全新现代测量技术——网络化测量技术。网络化仪器的概念是对传统测量仪器概念的突破，是虚拟仪器与网络技术相结合的产物。

### 2. 网络化仪器的优点

在网络化仪器环境条件下，被测对象可通过测试现场的普通仪器设备，将测得数据（信息）通过网络传输给异地的精密测量设备或高档次的微机化仪器去分析、处理；能实现测量信息的共享；可掌握网络节点处信息实时变化的趋势；此外，也可通过具有网络传输功能的仪器将数据传至原端（即现场）。采用网络测量技术、使用网络化仪器，可显著提高测量功效，有效降低监测、测控工作的人力和财力投入，缩短计量测试工作的周期。

### 3. 网络化仪器的发展趋势

随着计算机技术、网络通信技术的不断拓展，21世纪的仪器概念将是一个开放的系统概念。以PC机和工作站为基础，通过组建网络构成实用的测控系统，提高生产效率和共享信息资源，已成为现代测试仪器发展的方向。从某种意义上说，计算机网络也就是通用的仪器网络，如果在测控系统中有更多不同类型的智能设备也像计算机和工作站一样成为网络的节点联入网络，比如各种智能仪器、虚拟仪器等，它们充分利用目前已比较成熟的Internet网络的设施，不仅能实现更多资源的共享、降低组建系统的费用，还可提高测控系统的功能，并拓宽其应用的范围。“网络就是仪器”的概念确切地概括了仪器的网络化发展趋势。

目前，以Internet为代表的计算机网络正迅猛地发展，随着网络信道容量的扩大，网络速度将不再成为网络应用的障碍。随着测控网络的发展，测控网络和信息网络的互联技术也将日臻完善。计算机技术、传感器技术、网络技术与测控技术的有机结合，使网络化、分布式测控系统的组建更为方便。与各行各业一样，测试技术也必将在网络时代发生革命性变化。

## 二、基于现场总线技术的网络化测控系统

### 1. 基于现场总线技术的网络化测控系统的结构

随着工业生产的发展，需要的测控点和测控参数越来越多，使得自动测控系统变得庞大而又复杂，分散型测控仪器已不能适应需要。现场总线是用于过程自动化和制造自动化的现场设备或仪表互连的现场数字通信网络，它嵌入在测控系统的各种传感器、仪表和设备中。基于现场总线技术的网络化测控系统的构成如图8-20所示。

现场总线面向工业生产现场，主要用于实现生产/过程领域的基本测控设备（现场级设备）之间以及与更高层次测控设备（车间级设备）之间的互联。现场级设备指的是最低层次的控制、监测、执行和计算设备，包括传感器、控制器、智能阀门、微处理器和存储器等各种类型的工业仪表产品等。

### 2. 基于现场总线技术的网络化测控系统的特点

与传统测控仪表相比，现场总线网络技术具有如下特点。

(1) 开放式互连网络 现场总线为开放式互连网络，它不仅可与同层网络相连，最底层的传感器和执行器以及上层的监控/管理系统均通过现场总线网络实现互联，同时还可进

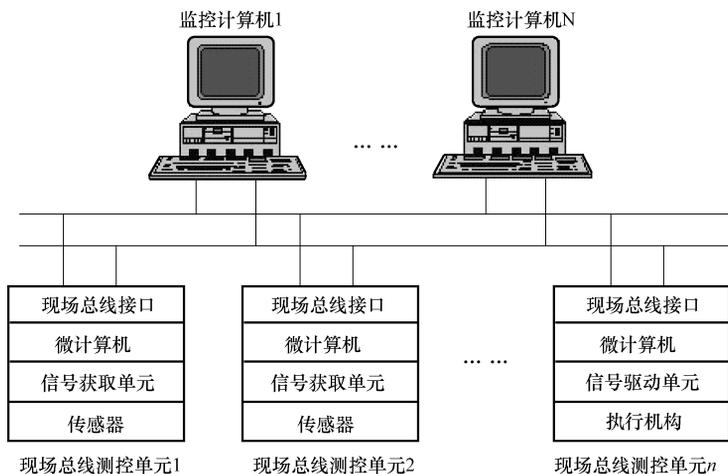


图 8-20 基于现场总线测控系统结构

一步通过上层监控 / 管理系统连接到企业内部网。挂接在现场总线上的仪器、传感器及其他设备都有标准数字化总线接口，遵守统一的通信协议。因此，不同厂家的产品具有互操作性，实现“即插即用”，不必再在硬件和软件上做任何修改就可构成所需的控制回路，形成开放式控制系统。

(2) 并行连接结构 采用并行连接方式，一对传输线一般可连接 20 个设备，双向传输多个信号，接线简单，工程周期短，安装费用低，维护容易，彻底抛弃了传统仪表单元一台仪器、一对传输线只能单向传输一个信号的缺陷。

(3) 全数字化通信 传统仪表由于采用模拟信号传输，往往需要提供辅助的抗干扰和提高精度的措施，而现场总线采用数字信号实现测控数据的传输，抗干扰能力强，精度高。

(4) 操作性好 操作人员在控制室即可了解仪表单元的运行情况，且可以实现对仪表单元的远程参数调整、故障诊断和控制过程监控。

(5) 综合功能强 现场总线仪表单元是以微处理器为核心构成的智能仪表单元，可同时提供检测、变换和补偿功能，实现一表多用。

(6) 组态灵活 由于现场总线的开放性，用户组态十分简便。不同厂商的设备既可互联也可互换，现场设备间可实现互操作，通过进行结构重组，可实现系统任务的灵活调整。

### 三、基于 Internet 的网络测控系统

#### 1. 基于 Internet 的测控系统结构

基于 Internet 的测控系统利用嵌入式系统作为现场平台，实现对需测数据的采集、传输和控制，并以 Internet 作为数据信息的传输载体，且可在远端 PC 机上观测、分析和存储测控数据与信息。典型的基于 Internet 的测控系统结构如图 8-21 所示。

图中现场智能仪表单元通过现场级测控网络与企业内部网互联，而具有 Internet 接口能力的网络化测控仪器通过嵌入其内部的 TCP/IP 协议直接连接于企业内部网上。如此，测控系统在数据采集、信息发布、系统集成等方面都以企业内部网络（Intranet）为依托。将测

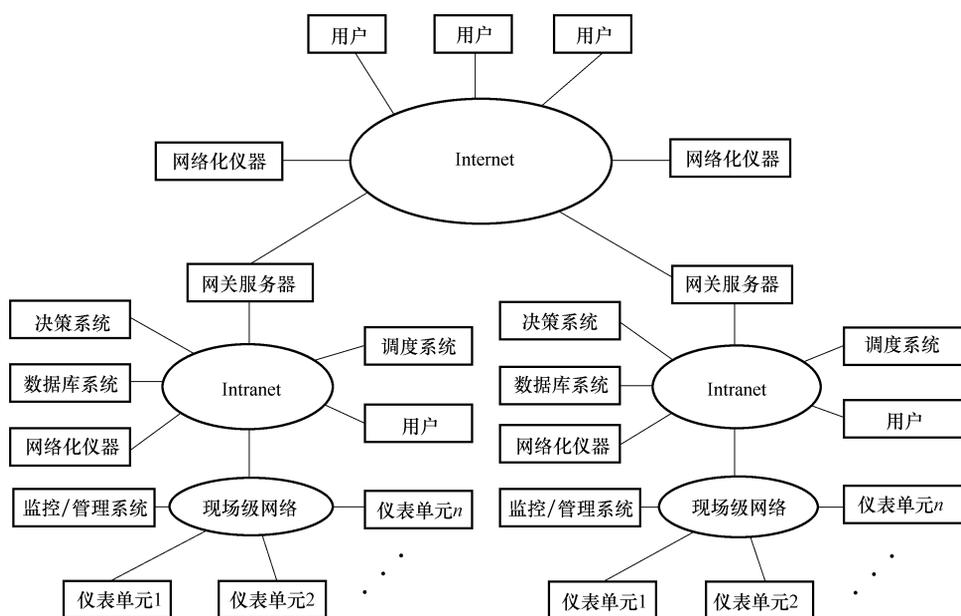


图 8-21 基于 Internet 的测控系统结构

控网和企业内部网及 Internet 互联，便于实现测控网和信息网的统一。在这样构成的测控网络中，网络化仪器设备充当着网络中独立节点的角色，信息可跨越网络传输至所需的任何领域，实时、动态（包括远程）的在线测控成为现实。

## 2. 基于 Internet 测控系统的结构特点

以 Internet 为代表的计算机网络突破了传统通信方式的时空限制和地域障碍，使更大范围内的通信变得十分容易。Internet 拥有的硬件和软件资源正在越来越多的领域中得到应用，比如电子商务、网上教学、远程医疗、远程数据采集与控制，以及高档测量仪器设备资源的远程实时调用，远程设备故障诊断等。与此同时，高性能、高可靠性、低成本的网关、路由器、中继器及网络接口芯片等网络互联设备的不断进步，又方便了 Internet、不同类型测控网络、企业网络间的互联。利用现有 Internet 资源而不需建立专门的拓扑网络，使组建测控网络、企业内部网络以及它们与 Internet 的互联都十分方便。

应用 Internet 具有开放性的互联通信标准，使 Intranet 成为基于 TCP/IP 协议的开放系统，能方便地与外界连接，尤其是与 Internet 连接。Internet 已开始对传统的测控系统产生越来越大的影响，基于网络化、模块化、开放性原则，测控网络由传统的集中模式转变为分布模式，成为具有开放性、可互操作性、分散性、网络化和智能化的测控系统。网络的节点上不仅有计算机、工作站，还有智能测控仪器仪表，测控网络有与信息网络相似的体系结构和通信模型。比如，目前测控系统中迅猛发展的现场总线，它的通信模型和 OSI 模型对应，将现场的智能仪表和装置作为节点，通过网络将节点连同控制室内的仪器仪表和控制装置联成有机的测控系统，测控网络的功能远大于系统中各独立个体功能的总和。

## 思考题

1. 计算机测试系统的主要组成部件有哪些？其特点是什么？



2. 多路模拟开关的作用是什么? 对多路模拟开关有什么要求?
3. 模/数 (A/D) 转换器的作用是什么? A/D 转换前是否一定要加采样保持?
4. 何谓智能仪器? 智能仪器的特点是什么?
5. 智能仪器的基本组成和功能模块有哪些? 有哪几种结构形式?
6. 何谓虚拟仪器? 与传统的仪器相比, 虚拟仪器具有哪些特点?
7. LabVIEW 具有什么特点? 如何用 LabVIEW 建立虚拟仪器?
8. 何谓网络化仪器? 网络化仪器的特点是什么?
9. 基于现场总线的测控系统是如何构成的? 它具有什么特点?
10. 基于 Internet 的测控系统是如何构成的? 它具有哪些特点?

## 参 考 文 献

- [1] 尤丽华. 测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 陈花玲. 机械工程测试技术 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] 曾光奇. 工程测试技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [4] 卢文祥, 杜润生. 工程测试与信息处理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1994.
- [5] 郑华耀. 检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] 于永芳, 郑仲民. 检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [7] 马西秦. 自动检测技术 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 梁森、王侃夫. 自动检测与转换技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [9] 王元庆. 新型传感器原理及应用. [M] 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] 麻友良. 汽车电器与电子控制系统 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [11] 黄长艺, 卢文祥. 机械工程测量与试验技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [12] 杜向阳. 机械工程测试技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [13] 郝芸. 传感器原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [14] 沙占友. 集成化智能传感器原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [15] 刘迎春, 叶湘滨. 传感器原理设计与应用. 4 版. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
- [16] 施文济. 自控系统中的测量技术与显示技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [17] 陈杰, 黄鸿. 传感器原理与检测技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [18] 王庆元. 新型传感器原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社 2002.
- [19] 沈聿农. 传感器及应用技术 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [20] 赵庆海. 测试技术与工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

# 应用型本科汽车类专业规划教材

汽车理论

汽车构造

汽车电子控制技术

汽车检测与故障诊断

汽车营销原理与应用

汽车运用工程

汽车专业英语

汽车维修技术

汽车发动机原理

汽车空调技术

汽车使用基础

汽车维护

汽车销售与技术实务

汽车服务企业管理

汽车文化与新技术

汽车制造工艺

新能源汽车技术

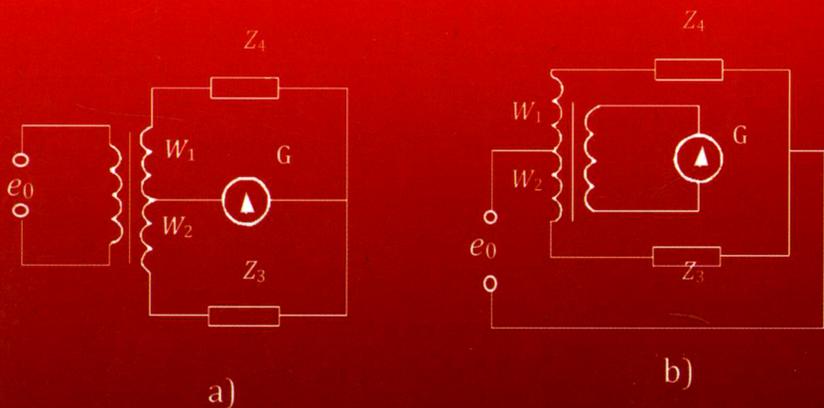
车载网络技术

汽车配件营销与管理

汽车电气与电子课程设计教程

汽车构造与拆装实训教程

汽车工程测试技术



地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379649

网络服务

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版



机工教育微信服务号



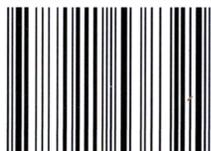
扫一扫，更多汽车精品图书任你选

上架指导 交通运输 / 汽车维修

ISBN 978-7-111-53832-5

策划编辑◎赵海青

ISBN 978-7-111-53832-5



9 787111 538325 >

定价：35.00元