



高等职业教育“十一五”规划教材

自动检测 技术及应用



崔维群 刘子政 主 编
徐强珍 徐艳霞 苏建国 许 峰 副主编

本书配有
电子课件



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高等职业教育“十一五”规划教材

自动检测技术及应用

崔维群 刘子政 主编
徐强珍 徐艳霞 苏建国 许峰 副主编
王金平 主审

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书根据教育部制定的《高职高专教育传感器与检测技术教学基本要求》编写而成。

全书共 11 章,主要内容包括检测与测量技术的有关方法及传感器的基本知识,常用传感器的工作原理、基本结构、主要性能、测量电路和应用方法。同时还介绍了若干新型传感器和检测系统中的信号处理技术、干扰抑制技术。每一种传感器都有典型应用介绍,每章后面都有技能训练、小结和复习思考题。

本书取材广泛,内容丰富,深入浅出,注重实用性和实践技能的培养,可作为高等职业院校、高等专科学校和成人教育自动化类、仪器仪表类、电子类、机电及数控类、计算机类等专业的教材或参考书,也可供科研人员、工程技术人员及自学人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术及应用/崔维群,刘子政主编. —北京:国防工业出版社,2009.7

高等职业教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-06287-8

I. 自... II. ①崔...②刘... III. 自动检测 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 073272 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

鑫马印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 428 千字

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

当今社会已经步入信息化社会,作为信息获取渠道的传感器和自动检测技术备受重视。随着传感器和自动检测技术的飞速发展,其应用领域已经深入到社会生活的各个方面。因此,在当今信息时代掌握传感器及检测技术尤为重要。

本书是根据教育部积极发展高等职业教育及大力推进高等专科教育人才培养模式改革的精神,按照教育部制定的《高职高专教育传感器与检测技术教学基本要求》编写而成,以重点培养学生在实际工作中的基本应用能力和基本技能为目的,本着理论知识以必需、够用为度,注重知识的系统性和适用性,同时尽量反映传感器及检测技术领域内的新技术和新动向。

本书取材广泛,内容丰富,深入浅出,图文并茂,注重传感器与工程检测技术和实际应用的结合以及实践技能的培养,使教材更具广泛性和适应性,可作为高等职业院校和高等专科学校自动化类、仪器仪表类、电子类、机电及数控类、计算机类等专业的教材,也可作为相近专业师生及有关工程技术人员的参考用书。

全书共分 11 章,主要内容有:检测与测量技术的有关方法及传感器的基本知识;电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、热电偶传感器、光电传感器、压电传感器、数字式传感器以及磁敏传感器等常用传感器的工作原理、基本结构、主要性能、测量电路、使用方法及典型应用;超导、生物和智能传感器的原理、分类及典型应用;传感器与自动检测系统的信号处理及抗干扰技术。为了增强学生的感性认识,书中附有大量的传感器实物图片及应用图片。另外,为了加强学生的实践技能和对所学知识掌握的牢固性和系统性,每章后面均有技能训练、内容总结和复习思考题。

本书由崔维群、刘子政担任主编,王金平担任主审。第 1 章由刘子政编写,第 2 章由刘昌华编写,第 3 章由许峰编写,第 4 章和第 9 章的部分内容由徐艳霞编写,第 5 章由徐强珍编写,第 6 章和第 9 章的部分内容由秦永生编写,第 7 章由苏建国编写,第 8 章由崔维群编写,第 10 章由赵南编写,第 11 章由应文博编写。另外,王书平、申加亮、黄萌、宋凡峰、闫廷光、王纬、王妍以及王有明(工程师)、刘升(工程师)等参与了部分文稿的编写和资料整理工作。最后,由崔维群完成了全书的统稿工作。

本书在编写过程中,参考了有关文献,并引用了其中的一些资料,在此谨向有关作者和单位表示衷心感谢!同时本书在编写过程中还得到了山东水利职业学院、山东科技职业学院、沈阳农业大学高等职业技术学院、山东经贸职业学院、山东畜牧兽医职业学院的领导和老师们的大力支持和帮助,在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中错误与不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

第 1 章 传感器与检测技术基本知识	1
1.1 测量的基本概念.....	1
1.1.1 测量的分类	1
1.1.2 测量值的表示方法	1
1.2 测量误差及其分类.....	1
1.2.1 测量误差的产生原因	1
1.2.2 测量误差的分类	2
1.2.3 测量仪器的准确度	3
1.3 测量结果的数据分析及其处理.....	4
1.3.1 测量结果的数据分析	4
1.3.2 测量结果的数据处理	5
1.4 传感器及基本特征.....	7
1.4.1 传感器的作用	7
1.4.2 传感器的组成及分类	9
1.4.3 传感器的基本特性.....	11
1.4.4 传感器的发展与概况.....	13
1.4.5 传感器的选用原则.....	14
1.5 技能实训	15
1.5.1 数字万用表测电阻、二极管、电容实训.....	16
1.5.2 数字万用表测逻辑电平实训.....	18
1.5.3 数字万用表测温实训.....	19
本章小结.....	20
复习思考题.....	21
第 2 章 电阻式传感器及应用	23
2.1 电阻应变片式传感器及应用	23
2.1.1 电阻应变片结构.....	23
2.1.2 电阻应变片工作原理.....	23
2.1.3 测量转换电路.....	26
2.1.4 电阻应变片式传感器应用.....	27
2.2 电位器式传感器及应用	29

2.2.1	电位器式传感器结构	29
2.2.2	电位器式传感器工作原理	29
2.2.3	电位器式传感器应用	30
2.3	测温热电阻式传感器及应用	31
2.3.1	热电阻式传感器	31
2.3.2	热敏电阻式传感器	36
2.3.3	测温热电阻式传感器应用	40
2.4	气敏电阻传感器及应用	43
2.4.1	气敏效应机理	43
2.4.2	气敏电阻传感器结构及符号	44
2.4.3	气敏电阻传感器主要参数	45
2.4.4	气敏电阻传感器基本测量电路及使用注意事项	46
2.4.5	气敏电阻传感器应用	46
2.5	湿敏电阻传感器及应用	49
2.5.1	氯化锂湿敏电阻传感器	49
2.5.2	半导体陶瓷湿敏电阻传感器	50
2.5.3	高分子湿敏电阻传感器	52
2.5.4	湿敏电阻传感器主要特性参数	53
2.5.5	湿敏电阻传感器使用注意事项	53
2.5.6	湿敏电阻传感器应用	54
2.6	技能实训	56
2.6.1	电阻应变片粘贴实训	56
2.6.2	负温度系数热敏电阻传感器检测实训	57
2.6.3	气敏、湿敏电阻传感器检测实训	58
2.6.4	热电阻检测及故障处理实训	59
2.6.5	由气敏电阻传感器构成的酒精气味检测报警电路读图实训	60
	本章小结	61
	复习思考题	62
第3章	电感式传感器及应用	63
3.1	自感式传感器	63
3.1.1	自感式传感器的工作原理	63
3.1.2	自感式传感器的分类	64
3.1.3	自感式传感器的测量转换电路	66
3.1.4	自感式传感器应用	68
3.2	差动变压器式传感器	69
3.2.1	差动变压器式传感器的结构	69
3.2.2	差动变压器式传感器的工作原理	70
3.2.3	差动变压器式传感器的测量转换电路	71

3.2.4	差动变压器式传感器的应用	73
3.3	电涡流式传感器	74
3.3.1	电涡流式传感器的基本结构	75
3.3.2	电涡流式传感器的工作原理	75
3.3.3	电涡流式传感器应用	77
3.4	技能实训	78
3.4.1	差动变压器式传感器在电磁轴承位置检测中的应用实训	79
3.4.2	利用电感式传感器进行工件生产加工定位系统设计实训	82
	本章小结	84
	复习思考题	84
第4章	电容式传感器及应用	85
4.1	概述	85
4.2	变极距式电容传感器	85
4.2.1	变极距式电容传感器的结构	85
4.2.2	变极距式电容传感器的工作原理	86
4.3	变介电常数式电容传感器	87
4.3.1	变介电常数式电容传感器的结构	87
4.3.2	变介电常数式电容传感器的工作原理	87
4.3.3	变介电常数式电容传感器应用	89
4.4	变面积式电容传感器	90
4.4.1	变面积式电容传感器的结构	90
4.4.2	变面积式电容传感器的工作原理	91
4.5	差动电容传感器	91
4.5.1	差动电容传感器的结构	91
4.5.2	差动电容传感器的工作原理	92
4.5.3	差动电容传感器的测量转换电路	93
4.6	电容式传感器常用测量转换电路	94
4.6.1	电桥式测量转换电路	94
4.6.2	调频式测量转换电路	95
4.6.3	差动脉宽调制电路	96
4.6.4	运算放大器式测量转换电路	98
4.7	电容式传感器应用	98
4.7.1	电容式传感器特点	99
4.7.2	电容式湿度传感器	99
4.7.3	电容式应变计	101
4.7.4	电容式测厚仪	101
4.8	技能实训	102
4.8.1	湿敏电容传感器检测实训	102

4.8.2	电容式传感器在车辆检测装置中的应用实训	102
4.8.3	电容式液位测量系统的设计实训	105
	本章小结	107
	复习思考题	107
第5章	热电偶传感器及应用	108
5.1	热电偶传感器的工作原理和结构	108
5.1.1	热电偶传感器的工作原理	108
5.1.2	热电偶的定律	109
5.1.3	热电偶的结构	112
5.1.4	热电偶的种类	113
5.2	热电偶的冷端补偿	115
5.3	热电偶的测温电路	117
5.4	热电偶的应用	119
5.5	技能实训	121
5.5.1	热电偶传感器的认识及安装实训	121
5.5.2	热电偶传感器测温实训	124
	本章小结	125
	复习思考题	126
第6章	光电传感器及应用	127
6.1	光电二极管	127
6.1.1	光电二极管的结构和工作原理	127
6.1.2	光电二极管的基本特性	128
6.1.3	光电二极管应用	130
6.2	光电三极管	131
6.2.1	光电三极管的结构和工作原理	131
6.2.2	光电三极管的基本特性	132
6.2.3	光电三极管应用	133
6.3	光敏电阻	134
6.3.1	光敏电阻的结构和工作原理	134
6.3.2	光敏电阻的主要参数及基本特性	134
6.3.3	光敏电阻的应用	136
6.4	光电池	138
6.4.1	光电池的结构和工作原理	138
6.4.2	光电池的特性参数	138
6.4.3	光电池的应用	140
6.5	红外传感器	141
6.5.1	红外辐射	141

6.5.2	红外传感器的结构和工作原理	141
6.5.3	红外传感器应用	143
6.6	光固态 CCD 图像传感器	145
6.6.1	CCD 器件的结构和工作原理	145
6.6.2	CCD 图像传感器	147
6.6.3	MOS 图像传感器	150
6.6.4	CCD 器件应用	151
6.7	光纤传感器	152
6.7.1	光纤结构、传光原理及基本特性	152
6.7.2	光纤传感器结构及原理	154
6.7.3	光纤传感器应用	156
6.8	激光传感器	157
6.8.1	激光的产生机理及特性	157
6.8.2	激光传感器应用	158
6.9	技能实训	159
6.9.1	光敏电阻传感器检测实训	159
6.9.2	光电二极管检测实训	160
6.9.3	光电三极管检测实训	161
6.9.4	自动红外感应灯安装实训	162
	本章小结	164
	复习思考题	165
第 7 章	压电传感器及应用	166
7.1	压电式传感器的工作原理	166
7.1.1	压电效应	166
7.1.2	石英晶体产生压电效应的微观机理	167
7.1.3	作用力与电荷的关系	168
7.2	常用压电材料及压电元件结构	169
7.2.1	常用压电材料	169
7.2.2	压电元件结构	170
7.3	压电式传感器的测量电路	171
7.3.1	压电式传感器的等效电路	171
7.3.2	压电式传感器的信号调理电路	172
7.4	压电传感器的应用	175
7.5	技能实训	178
7.5.1	压电陶瓷片检测实训	178
7.5.2	门窗震动报警器的设计安装实训	179
7.5.3	压电加速度传感器安装实训	180
	本章小结	180

复习思考题	181
第 8 章 数字式传感器及应用	182
8.1 光栅传感器	182
8.1.1 光栅的组成和类型	182
8.1.2 光栅传感器的工作原理	184
8.1.3 光栅传感器应用	187
8.2 磁栅传感器	190
8.2.1 磁栅传感器的组成及类型	190
8.2.2 磁栅传感器的工作原理	191
8.2.3 磁栅传感器应用	194
8.3 感应同步器	196
8.3.1 直线式感应同步器	196
8.3.2 旋转式感应同步器	198
8.3.3 感应同步器应用	199
8.4 编码器	200
8.4.1 增量式光电编码器	201
8.4.2 接触式码盘编码器	204
8.4.3 绝对式光电编码器	206
8.4.4 编码器应用	207
8.5 技能实训	209
8.5.1 光栅尺安装实训	209
8.5.2 由感应同步器组成的数字测角系统认识实训	211
本章小结	213
复习思考题	213
第 9 章 磁敏传感器及应用	215
9.1 霍尔传感器	215
9.1.1 霍尔元件的结构及工作原理	215
9.1.2 霍尔元件常用测量电路	220
9.1.3 霍尔集成电路传感器	220
9.1.4 霍尔传感器应用	223
9.2 磁敏电阻	227
9.2.1 磁阻效应	227
9.2.2 磁敏电阻结构	228
9.2.3 磁敏电阻应用	231
9.3 磁敏二极管	235
9.3.1 磁敏二极管的结构及工作原理	235
9.3.2 磁敏二极管的特性参数	236

9.3.3 磁敏二极管应用	238
9.4 磁敏三极管	239
9.4.1 磁敏三极管的结构及工作原理	239
9.4.2 磁敏三极管的主要特性	239
9.4.3 磁敏三极管应用	242
9.5 技能实训	242
9.5.1 霍尔传感器检测实训	242
9.5.2 由霍尔传感器构成的水位控制系统电路实训	243
9.5.3 用霍尔传感器设计高斯计实训	244
本章小结	245
复习思考题	246
第 10 章 新型传感器	247
10.1 超导传感器	247
10.1.1 超导效应	247
10.1.2 超导传感器的工作原理	247
10.1.3 超导传感器应用	248
10.2 智能传感器	250
10.2.1 智能传感器的技术途径	250
10.2.2 智能传感器应用	252
10.3 生物传感器	256
10.3.1 生物传感器的分类	256
10.3.2 生物传感器的应用领域	257
10.3.3 生物传感器的发展方向	259
本章小结	261
复习思考题	261
第 11 章 信号处理及抗干扰技术	262
11.1 信号的处理	262
11.1.1 信号的处理与变换	262
11.1.2 信号的记录和显示	270
11.2 抗干扰技术	273
11.2.1 干扰的种类和来源	273
11.2.2 差模干扰和共模干扰	275
11.2.3 干扰抑制技术	277
本章小结	287
复习思考题	287
参考文献	288

第 1 章 传感器与检测技术基本知识

1.1 测量的基本概念

测量是借助于专用的技术工具,通过实验和计算,对被测对象收集信息的过程。例如:用尺子去度量长度,用秤来称量物体的重量,用光学仪器精确测量物体的大小以及用检测元件测量温度或压力等,都是测量的过程。

1.1.1 测量的分类

测量可分为狭义与广义两种。以上所说的是狭义测量。广义测量是指对被测对象进行检测、变换、分析、处理、显示和控制等的综合过程。在广义测量系统中,有以检测元件为中心的检测部分;有转换信号、提高测量能力的测量部分;有进行信息分析、处理和显示的数据分析处理部分;有联系被测对象和控制测量过程的控制部分等。

1.1.2 测量值的表示方法

对测量结果的要求,通常是要获取被测量的大小与符号,或取得一个变量与另一个变量的相互关系。由此掌握被测对象的特性和规律,或控制某一过程,对某件事情做出决策。

测量中必要的原则是同质比较,即被测量与同性质的标准量进行比较,并确定被测量是该标准量的倍数。标准量应该是国际上或国家特定机构所指定的,其性能应是足够稳定的。

根据上述原则,测量结果可以表示为

$$x = A_x A_e \quad (1-1)$$

式中 x ——被测量;

A_e ——所选被测量的单位名称;

A_x ——在所选单位下的倍数。

例如 $x = 2.5\text{m} = 2500\text{mm}$,又如 $x = 1.2\text{kg} = 1200\text{g}$ 。

1.2 测量误差及其分类

1.2.1 测量误差的产生原因

测量的目的是对被测量求取真值。所谓真值是指被测量在一定条件下其本身客观存在的真实的实际值。但在测量过程中,由于测量方法和测量设备的不完善、周围环境的影

响以及人们认识能力所限等,使测量值与被测量的真值之间不可避免地存在差异,这个差异称为测量误差。无论多么精密的测量,测量误差总是不可避免的。测量精确度越高,意味着测量结果与被测量的真值越接近。随着科学技术的发展,测量的精确度将不断提高,但误差总是存在的。而且在实际测量工作中,只要能保证测量误差在允许的范围内,或者说能达到一定的精确度,那么这个测量结果就被认为是合理的,并不是越高越好。

1.2.2 测量误差的分类

1. 按误差最基本性质与特点分类

按照误差最基本性质与特点,可以分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差:指服从一定规律(如定值、线性、多项式或周期性函数等)的误差。

产生系统误差是因为测量原理不完善,测量仪器制造上有缺陷(如刻度有偏差),测量环境发生变化,测量工作中使用仪表的方法不正确,测量仪表读数方式不良,操作人员感觉不好等因素造成的。

系统误差通常是有规律可循的,经过细微的分析就能事先预见到它的出现,根据出现的原因,引入相应的修正值便可使之减小。

系统误差越小,测量结果就越准确。

(2) 随机误差:它服从一定的统计规律,是测量过程中某些影响量综合作用的结果。

随机误差是由于许多影响量的细微变化的总和造成的,而其中每个影响量的变化规律以及它们之间的相互关系难以认识,因而表现出随机性。

高精度的测量中,随机误差是不可避免的,它不能用引入修正值的方法进行校正。但根据概率论与统计理论,可以研究随机误差对测量结果的影响,寻求随机误差对测量结果影响的评价(估计),通过适当的数据处理,就有可能大大减小它对测量结果的影响。

(3) 粗大误差:它是指一种明显偏离实际值的误差,没有任何规律可循,纯属偶然。

产生粗大误差的原因主要是因为操作人员粗心或过度疲劳、操作出错或偶然由外界干扰引起。

粗大误差不是测量仪表本身固有的,主要是测量过程中的过失造成的。一旦发现测量结果出现粗大误差,必须从中剔除。

2. 按误差本身的量纲分类

(1) 绝对误差 Δ :测量值 M 与被测量的真值 T_S 之间的差值称为绝对误差 Δ ,即

$$\Delta = M - T_S \quad (1-2)$$

Δ 与 M 同量纲,它反映了测量值偏离真值的绝对大小。其值可能为正,也可能为负。

例如用活塞式压力计测量 $100 \times 10^5 \text{Pa}$ 压力时,绝对误差为 $\pm 0.05 \times 10^5 \text{Pa}$ 。用弹簧管式的压力表测量 10^5Pa 压力时,绝对误差为 $\pm 0.05 \times 10^5 \text{Pa}$ 。又如用电阻式温度计测量 200°C 温度时,绝对误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 等。

从以上例子可以看出,对于相同的被测量,绝对误差可以评定其测量精度的高低,但对于不同的被测量及不同的物理量,绝对误差就难以评定其测量精度的高低,为此引入相对误差的概念。

(2) 相对误差 γ :它是绝对误差 Δ 与被测量的真值 T_S 的比值,通常用百分数表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{T_s} \times 100\% \approx \frac{\Delta}{M} \times 100\% \quad (1-3)$$

例如活塞式压力计的相对误差为

$$\gamma_1 = \frac{\pm 0.05 \times 10^5}{100 \times 10^5} \times 100\% = \pm 0.05\%$$

弹簧管压力表的相对误差为

$$\gamma_2 = \frac{\pm 0.05 \times 10^5}{10^5} \times 100\% = \pm 5\%$$

电阻温度计的相对误差为

$$\gamma_3 = \frac{\pm 0.5}{200} \times 100\% = \pm 0.25\%$$

3种仪表中活塞式压力计的精度最高。

但相对误差还不能完全解决问题,在整个测量范围内,相对误差不是一个常数,在低限值附近示值小,相对误差大;而在上限值的 $2/3 \sim 4/5$ 附近,相对误差比较小。这样,同一仪表,被测量不一样,相对误差就不一样。为了解决这一问题,引入了引用误差的概念。

(3) 引用误差 γ_0 :绝对误差 Δ 与测量仪表上限(量程) β 的比值,并以百分数表示,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta}{\beta} \times 100\% \quad (1-4)$$

通常用最大引用误差 $\gamma_{0\max}$ 来确定仪表的精度等级。仪表的精度等级标明了仪表的最大引用误差不能通过的界限。当 $\gamma_{0\max}$ 与精度等级的分挡值不等时,应取比 $\gamma_{0\max}$ 稍大的精度等级值。如果某仪表为A级精度,则标明仪表最大引用误差不超过A%,而不意味着仪表在各刻度点上的示值误差都是A%。

【例1-1】要测稍小于 100°C 的温度,现有0.5级 $0 \sim 300^\circ\text{C}$ 和1.0级 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 的两个温度计,试问采用哪一个温度计好?

解:用0.5级的表测量时,最大相对误差为

$$\gamma_{1m} = \frac{300 \times 0.5\%}{100} = 1.5\%$$

用1.0级的表测量时最大相对误差为

$$\gamma_{2m} = \frac{100 \times 1\%}{100} = 1.0\%$$

计算表明,用1.0级的表比0.5级的表合适。所以实际测量时,要兼顾精度和量程,不能只看精确度等级。

1.2.3 测量仪器的准确度

测量仪器的准确度是指“测量仪器给出接近于真值的响应的能力”,也就是指测量仪器给出的示值接近于真值的能力,即测量仪器由于仪器本身所造成的其输出的被测量值接近被测量真值的能力。由于各种测量误差的存在,通常任何测量都不可能是完善的,所以实际上真值是不可知的,当然接近于真值的能力也是不确定的,因此测量仪器准确度反

映了测量仪器示值接近真值的一种程度,是一个定性的概念。

测量仪器准确度是表征测量仪器品质和特性的主要性能之一,因为使用任何测量仪器都是为了得到准确可靠的测量结果,实质是要求示值更接近于真值。为此虽然测量仪器准确度是一种定性的概念,但在实际应用中人们往往需要以定量的概念来进行表述,以确定其测量仪器的示值接近于真值能力的大小。在实际应用中这一表述是用其他术语来定义的,如准确度等级、测量仪器的〔示值〕误差、〔测量仪器的〕最大允许误差或〔测量仪器的〕引用误差等(此处所使用的方括号,按《通用计量术语及定义》,使用时可以省略,下同)。

准确度等级是指“符合一定的计量要求,使误差保持在规定极限以内的测量仪器的等别、级别”,即按测量仪器准确度高低而划分的等别或级别,如电工测量指示仪表按仪表准确度等级分类可分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0等7级,具体说就是该测量仪器满量程的引用误差,如1.0级指示仪表,其满量程误差为 $\pm 1.0\%$ 。又如一等、二等标准水银温度计,是以其示值的最大允许误差来划分的。所以准确度等级实质上就是以测量仪器的误差来定量表述测量仪器准确度的大小。

测量仪器的示值误差是指在规定的条件下测量仪器示值与对应输入量的真值之差,这和测量仪器准确度的概念是完全对应的。有的测量仪器没有准确度等级指标,则测量仪器示值接近于真值的响应能力就用测量仪器允许的示值误差来表述。

在实际使用中,要正确区分测量仪器的准确度和准确度等级及测量仪器的准确度和测量准确度的概念。测量仪器的准确度是指测量仪器给出的示值接近于真值的能力,准确度等级是指根据测量仪器的示值接近真值的具体程度所划分的等级或级别,测量仪器的准确度通常可用准确度等级来具体表述,测量仪器按准确度来划分等级进行分类有利于量值传递或溯源,有利于制造和合理选用测量仪器,准确度等级是测量仪器最具概括性的特性。

测量仪器的准确度是对测量仪器本身而言的,它只是确定了测量仪器本身示值的误差范围,它并不等于用该测量仪器进行测量其测量结果的准确可靠性,测量准确度是表示测量结果与被测量真值之间的一致程度,是对测量结果而言的,它既包含了测量仪器的误差,也包含了测量环境条件外界因素所带来的误差,一是对测量器具而言,一是对测量结果而言,这二者是有根本区别的,当然也存在着内在的联系,但是两个不同的概念。

1.3 测量结果的数据分析及其处理

1.3.1 测量结果的数据分析

数据也称观测值,是实验、测量、观察、调查等的结果,常以数量的形式给出。数据分析的目的是把隐没在一大批看来杂乱无章的数据中的信息集中、萃取和提炼出来,以找出所研究对象的内在规律。

在实际生活中,数据分析有极广泛的应用,它可帮助人们做出判断,以便采取适当行动。例如J. 开普勒通过分析行星角位置的观测数据,找出了行星运动规律。又如,一个企业的领导人要通过市场调查,分析所得数据以判定市场动向,从而制定合适的生产及销

售计划等。

典型的数据分析可能包含以下3步。①探索性分析。当数据刚取得时,可能杂乱无章,看不出规律,通过作图、列表、用各种形式的方程拟合、计算某些特征量等手段探索规律性的可能形式,即往什么方向和用何种方式去寻找和揭示隐含在数据中的规律性。②模型选定分析。在探索性分析的基础上提出一类或几类可能的模型,然后通过进一步的分析从中挑选一定的模型。③推断分析。通常使用数理统计方法对所定模型或估计的可靠程度和精确程度做出推断。

数据分析离不开外部的知识和判断,形式化的数据分析方法只是一种辅助手段,以帮助人们进行判断或推理。数据及其结构、数据分析的问题和目的都是多种多样的,因而数据分析可化为许多课题,它与数学、统计学、计算机科学等学科和技术都有密切的联系,正在蓬勃发展,对促进科学技术的发展起着极其重要的作用。

1.3.2 测量结果的数据处理

测量人员在取得测量数据后,通常要对这些数据进行计算、分析、整理,有时还要把数据归纳成一定的表达式,甚至制成表格或画成曲线,这就是数据处理的工作。

1. 有效数字及数字的舍入规则

1) 有效数字

由于测量中误差的存在或者测量仪器分辨力的限制,测量数据中从某位起的右边一位是欠准确的估计数字,称为存疑数字。所谓有效数字,是指从最左边一位非零数字起算到右边第一位存疑数字为止的多位数字。对于确定的数值,通常规定误差不得超过末位单位数字的 $1/2$ 。例如,若末位数字是个位,则包含的绝对误差值小于 0.5 ;若末位是十位,则包含的绝对值误差小于 5 。对于这种误差不大于末位单位数字 $1/2$ 的数,从它左边第一个不为零的数字起,直到右边最后一个数字为止,都叫有效数字,例如:

3.14159	六位有效数字	极限(绝对)误差 ≤ 0.000005
3.1416	五位有效数字	极限误差 ≤ 0.00005
9600	四位有效数字	极限误差 ≤ 0.5
97×10^2	二位有效数字	极限误差 $\leq 0.5 \times 10^2$
0.032	二位有效数字	极限误差 ≤ 0.0005
0.302	三位有效数字	极限误差 ≤ 0.0005

在实际测量中,测量结果所用的不同表示方法,其含义是不同的。如某电流的测量结果写成 2000mA ,表示绝对误差小于 0.5mA ;而如果写成 2A ,则表示仅有一位有效数字,绝对误差小于 0.5A ;但如写成 2.000A ,绝对误差则与 2000mA 完全相同。

2) 数字的舍入规则

对测量结果中多余的有效数字,应按“小于5舍,大于5进,等于5时取偶数”的法则进行处理。“等于5取偶数”是指当尾数为 0.5 时,末位是奇数,则加1,末位是偶数,则不变。例如,将 $10.34, 10.36, 10.35, 10.45$ 保留一位小数点后一位有效数字,即

- $10.34 \rightarrow 10.3$ ($4 < 5$, 舍去)
- $10.36 \rightarrow 10.4$ ($6 > 5$, 进一)
- $10.35 \rightarrow 10.4$ (3 是奇数, 5 入)

10.45 → 10.4 (4 是偶数, 5 舍)

另一方面, 在读取测量仪器的示值时, 测量误差的小数点后面有几位, 则测量数据的小数点后面也取几位。

例如, 用一台 0.5 级电压表 100 V 量程挡测量电压, 电压表指示值为 75.35V。可以推算得 $\Delta U = \pm 0.5\% \times U = \pm 0.5\% \times 100V = \pm 0.5V$, 故小数点后的第一位是存疑数字, 根据舍入规则, 示值末尾的 $0.35 < 0.5$, 所以应舍去, 测量报告值为 75V。

2. 等精度测量结果的处理

按测量条件的不同测量可分为等精度测量和不等精度测量。等精度测量是指在测量条件相同的情况下进行的一系列测量。例如, 由同一个人在同一仪器上采用同样测量方法对同一被测物理量进行多次重复测量, 每次测量的可靠程度都相同, 这些测量就是等精度测量, 否则就是非等精度测量。等精度测量, 其测量结果的数据处理比较容易; 而非等精度测量其数据处理很复杂, 所以只有在非用不可的情况下, 才采用非等精度测量。

对等精度测量得到的测试数据, 通常按下述步骤进行处理:

(1) 将等精度测量下测得的各数据 X_i 依次列成表格;

(2) 求出算术平均值 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$;

(3) 列出残差 $U_i = X_i - \bar{X}$;

(4) 列出 U_i^2 , 计算标准偏差的估计值 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^2}$;

(5) 按 $|U_i| > 3\sigma$ 的原则, 检查并剔除粗大误差;

(6) 判断有无系统误差, 如有, 可进行修正或重新测量;

(7) 算出算术平均值估计值的标准偏差 $\bar{\sigma}_x = \sigma/\sqrt{n}$;

(8) 写出测量结果的表达式, 即 $X = \bar{X} \pm 3\bar{\sigma}_x$ 。

例如, 对电压进行 16 次等精度测量, 记录修正值的测量数据如下:

205.30	204.94	205.63	205.24
206.65	204.97	205.36	205.16
205.71	204.70	204.86	205.35
205.21	205.19	205.21	205.32

按上述步骤可求得: $\bar{X} = 205.30V$, $\sigma = 0.4434$, 按 $|U_i| > 3\sigma = 1.3302$, 剔除坏值 206.65, 重新计算 15 个数据的平均值得 $\bar{X}' = 205.21$, $\sigma' = 0.27$, $\bar{\sigma}_x = 0.07$ 。最终测量结果为

$$X = \bar{X}' \pm 3\bar{\sigma}_x = 205.2 \pm 0.2V$$

3. 实验曲线的绘制

在实际测量中, 很少进行孤立量的测量, 更多的是成组量的测量。测量的目的是要从一组测量数据, 如 n 对 (x_i, y_i) 中去求得变量 x 和 y 之间最佳的函数关系 $y = f(x)$ 。直观地说, 就是在平面直角坐标系上, 从给定的 n 个点 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), 求一条最接近这一组数据点的曲线, 以显示这些点的总的趋向。这一过程称为曲线拟合, 该曲线的方程称为回归方程。利用最小二乘法, 可以保证最佳拟合与回归。

常用的拟合方法有直线拟合与曲线拟合两种。