

新编高等职业教育电子信息、机电类精品教材

# 自动检测与转换技术

## (第4版)

顾 阳 主 编  
苏家健 纪 永 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书主要介绍常用传感器的工作原理、基本结构及相应的测量电路,并穿插介绍了大量的应用实例。在取材上,在不削弱传统传感器基本内容的前提下,以较大的篇幅介绍了新技术和目前使用较多的新型传感器,强调内容的实用性和先进性,突出基本技能的培养。

本书共有 14 章。第 1 章介绍检测技术的基础知识;第 2~8 章介绍各种常用的传感器,包括电阻式、变磁阻式、电容式、热电偶、光电式、霍尔、压电式等各种传感器;第 9 章介绍光纤传感器;第 10 章介绍过程参数的控制;第 11 章介绍超声波传感器;第 12 章介绍自动检测技术的综合应用;第 13 章介绍数字式传感器技术;第 14 章介绍物联网传感器技术及其应用。

本次修订后,既保持原教材的特色,精选理论教学内容,体现适用、够用原则,又重点突出,各章增加例题、习题和习题解答,以便更方便、更好地为教学服务。

本书可作为高职高专院校电气自动化技术、应用电子技术、机电一体化技术、工业自动化技术、计算机控制技术及相近专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

自动检测与转换技术 / 顾阳主编. —4 版. —北京:电子工业出版社, 2022. 10  
ISBN 978-7-121-37921-5

I. ①自… II. ①顾… III. ①自动检测-高等学校-教材②传感器-高等学校-教材 IV. ①TP274②TP212  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 259327 号

责任编辑:王昭松

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:16.75 字数:428.8 千字

版 次:2006 年 8 月第 1 版

2022 年 10 月第 4 版

印 次:2022 年 10 月第 1 次印刷

定 价:55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254015, wangzs@phei.com.cn, QQ83169290。

# 第4版前言

本书针对近年来传感器技术飞速发展的现状，以培养岗位核心能力为目标，精选内容，力图使学生通过本课程的学习，掌握生产一线技术人员、运行人员必须具备的传感器及检测技术的基本知识和操作技能。

本次修订在保持第3版的基本框架结构和内容不变的前提下，跟踪自动检测和传感器的新发展、新动向、新技术，对部分内容做了调整和补充，使本书第4版内容更加翔实，编排更加合理，实例更加丰富，更有利于教学的组织及学生的自学使用。

在教学内容选材上，本书以有限的篇幅尽可能覆盖比现有教材更宽的知识面，在不削弱传统传感器基本内容的前提下，以较大的篇幅充实了新技术和目前使用较多的新型传感器内容。本次修订，结合物联网技术的发展，增加了第14章物联网传感器技术及其应用、第11章超声波传感器的内容，并扩充了第6章光电传感器的内容，目的是适应本书的专业应用面，进一步满足传感器开发和应用的需要。

本书的主要特点：增加传感器的应用实例，特别是日常生活中的应用实例。在内容取材上，既考虑传感器和检测技术的数字化发展趋势及新技术应用，又考虑高职学生的学习基础和特点，使本书既有一定深度又有一定广度。

本书各章具有一定的独立性，对应的参考学时为48~96学时，在教学中，教师可以根据专业方向和特点选用不同的章节，合理安排课时。

本书共有14章。第1章介绍检测技术的基础知识；第2~8章介绍各种常用的传感器，包括电阻式、变磁阻式、电容式、热电偶、光电式、霍尔、压电式等各种传感器；第9章介绍光纤传感器；第10章介绍过程参数的控制；第11章介绍超声波传感器；第12章介绍自动检测技术的综合应用；第13章介绍数字式传感器技术；第14章介绍物联网传感器技术及其应用。

本书由上海第二工业大学顾阳任主编，上海第二工业大学苏家健、上海城建职业学院纪永老师任副主编。

顾阳编写第2、3、4、11、12章，纪永编写第1、6、10、13、14章，苏家健编写第5、7、8、9章，上海外国语大学周昕语为新型传感器技术的外文资料翻译做了大量的工作。全书由苏家健负责统稿。本书附赠思考与练习部分答案，提供考试试卷和答案各一套，读者可

登录华信教育资源网 ([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn)) 免费注册后下载使用。

本书可作为高职高专院校工业生产自动化技术、电气自动化技术、应用电子技术、机电一体化技术、计算机控制技术及相近专业的教材，也可作为相关专业技术人员的参考书。

本书在编写过程中，参阅了许多专家的著作、论文和教材，还得到电子工业出版社编辑的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，对于在本版中存在的不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 检测技术的基础知识 .....	1	2.2.4 测量电路 .....	33
1.1 测量的基本概念 .....	1	2.3 电阻应变式传感器的应用 .....	36
1.1.1 测量 .....	1	2.4 压阻式传感器 .....	40
1.1.2 测量方法 .....	1	2.4.1 压阻效应与压阻系数 .....	40
1.2 测量误差及其分类 .....	3	2.4.2 测量原理 .....	40
1.2.1 测量误差及其表示方法 .....	3	2.4.3 温度补偿 .....	41
1.2.2 测量误差的分类 .....	5	2.4.4 压阻式传感器的应用 .....	41
1.3 测量误差的分析与处理 .....	6	2.5 气敏电阻传感器 .....	42
1.3.1 随机误差的统计特性 .....	6	2.6 湿敏电阻传感器 .....	45
1.3.2 粗大误差 .....	9	小结 .....	48
1.3.3 系统误差 .....	9	思考与练习 .....	48
1.3.4 直接测量数据的误差分析 .....	10	第 3 章 变磁阻式传感器 .....	50
1.4 传感器及其基本特性 .....	12	3.1 自感式传感器 .....	50
1.4.1 传感器的定义及组成 .....	12	3.1.1 基本变间隙式自感传感器 .....	50
1.4.2 传感器的分类 .....	13	3.1.2 差动变间隙式传感器 .....	51
1.4.3 传感器的基本特性 .....	15	3.1.3 螺管型自感式传感器 .....	52
1.4.4 传感器技术的发展趋势 .....	19	3.1.4 测量电路 .....	52
1.5 弹性敏感元件 .....	20	3.2 变压器式传感器 .....	54
1.5.1 弹性敏感元件的弹性特性 .....	20	3.2.1 螺线管式差动变压器 .....	55
1.5.2 弹性敏感元件的材料及其基本 要求 .....	21	3.2.2 测量电路 .....	56
1.5.3 弹性敏感元件的转换原理 .....	21	3.3 电涡流式传感器 .....	59
小结 .....	25	3.3.1 电涡流式传感器的工作原理 .....	59
思考与练习 .....	25	3.3.2 电涡流式传感器种类 .....	59
第 2 章 电阻式传感器 .....	27	3.3.3 测量电路 .....	61
2.1 电位器式传感器 .....	27	3.4 变磁阻式传感器的应用 .....	63
2.1.1 线性电位器 .....	27	3.4.1 自感式传感器的应用 .....	63
2.1.2 电位器式传感器的应用 .....	29	3.4.2 变压器式传感器的应用 .....	64
2.2 电阻应变式传感器 .....	30	3.4.3 电涡流式传感器的应用 .....	64
2.2.1 电阻应变片的种类与结构 .....	30	小结 .....	66
2.2.2 电阻的应变效应 .....	31	思考与练习 .....	66
2.2.3 应变片测量原理 .....	32	第 4 章 电容式传感器 .....	68
		4.1 电容式传感器的工作原理 .....	68

4.1.1 变面积式电容传感器 .....	68	6.3.3 光电池的应用 .....	117
4.1.2 变间隙式电容传感器 .....	70	6.3.4 红外测温仪 .....	118
4.1.3 变介电常数式电容传感器 .....	72	6.4 光电开关和光电断续器 .....	119
4.2 测量电路 .....	75	6.4.1 光电开关 .....	119
4.2.1 调幅型电路 .....	75	6.4.2 光电断续器 .....	120
4.2.2 差动脉冲宽度调制电路 .....	76	6.5 CCD 图像传感器及其应用 .....	120
4.2.3 调频型电路 .....	78	6.5.1 CCD 图像传感器的工作原理 .....	121
4.3 电容式传感器的应用 .....	78	6.5.2 CCD 图像传感器的分类 .....	122
小结 .....	80	6.5.3 CCD 图像传感器的应用 .....	123
思考与练习 .....	80	小结 .....	124
<b>第 5 章 热电偶传感器</b> .....	82	思考与练习 .....	124
5.1 热电偶工作原理和基本定律 .....	82	<b>第 7 章 霍尔传感器</b> .....	126
5.1.1 热电偶工作原理 .....	82	7.1 霍尔元件工作原理 .....	126
5.1.2 热电偶的基本定律 .....	84	7.2 霍尔元件的基本结构和主要特性	
5.2 热电偶的材料、结构及种类 .....	85	参数 .....	127
5.2.1 热电偶材料 .....	85	7.2.1 基本结构 .....	127
5.2.2 热电偶结构 .....	86	7.2.2 主要特性参数 .....	128
5.2.3 热电偶种类及分度表 .....	87	7.3 霍尔元件的测量电路及补偿 .....	129
5.3 热电偶的冷端补偿 .....	90	7.3.1 基本测量电路 .....	129
5.4 热电偶测温电路 .....	93	7.3.2 温度误差的补偿 .....	129
5.5 热电阻 .....	94	7.3.3 不等位电势的补偿 .....	131
5.5.1 金属热电阻 .....	94	7.4 霍尔集成电路 .....	132
5.5.2 半导体热敏电阻 .....	98	7.5 霍尔传感器的应用 .....	133
5.5.3 集成温度传感器 .....	98	小结 .....	135
小结 .....	103	思考与练习 .....	136
思考与练习 .....	103	<b>第 8 章 压电式传感器</b> .....	137
<b>第 6 章 光电式传感器</b> .....	105	8.1 压电效应 .....	137
6.1 光电效应及光电器件 .....	105	8.1.1 石英晶体的压电效应 .....	137
6.1.1 光电效应 .....	105	8.1.2 石英晶体的类型 .....	139
6.1.2 光电管 .....	105	8.1.3 压电陶瓷的压电效应 .....	139
6.1.3 光敏电阻 .....	106	8.1.4 压电陶瓷的类型 .....	140
6.1.4 光电二极管和光电晶体管 .....	108	8.2 压电材料的选用 .....	140
6.1.5 光电池 .....	110	8.3 压电式传感器测量电路 .....	140
6.2 红外传感器 .....	111	8.3.1 压电器件的串联与并联 .....	140
6.2.1 红外辐射 .....	111	8.3.2 压电式传感器的等效电路 .....	141
6.2.2 红外探测器 .....	112	8.3.3 压电式传感器的测量电路 .....	141
6.3 光电式传感器应用举例 .....	113	8.4 压电式传感器应用举例 .....	142
6.3.1 光敏电阻传感器的应用 .....	113	小结 .....	145
6.3.2 光电晶体管的应用 .....	115	思考与练习 .....	146

<b>第 9 章 光纤传感器</b> .....	147
9.1 光纤传感器的原理、结构及种类 .....	147
9.1.1 光纤传感器的原理 .....	147
9.1.2 光纤的结构 .....	148
9.1.3 光纤的种类 .....	148
9.2 光的传输原理 .....	149
9.2.1 光的全反射定律 .....	149
9.2.2 光纤的传光原理 .....	150
9.3 光纤传感器的类型 .....	150
9.3.1 光纤传感器的分类 .....	150
9.3.2 功能型和非功能型光纤传 感器 .....	151
9.3.3 光纤传感器的主要部件 .....	152
9.4 功能型光纤传感器 .....	152
9.4.1 相位调制型光纤传感器 .....	152
9.4.2 光强调制型光纤传感器 .....	154
9.5 非功能型光纤传感器 .....	155
9.5.1 遮断光路的光强调制型光纤 传感器 .....	155
9.5.2 改变光纤相对位置的光强调 制型光纤传感器 .....	156
9.6 光纤传感器的应用 .....	157
9.6.1 光纤微位移传感器 .....	157
9.6.2 光纤流量传感器 .....	157
9.6.3 光纤图像传感器 .....	158
小结 .....	159
思考与练习 .....	160
<b>第 10 章 过程参数的控制</b> .....	161
10.1 压力测量 .....	161
10.1.1 弹簧管压力表 .....	162
10.1.2 压力、差压变送器的基本 原理 .....	163
10.2 液位测量 .....	164
10.2.1 浮力式液位仪表 .....	165
10.2.2 光纤液位计 .....	166
10.2.3 静压式液位计 .....	168
10.2.4 电阻式液位计 .....	171
10.3 流量测量 .....	172
10.3.1 容积式流量传感器 .....	173

10.3.2 差压式流量传感器 .....	175
10.3.3 速度式流量传感器 .....	183
10.3.4 流体阻力式流量传感器 .....	190
小结 .....	194
思考与练习 .....	194
<b>第 11 章 超声波传感器</b> .....	196
11.1 超声波物理基础 .....	196
11.2 超声波传感器的原理及性能指标 .....	197
11.3 超声波传感器的应用 .....	199
小结 .....	202
思考与练习 .....	202
<b>第 12 章 自动检测技术的综合应用</b> .....	204
12.1 传感器的选用原则 .....	204
12.2 综合应用举例 .....	205
12.2.1 高炉炼铁自动检测与控制 .....	205
12.2.2 蒸馏塔自动检测与控制 .....	209
12.2.3 传感器在汽车中的应用 .....	210
12.2.4 传感器在空气污染监测中的 应用 .....	213
12.2.5 IC 卡智能水表的应用 .....	214
12.2.6 传感器在全自动洗衣机中的 应用 .....	216
12.2.7 传感器在电冰箱中的应用 .....	216
12.2.8 传感器在空调中的应用 .....	218
12.2.9 传感器在厨具中的应用 .....	219
12.2.10 传感器在燃气热水器中的 应用 .....	220
12.2.11 传感器在家用吸尘器中的 应用 .....	221
小结 .....	222
思考与练习 .....	222
<b>第 13 章 数字式传感器技术</b> .....	223
13.1 光栅传感器 .....	223
13.1.1 光栅的基本知识 .....	223
13.1.2 莫尔条纹及其测量原理 .....	225
13.1.3 光栅测量系统 .....	227
13.1.4 光栅测量系统的应用 .....	231
13.2 磁栅传感器 .....	231

13.2.1 磁栅及其分类 .....	232	思考与练习 .....	248
13.2.2 磁头及其结构 .....	233	<b>第 14 章 物联网传感器技术及其应用</b> ...	249
13.2.3 信号处理方式 .....	235	14.1 物联网基础知识 .....	249
13.2.4 磁栅传感器的应用 .....	236	14.1.1 什么是物联网 .....	249
13.3 数字编码器 .....	238	14.1.2 物联网的核心技术和体系 结构 .....	250
13.3.1 接触式码盘编码器 .....	238	14.2 物联网中常用的传感器 .....	252
13.3.2 光电编码器 .....	240	14.3 传感器在智能家居领域的应用 .....	253
13.3.3 光电编码器的应用 .....	243	14.4 物联网传感器技术在其他领域的 应用 .....	257
13.4 感应同步器 .....	243	小结 .....	257
13.4.1 感应同步器的结构 .....	243	思考与练习 .....	257
13.4.2 感应同步器的工作原理 .....	245	<b>参考文献</b> .....	258
13.4.3 数字位置测量系统 .....	246		
小结 .....	247		

# 第1章 检测技术的基础知识

在信息社会的一切活动领域中，检测是科学地认识各种现象的基础性方法和手段。现代化的检测手段在很大程度上决定了生产、科学技术的发展水平，而科学技术的发展又为检测技术提供了新的理论基础和制造工艺，同时对检测技术提出了更高的要求。检测技术是所有科学技术的基础，是自动化技术的支柱之一。

自动检测与转换技术是一门以研究检测系统中信息提取、转换及处理的理论和技术为主要内容的应用技术学科，本章是自动检测与转换技术的理论基础。

## 1.1 测量的基本概念

### 1.1.1 测量

测量是人们借助专门的技术和设备，通过实验的方法，把被测量与作为单位的标准量进行比较，以确定被测量是标准量的多少倍数的过程，所得的倍数就是测量值。测量结果包括数值大小和测量单位两部分，数值大小可以用数字、曲线或图形表示。测量的目的是为了精确获取表征被测量对象特征的某些参数的定量信息。

检测是意义更为广泛的测量。在自动化领域中，检测的任务不仅包括对成品或半成品的检验和测量，也包括为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象并使之处于给定的最佳状态，需要随时检查和测量各种参量的大小和变化等情况。在不强调它们之间细微差别的一般工程技术应用领域中，测量和检测可以相互替代。

### 1.1.2 测量方法

对于测量方法，从不同的角度出发，有不同的分类方法。本节重点阐述按测量手段分类的直接测量、间接测量和联立测量，及按测量方式分类的偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

#### 1. 按测量手段分类

(1) 直接测量。在使用测量仪表进行测量时，对仪表读数不需要经过任何运算，就能直接得到测量的结果，称为直接测量。例如，用弹簧管式压力表测量流体压力就是直接测量。直接测量的优点是测量过程简单而迅速，缺点是测量精度不高。这种测量方法是工程上广泛采用的方法。

(2) 间接测量。在使用仪表进行测量时，首先对与被测物理量有确定函数关系的几个量进行测量，将测量值代入函数关系式，经过计算得到测量所需的结果，这种测量称为间接测

量。例如，对导线电阻率 $\rho$ 的测量就是间接测量，由于 $\rho = \frac{R\pi d^2}{4l}$ ，其中 $R$ 、 $l$ 、 $d$ 分别表示导线的电阻值、长度和直径，这时，只有先经过直接测量得到导线的 $R$ 、 $l$ 、 $d$ 以后，再代入 $\rho$ 的表达式，才能经计算得到所需要的结果 $\rho$ 值。在这种测量过程中，步骤较多，花费时间较长，有时可以得到较高的测量精度。间接测量多用于科学实验中的实验室测量，在工程测量中也有所应用。

(3) 联立测量。在应用仪表进行测量时，若被测物理量必须经过求解联立方程组才能得到最终结果，则这样的测量称为联立测量。在进行联立测量时，一般需要改变测量条件，才能获得一组联立方程所需要的数据。

联立测量的操作步骤很复杂，花费时间长，是一种特殊的测量方法。它只适用于科学实验或特殊场合。

## 2. 按测量方式分类

(1) 偏差式测量。在测量过程中，用仪表指针的位移（即偏差）决定被测量的测量方法，称为偏差式测量。应用这种方法进行测量时，标准量具不装在仪表内，而是事先用标准量具对仪表刻度进行校准；在测量时，输入被测量，按照仪表指针在标尺上的示值，决定被测量的数值。这种方法是间接方式实现被测量与标准量具的比较的。例如，用磁电式电流表测量电路中某支路的电流，用磁电式电压表测量某电气元件两端的电压等，就属于偏差式测量。采用这种方法进行测量，测量过程比较简单、迅速。但是，测量结果的精度低。这种测量方法广泛用于工程测量中。

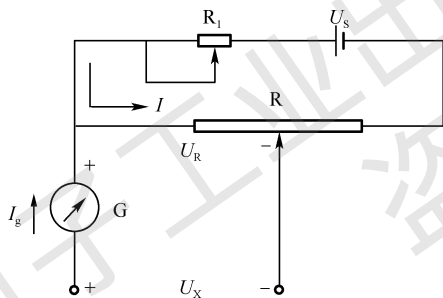


图 1.1 电位差计简化等效电路

(2) 零位式测量。在测量过程中，用指零仪表的零位指示检测测量系统的平衡状态。在测量系统达到平衡时，用已知的基准量决定被测未知量的测量方法，称为零位式测量。应用这种方法进行测量时，标准量具装在仪表内，在测量过程中，标准量直接与被测量相比较，调整标准量，一直到被测量与标准量相等，即使指零仪表回零。如图 1.1 所示的电路是电位差计的简化等效电路。在进行测量之前，应先调 $R_1$ ，将回路工作电流 $I$ 校准；在测量时，要调整 $R$ 的活动触点，使检流计 $G$ 回零，这时 $I_g = 0$ ，即 $U_R = U_x$ ，这样，标准电压 $U_R$ 的值就表示被测未知电压值 $U_x$ 。

采用零位式测量法进行测量时，优点是能够获得比较高的测量精度，但是测量过程比较复杂。采用自动平衡操作以后，虽然可以加快测量过程，但它的反应速度由于受工作原理所限，也不会很高。因此，这种测量方法不适用于测量变化迅速的信号，只适用于测量变化较缓慢的信号。

(3) 微差式测量。微差式测量法是综合了偏差式测量法与零位式测量法的优点而提出的测量方法。这种方法是将被测的未知量与已知的标准量进行比较，并取得差值后，用偏差法测得此值。应用这种方法测量时，标准量具装在仪表内，并在测量过程中将标准量直接与被测量进行比较。由于两者的值很接近，因此在测量过程中不需要调整标准量，而只需要测量两者的差值。

微差式测量法的优点是反应快，而且测量精度高，特别适用于在线控制参数的检测。

## 1.2 测量误差及其分类

### 1.2.1 测量误差及其表示方法

在一定条件下被测物理量客观存在的实际值，称为真值。真值是一个理想的概念。在实际测量时，由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响以及人们辨识能力所限等因素，使得测量值与其真值之间不可避免地存在着差异。测量值与真值之间的差值称为测量误差。

测量误差可用绝对误差表示，也可用相对误差和引用误差表示。

#### 1. 绝对误差

绝对误差  $\Delta x$  是指测量值  $x$  与真值  $L_0$  之间的差值，即

$$\Delta x = x - L_0 \quad (1.1)$$

由于真值  $L_0$  的不可知性，在实际应用时，常用实际真值  $L$  代替，即用被测量多次测量的平均值或上一级标准仪器测得的示值作为实际真值  $L$ ，故有

$$\Delta x = x - L \quad (1.2)$$

绝对误差是一个有符号、大小、量纲的物理量，它只表示测量值与真值之间的偏离程度和方向，而不能说明测量质量的好坏。

在实际测量中，还经常用到修正值  $c$ 。所谓“修正值”是指与绝对误差数值相等但符号相反的数值，即  $c = -\Delta x = L - x$ 。修正值给出的方式可能是具体的数值、一条曲线、公式或数表，将测量值与修正值相加就可以得到实际真值。

#### 2. 相对误差

相对误差常用百分比的形式来表示，一般多取正值。相对误差可分为实际相对误差、示值（标称）相对误差和引用相对误差等。

(1) 实际相对误差  $\gamma$ ：是用测量值的绝对误差  $\Delta x$  与其实际真值  $L$  的百分比来表示的相对误差，即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{L} \times 100\% \quad (1.3)$$

(2) 示值（标称）相对误差  $\gamma_x$ ：是用测量值的绝对误差  $\Delta x$  与测量值  $x$  的百分比来表示的相对误差，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.4)$$

在检测技术中，由于相对误差能够反映出测量技术水平的高低，因此更具有实用性。例如，测量两地距离为 1 000km 的路程时，若测量结果为 1 001km，则测量结果的绝对误差是 1km，示值相对误差为 1‰；如果把 100m 长的一匹布量成 101m，尽管绝对误差只有 1m，与前者 1km 相比较小很多，但 1% 的示值相对误差却比前者 1‰ 大得多，这说明后者测量水平较低。

(3) 引用相对误差：是指测量值的绝对误差  $\Delta x$  与仪器的量程  $A_m$  的百分比。引用相对误差的最大值称为最大引用相对误差  $\gamma_m$ ，即

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% \quad (1.5)$$

由于式（1.5）中的分子、分母都由仪表本身所决定，因此在测量仪表中，人们经常使用最大引用相对误差来评价仪表的性能。最大引用相对误差又称为满度相对误差，是仪表基本误差的主要形式，故也常称之为仪表的基本误差，它是仪表的主要质量指标。基本误差去掉百分号（%）后的数值定义为仪表的精度等级。精度等级规定取一系列标准值，通常用阿拉伯数字标在仪表的刻度盘上，等级数字外有一圆圈。我国目前规定的精度等级有 0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0 等。精度等级数值越小，测量的精确度越高，仪表的价格越贵。

由于仪表都有一定的精度等级，因此其刻度盘的分格值不应小于仪表的允许误差（绝对误差）值，小于允许误差的分度是没有意义的。

在正常工作条件下使用时，工业上常用的各等级仪表的基本误差不超过表 1.1 所规定的值。

表 1.1 仪表的精度等级和基本误差

精度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	4.0	5.0
基本误差	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 4.0\%$	$\pm 5.0\%$

**【例 1.1】** 某温度计的量程范围为 0~500℃，校验时该表的最大绝对误差为 6℃，试确定该仪表的精度等级。

解：根据题意知  $|\Delta x|_m = 6^\circ\text{C}$ ， $A_m = 500^\circ\text{C}$ ，代入式（1.5）中

$$\gamma_m = \frac{|\Delta x|_m}{A_m} \times 100\% = \frac{6}{500} \times 100\% = 1.2\%$$

从表 1.1 中可知，该温度计的基本误差介于 1.0%~1.5%，因此该表的精度等级应定为 1.5 级。

**【例 1.2】** 现有 0.5 级的 0~300℃ 和 1.0 级的 0~100℃ 两个温度计，欲测量 80℃ 的温度，试问选用哪一个温度计比较好？为什么？

解：0.5 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80℃ 时可能出现的最大示值相对误差分别为

$$|\Delta x|_{m1} = \gamma_{m1} A_{m1} = 0.5\% \times (300 - 0) = 1.5$$

$$\gamma_{x1} = \frac{|\Delta x|_{m1}}{x} \times 100\% = \frac{1.5}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

1.0 级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量 80℃ 时可能出现的最大示值相对误差分别为

$$|\Delta x|_{m2} = \gamma_{m2} A_{m2} = 1.0\% \times (100 - 0) = 1$$

$$\gamma_{x2} = \frac{|\Delta x|_{m2}}{x} \times 100\% = \frac{1}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果  $\gamma_{x1} > \gamma_{x2}$ ，显然用 1.0 级温度计测量比用 0.5 级温度计测量示值相对误差更小。因此在选用仪表时，不能单纯追求高精度，而是应兼顾精度等级和量程，最好使测量值落在仪表满度值的 2/3 以上区域内。

**【例 1.3】** 现对一个量程为 60MPa 的压力表进行校准，测得仪表刻度值、标准仪表示值数据如表 1.2 所示。

表 1.2 测量数据

仪表刻度值/MPa	0	10	20	30	40	50	60
标准仪表示值/MPa	0.0	9.8	20.1	30.3	40.4	50.2	60.1
绝对误差/MPa	0	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.2	-0.1
修正值/MPa	0	-0.2	0.1	0.3	0.4	0.2	0.1

试将各校准点的绝对误差和修正值填入表 1.2 中, 并确定该压力表的精度等级。

解: 最大绝对误差为 0.4MPa。

$$-\frac{0.4}{60} \times 100\% = -0.67\%$$

该压力表精度等级为 1 级。

### 1.2.2 测量误差的分类

在测量过程中, 由于被测量千差万别, 影响测量工作的因素非常多, 使得测量误差的表现形式也多种多样, 因此测量误差有不同的分类方法。

#### 1. 按误差表现的规律划分

(1) 系统误差。对同一被测量进行多次重复测量时, 若误差固定不变或者按照一定规律变化, 则这种误差称为系统误差。

系统误差主要是由于测量系统本身不完备或者环境条件的变迁造成的。例如, 所使用仪器仪表的误差、测量方法的不完善、各种环境因素的波动, 以及测量者个体差异等原因。

系统误差反映了测量值偏离真值的程度, 可用“正确度”一词表征。

系统误差是有规律性的。按其表现的特点可分为固定不变的恒值系差和遵循一定规律变化的变值系差。系统误差一般可通过实验或分析的方法, 查明其变化的规律及产生的原因, 因此它是可以预测的, 也是可以消除的。

(2) 随机误差。对同一被测量进行多次重复测量时, 若误差的大小随机变化、不可预知, 则这种误差称为随机误差。

随机误差是由很多复杂因素的微小变化引起的, 尽管这些不可控微小因素中的一项对测量值的影响甚微, 但这些因素的综合作用造成了各次测量值的差异。

随机误差反映了测量结果的“精密度”, 即各个测量值之间相互接近的程度。

对随机误差的某个单值来说, 是没有规律、不可预料的, 但从多次测量的总体上看, 随机误差又服从一定的统计规律, 大多数服从正态分布规律。因此, 可以用概率论和数理统计的方法, 从理论上估计其对测量结果的影响。

应该指出, 在任何一次测量中, 系统误差和随机误差一般都是同时存在的, 而且两者之间并不存在绝对的界限。

(3) 粗大误差。测量结果明显地偏离其实际值所对应的误差, 称为粗大误差或疏忽误差, 又称为过失误差。含有粗大误差的测量值称为坏值。

产生粗大误差的原因有操作者的失误、使用有缺陷的仪器、实验条件的突变等。

正确的测量结果中不应包含粗大误差。实际测量时必须根据一定的准则判断测量结果中是否包含坏值, 并在数据记录中将所有的坏值都予以剔除。同时还可采取提高操作人员的工

作责任心，以及对测量仪器进行经常性检查、维护、校验和修理等方法，减少或消除粗大误差。

(4) 缓变误差。数值随时间缓慢变化的误差称为缓变误差。

缓变误差主要是由测量仪表零件的老化、失效、变形等原因造成的。这种误差在短时间不易被察觉，但在经过较长的时间后会显露出来。

通常可以采用定期校验的方法及时修正缓变误差。

## 2. 按被测量与时间的关系划分

(1) 静态误差。被测量稳定不变时所产生的测量误差称为静态误差。

(2) 动态误差。被测量随时间迅速变化时，系统的输出量在时间上却跟不上输入的变化，这时所产生的误差称为动态误差。例如，将水银温度计插入 100℃ 沸水中，水银柱不可能立即上升到 100℃，此时读数必然产生动态误差。

此外，按测量仪表的使用条件分类，可将误差分为基本误差和附加误差；按测量技能和手段分类，误差又可分为工具误差和方法误差。

# 1.3 测量误差的分析与处理

## 1.3.1 随机误差的统计特性

### 1. 随机误差的特征

随机误差就单次测量而言是无规律的，其大小、方向均不可预知，既不能用实验的方法消除，也不能修正，但当测量次数无限增加时，该测量列中的各个测量误差出现的概率密度分布服从正态分布，即

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} \quad (1.6)$$

式中， $\Delta x = x - L$  为测量值的绝对误差； $\sigma$  为分布函数的标准误差。图 1.2 给出了相应的正态分布曲线。

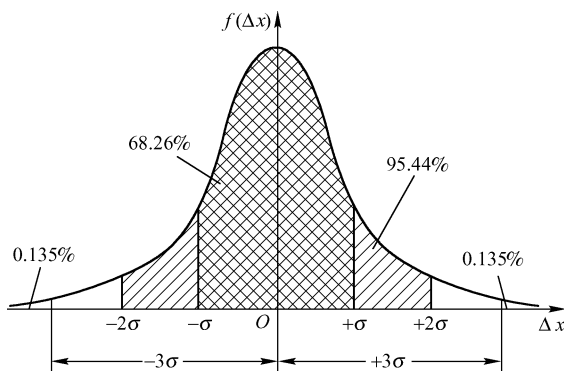


图 1.2 随机误差的正态分布曲线

测量结果符合正态分布曲线的例子非常多，如某校男生身高的分布、交流电源电压的波动等。由式 (1.6) 和图 1.1 不难看出，具有正态分布的随机误差具有以下 4 个特征。

- (1) 对称性：绝对值相等的正、负误差出现的概率大致相等。
- (2) 单峰性：绝对值越小的误差在测量中出现的概率越大。
- (3) 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界限。
- (4) 抵偿性：在相同的测量条件下，当测量次数增加时，随机误差的算术平均值趋近于零。

## 2. 正态分布随机变量的数字特征

随机变量的统计规律由概率密度函数进行了全面的描述，而数字特征则可以通过一些简单的数据来反映随机变量的某些关键特征。

(1) 算术平均值。由上述正态分布的抵偿性可得

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \bar{x}$$

式中， $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$  为算术平均值。

上式表明，当等精度测量次数无穷增加时，被测量的真值就等于测量值的算术平均值，即算术平均值是被测量真值的最佳估计值。

(2) 方差和标准偏差。在实际应用中，不仅要考虑如何由测量值来对被测量值的真值进行最佳估计，还应注意测量值偏离真值的程度。前一个问题通过算术平均值来解决，而后一个问题则由方差或标准偏差来衡量。

方差就是当等精度测量次数无穷增加时，测量值与真值之差的平方和的算术平均值，用  $\sigma^2$  表示，即

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n \delta^2}{n} \quad (1.7)$$

方差的正平方根称为标准偏差，用  $\sigma$  表示，即

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta^2}{n}} \quad (1.8)$$

符合正态分布的随机误差，其概率密度函数的数学表达式为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.9)$$

式中， $\delta = x - \mu$ 。

概率密度函数曲线的形状取决于  $\sigma$ 。首先， $\sigma$  是曲线上拐点的横坐标值。其次， $\sigma$  值越小，则分布曲线越陡，随机误差的分散程度越小，这是人们所希望的； $\sigma$  值越大，则分布曲线越平坦，随机误差越分散。标准偏差  $\sigma$  的意义如图 1.3 所示。

若随机变量  $X$  具有形式为式 (1.9) 的概率密度函数，则称  $X$  服从参数为  $\mu$ 、 $\sigma^2$  的正态分布，记为  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

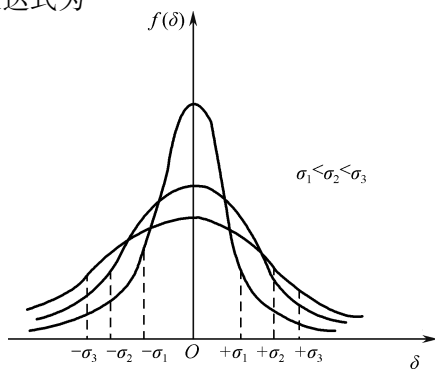


图 1.3 标准偏差  $\sigma$  的意义

利用式（1.8）计算标准偏差是在真值已知且测量次数  $n \rightarrow \infty$  的条件下定义的，在实际应用中无法使用。因此， $\sigma$  的精确值是无法得到的，只能求得其最佳估计值  $\hat{\sigma}$ 。

数理统计的研究表明， $\hat{\sigma}$  可由贝塞尔公式计算

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1.10)$$

式中， $v_i = x_i - \bar{x}$  为第  $i$  次测量值的残差（即残余误差）。

### 3. 置信区间与置信概率

被测量的测量值是一个随机变量  $X$ ，显然，随机误差  $\delta = X - \mu$  也是一个随机变量，通常需要确定  $\delta$  落入某一区间  $(a, b]$  的概率有多大。由式（1.6）和式（1.9）可知

$$P\{a < \delta \leq b\} = \int_{-\infty}^b f(\delta) d\delta - \int_{-\infty}^a f(\delta) d\delta = \int_a^b f(\delta) d\delta = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1.11)$$

随机变量  $\delta$  的取值范围  $(a, b]$  称为置信区间，而随机变量在置信区间内取值的概率  $P\{a < \delta \leq b\}$ ，则称为置信概率。由于概率密度函数  $f(\delta)$  曲线具有对称性，并且其形状取决于  $\sigma$ ，因此置信区间一般以  $\sigma$  的倍数  $\pm k_p \sigma$  表示，其中  $k_p$  称为置信系数。

在式（1.11）中，设  $\delta/\sigma = Z$ ，则置信概率可表示为

$$P\{-k_p \sigma < \delta \leq +k_p \sigma\} = \int_{-k_p \sigma}^{+k_p \sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{Z^2}{2}} \sigma dZ = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+k_p} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \quad (1.12)$$

式（1.12）中的函数称为概率积分函数（或拉普拉斯函数），并可表示为

$$\phi(Z = k_p) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{+k_p} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \quad (1.13)$$

表 1.3 列出了置信系数  $k_p$  取不同值时  $\phi(Z)$  的数值。

表 1.3 正态分布下概率积分函数数值表

$Z$	$\phi(Z)$	$Z$	$\phi(Z)$	$Z$	$\phi(Z)$	$Z$	$\phi(Z)$
0	0.00000	0.9	0.63188	1.9	0.94257	2.7	0.99307
0.1	0.07966	1.0	0.68269	1.96	0.95000	2.8	0.99489
0.2	0.15852	1.1	0.72867	2.0	0.95450	2.9	0.99627
0.3	0.23585	1.2	0.76986	2.1	0.96427	3.0	0.99730
0.4	0.31084	1.3	0.80640	2.2	0.97219	3.5	0.999535
0.5	0.38293	1.4	0.83849	2.3	0.97855	4.0	0.999937
0.6	0.45149	1.5	0.86639	2.4	0.98361	4.5	0.999993
0.6745	0.50000	1.6	0.89040	2.5	0.98758	5.0	0.999999
0.7	0.51607	1.7	0.91087	2.58	0.99012	$\infty$	1.000000
0.8	0.57629	1.8	0.92814	2.6	0.99068		

例如， $P\{-\sigma < \delta < \sigma\} = \phi(1) = 0.68269$ ，说明随机误差落入区间  $(-\sigma, \sigma]$  的概率为 68.26%。

### 4. 仅包含随机误差测量结果的表示

算术平均值虽然是被测量真值的最佳估计值，但仍存在误差。如果把在相同条件下对同

一被测量进行的等精度测量分为  $m$  组, 每组重复进行  $n$  次测量, 则各组测量值的算术平均值也不尽相同。数理统计学的研究表明, 这种误差也符合随机误差的性质, 并有如下定理:

若随机变量  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 则  $\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right)$ 。

显然,  $X$  的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.14)$$

在实际中采用  $\sigma_{\bar{x}}$  的最佳估计值  $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ , 并且

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (1.15)$$

式中,  $\hat{\sigma}$  可由式 (1.10) 的贝塞尔公式求出。

设测量值的算术平均值  $\bar{x}$  相对于被测量真值的误差为  $\delta_{\bar{x}} = \bar{x} - \mu$ , 则因为

$$P\{-\hat{\sigma}_{\bar{x}} < \delta_{\bar{x}} \leq +\hat{\sigma}_{\bar{x}}\} = P\{\bar{x} - \hat{\sigma}_{\bar{x}} \leq \mu < \bar{x} + \hat{\sigma}_{\bar{x}}\} = 0.68269$$

即  $\mu$  落入置信区间  $[\bar{x} - \hat{\sigma}_{\bar{x}}, \bar{x} + \hat{\sigma}_{\bar{x}})$  内的置信概率可达 68.269%, 所以一般就将被测量  $x$  的测量结果表示为

$$x = \bar{x} \pm \hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (1.16)$$

### 1.3.2 粗大误差

当置信系数  $k_p$  取 3, 即置信区间设定为  $(-3\sigma, +3\sigma]$  时, 相应的置信概率为

$$P\{-3\sigma < \delta \leq +3\sigma\} = \phi(3) = 0.99730$$

说明测量误差在  $(-3\sigma, +3\sigma]$  范围内的概率达 99.73%, 超出  $(-3\sigma, +3\sigma]$  范围的概率仅为 0.27%, 即一般情况下测量误差的绝对值大于  $3\sigma$  的可能性极小。因此, 如果某次测量结果出现了这一小概率情况, 就认为该测量结果存在粗大误差, 应予以剔除, 以消除其对测量结果的影响。

实际使用中常采用拉依达准则, 即当测量次数足够多时, 如果

$$|v_i| = |x_i - \bar{x}| > 3\hat{\sigma} \quad (1.17)$$

那么第  $i$  次测量值  $x_i$  就存在粗大误差。

### 1.3.3 系统误差

已知在相同条件下对同一个量进行的多次等精度测量中, 如果仅存在随机误差, 那么可用多次测量值的算术平均值  $\bar{x}$  作为被测量真值  $\mu$  的最佳估计, 即认为  $\bar{x}$  就是被测量的约定真值  $x_0$ 。这时某次测量值的绝对误差

$$\Delta x_i = x_i - x_0 = x_i - \bar{x} = v_i \quad (1.18)$$

可见, 如果仅存在随机误差, 则残差  $v_i$  就是该次测量的随机误差。但是, 在许多测量中发现,  $\bar{x}$  与  $x_0$  之间存在明显的偏差, 并且这种偏差常保持为常数, 或按某一确定的规律变化。

显然, 这是与随机误差性质不同的另一类误差。分析表明, 造成这类误差的原因可能是测量仪器不准确, 测量方法不完善, 或环境因素影响等。这种性质的误差就称为系统误差。

对式 (1.18) 进行如下变换

$$\Delta x_i = x_i - x_0 = (x_i - \bar{x}) + (\bar{x} - x_0) = v_i + \varepsilon \quad (1.19)$$

式中, 残差  $v_i$  是每次测量的随机误差, 而  $\varepsilon$  就是在多次等精度测量中出现的系统误差。

在多次等精度测量中, 如果系统误差  $\varepsilon$  的大小和符号保持不变, 则称之为恒定系统误差; 如果  $\varepsilon$  按某一确定的规律变化, 则称之为可变系统误差, 而这种确定的变化规律可能是线性的、周期性的或更为复杂的规律。

如何才能知道测量中是否存在系统误差呢? 下面介绍几种简单和常用的判别方法。

(1) 残余误差观察法。将一个测量列的残余误差在  $p_i-n$  坐标中依次连接后, 通过观察误差曲线即可判断有无系统误差的存在。这种方法很直观, 如图 1.4 所示。图 1.4 (a) 所示不存在系统误差; 图 1.4 (b) 所示存在恒定变化的系统误差; 图 1.4 (c) 所示存在周期性变化的系统误差; 图 1.4 (d) 所示同时存在线性变化和周期性变化的系统误差。

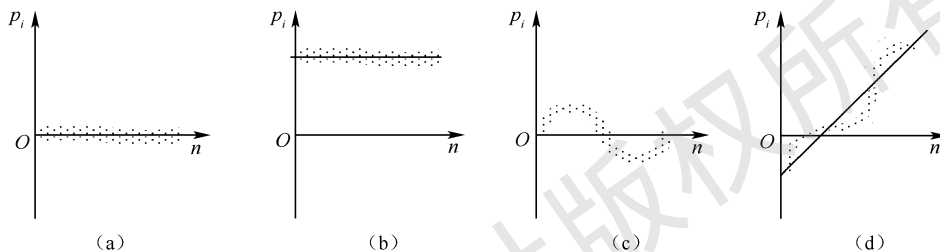


图 1.4  $p_i-n$  示意图

残余误差观察法简单、方便, 但当系统误差相对于随机误差不显著, 或残差变化规律较为复杂时, 这种方法就不适用了, 此时需要借助一些判据。

(2) 判据判别法。以下简单介绍两种常用的判据。

① 马利科夫判据。将一组等精度测量值顺序排列并分成两组, 分别求出两组残差和  $\sum_{i=1}^k v_i$ 、 $\sum_{i=k+1}^n v_i$ 。当  $n$  为偶数时, 取  $k=\frac{n}{2}$ ; 当  $n$  为奇数时, 取  $k=\frac{n+1}{2}$ 。若

$$M = \left| \sum_{i=1}^k v_i - \sum_{i=k+1}^n v_i \right| > |v_i|_{\max}$$

则说明测量中存在线性系统误差。式中,  $|v_i|_{\max}$  为残差绝对值的最大值。

② 阿贝—赫梅特判据。将一组等精度测量值顺序排列, 并求出

$$A = \left| \sum_{i=1}^n v_i v_{i+1} \right| = |v_1 v_2 + v_2 v_3 + \cdots + v_{n-1} v_n|$$

若  $A > \sqrt{n-1} \hat{\sigma}^2$ , 则说明测量中存在周期性系统误差。

如果在测量结果中发现含有系统误差, 则要根据具体情况分析其产生的原因, 然后有的放矢地采取相应的校正或补偿措施, 以消除其对测量结果的影响。

### 1.3.4 直接测量数据的误差分析

在相同条件下, 对某一个量进行多次等精度的直接测量, 从而得出一组测量数据。为了求出被测量真值的最佳估计值及其误差范围, 一般需要通过以下步骤完成。

(1) 检查测量数据中有无粗大误差, 若有, 则剔除该测量值; 然后重复上述步骤, 直至剩余的数据中不再有粗大误差。

(2) 检查剔除粗大误差后的测量数据中有无系统误差, 若有, 则采取相应的校正或补偿措施, 以消除其对测量结果的影响。

(3) 经过上述处理后的测量数据中只存在随机误差，因此，可用这些测量数据的算术平均值  $\bar{x}$  作为被测量真值的最佳估计值，并给出  $\bar{x}$  的标准偏差  $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ 。

**【例 1.4】** 在相同条件下，对某一电压进行了 16 次等精度测量，测量结果如表 1.4 的第二列所示，试求出对该电压的最佳估计值及其标准偏差。

解：(1) 检查 16 次测量值中有无粗大误差。

首先计算 16 次测量值的算术平均值

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{16} x_i}{16} = 205.3。$$

填入表 1.4 第二列的最后一行。

再计算各次测量值的残差  $v_i = x_i - \bar{x}$ ，分别填入表 1.4 的第三列。

然后根据贝塞尔公式计算

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{16} v_i^2}{16-1}} = 0.444$$

$$3\hat{\sigma} = 1.332$$

因为  $|v_5| = 1.35 > 3\hat{\sigma}$ ，所以第 5 次测量值含有粗大误差，应剔除  $x_5$ 。

表 1.4 测量结果及分析

测量序号 $i$	测量值 $x_i/V$	残差 $v_i/V$	剔除 $x_5$ 以后		
			$i'$	$v_i'/V$	$v_i'v_{i+1}'/V^2$
1	205.30	0.00	1	0.09	-0.0243
2	204.94	-0.36	2	-0.27	-0.1134
3	205.63	0.33	3	0.42	0.0126
4	205.24	-0.06	4	0.03	-0.0072
5	206.65	1.35	—	—	-0.0360
6	204.97	-0.33	5	-0.24	-0.0075
7	205.36	0.06	6	0.15	0.0180
8	205.16	-0.14	7	-0.05	0.1836
9	204.85	-0.45	8	-0.36	-0.2550
10	204.70	-0.60	9	-0.51	0.0700
11	205.71	0.41	10	0.50	0
12	205.35	0.05	11	0.14	0
13	205.21	-0.09	12	0.00	0
14	205.19	-0.11	13	-0.02	0
15	205.21	-0.09	14	0.00	0
16	205.32	0.02	15	0.11	
	$\bar{x} = 205.30$ $\bar{x}' = 205.21$				$A = 0.1592$

(2) 检查余下的 15 次测量值中有无粗大误差。

对余下的 15 次测量值重编顺序号  $i'=1\sim 15$ ，检查方法与第 (1) 步类似。

$$\bar{x}' = \frac{\sum_{i'=1}^n x_i}{n} = \frac{\sum_{i'=1}^{15} x_i}{15} = 205.21 \quad \hat{\sigma}' = \sqrt{\frac{\sum_{i'=1}^n v'^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i'=1}^{15} v'^2}{15-1}} = \sqrt{\frac{1.0127}{14}} = 0.269 \quad 3\hat{\sigma}' = 0.807$$

显然，余下的 15 次测量值中已不包含粗大误差。

(3) 检查余下的 15 次测量值中有无系统误差。

$$M = \left| \sum_{i'=1}^k v_i' - \sum_{i=k+1}^n v_i' \right| = \left| \sum_{i'=1}^8 v_i' - \sum_{i=9}^{15} v_i' \right| = |(-0.23) - 0.22| = 0.45$$

而

$$|v_i'|_{\max} = |V_{10}| = 0.51 > M$$

所以根据马利科夫判据知，测量结果中不包含线性系统误差。

$$\text{又因为} \quad A = \left| \sum_{i'=1}^n v_i' v_{i+1}' \right| = |v_1' v_2' + v_2' v_3' + \cdots + v_{14}' v_{15}'| = 0.1592$$

而

$$\sqrt{n-1} \hat{\sigma}'^2 = \sqrt{15-1} \times 0.269^2 = 0.2708 > A$$

所以根据阿贝—赫梅特判据知，测量结果中不包含周期性系统误差。

综上所述可认为，剔除  $x_5$  以后，余下的 15 次测量值中不包含粗大误差和系统误差，而仅有随机误差。

(4) 写出测量结果的表达式。

现已求出  $\bar{x}' = 205.21$ ，其标准偏差为

$$\hat{\sigma}_x' = \frac{\hat{\sigma}'}{\sqrt{n}} = \frac{0.269}{\sqrt{15}} \approx 0.07$$

所以测量结果可表示为

$$x = \bar{x}' \pm \hat{\sigma}_x' = 205.21 \pm 0.07 \text{ (V)}$$

## 1.4 传感器及其基本特性

### 1.4.1 传感器的定义及组成

现代信息技术包括计算机技术、通信技术和传感器技术等，计算机相当于人的大脑，通信相当于人的神经，而传感器则相当于人的感觉器官。如果没有各种精确可靠的传感器去检测原始数据并提供真实的信息，那么即使是性能非常优越的计算机，也无法发挥其应有的作用。

#### 1. 传感器的定义

从广义上讲，传感器是能够感觉外界信息并按一定规律将这些信息转换成可用的输出信号的器件或装置。这一概念包含了以下 3 方面的含义。

(1) 传感器是一种能够完成提取外界信息任务的装置。

(2) 传感器的输入量通常指非电量信号，如物理量、化学量、生物量等；而输出量是便于传输、转换、处理、显示等的物理量，主要是电量信号。例如，电容式传感器的输入量可以是力、压力、位移、速度等非电量信号，输出则是电压信号。

(3) 传感器的输出量与输入量之间精确地保持一定的规律。

## 2. 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件和转换电路三部分组成，如图 1.5 所示。

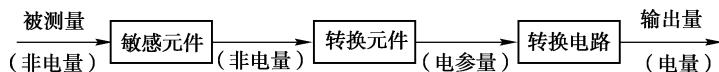


图 1.5 传感器组成框图

(1) 敏感元件。敏感元件是传感器中能直接感受被测量的部分，即直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量。例如，弹性敏感元件将压力转换为位移，且压力与位移之间保持一定的函数关系。

(2) 转换元件。转换元件是传感器中将敏感元件输出量转换为适于传输和测量的电信号的部分。例如，应变式压力传感器中的电阻应变片将应变转换成电阻的变化。

(3) 转换电路。转换电路将电参量转换成便于测量的电压、电流、频率等电量信号。例如，交、直流电桥，放大器，振荡器，电荷放大器等。

应该注意，并不是所有的传感器必须同时包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量，则它就同时兼为转换元件，如热电偶；如果转换元件能直接感受被测量，而输出与之成一定关系的电量，则此时的传感器就没有敏感元件，如压电元件。

### 1.4.2 传感器的分类

传感器千差万别，种类繁多，分类方法也不尽相同，常用的分类方法有下面几种。

#### 1. 按被测物理量分类

按被测物理量可分为温度、压力、流量、物位、位移、加速度、磁场、光通量等传感器。这种分类方法明确表明了传感器的用途，便于使用者选用，如压力传感器用于测量压力信号。

#### 2. 按传感器工作原理分类

按工作原理可分为电阻式传感器、热敏传感器、光敏传感器、电容式传感器、电感式传感器、磁电式传感器等。这种方法表明了传感器的工作原理，有利于传感器的设计和应用。例如，电容式传感器就是将被测量转换成电容值的变化。表 1.5 列出了这种分类方法中各类型传感器的名称及典型应用。

表 1.5 各类型传感器的名称及典型应用

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电参量	电阻	移动电位器触点改变电阻	电位器式传感器	位移
		改变电阻丝 (或片) 的尺寸	电阻应变式传感器、半导体 应变式传感器	微应变、力、负荷
		利用电阻的温度效应 (电阻温度系数)	热丝传感器	气流速度、液体流量
			电阻式温度传感器	温度、辐射热
			热敏传感器	温度
		利用电阻的光敏效应	光敏传感器	光强
		利用电阻的湿度效应	湿敏传感器	湿度

续表

传感器分类		转换原理	传感器名称	典型应用
转换形式	中间参量			
电参量	电容	改变电容的几何尺寸	电容式传感器	力、压力、负荷、位移
		改变电容的介电常数		液位、厚度、含水量
	电感	改变磁路几何尺寸、导磁体位置	电感式传感器	位移
		涡流去磁效应	电涡流式传感器	位移、厚度、硬度
		利用压磁效应	压磁式传感器	力、压力
		改变互感	差动变压器式传感器	位移
			自整角机传感器	位移
			旋转变压器式传感器	位移
	频率	改变谐振回路中的固有参数	振弦式传感器	压力、力
			振筒式传感器	气压
			石英谐振式传感器	力、温度等
	计数	利用莫尔条纹	光栅传感器	大角位移、大直线位移
		改变互感	感应同步器	
		利用数字编码	角度编码器	
	数字	利用数字编码	角度编码器	大角位移
电量	电动势	温差电动势	热电偶传感器	温度、热流
		霍尔效应	霍尔传感器	磁通、电流
		电磁感应	磁电式传感器	速度、加速度
		光电效应	光电式传感器	光强
	电荷	辐射电离	电离式传感器	离子计数、放射性强度
		压电效应	压电式传感器	动态力、加速度

### 3. 按传感器转换能量供给形式分类

按转换能量供给形式可分为能量变换型（发电型）和能量控制型（参量型）两种。

能量变换型传感器在进行信号转换时不需要另外提供能量，就可将输入信号能量变换为另一种形式能量输出，如热电偶传感器、压电式传感器等。

能量控制型传感器工作时必须有外加电源，如电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、霍尔传感器等。

### 4. 按传感器工作机理分类

按工作机理可分为结构型传感器和物性型传感器。

结构型传感器是指被测量变化时引起传感器结构发生改变，从而引起输出电量变化。例如，电容式压力传感器就属于这种传感器，当外加压力变化时，电容极板发生位移，结构的改变引起电容值变化，输出电压也随之发生变化。

物性型传感器是利用物质的物理或化学特性随被测参数变化的原理构成的，一般没有可动结构部分，易小型化，如各种半导体传感器。

习惯上常把工作原理和用途结合起来命名传感器，如电容式压力传感器、电感式位移传感器等。

### 1.4.3 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指传感器的输出与输入之间的关系。传感器测量的参数一般有两种形式：一种是不随时间的变化而变化（或变化极其缓慢）的静态信号；另一种是随时间的变化而变化的动态信号。因此，传感器的基本特性分为静态特性和动态特性。

#### 1. 传感器的静态特性与指标

传感器的静态特性是指传感器输入信号处于稳定状态时，其输出与输入之间呈现的关系。这种关系可表示为

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1.20)$$

式中， $y$  为传感器输出量； $x$  为传感器输入量； $a_0$  为传感器的零位输出； $a_1$  为传感器的灵敏度， $a_2$ 、 $a_3$ 、 $\cdots$ 、 $a_n$  为非线性项系数。

衡量静态特性的主要指标有精确度、稳定性、灵敏度、线性度、迟滞和可靠性等。

(1) 精确度。精确度是反映测量系统中系统误差和随机误差的综合评定指标。与精确度有关的指标有精密度和准确度。

① 精密度：说明测量系统指示值的分散程度。精密度反映了随机误差的大小，精密度高则随机误差小。

② 准确度：说明测量系统的输出值偏离真值的程度。准确度是系统误差大小的标志，准确度高则系统误差小。

精确度是准确度与精密度两者的总和，常用仪表的基本误差表示。精确度高表示精密度和准确度都高。

图 1.6 所示的射击例子有助于对准确度、精密度和精确度三个概念的理解。图 1.6 (a) 表示准确度高而精密度低；图 1.6 (b) 表示精密度高而准确度低；图 1.6 (c) 表示准确度和精密度都高，即它的精确度高。

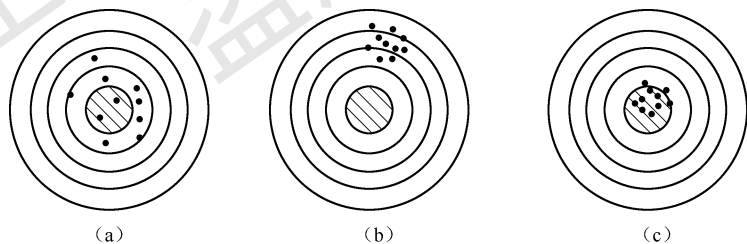


图 1.6 射击例子

(2) 稳定性。传感器的稳定性常用稳定度和影响系数表示。

① 稳定度：是指在规定工作条件范围和规定时间内，传感器性能保持不变的能力。传感器在工作时，内部随机变动的因素很多，如发生周期性变动、漂移或机械部分的摩擦等都会引起输出值的变化。

稳定度一般用重复性的数值和观测时间的长短表示。例如，某传感器输出电压值每小时变化 1.5mV，可写成稳定度为 1.5mV/h。

② 影响系数：是指由于外界环境变化引起传感器输出值变化的量。一般传感器都有给定的标准工作条件，如环境温度 20℃、相对湿度 60%、大气压力 101.33kPa、电源电压 220V 等。而实际工作时的条件通常会偏离标准工作条件，这时传感器的输出也会发生变化。

影响系数常用输出值的变化量与影响量变化量的比值表示, 如某压力表的温度影响系数为  $200\text{Pa}/^{\circ}\text{C}$ , 即表示环境温度每变化  $1^{\circ}\text{C}$ , 压力表的示值变化  $200\text{Pa}$ 。

(3) 灵敏度。灵敏度  $S$  是指传感器在稳态下输出变化量  $\Delta y$  与输入变化量  $\Delta x$  的比值, 即

$$S = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1.21)$$

显然, 灵敏度表示静态特性曲线上相应点的斜率。对于线性传感器来说, 灵敏度为一个常数; 对于非线性传感器来说, 灵敏度则为一个变量, 其值随着输入量的变化而变化, 如图 1.7 所示。

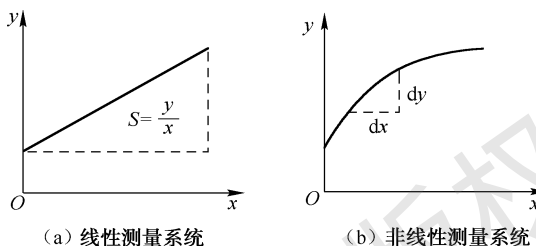


图 1.7 灵敏度的定义

灵敏度的量纲取决于传感器输入、输出信号的量纲。例如, 压力式传感器灵敏度的量纲可表示为  $\text{mV}/\text{Pa}$ 。对于数字式仪表, 灵敏度以分辨力表示。所谓分辨力是指数字式仪表最后一位数字所代表的值。一般地, 分辨力数值小于仪表的最大绝对误差。

在实际应用中, 一般希望传感器的灵敏度高一些, 且在满量程范围内保持恒定值, 即传感器的静态特性曲线为直线。

(4) 线性度。线性度  $\gamma_L$ , 又称非线性误差, 是指传感器实际特性曲线与其理论拟合直线之间的最大偏差  $\Delta_{L\max}$  与传感器满量程输出  $y_{FS}$  的百分比, 即

$$\gamma_L = \frac{\Delta_{L\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.22)$$

理论拟合直线的选取方法不同, 线性度的数值就不同。图 1.8 所示为传感器线性度示意图, 图中的拟合直线是一条将传感器的零点与对应于最大输入量的最大输出值点 (满量程点) 连接起来的直线, 这条直线称为端基直线, 由此得到的线性度称为端基线性度。

实际上, 人们总是希望线性度越小越好, 即传感器的静态特性曲线接近于拟合直线, 这时传感器的刻度是均匀的, 读数方便且不易引起误差, 容易标定。检测系统的非线性误差多采用计算机来纠正。

(5) 迟滞。迟滞是指传感器在正 (输入量增大)、反 (输入量减小) 行程中输出曲线不重合的现象, 如图 1.9 所示。

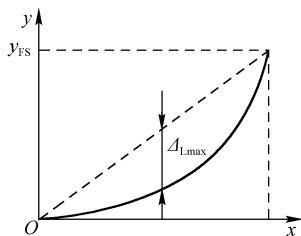


图 1.8 传感器线性度示意图

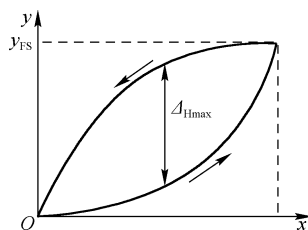


图 1.9 传感器迟滞示意图

迟滞  $\gamma_H$  用正、反行程输出值间的最大差值  $\Delta_{Hmax}$  与满量程输出  $y_{FS}$  的百分比表示, 即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta_{Hmax}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1.23)$$

造成迟滞的原因有很多, 如轴承摩擦、间隙、螺钉松动、电路元件老化、工作点漂移、积尘等。迟滞会引起分辨力变差或造成测量盲区, 因此一般希望迟滞越小越好。

(6) 可靠性。可靠性是指传感器或检测系统在规定的工作条件和规定的时间内, 具有正常工作性能的能力。它是一种综合性的质量指标, 包括可靠度、平均无故障工作时间、平均修复时间和失效率。

① 可靠度: 传感器在规定的使用条件和工作周期内, 达到所规定性能的概率。

② 平均无故障工作时间 (MTBF): 指相邻两次故障期间传感器正常工作时间的平均值。

③ 平均修复时间 (MTTR): 指排除故障所花费时间的平均值。

④ 失效率: 指在规定的条件下工作到某个时刻, 检测系统在连续单位时间内发生失效的概率。对可修复的产品, 又称为故障率。

失效率是时间的函数, 如图 1.10 所示。一般分为 3 个阶段: 早期失效期、偶然失效期和衰老失效期。

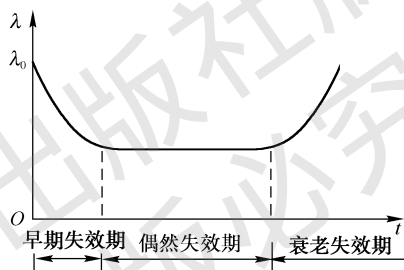


图 1.10 失效率变化曲线

## 2. 传感器的动态特性与指标

传感器的动态特性是指传感器对于随时间变化的输入信号的响应特性。通常希望传感器的输出信号和输入信号随时间的变化曲线一致或相近, 但实际上两者总是存在着差异, 因此必须研究传感器的动态特性。

在研究传感器的动态特性时首先要建立动态模型, 动态模型有微分方程、传递函数和频率响应函数几种, 可以分别从时域、复数域和频域对系统的动态特性及规律进行研究。

系统的动态特性取决于系统本身及输入信号的形式, 工程上常用正弦函数和单位阶跃函数作为标准的输入信号。通常在时域主要分析传感器在单位阶跃输入下的响应; 而在频域主要分析在正弦输入下的稳态响应, 并着重从系统的幅频特性和相频特性来讨论。

(1) 传感器阶跃响应。传感器的动态模型可以用线性常系数微分方程表示, 即

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1.24)$$

式中,  $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m$  是取决于传感器参数的常数, 一般  $b_1 = b_2 = \cdots = b_m = 0$ , 而  $b_0 \neq 0$ 。若  $n=0$ , 则传感器为零阶系统; 若  $n=1$ , 则传感器为一阶系统; 若  $n=2$ , 则传感器为二阶系统; 若  $n \geq 3$  时, 则传感器称为高阶系统。

当传感器输入一个单位阶跃信号  $u(t)$  时, 其输出信号称为阶跃响应。

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1.25)$$

常见的一阶、二阶传感器阶跃响应曲线如图 1.11 所示, 主要动态指标如下。

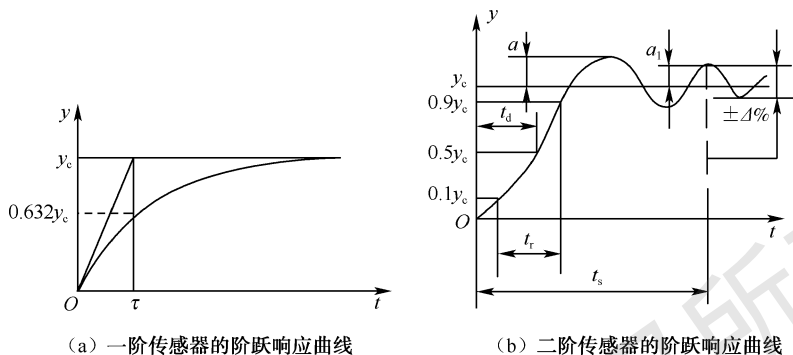


图 1.11 阶跃响应曲线

① 时间常数  $\tau$ : 传感器输出  $y(t)$  由零上升到稳态值  $y_c$  的 63.2% 所需的时间, 如图 1.11 (a) 所示。

② 上升时间  $t_r$ : 传感器输出  $y(t)$  由稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间, 如图 1.11 (b) 所示。

③ 调节时间  $t_s$ : 传感器输出  $y(t)$  由零上升达到并一直保持在允许误差范围  $\pm\Delta\%$  所需的时间。 $\pm\Delta\%$  可以是 2%、5% 或 10%, 根据实际情况确定。

④ 最大超调量  $a$ : 输出最大值  $y_{\max}$  与输出稳态值  $y_c$  的相对误差, 即

$$a = \frac{y_{\max} - y_c}{y_c} \times 100\% \quad (1.26)$$

⑤ 振荡次数  $N$ : 调节时间内, 输出量在稳态值附近上下波动的次数。

⑥ 稳态误差  $e_{ss}$ : 无限长时间后, 传感器的稳态输出值  $y_c$  与目标值  $y_0$  之间偏差的相对值, 即

$$e_{ss} = \frac{y_c - y_0}{y_c} \times 100\% \quad (1.27)$$

(2) 传感器频率响应。将各种频率不同而幅值相等的正弦信号输入到传感器, 其输出正弦信号的幅值、相位与频率之间的关系称为频率响应特性。频率响应特性可由频率响应函数表示, 它由幅频特性和相频特性组成。

由控制理论知, 传感器的频率响应函数为

$$G(j\omega) = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1 (j\omega) + a_0} \quad (1.28)$$

① 幅频特性: 频率特性  $G(j\omega)$  的模, 即输出与输入的幅值比  $A(\omega) = |G(j\omega)|$  称为幅频特性。以  $\omega$  为自变量、 $A(j\omega)$  为因变量的曲线称为幅频特性曲线。

② 相频特性: 频率特性  $G(j\omega)$  的相角  $\varphi(\omega)$ , 即输出与输入的相位差  $\phi(\omega) = -\arctan G(j\omega)$  称为相频特性。以  $\omega$  为自变量、 $\varphi(\omega)$  为因变量的曲线称为相频特性曲线。

对于最小相位系统, 幅频特性与相频特性之间存在一一对应关系, 因此在进行传感器的频率响应分析时, 主要使用幅频特性, 图 1.12 所示为典型测量仪表的幅频特性。当测量仪表

的输入信号频率较低时,测量仪表能够在精度范围内检测到被测量;随着输入信号频率的增大,幅频特性逐渐减小,测量仪表将无法等比例复现被测量。

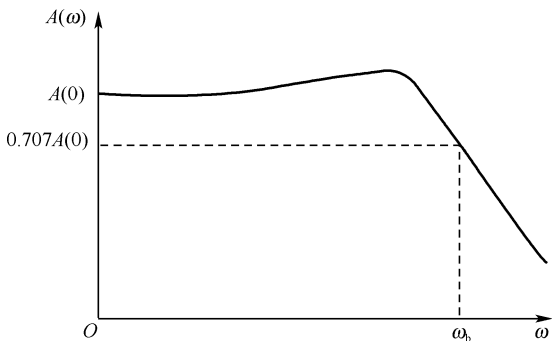


图 1.12 测量仪表的幅频特性

幅频特性中对应于幅值为  $0.707A(0)$  时的频率称为截止频率  $\omega_b$ 。对应的频率范围  $0 \leq \omega \leq \omega_b$  称为频带宽度,频带宽度反映了测量仪表对快变信号的检测能力。

#### 1.4.4 传感器技术的发展趋势

##### 1. 传感器的作用

在信息时代,人们的社会活动将主要依靠对信息资源的开发、获取、传输与处理,而传感器处于自动检测与控制系统之首,处于研究对象与测控系统的接口位置,是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学研究和生产过程要获取信息,都要通过传感器转换为便于传输与处理的电信号。系统的自动化、智能化程度越高,系统对传感器的依赖性越大,因此传感器对系统的功能起着决定性的作用。

现代科学技术的发展离不开检测技术,而检测技术更离不开传感器,特别是在科学技术迅猛发展的今天,传感器已广泛应用于工业自动化、航天技术、军事领域、机器人开发、环境检测、医疗卫生、家电行业等各学科和工程领域。传感器技术是现代科技的前沿技术,是现代信息技术的三大支柱之一。传感器技术的水平高低是衡量一个国家科技发展水平的主要标志之一。

##### 2. 传感器技术的发展趋势

从 20 世纪 80 年代起,日本就将传感器技术列为优先发展的高新技术之首,美国等西方国家也将其列为国家科技和国际技术发展的重点内容。我国自 20 世纪 80 年代以来在传感器技术方面取得了很大突破。

目前,传感器技术已从单一的物性型传感器进入功能更强大、技术高度集成的新型传感器阶段。新型传感器的开发和应用已成为现代传感器技术和系统的核心和关键。21 世纪传感器发展的总趋势是微型化、多功能化、集成化、数字化、智能化、网络化和系统化。

(1) 传感器的微型化。微型传感器是以微机电系统 (Micro-ElectroMechanical Systems, MEMS) 技术为基础的。MEMS 的核心技术是微电子机械加工技术,主要包括体硅微机械加工技术、表面硅微加工技术、LIGA 技术 (即 X 光深层光刻、微电铸和微复制技术)、激光微加工技术和微型封装技术等。微型传感器具有体积小、质量轻、反应快、灵敏度高及成本低等特点。比较成熟的微型传感器有压力式传感器、微加速度传感器、微机械陀螺等。

(2) 传感器的多功能化与集成化。由于传统的传感器只能用于检测一种物理量,但在许多

应用领域,为了能准确反映客观事物和环境,通常需要同时测量大量参数,由若干种敏感元件组成的多功能传感器应运而生,多种功能集成于一个传感器系统中,即在同一芯片上或将众多同一类型的单个传感器集成为一维、二维阵列型传感器,或将传感器与调整、补偿等电路集成一体化。半导体、电介质材料的进一步开发和集成技术的不断发展为集成化提供了基础。

(3) 传感器的数字化、智能化、网络化与系统化。智能化的传感器是一种涉及多学科的新型传感器系统,它是一种带微处理器的具有自校准、自补偿、自诊断、数据处理、网络通信和数字信号输出功能的新型传感器。嵌入式技术、集成电路技术和微控制器的引入,使传感器成为硬件和软件的结合体,一方面传感器的功耗降低、体积减小、抗干扰性和可靠性提高;另一方面利用软件技术实现了传感器的非线性补偿、零点漂移和温度补偿等;同时网络接口技术的应用使传感器能方便地接入工业控制网络,为系统的扩充和维护提供了极大的方便。

## 1.5 弹性敏感元件

物体在外力作用下改变原来尺寸或形状的现象称为变形。若去除外力后物体能完全恢复其原来的尺寸和形状,则这种变形称为弹性变形。具有弹性变形特性的物体称为弹性元件。

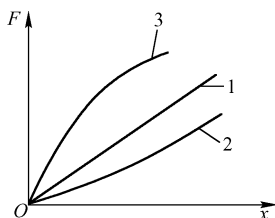
弹性元件在传感器技术中占有极其重要的地位。它首先把力、力矩或压力转换成相应的应变或位移,然后配合各种形式的传感元件,将被测力、力矩或压力转换成电量。

根据弹性元件在传感器中的作用,它基本上可以分为两种类型:弹性敏感元件和弹性支承。前者感受力、力矩、压力等被测参数,并通过它将被测量转换为应变、位移等,也就是通过它将被测参数由一种物理状态转换为另一种所需要的物理状态。由于它直接起到测量的作用,故称为弹性敏感元件。

### 1.5.1 弹性敏感元件的弹性特性

作用在弹性敏感元件上的外力与由该外力所引起的相应变形(应变、位移或转角)之间的关系称为弹性敏感元件的弹性特性。弹性特性可由刚度和灵敏度来表示。

#### 1. 刚度



1—线性 2、3—非线性

图 1.13 弹性特性

刚度是弹性敏感元件在外力作用下抵抗变形的能力,其数学表达式为

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{dF}{dx} \quad (1.29)$$

式中,  $F$  为作用在弹性敏感元件上的外力;  $x$  为弹性敏感元件产生的应变。

若刚度  $k$  是常数,则元件的弹性特性是线性的,否则是非线性的,如图 1.13 所示。

#### 2. 灵敏度

灵敏度是刚度的倒数,可表示为

$$K = \frac{dx}{dF} \quad (1.30)$$

从式 (1.30) 可以看出, 灵敏度就是单位力产生应变的大小。与刚度相似, 如果元件弹性特性是线性的, 则灵敏度为常数; 若弹性特性是非线性的, 则灵敏度为变数。

### 3. 弹性滞后

弹性敏感元件在弹性变形范围内, 弹性特性的加载曲线与卸载曲线不重合的现象称为弹性滞后, 如图 1.14 所示。

### 4. 弹性后效

弹性敏感元件所加载荷改变后, 不是立即完成相应的变形, 而是在一定时间间隔内逐渐完成变形的现象称为弹性后效。由于弹性后效存在, 弹性敏感元件的变形不能迅速地随作用力的改变而改变, 因而会引起测量误差。

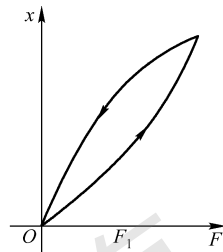


图 1.14 弹性滞后

## 1.5.2 弹性敏感元件的材料及其基本要求

因为弹性敏感元件在传感器中直接参与转换和测量, 所以对它有一定要求。在任何情况下, 它应保证有良好的弹性特性、足够的精度和稳定性, 以及在长时间使用中和温度变化时都应保持稳定的特性。因此, 对其材料的基本要求如下。

- (1) 具有良好的机械特性（强度高、抗冲击、韧性好、疲劳强度高等）和良好的机械加工及热处理性能。
- (2) 良好的弹性特性（弹性极限高、弹性滞后和弹性后效小等）。
- (3) 弹性模量的温度系数小且稳定, 材料的线膨胀系数小且稳定。
- (4) 抗氧化性和抗腐蚀性等化学性能良好。

## 1.5.3 弹性敏感元件的转换原理

下面介绍几种常用弹性敏感元件及其将力与压力转换为所需物理量的原理。

### 1. 弹性圆柱

弹性圆柱具有结构简单的特点, 可承受很大的载荷, 根据截面形状可分为圆筒形与圆柱形两种, 如图 1.15 所示。

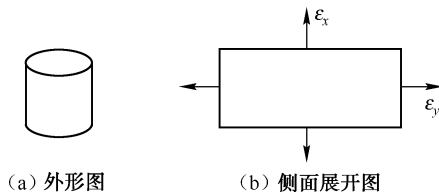


图 1.15 弹性圆柱

在力的作用下, 弹性圆柱产生应变。当受到轴向拉或压的作用力  $F$  时, 在与轴线成  $90^\circ$  的侧面上产生轴向应力和横向应力, 其轴向应力的应变量为

$$\sigma_x = \frac{F}{S} \quad (1.31)$$

$$\varepsilon_x = \frac{F}{SE} \quad (1.32)$$

横向应力的应变量为

$$\sigma_y = -\mu \frac{F}{S} \quad (1.33)$$

$$\varepsilon_y = -\mu \frac{F}{SE} \quad (1.34)$$

式中,  $F$  为沿轴线方向的作用力;  $E$  为材料的弹性模量;  $\mu$  为材料的泊松系数, 一般为  $0 \sim 0.5$ ;  $S$  为圆柱的横截面积。

由上述几个公式可以看出, 圆柱的应变大小决定于圆柱的结构、横截面积、材料性质和圆柱所承受的力, 而与圆柱的长度无关。

对于空心的圆柱弹性敏感元件, 上述表达式也是适用的, 而且空心的弹性元件在某些方面还要优于实心元件。但是当空心圆柱的壁太薄时, 受压力作用后将产生较明显的变形而影响精度。

## 2. 悬臂梁

悬臂梁可分为等截面梁和等强度梁, 分别如图 1.16、图 1.17 所示。悬臂梁是一端固定、另一端自由的弹性敏感元件, 它具有结构简单、加工方便的特点, 在较小力的测量中应用较多。

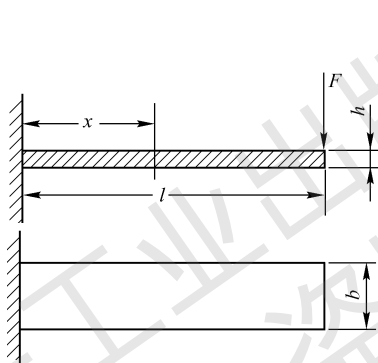


图 1.16 等截面梁

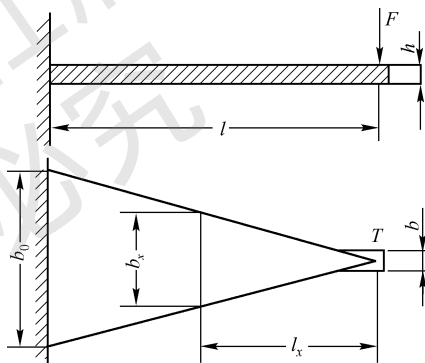


图 1.17 等强度梁

(1) 等截面梁。一端固定, 另一端自由, 且截面为矩形的梁称为等截面梁。等截面梁所受作用力  $F$  与某一位置处的应变关系可按式计算:

$$\varepsilon_x = \frac{6F(l-x)}{ESh} \quad (1.35)$$

式中,  $\varepsilon_x$  为距固定端  $x$  处的应变值;  $l$  为梁的长度;  $x$  为某一位置到固定端的距离;  $E$  为梁的材料的弹性模量;  $S$  为梁的横截面积;  $h$  为梁的厚度。

由式 (1.35) 可知, 随着位置  $x$  的不同, 在梁上各个位置所产生的应变也是不同的。

(2) 等强度梁。等截面梁的不同部位所产生的应变是不相等的, 这对电阻应变式传感器中应变片的粘贴位置提出了较高的要求。而等强度梁在自由端加上作用力时, 在梁上各处产生的应变大小相等。当作用力  $F$  加在梁的两斜边的交汇点处时, 等强度梁各点的应变值为

$$\varepsilon = \frac{6l}{Eb_0h^2} F \quad (1.36)$$

式中,  $\varepsilon$  为梁各点的应变值;  $l$  为梁的长度;  $b_0$  为梁的固定端宽度;  $E$  为梁的材料的弹性模量;  $h$  为梁的厚度。

### 3. 薄壁圆筒

薄壁圆筒与弹簧管等弹性元件可将气体压力转换为应变。薄壁圆筒的壁厚一般都小于圆筒直径的  $1/20$ ，内腔与被测压力相通时，内壁均匀受压，薄壁无弯曲变形，只是均匀地向外扩张。所以，筒壁的每一单元将在轴线方向和圆周方向产生拉伸应力，如图 1.18 所示，其值为

$$\sigma_x = \frac{r_0}{2h} p \quad (1.37)$$

$$\sigma_r = \frac{r_0}{h} p \quad (1.38)$$

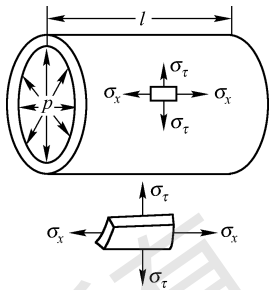


图 1.18 薄壁圆筒受力分析

式中， $\sigma_x$  为轴向的拉伸应力； $\sigma_r$  为圆周方向的拉伸应力； $p$  为筒内气体压强； $r_0$  为圆筒的半径； $h$  为圆筒的壁厚。

轴向应力  $\sigma_x$  与周向应力  $\sigma_r$  相互垂直，应用胡克定律，可求得这种弹性敏感元件压力-应变关系式

$$\varepsilon_x = \frac{r_0}{2Eh} (1-2\mu) p \quad (1.39)$$

$$\varepsilon_r = \frac{r_0}{2Eh} (2-\mu) p \quad (1.40)$$

由式 (1.39)、式 (1.40) 可知，它的应变与圆筒的长度无关，而仅取决于圆筒的半径  $r_0$ 、壁厚  $h$  和弹性模量  $E$ ，而且轴线方向应变与圆周方向应变不相等。

### 4. 弹簧管

弹簧管的截面形状为椭圆形、卵形或更复杂的形状。它主要在测量流体压力时作为压力敏感元件使用，将压力转换为弹簧管端部的位移。弹簧管大多是弯曲成 C 形的空心管子，管子的一端开口，作为固定端；另一端封死，作为自由端。C 形弹簧管的结构与截面示意图如图 1.19 所示。弹簧管的自由端连在管接头上，压力  $p$  通过管接头导入弹簧管的内腔，在管内压力作用下，管截面将趋于变成圆形，从而使 C 形管趋于伸直。于是，管的自由端移动。弹簧管自由端的位移反映管内压力的大小。为了减小应力，可将其制成螺旋形弹簧管，如图 1.20 所示。

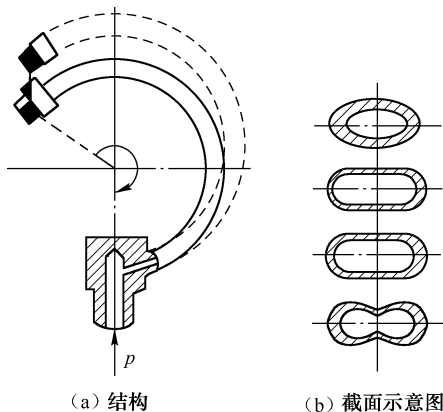


图 1.19 C 形弹簧管的结构与截面示意图

对于椭圆形截面的薄壁弹簧管，管壁厚与短半轴之比应为  $0.7 \sim 0.8$ 。在一定范围内，其自由端位移  $d$  和所受压力  $p$  之间的关系呈线性特性，如图 1.21 所示。当压力超过某一压力值  $p$  时，特性曲线将偏离直线而上翘。

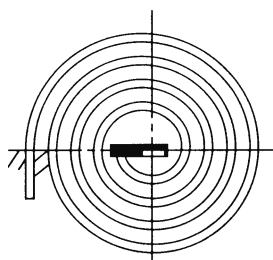


图 1.20 螺旋形弹簧管

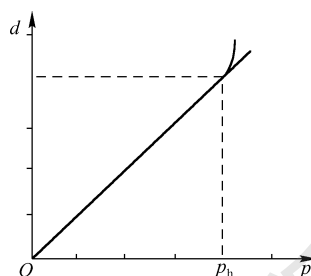


图 1.21 特性曲线

## 5. 膜片

膜片分平膜片和波纹膜片两种，在相同压力下，波纹膜片可产生较大的挠度（位移）。

(1) 平膜片。常用的平膜片为圆平膜片，简称圆模，如图 1.22 所示。圆膜在压力作用下，中心挠度（位移）最大，且当膜片中心的最大挠度远远小于膜片的厚度时，膜片的中心挠度正比于压力。当膜片中心的最大挠度大于或等于膜片的厚度时，圆膜中心的位移与压力间呈非线性关系。为了减小非线性，位移量应当比膜片的厚度小得多。

(2) 波纹膜片。波纹膜片是一种压有环状同心波纹的圆形薄板，一般用于测量压力（或压差），为了增加膜片中心的位移，可把两个膜片焊在一起，制成膜盒，它的位移为单个膜片的两倍。如果需要得到更大的位移，则可把数个膜盒串联成膜盒组。

波纹膜片的形状可以做成多种形式，通常采用正弦形、梯形、锯齿形。膜片的轴向截面如图 1.23 所示，为了便于与其他零件相连接，在膜片中央留有一个光滑部分，有时还在中心焊上一块金属片，称为膜片的硬心。

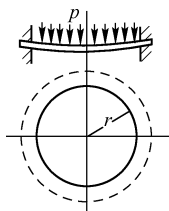


图 1.22 圆膜示意图

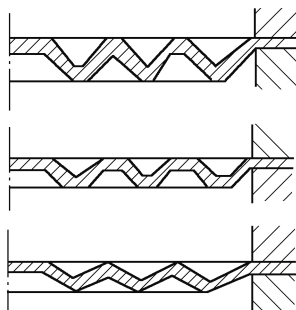


图 1.23 膜片的轴向截面

在一定的压力作用下，正弦形波纹膜片给出最大的挠度；锯齿形波纹膜片给出最小的挠度，但它的特性比较接近于直线；梯形波纹膜片的特性介于上述二者之间。

## 6. 波纹管

波纹管是一种表面上有许多同心环状波形皱纹的薄壁圆管，如图 1.24 所示。在流体压力或轴向力的作用下，将产生伸长或缩短；在横向力的作用下，波纹管将在平面内弯曲。金属波纹管的轴向容易变形，即灵敏度非常好，在变形量允许的情况下，压力或轴向力的变化与

伸缩量是成比例的，所以利用它可把压力或轴向力转换为位移。

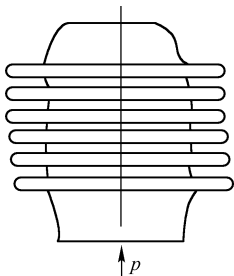


图 1.24 波纹管

## 小 结

测量就是通过实验对客观事物取得定量数值的过程。

测量方法有多种不同的分类方法：直接测量、间接测量与联立测量，偏差式测量、零位式测量和微差式测量。

测量误差是客观存在的。测量误差可用绝对误差、相对误差和引用误差表示。按照误差的表现规律，主要包括系统误差和随机误差。系统误差是有规律的，是可以预测并消除的；随机误差大多服从正态分布规律，从理论上可以估计随机误差对测量结果的影响。

传感器是能够感觉外界信息并按一定规律将这些信息转换成可用的输出信号的器件或装置。一般由敏感元件、转换元件和转换电路三部分组成。有时还要加上辅助电源。

传感器的静态特性反映了输入信号处于稳定状态时的输出与输入关系。衡量静态特性的主要指标有精确度、稳定性、灵敏度、线性度、迟滞和可靠性等。

传感器的动态特性是指传感器对于随时间变化的输入信号的响应特性。时域分析主要讨论传感器在单位阶跃输入下的响应，主要从稳定性、准确性和快速性三方面衡量；频域分析则是讨论传感器在正弦输入下的稳态响应，并着重从系统的幅频特性和相频特性来分析。

传感器技术是现代科技的前沿技术，是衡量一个国家科技发展水平的主要标志之一。21世纪传感器发展的总趋势是微型化、多功能化、集成化、数字化、智能化、网络化和系统化。

## 思考与练习

1. 什么是仪表的基本误差？它与仪表的精度等级是什么关系？
2. 什么是测量误差？测量误差有几种表示方法？各有什么用途？
3. 误差按照表现出来的规律主要分为哪几种？它们各有什么特点？它们与准确度和精密度的关系是什么？
4. 某电压表刻度为  $0 \sim 10\text{V}$ ，在  $5\text{V}$  处标准仪表示值为  $4.995\text{V}$ ，求在  $5\text{V}$  处的绝对误差、相对误差及引用误差。
5.  $0.1$  级量程为  $10\text{A}$  电流表经标定，最大绝对误差为  $8\text{mA}$ ，问该表是否合格？
6. 工艺要求检测温度指标为  $(300 \pm 6)^\circ\text{C}$ ，现拟用一台  $0 \sim 500^\circ\text{C}$  的温度表检测该温度，试

选择该表的精度等级。

7. 使用一只 0.2 级、量程为 10V 的电压表，测得某一电压为 5.0V，试求此测量值可能出现的绝对误差和相对误差的最大值。

8. 现对一个量程为 100mV、表盘为 100 等分刻度的毫伏表进行校准，测得数据如表 1.6 所示。

表 1.6 测量数据

仪表刻度值/mV	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
标准仪表示值/mV	0.0	9.9	20.2	30.4	39.8	50.2	60.4	70.3	80.0	89.7	100.0
绝对误差/mV											
修正值/mV											

试将各校准点的绝对误差和修正值填入表 1.6 中，并确定该毫伏表的精度等级。

9. 用温度传感器对某温度进行 12 次等精度测量，测量数据（单位：℃）如下：

20.46、20.52、20.50、20.52、20.48、20.47、20.50、20.49、20.47、20.49、20.51、20.51

要求对该组数据进行分析整理，并写出最后结果。

10. 已知对某电压的测量值  $U \sim N(50V, 0.04V^2)$ ，若要求置信概率达到 50%，求相应的置信区间。

11. 设用某压力表对容器内的压力进行了 14 次等精度测量，获得测量数据（单位：MPa）如表 1.7 所示。

表 1.7 测量数据

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$x$	1.13	1.07	1.08	1.13	1.14	1.09	1.08	1.07	1.09	1.12	1.08	1.10	1.11	1.10

试对该测量数据进行处理，并写出最后结果。

12. 被测温度为 400℃，现有量程为 0～500℃、精度为 1.5 级和量程为 0～1 000℃、精度为 1.0 级的温度仪表各一块，问选用哪块仪表测量更好一些？为什么？

13. 什么是传感器？传感器一般由哪几部分组成？传感器有哪些分类方法？

14. 什么是传感器的静态特性？传感器静态特性的技术指标及各自的定义是什么？

15. 什么是传感器的动态特性？传感器动态特性的分析方法有哪几种？其技术指标及各自的定义是什么？

16. 为什么在研究传感器的动态特性时常用的标准输入信号是正弦信号和阶跃信号？

17. 甲、乙二人分别用不同的方法对同一电感进行多次测量，结果如下（假设均无粗大误差和系统误差）：

甲  $x_1$  (mH): 1.28 1.31 1.27 1.26 1.19 1.25

乙  $x_2$  (mH): 1.29 1.23 1.22 1.24 1.25 1.20

写出测量结果表达式，评价哪个人的测量精密度高。

18. 对某量进行 5 次等精度测量，获得测量数据为 29.18、29.24、29.27、29.25、29.26，求算术平均值  $\bar{X}$  及最佳估计值。