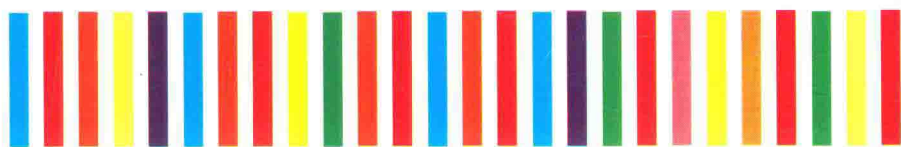




高职高专国家示范性院校课改教材

传感器与 自动检测技术

CHUANGANQI YU ZIDONG JIANCE JISHU



① 主编 程月平



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高职高专国家示范性院校课改教材

传感器与自动检测技术

主 编 程月平
副主编 方 波
参 编 鲍 方 徐群丽 朱晓玲

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书根据高职高专教育的特点,以职业岗位核心能力为目标,精选教学内容,力求内容新颖、叙述简练、学用结合。

本书按照传感器的物理和化学效应,以传统的变阻式、电阻式、热电式、光电式、电动势式、环境测量、数字式以及新型传感器为单元,以效应原理、电路处理、应用实例为步骤讲解各种传感器在实际工作中的应用,书中通过实验帮助学生加深对传感器知识的理解,并结合工程实际,讲解了检测技术的基础知识和测量信号的基本处理技术;联系现实生活,讲解了传感器在家电、汽车中的综合应用;通过单元实训指导增强学生的实践动手能力。

本书可作为高职高专和成人高校的电气自动化技术、生产过程自动化技术、应用电子技术、机电一体化技术、楼宇智能化技术以及相关专业的教材,也可供自动化技术相关领域的从业人员参考。

★本书配有电子教案,需要的教师可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与自动检测技术/程月平主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2016.4

高职高专国家示范性院校课改教材

ISBN 978-7-5606-3907-9

I. ①传… II. ①程… III. ①传感器—高等职业教育—教材②自动检测—高等职业教育—教材
IV. ①TP212②TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 034795 号

策划编辑 秦志峰

责任编辑 南 景 秦志峰

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2016年4月第1版 2016年4月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 16.5

字 数 389千字

印 数 1~3000册

定 价 32.00元

ISBN 978-7-5606-3907-9/TP

XDUP 4199001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

前 言

本书是根据高职高专教学改革“淡化理论，够用为度，培养技能，重在运用，能力本位”的指导思想编写而成的。本书针对高等职业教育的特点，以岗位核心能力为目标，精选教学内容，力图使高职高专自动化类专业的学生在学完“传感器与自动检测技术”课程后，能掌握生产一线技术人员和运行人员必须具备的传感器与检测技术的基本知识及基本应用技能。

本书在传感器技术的讲解中，着重提炼出各种传感器的规律性内容，按照传感器的物理或化学效应讲解其工作原理，并将它作为理解其他内容的基础；通过对信号电路的讲解，使学生熟悉传感器的使用方式和方法；通过应用实例为学生打开运用传感器的思路；通过做实验使学生加深对传感器知识的理解。本书在检测技术的讲解中，主要介绍了检测技术的基本知识和检测装置的信号处理技术，以期学生在应用中遇到类似问题时能够找到解决方法。书中还密切联系生活实际，介绍了传感器的综合应用，以开阔学生的视野和思路；实训指导部分则利用平台，通过选择元器件进行自主设计、制作、调试和维修等，加强对学习知识的综合运用，培养学生的创新性，也是一种对职业能力的锻炼。

本书的主要特点在于结合实际来提高高职高专学生的知识水平和解决实际问题的能力，压缩了大量的理论推导，通过实验、实训增强动手能力，充分突出了高职高专教材的实用性。在取材方面，既考虑了传感器和检测技术日新月异的发展趋势，又考虑了目前高职高专学生的学习基础和特点，使得本书既有深度又有广度。

本书各章具有一定的独立性，因此在教学中，教师可以根据专业方向和特点选用不同的章节。

本书由武汉职业技术学院程月平编写第1、5、6、7、11、12章及附录并统稿，武汉职业技术学院方波编写第2、3、4、10章，武汉职业技术学院朱晓玲编写第8章，湖北城市建设职业技术学院徐群丽编写第9章，实验由武汉职业技术学院鲍方编写。

本书在编写过程中，得到了武汉职业技术学院其他老师的帮助与支持，还参考和应用了许多专家、学者的著作，在此一并表示衷心的感谢！

由于作者的水平有限，本书在内容选择和安排上，可能存在遗漏和不妥之处，诚请读者批评指正。

编 者

2015年12月

目 录

第 1 章 传感器与检测技术基础知识	1	2.2.6 差动螺管式电感传感器位移测量 实验	31
1.1 传感器基础知识	1	2.3 电涡流式传感器	32
1.1.1 传感器的组成与分类	1	2.3.1 电涡流式传感器的工作原理	32
1.1.2 传感器的基本特性	1	2.3.2 电涡流式传感器的结构类型及特性	33
1.2 检测技术基础知识	5	2.3.3 电涡流式传感器的测量转换电路	35
1.2.1 检测系统的组成与功能	5	2.3.4 电涡流式传感器的应用	36
1.2.2 测量的方法	5	2.3.5 电涡流式传感器的应用实例	38
1.2.3 测量误差的分类	6	2.3.6 电涡流式传感器的振幅测量实验	39
1.2.4 测量误差的表示方法	7	2.4 电容式传感器	39
1.2.5 测量误差的处理	8	2.4.1 电容式传感器的工作原理	40
1.3 检测系统中的弹性敏感元件	10	2.4.2 电容式传感器的结构类型及特性	40
1.3.1 弹性敏感元件的基本特性	10	2.4.3 电容式传感器的测量转换电路	42
1.3.2 弹性敏感元件的形式及应用范围	10	2.4.4 电容式传感器的应用	44
1.4 传感器的标定与选择	14	2.4.5 电容式传感器的应用实例	46
1.4.1 传感器的标定与校准	14	2.4.6 电容式传感器的特性	47
1.4.2 传感器的选择	14	本章小结	48
本章小结	15	思考题与习题	48
思考题与习题	16	第 3 章 电阻式传感器	50
第 2 章 变阻抗式传感器	17	3.1 应变式传感器	50
2.1 自感式传感器	17	3.1.1 应变式传感器的工作原理	50
2.1.1 自感式传感器的工作原理	17	3.1.2 应变片的结构类型及特性	51
2.1.2 自感式传感器的结构类型及特性	18	3.1.3 应变式传感器的测量转换电路	52
2.1.3 自感式传感器的测量转换电路	19	3.1.4 应变式传感器的使用注意事项	53
2.1.4 自感式传感器的应用	21	3.1.5 应变式传感器的应用	54
2.2 差动变压器	23	3.1.6 应变式传感器的应用实例	55
2.2.1 差动变压器的工作原理及输出特性	23	3.1.7 金属箔式应变片单臂电桥实验	57
2.2.2 差动变压器的基本特性	25	3.2 压阻式传感器	58
2.2.3 差动变压器的测量转换电路	25	3.2.1 压阻式传感器的工作原理	58
2.2.4 差动变压器的应用	26		
2.2.5 差动变压器的应用实例	28		

3.2.2	压阻式传感器的结构与特性	59	5.2.4	光敏电阻特性实验	97
3.2.3	压阻式传感器的测量转换电路	60	5.2	光纤传感器	97
3.2.4	压阻式传感器的温度补偿	61	5.2.1	光纤及其传光原理	98
3.2.5	压阻式传感器的应用	62	5.2.2	光纤传感器的组成及分类	100
3.2.6	压阻式传感器的应用实例	63	5.2.2	光纤式传感器应用技术	101
3.2.7	扩散硅压阻式压力传感器实验	65	5.2.3	光纤位移传感器——位移测量	104
本章小结		66	5.3	激光传感器	106
思考题与习题		66	5.3.1	激光的本质	106
第4章 热电式传感器		67	5.3.2	激光的形成	107
4.1	热电阻式传感器	67	5.3.3	激光的特点	108
4.1.1	常用热电阻	67	5.3.4	激光器的种类	109
4.1.2	热电阻传感器的测量电路和应用	69	5.3.5	激光传感器的应用	110
4.1.3	热电阻传感器的应用实例	69	5.4	图像传感器	112
4.1.4	热敏电阻	70	5.4.1	CCD 图像传感器	112
4.1.5	热敏电阻传感器的应用	71	5.4.2	CMOS 图像传感器	117
4.1.6	热敏电阻传感器的应用实例	72	5.4.3	CCD 摄像法的应用——莫尔条纹计数	121
4.1.7	热敏式传感器测温度	73	本章小结		122
4.2	热电偶传感器	74	思考题与习题		122
4.2.1	热电偶传感器的工作原理	74	第6章 电动势传感器		123
4.2.2	热电偶的结构形式与材料	76	6.1	压电式传感器	123
4.2.3	热电偶的冷端补偿	78	6.1.1	压电式传感器的工作原理	123
4.2.4	热电偶测温电路	80	6.1.2	压电式传感器及其等效电路	126
4.2.5	热电偶传感器的应用实例	80	6.1.3	压电式传感器的测量电路	128
4.2.6	热电偶测温实验	81	6.1.4	压电式传感器的应用	130
4.3	PN 结温度传感器	82	6.1.5	压电加速度传感器特性实验	133
4.3.1	PN 结温度传感器的工作原理	82	6.2	霍尔传感器	134
4.3.2	PN 结温度传感器的应用	83	6.2.1	霍尔元件的基本工作原理	134
4.3.5	PN 结温度传感器的应用实例	84	6.2.2	霍尔元件的测量电路和误差分析	136
4.3.6	PN 结集成温度传感器测温实验	87	6.2.3	霍尔元件的使用	137
本章小结		88	6.2.4	霍尔元件的应用	140
思考题与习题		88	6.2.5	霍尔传感器的直流激励特性	143
第5章 光电式传感器		89	本章小结		144
5.1	光电效应与光电元件	89	思考题与习题		144
5.1.1	光电效应	89	第7章 环境量检测传感器		145
5.2.2	光电元件	90	7.1	气敏传感器	145
5.2.3	光电传感器的应用实例	96			

7.1.1	气敏传感器的类型与特性	145	8.4.2	感应同步器的结构与工作原理	180
7.1.2	气敏传感器的工作原理	146	8.4.3	感应同步器的应用技术	184
7.1.3	气敏传感器的应用技术	148	8.4.4	感应同步器的应用实例	187
7.1.4	气敏传感器的选择	150	本章小结		188
7.1.5	气敏传感器的应用实例	150	思考题与习题		188
7.1.6	气敏传感器的实验	152	第9章 新型传感器		189
7.2	湿度传感器	153	9.1	机器人传感器	189
7.2.1	湿度的定义及湿度传感器的特性	153	9.1.1	机器人传感器的分类	189
7.2.2	湿度传感器的工作原理	154	9.1.2	常用的机器人传感器	190
7.2.3	湿度传感器的应用技术	155	9.1.3	机器人传感器的应用	196
7.2.4	湿度传感器的选择	156	9.2	生物传感器	198
7.2.5	湿度传感器的应用实例	157	9.2.1	生物传感器的分类	198
7.2.6	湿度传感器的实验	159	9.2.2	常用的生物传感器	198
本章小结		160	9.2.3	生物传感器的应用	200
思考题与习题		160	本章小结		202
第8章 数字式传感器		161	思考题与习题		203
8.1	光栅传感器	161	第10章 检测系统的信号处理技术		204
8.1.1	光栅传感器的类型与特性	161	10.1	信号处理技术	204
8.1.2	光栅的结构与测量原理	161	10.1.1	传感器信号的预处理	204
8.1.3	光栅传感器应用技术	163	10.1.2	信号放大技术	206
8.1.4	光栅传感器的选择	166	10.2	干扰抑制技术	209
8.1.5	光栅传感器的应用实例	166	10.2.1	干扰的来源	209
8.1.6	光栅传感器——莫尔条纹原理实验	167	10.2.2	信噪比和电磁兼容性	210
8.2	磁栅传感器	168	10.2.3	电磁干扰的途径	211
8.2.1	磁栅传感器及特性	168	10.2.4	抑制电磁干扰的基本措施	212
8.2.2	磁栅的结构与工作原理	168	10.2.5	抗电磁干扰技术(电磁兼容控制技术)	213
8.2.3	磁栅传感器应用技术	171	10.3	传感器的非线性补偿	217
8.2.4	磁栅传感器的应用实例	172	10.3.1	非线性补偿环节特性的获取方法	217
8.3	光电编码器	173	10.3.2	非线性补偿环节的实现方法	218
8.3.1	光电编码器的分类及其特性	173	本章小结		221
8.3.2	光电编码器的工作原理	173	思考题与习题		222
8.3.3	光电编码器的应用技术	175	第11章 传感器的综合应用		223
8.3.4	光电编码器的选择	177	11.1	传感器在家用电器中的应用	223
8.3.5	光电编码器的应用实例	177	11.1.1	洗衣机中所用的传感器	223
8.4	感应同步器	179	11.1.2	控制燃烧过程的传感器	228
8.4.1	感应同步器及其特性	179	11.1.3	小型家电中的传感器	229
			11.2	传感器在汽车工业中的应用	229
			11.2.1	曲轴转角及转速传感器	230
			11.2.2	车速传感器	231
			11.2.3	液位传感器	232

11.2.4 空气流量传感器	233	12.4 简易数字式血压计	244
11.2.5 温度传感器	235	本章小结	245
11.2.6 汽车用压力传感器	235	思考题与习题	245
11.2.7 爆燃传感器	236	附录	246
本章小结	237	附录 1 几种常用传感器性能比较	246
思考题与习题	237	附录 2 工业热电阻分度表	247
第 12 章 单元实训指导	238	附录 3 镍-镍硅(镍铝)K 型热电偶分度表	249
12.1 液体点滴速度监控装置	238	附录 4 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	251
12.2 自动抽水系统	241	参考文献	256
12.3 电风扇温控开关电路	243		

第1章 传感器与检测技术基础知识

本章首先介绍了传感器与检测技术的基础知识,然后阐述了检测系统中的非电量与非电量转换元件(弹性敏感元件)以及传感器的选择原则,通过这些内容使读者对传感器与自动检测技术中涉及的一些基本概念有一定了解。

1.1 传感器基础知识

1.1.1 传感器的组成与分类

传感器的组成框图如图1-1所示。传感器由敏感元件和转换元件组成。其中,敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件是指传感器中将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号的部分。由于传感器的输出信号一般都很微弱,通常需要信号调理转换电路对输出信号进行放大、运算调制等。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用,传感器的信号调理转换电路可能安装在传感器的壳体里,或与敏感元件一起集成在同一芯片上。此外,信号调理转换电路以及传感器工作必须有辅助的电源,因此,信号调理转换电路以及所需的电源都应作为传感器组成的一部分。

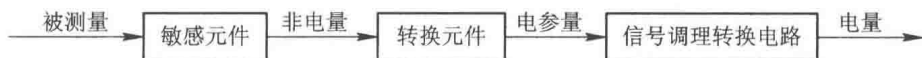


图 1-1 传感器的组成框图

传感器的种类繁多,分类方法也很多,目前一般采用两种分类方法。一是按传感器的工作原理进行分类,如应变式、电容式、压变式、磁电式等;二是按被测参数进行分类,如温度、压力、位移、速度等被测量。

1.1.2 传感器的基本特性

在生产过程和科学实验中,要对各种参数进行检测和控制,就要求传感器能感受被测非电量的变化并将其不失真地变换成相应的电量,这取决于传感器的基本特性,即输出-输入特性。

如果把传感器看做二端口网络,即有两个输入端和两个输出端,那么传感器的输出-输入特性就是与其内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来分别描述。

1. 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时的输出-输入关系。只考虑传感器的静态特性时,输入量与输出量之间的关系式中不含有时间变量。

1) 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。

输出与输入的关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看，希望具有线性关系，即具有理想的输出-输入关系。但实际遇到的传感器大多为非线性的，如果不考虑迟滞和蠕变等因素，传感器的输出与输入关系可用一个多项式表示：

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \tag{1-1}$$

式中： a_0 为输入量 x 为零时的输出量； a_1, a_2, \dots, a_n 为非线性项系数。

可见，各项系数不同，决定了特性曲线的具体形式各不相同。

静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际使用中，为了标定和数据处理的方便，希望得到线性关系，因此引入各种非线性补偿环节。例如，采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理，从而使传感器的输出与输入关系为线性的或接近线性的。

如果传感器非线性的方次不高，输入量变化范围较小，则可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段，如图 1-2 所示，使传感器的输出-输入特性线性化，所采用的直线称为拟合直线。

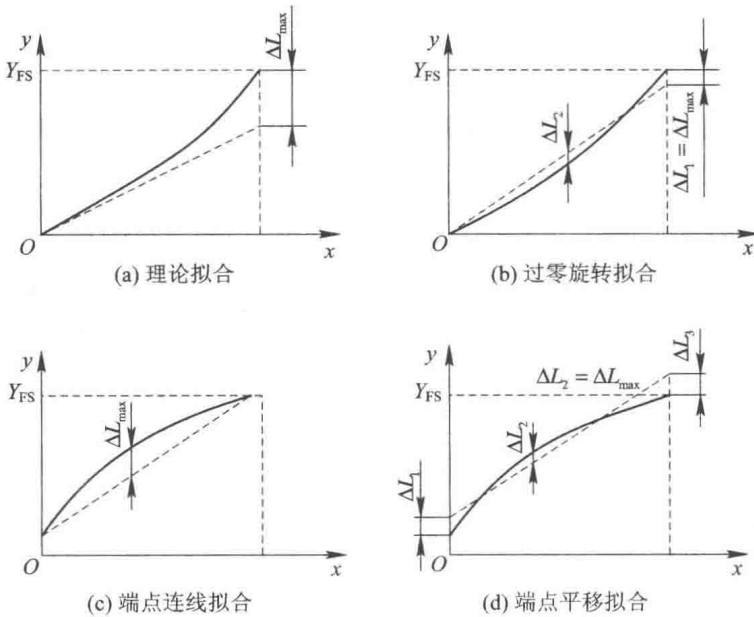


图 1-2 几种直线拟合方法

实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差(或线性度)，通常用相对误差 γ_L 表示，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{1-2}$$

式中： ΔL_{\max} 为最大非线性绝对误差； Y_{FS} 为满量程输出。

由图 1-2 可见，即使是同类传感器，拟合直线不同，其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多，用最小二乘法求取的拟合直线其拟合精度最高。

2) 灵敏度

灵敏度 S 是指传感器的输出量增量 Δy 与引起输出量增量的输入量增量 Δx 的比

值,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-3)$$

式中: S 为灵敏度; Δy 为传感器的输出量增量; Δx 为输入量增量。

对于线性传感器,它的灵敏度就是其静态特性的斜率,即 S 为常数。对于非线性传感器,它的灵敏度 S 为一变量,用下式表示:

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (1-4)$$

传感器的灵敏度如图 1-3 所示。

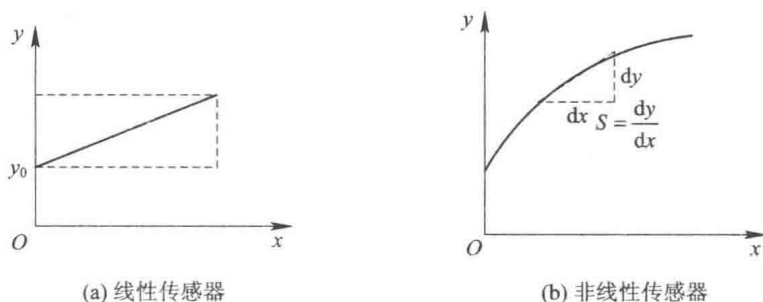


图 1-3 传感器的灵敏度

3) 迟滞现象

传感器在正行程(输入量增大)和反行程(输入量减小)期间其输出-输入特性曲线不重合的现象称为迟滞现象,如图 1-4 所示。也就是说,对于同一大小的输入信号,传感器的正反行程输出信号大小不相等。

产生这种现象的主要原因是由传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷所造成的,如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

迟滞大小通常由实验确定。迟滞误差可由下式计算:

$$\gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中: γ_H 为迟滞误差; ΔH_{\max} 为正反行程输出值间的最大差值; Y_{FS} 为全量程的输出值。

4) 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度,如图 1-5 所示。

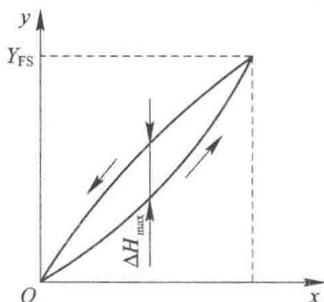


图 1-4 迟滞现象

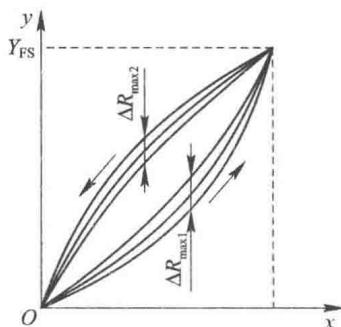


图 1-5 重复性特性图

重复性误差 γ_R 属于随机误差，常用标准偏差表示，也可用正反行程中的最大偏差表示，即

$$\gamma_R = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中： γ_R 为重复性误差； ΔR_{\max} 为正反行程中的最大偏差； Y_{FS} 为全量程的输出值。

2. 传感器的动态特性

在动态(快速变化)输入信号的情况下，要求传感器不仅能精确地测量信号的幅值大小，而且能测量出信号变化的过程。这就要求传感器能迅速准确地响应和再现被测信号的变化。传感器的动态特性，是指在测量动态信号时传感器的输出反映被测量的大小和随时间变化的能力。动态特性差的传感器在测量过程中，将会产生较大的动态误差。

具体研究传感器的动态特性时，通常从时域和频域两方面，分别采用瞬态响应法和频率响应法来分析。最常用的是通过几种特殊的输入时间函数，例如阶跃函数和正弦函数来研究其响应特性，称为阶跃响应法和频率响应法。在此仅介绍传感器的阶跃响应特性。

给传感器输入一个单位阶跃函数信号：

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

其输出特性称为阶跃响应特性，如图 1-6 所示。由图 1-6 可看出衡量阶跃响应的几项指标的含义。

- (1) 时间常数 τ ：传感器输出值上升到稳态值 γ_c 的 63.2% 所需的时间。
- (2) 上升时间 t_r ：传感器输出值由稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间。
- (3) 响应时间 t_s ：输出值达到允许误差范围 $\pm \Delta\%$ 所经历的时间。
- (4) 超调量 α ：输出第一次超过稳值的峰高，即 $\alpha = \gamma_{\max} - \gamma_c$ ，常用 $(\alpha/\gamma_c) \times 100\%$ 表示。
- (5) 延迟时间 t_d ：响应曲线第一次达到稳定值的一半所需的时间。
- (6) 衰减度 ψ ：指相邻两个波峰(或波谷)高度下降的百分数，即 $(\alpha - \alpha_1)/\alpha \times 100\%$ 。

其中，时间常数 τ 、上升时间 t_r 、响应时间 t_s 表征系统的响应速度性能；超调量 α 、衰减度 ψ 则表征传感器的稳定性能。通过响应速度和稳定性能两个方面即可完整地描述传感器的动态特性。

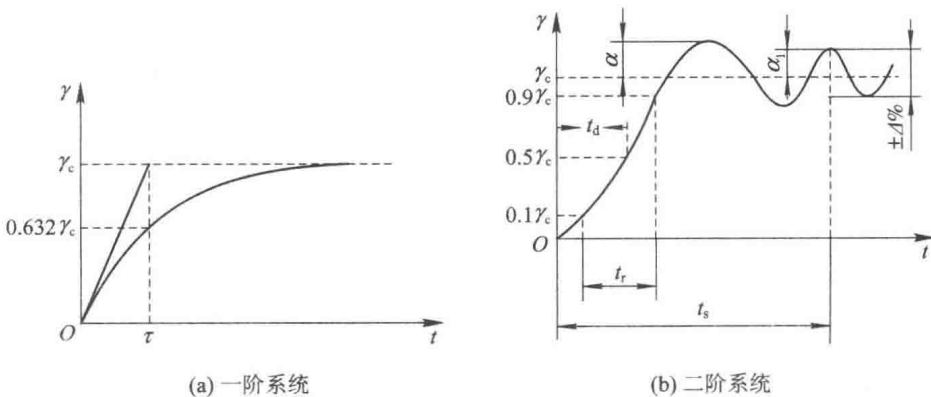


图 1-6 传感器阶跃响应特性

1.2 检测技术基础知识

1.2.1 检测系统的组成与功能

以计算机技术广泛应用为标志的现代检测系统已经比较普及,其主要组成部分如图1-7所示。

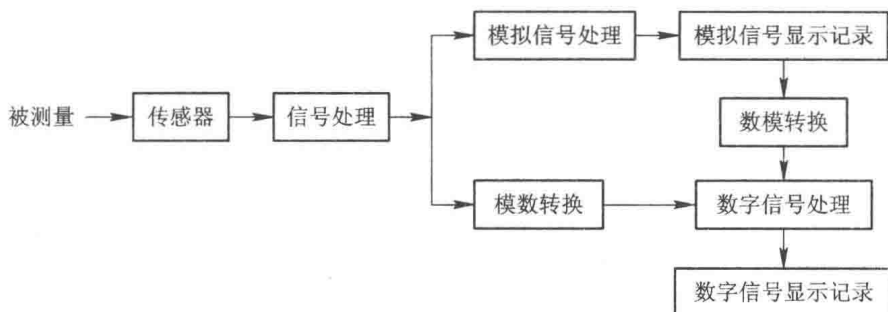


图 1-7 现代检测系统的组成

1.2.2 测量的方法

测量是人们借助于仪器、设备,通过一定的方法,对被测对象进行定性认识或者定量认识的过程。所谓定性认识,就像用验电笔测试电源插孔是否有电,是指大致判断被测量存在还是不存在。所谓定量认识,就像用万用表去测量电源插孔间的电压值,能够得到一个比较准确的数值。

测量过程实际上是一个比较过程,即将被测量与同一性质的标准量进行比较,从而确定被测量与标准量比值的过程。例如,用直尺与直立人体进行比较,可以确定人体的身高。在一般情况下,测量过程中需要将测量与标准量同时转换为另一种性质的中间量才能进行比较。转换将静态测量变成了动态测量。例如,万用表是将被测电流、被测电压或被测电阻转换为指针的角位移,与刻度盘上的标定值进行比较后,确定出被测量的数据。由此可见,测量的概念是与被测量转换的概念密不可分的,检测技术正是从这一重要现象出发而逐步发展与完善起来的。

实现被测量与标准量比较,并得出比值的方法,称为测量方法。针对不同测量任务进行具体分析以找出切实可行的测量方法,对测量工作十分重要。测量方法从不同角度有不同的分类方法。测量方法根据测量过程的特点,可分为直接测量、间接测量与组合测量;根据测量的精度因素,可分为等精度测量与非等精度测量;根据测量仪器的特点,可分为接触测量与非接触测量;根据测量对象的特点,可分为静态测量与动态测量。

1. 直接测量、间接测量与组合测量

(1) 直接测量。在使用传感器或仪表对被测量进行测量时,仪表读数不需要经过任何运算就能直接表示测量所需结果的测量方法称为直接测量。如用磁电式电流表测量电路的某一支路电流、用弹簧管压力表测量压力等,都属于直接测量。直接测量的优点是测量过程既简单又快捷,缺点是测量精度不高。

(2) 间接测量。在使用传感器或仪表对被测量进行测量时, 首先对与测量有确定关系的几个量进行测量, 将被测量代入关系式, 经过计算得到所需要的结果, 这种测量方法称为间接测量。间接测量过程较多, 时间较长, 常用于不方便进行直接测量的场合。

(3) 组合测量。被测量要经过解联立方程组, 才能得到最后的结果, 这样的测量方法称为组合测量。组合测量是一种特殊的精度测量方法, 由于操作手续复杂、时间长, 多用于科学实验中和一些特殊的场合。

2. 等精度测量与非等精度测量

(1) 等精度测量。用相同仪器和相同测量方法对同一被测量进行的多次重复测量, 称为等精度测量。

(2) 非等精度测量。用不同的仪表和不同的测量方法或在不同的环境条件下对同一被测量进行的多次重复测量, 称为非等精度测量。

3. 接触测量与非接触测量

(1) 接触测量。传感器直接与被测对象接触, 感受被测量的变化, 从而获取信号, 并测量出其大小的方法, 称为接触测量。

(2) 非接触测量。传感器不直接与被测对象接触, 而是间接感受被测量的变化, 从而获取信号, 并测量出其大小的方法, 称为非接触测量。

4. 静态测量与动态测量

(1) 静态测量。被测对象的大小不随时间的变化而变化, 处于稳定状态下进行的测量方法, 称为静态测量。

(2) 动态测量。被测对象的大小跟随时间的变化而变化, 处于非稳定状态下进行的测量方法, 称为动态测量。

1.2.3 测量误差的分类

测量的目的是为了求取被测量的真值, 即在一定条件下, 被测量客观存在的实际值。在测量过程中由于受到各种主客观条件的制约, 如用于测量的仪器设备不够精确、测量方法不够完善、操作者缺乏经验等, 测量结果与被测量的实际值之间总是存在有一定的偏差, 此偏差称为测量误差。通过对测量误差的研究, 可以分析测量误差产生的原因, 并采取相应的措施克服误差, 或将误差控制在允许的范围之内。测量误差若按误差的性质进行分类, 通常分为系统误差、随机误差与粗大误差。

1. 系统误差

系统误差是指在同一条件下, 对同一被测量重复多次测量时, 保持不变或具有确定变化规律的误差。引起系统误差的原因主要在检测系统的内部, 一是仪器的精度不够; 二是使用的测量方法不当; 三是测量原理不完善; 四是检测系统所处的环境不理想。由于系统误差是恒定的或是有规律可循的, 因此在认真分析产生系统误差原因的基础上通过实验方法或引入修正值加以消除, 可使测量结果尽量接近真值, 以提高测量结果的精度。

2. 随机误差

随机误差是指在同一条件下, 对同一被测量重复多次测量时, 大小和符号都发生变化而且没有规律可循的误差。随机误差往往是由于偶然因素的影响而随机产生的, 因而不能用实验方法或引入修正值加以消除, 也不可避免, 但可以通过数理统计的方法来减少其产

生的影响。随机误差能够反映测量结果的分散程度，通常称为精密度。随机误差越小，说明多次测量时的分散性越小，精密度越高。应当指出，一个精密的测量结果却有可能是 inaccurate 的，因为它包括了系统误差。一个既精密又准确的测量结果，才能比较全面地反映检测的质量。检测技术中，用精准度(简称精度，它从精密度和准确度中各取一字)反映精密度和准确度的综合结果。图 1-8 所示的射击例子有助于加深对准确度、精密度和精准度三个概念的理解。

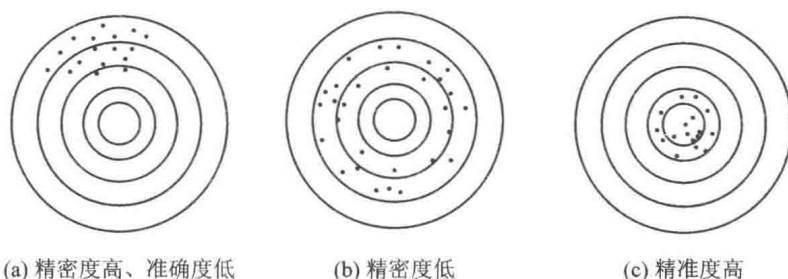


图 1-8 准确度、精密度和精准度示意图

3. 粗大误差

粗大误差是指明显偏离测量结果的误差，又称过失误差。引起粗大误差的根本原因主要是测量人员操作失误、读错数值、记错数值，也完全没有规律。另外，当测量方法失当，测量条件突然发生变化时，也可能引起粗大误差。在分析测量结果时，应首先分析是否存在粗大误差，当发现有粗大误差的测量值时应及时去除，然后再对随机误差和系统误差进行分析。

1.2.4 测量误差的表示方法

测量误差有绝对误差与相对误差两种表示方法。

1. 绝对误差

绝对误差 ΔX 是指测量值 A_X 与约定真值 A_0 之间的差值，可用下式表示：

$$\Delta X = A_X - A_0 \quad (1-8)$$

绝对误差可以直接反映测量结果与真值之间的偏差值，但不可作为测量精度的指标。例如，在两次测量电压时，绝对误差都是 $\Delta X = 0.2 \text{ mV}$ ，当测量值 A_X 为 1 V 时，可以认为误差是很小的，精度是很高的；当测量值 A_X 为 1 mV 时，就不能认为误差还是很小，精度还是很高，而是误差很大，精度很低。

2. 相对误差

绝对误差不能作为完全反映测量值精度的指标，相对误差则完全可以。相对误差有三种表示方法：

(1) 实际相对误差 γ_A 。实际相对误差用绝对误差对约定真值 A_0 的百分比表示，即

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

(2) 示值相对误差 γ_X 。示值相对误差用绝对误差 ΔX 对测量值 A_X 的百分比表示，即

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{A_X} \times 100\% \quad (1-10)$$

(3) 满度相对误差 γ_m 。满度相对误差用绝对误差 ΔX 对测量仪器满度值 A_m 的百分比

表示,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{A_m} \times 100\% \quad (1-11)$$

满度相对误差是最常用的一种相对误差的表示方式。我国的电工仪表精度分为 7 级,而其精度等级 S 的确定是利用最大满度相对误差得到的,即

$$S = \frac{|\Delta X_m|}{A_m} \times 100 \quad (1-12)$$

式中: ΔX_m 为绝对误差 ΔX 的最大值。

当测量仪表的下限刻度值不为 0 时, S 由下式表示:

$$S = \frac{|\Delta X_m|}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100 \quad (1-13)$$

式中: A_{\max} 为测量仪器的上限刻度值; A_{\min} 为测量仪器的下限刻度值。

电工仪表精度等级 S 规定取一系列标称值,分别称为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 级。0.5 级指该等级的电工仪器的满度相对误差的最大值不得超过 0.5%,而 5.0 级即意味该等级的电工仪器的满度相对误差的最大值不得超过 5.0%。

例 1.1 有两只电压表的精度及量程范围分别是 0.5 级 0~500 V、1.0 级 0~100 V,现要测量 80 V 的电压,试问选用哪只电压表较好。

解 用最大示值相对误差来比较,则

$$\begin{aligned} \gamma_{X1} &= \frac{\Delta X_{m1}}{A_x} \times 100\% = \frac{500 \times 0.5\%}{80} \times 100\% = 3.125\% \\ \gamma_{X2} &= \frac{\Delta X_{m2}}{A_x} \times 100\% = \frac{100 \times 1.0\%}{80} \times 100\% = 1.25\% \end{aligned}$$

计算结果表明,用 1.0 级电压表比用 0.5 级电压表更合适。这说明在选用电工仪表时应兼顾精度等级与量程两个方面,而不是片面追求仪表的精度等级。同时,在测量中要合理选择量程,尽量让指示值接近满量程值,以减小测量误差。

1.2.5 测量误差的处理

在测量过程中,测量误差总是不可避免地存在着。为了评价测量数据的质量,往往要对它们进行必要的处理,这就是数据处理。如前所述,系统误差是可以修正或在测量中设法消除的,因而数据处理主要是指剔除粗大误差和估算随机误差。

1. 剔除粗大误差

理论和实践证明,绝大多数测量数据的随机误差服从正态分布规律,标准误差 σ 是对正态分布曲线产生影响的唯一参数。正态分布理论中的分布范围虽为无穷大,但其实际分布范围通常取为 $\pm 3\sigma$,这是由于测量数据超出 3σ 的概率仅为 0.27%,因而一般将 $\pm 3\sigma$ 称为测量结果的极限误差。当有测量数据的剩余误差较极限误差大,则认为该数据有粗大误差存在,必须剔除。这里所谓的剩余误差是指每一个测量数据 A_i 与算术平均值 A 的差值,用 U_i 表示,表明该次测量数据对平均值的偏离程度。算术平均值是指相同的测量条件下,对同一被测量进行 n 次测量所得的数据之和与测量次数 n 的比值。

2. 估算随机误差

在实际测量中,对于某一被测值,重复测量的次数 n 是有限的。由于 n 次测量的数据

带有随机性,在算术平均值中仍然不可避免地存在着误差,因此在数据处理中,采用算术平均值的标准误差 $\bar{\sigma}$ 来评价算术平均值的精度。根据误差的有关理论, $\bar{\sigma}$ 与 σ 存在下列关系:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

这样就使随机误差减小为原来的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 。

3. 数据处理的一般步骤

(1) 计算 n 次测量数据的算术平均值 \bar{A} :

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}$$

(2) 计算标准误差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n U_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}$$

(3) 检查有无粗大误差数据。若有剩余误差超过 $\pm 3\sigma$,则剔除,然后重复以上步骤,直到无粗大误差数据存在。

(4) 计算算术平均值的标准误差:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

(5) 写出测量结果的表达式:

$$A_0 = \bar{A} \pm 3\bar{\sigma}$$

例 1.2 现对某液体测量温度 11 次,测量序号与测量数据如表 1-1 所示。

表 1-1 某液体测量温度数据

测量序号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
测量数据/ $^{\circ}\text{C}$	20.72	20.75	20.65	20.71	20.62	20.45	20.62	20.70	20.67	20.73	20.74

解 (1) 计算算术平均值:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = 20.67 (^{\circ}\text{C})$$

(2) 计算标准误差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}} = 0.086 (^{\circ}\text{C})$$

(3) 检查有无粗大误差数据。通过计算发现, A_6 的剩余误差最大, $U_6 = 0.22^{\circ}\text{C}$,而极限误差为 0.258°C ,大于 U_6 ,因而可以认为 11 个测量数据中无粗大误差数据存在。

(4) 计算算术平均值的标准误差:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 0.026 (^{\circ}\text{C})$$

(5) 写出测量结果表达式:

$$A_0 = \bar{A} \pm 3\bar{\sigma} = 20.67 \pm 0.078 (^{\circ}\text{C})$$