



全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

自动检测与转换技术

(第2版)

苏家健 主编
谭 艺 黄江巍 余家晶 副主编

理实

一体的
职教教材

品牌教材的
领军教材



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

自动检测与转换技术

(第2版)

苏家健 主 编
谭 艺 黄江巍 余家晶 副主编

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了常用传感器的工作原理、基本结构及相应的测量电路,并介绍了大量的应用实例。在取材上,强调理论够用,强调实用性和先进性,突出基本技能的培养,加强了实验的内容。

本书内容主要包括:检测技术的一般概念和测量方法、误差分析;电阻式、变磁阻式、电容式、热电偶、霍尔、光电式及压电式等常用传感器;新型的光纤传感器;过程控制参数;检测装置的信号处理技术,包括信号的放大、隔离、A/D 转换及与单片机的接口技术,并介绍了线性化处理的技术;集中列举了检测技术在工业生产中应用的实例,并专列一章介绍传感器的小制作;还安排了传感器的实验内容。在各章中都列举了大量的应用实例,以帮助读者对传感器知识的理解。

本书可作为高职高专生产过程自动化技术、电气自动化、应用电子技术、机电一体化技术、计算机控制及相近专业的教材,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/苏家健主编. —2 版. —北京:电子工业出版社,2009. 9

(全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材)

ISBN 978 - 7 - 121 - 09446 - 0

I. 自… II. 苏… III. ①自动检测 - 高等学校:技术学校 - 教材 ②传感器 - 高等学校:技术学校 - 教材
IV. TP274 TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151562 号

策划编辑:王昭松

责任编辑:韩玲玲

印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:18 字数:460.8 千字

印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:27.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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。

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

服务热线:(010)88258888。

出版说明

党的十六大提出,走我国新型工业化发展的道路,必须坚持“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”,而且要达到“科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势”等五个具体目标,这表明我国要基本实现工业化,不仅要采用机械化和电气化,而且要充分利用自动化和信息化。因此,以自动化技术为代表的先进生产技术,将在我国产业结构调整、推动传统产业现代化、实现经济及社会持续协调发展过程中,发挥极其重要的作用。

目前,作为我国高等教育一翼的高等职业教育,已经在招生规模方面取得了巨大的突破,但在教学改革方面与西方发达的职业教育相比,还相对落后。高职教育的培养目标是培养企业真正需要的具有实践动手能力的技术工人,这是当前高职教育改革的重点,也是一线教师所真正关心的话题。而工业自动化技术是高职教育中的一个重要领域,承担着为工业生产培养一线技术工人的重要作用,而且,无论是社会用人需求还是就业前景,这一领域目前都被广泛看好。

与此相适应,电子工业出版社在广泛调查研究的基础上,于2006年3月组织全国数十所高等职业院校的一线教师和企业技术专家,在上海召开了“全国高等职业教育工业生产自动化技术规划教材研讨会”,就相关的课程教学和高职培养目标进行了深入的探讨,确定了相关的主干教材10余种。与会代表多是所在学校的领导和业务骨干,具有丰富的教学经验、实践经验和编写教材的经验。

本套教材体现了高等职业教育改革的方向,以培养岗位技术人员的综合能力为中心,淡化理论、强化应用,突出职业教育的教育特色,并且根据教育部制定的“高职高专教育课程教学基本要求”,将传统课程重新组合,缩短教学课时,力求突出应用性、针对性、岗位性和专业性等特点。

本套教材在内容编排上以能力为单位模块,强调实用原则;书中实例完整,注重原理和方法的应用,以提高对高职学生技能的培养。本套教材将学历课程与资格应试结合,满足目前大多数高等职业院校学生毕业时对毕业证与资格证或上岗证的要求。本套教材力求内容新颖性,紧跟国内外工业自动化技术的最新进展,同时兼顾国内高职院校相关专业的最新教学内容。本套教材均配套教学参考资料,为高职师生的教与学提供方便和帮助。

本套教材的出版对于高等职业教育的改革和高等职业专门人才的培养将起到积极的推动作用。对于教材中所存在的一些不尽如人意之处,将通过今后的教学实践不断修订、完善和充实,以便我们更好地服务于高等职业教育。

本套教材适用于生产过程自动化技术、计算机控制技术、工业网络技术、液压与气动技术、检测技术及应用等专业,也适用于机电类专业。

电子工业出版社
高职高专教育教材事业部
2006年7月

前 言

自动检测与转换技术在现代生产和生活中越来越被人们所认识。近年来随着检测技术的发展,传感器的种类越来越多,使用的范围也越来越广泛。

本教材自 2006 年出版以来,在实际的教学实践中得到了一些肯定,但也存在诸多缺点,在再版中编者力图从以下几方面进行修改。

(1) 更加注重理论适度够用,注重实例介绍。删减了一些数学的推导,增加了一些实用的例子。

(2) 增加一些传感器的应用,特别是在日常生活中的应用。

(3) 除实验实例以外,增加了常用传感器的小制作。

(4) 为适应工业环境的使用,对过程控制参量压力、液位、流量等作了一些介绍。

本教材参考学时为 54 ~ 72 学时。

本教材共有 14 章。第 1 章为检测技术的概念,第 2 ~ 8 章介绍各种常用的电阻应变片、热电阻、气敏电阻、湿敏电阻、电感式、电容式、热电偶、压电式、光电式等各种传感器。第 9 章介绍光纤传感器,第 10 章介绍过程参数的控制,第 11 章介绍检测装置的信号处理和接口技术,第 12 章介绍自动检测技术的综合应用,第 13 章为实验,第 14 章为常用传感器的小制作。

本教材由上海第二工业大学苏家健任主编,上海建峰职业技术学院谭艺、上海第二工业大学黄江巍、上海震旦职业学院余家晶任副主编。

谭艺老师编写第 4、6、8、12 章,黄江巍老师编写 1、2、10 章,余家晶老师编写 3、13、14 章,苏家健老师编写第 5、7、9、11 章并统稿。

本书可作为高职高专生产过程自动化技术、电气自动化、应用电子技术、机电一体化技术、计算机控制及相近专业的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

本教材在编写过程中,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和同行的大力支持,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错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
2009 年 4 月

目 录

第 1 章 检测技术的基础知识	1
1.1 学好《自动检测与转换技术》课程大有用武之地	1
1.2 测量的基本概念	3
1.3 测量误差及其分类	4
1.3.1 测量误差及其表示方法	4
1.3.2 测量误差的分类	6
1.4 传感器及其基本特性	7
1.4.1 传感器的定义及组成	7
1.4.2 传感器的分类	8
1.4.3 传感器的基本特性	10
1.5 传感器技术的发展趋势	12
1.6 弹性敏感元件	13
1.6.1 弹性敏感元件的弹性特性	13
1.6.2 弹性敏感元件的材料及其基本要求	14
1.6.3 弹性敏感元件的变换原理	15
小结	18
思考与练习	19
第 2 章 电阻式传感器	21
2.1 电位器式传感器	21
2.1.1 线性电位器	21
2.1.2 电位器式传感器的应用	23
2.2 电阻应变式传感器	24
2.2.1 电阻应变片的种类与结构	24
2.2.2 电阻的应变效应	26
2.2.3 应变片测试原理	27
2.2.4 测量电路	27
2.3 电阻应变式传感器的应用	31
2.4 压阻式传感器	34
2.4.1 压阻效应与压阻系数	34
2.4.2 测量原理	35
2.4.3 温度补偿	35
2.4.4 压阻式传感器的应用	35
2.5 气敏电阻传感器	36
2.6 湿敏电阻传感器	40
2.7 热电阻	43
2.7.1 金属热电阻	43

2.7.2	半导体热敏电阻	47
2.7.3	集成温度传感器	48
小结	.....	51
思考与练习	.....	52
第3章	变磁阻式传感器	53
3.1	自感式传感器	53
3.1.1	基本自感式传感器	53
3.1.2	差动变间隙式传感器	54
3.1.3	螺管型电感式传感器	55
3.1.4	测量电路	55
3.2	变压器式传感器	57
3.2.1	螺线管式差动变压器	58
3.2.2	测量电路	59
3.3	电涡流式传感器	62
3.3.1	电涡流式传感器的工作原理	62
3.3.2	电涡流式传感器的种类	62
3.3.3	测量电路	64
3.4	变磁阻式传感器的应用	66
3.4.1	自感式传感器的应用	66
3.4.2	变压器式传感器的应用	67
3.4.3	电涡流式传感器的应用	67
小结	.....	69
思考与练习	.....	69
第4章	电容式传感器	70
4.1	电容式传感器工作原理	70
4.1.1	变面积式电容传感器	70
4.1.2	变间隙式电容传感器	72
4.1.3	变介电常数式电容传感器	74
4.2	测量电路	77
4.2.1	调幅型电路	77
4.2.2	差动脉冲宽度调制电路	79
4.2.3	调频型电路	80
4.3	电容式传感器的应用	81
小结	.....	82
思考与练习	.....	83
第5章	热电偶传感器	84
5.1	热电偶工作原理	84
5.1.1	热电偶工作原理	84
5.1.2	热电偶的基本定律	86
5.2	热电偶的材料、结构及种类	87

5.2.1	热电偶材料	87
5.2.2	热电偶结构	88
5.2.3	热电偶种类及分度表	89
5.3	热电偶的冷端补偿	92
5.4	热电偶测温线路	95
小结	.....	96
思考与练习	.....	96
第6章	光电式传感器	98
6.1	光电效应及光电器件	98
6.1.1	光电效应	98
6.1.2	光电管	98
6.1.3	光敏电阻	100
6.1.4	光敏晶体管	101
6.1.5	光电池	103
6.2	红外传感器	105
6.2.1	红外辐射	105
6.2.2	红外探测器	106
6.3	光电式传感器应用举例	107
6.3.1	光敏电阻传感器的应用	107
6.3.2	光敏晶体管的应用	108
6.3.3	光电池的应用	110
6.3.4	红外测温仪	110
6.4	光电开关和光电断续器	111
6.4.1	光电开关	111
6.4.2	光电断续器	112
6.5	CCD 图像传感器及应用	113
6.5.1	CCD 图像传感器的工作原理	113
6.5.2	CCD 图像传感器的分类	114
6.5.3	CCD 图像传感器的应用	116
小结	.....	117
思考与练习	.....	117
第7章	霍尔传感器	118
7.1	霍尔元件工作原理	118
7.2	霍尔元件的基本结构和主要特性参数	120
7.2.1	基本结构	120
7.2.2	主要特性参数	121
7.3	霍尔元件的测量电路及补偿	122
7.3.1	基本测量电路	122
7.3.2	温度误差的补偿	122
7.3.3	不等位电势的补偿	124
7.4	霍尔集成电路	125

7.5 霍尔传感器的应用	126
小结	128
思考与练习	129
第8章 压电式传感器	130
8.1 压电效应	130
8.1.1 石英晶体的压电效应	130
8.1.2 石英晶体	132
8.1.3 压电陶瓷的压电效应	132
8.1.4 压电陶瓷	133
8.2 压电材料	133
8.3 压电式传感器测量电路	134
8.3.1 压电器件的串联与并联	134
8.3.2 压电式传感器的等效电路	134
8.3.3 压电式传感器的测量电路	135
8.4 压电式传感器应用举例	137
小结	140
思考与练习	140
第9章 光纤传感器	141
9.1 光纤传感器基础知识	141
9.1.1 光纤传感器的原理	141
9.1.2 光纤的结构	142
9.1.3 光纤的种类	142
9.2 光的传输原理	143
9.2.1 光的全反射定律	143
9.2.2 光纤的传光原理	144
9.3 光纤传感器的类型	145
9.3.1 光纤传感器的分类	145
9.3.2 功能型和非功能型光纤传感器	145
9.3.3 光纤传感器的主要部件	146
9.4 功能型光纤传感器	147
9.4.1 相位调制型光纤传感器	147
9.4.2 光强调制型光纤传感器	149
9.5 非功能型光纤传感器	150
9.5.1 遮断光路的光强调制型光纤传感器	150
9.5.2 改变光纤相对位置的光强调制型光纤传感器	151
9.6 光纤传感器的应用	152
9.6.1 光纤微位移测量传感器	152
9.6.2 光纤流量传感器	153
9.6.3 光纤图像传感器	154
小结	155
思考与练习	155

第 10 章 过程参数的控制	156
10.1 压力测量	156
10.1.1 弹簧管压力表	157
10.1.2 压力、差压变送器的基本原理	158
10.2 液位测量	160
10.2.1 浮力式液位仪表	160
10.2.2 光纤液位计	162
10.2.3 静压式液位计	164
10.2.4 电阻式液位计	167
10.3 流量测量	168
10.3.1 容积式流量传感器	169
10.3.2 差压式流量传感器	171
10.3.3 速度式流量传感器	180
10.3.4 流体阻力式流量传感器	187
10.3.5 流体振动式流量传感器	190
小结	192
思考与练习	193
第 11 章 检测装置的信号处理及接口技术	195
11.1 信号的放大与隔离技术	195
11.1.1 运算放大器	195
11.1.2 测量放大器	196
11.1.3 隔离放大器	197
11.1.4 程控测量放大器 PGA	199
11.2 信号变换技术	201
11.2.1 0~10mA 的电压/电流变换(V/I 变换)	201
11.2.2 4~20mA 的电压/电流变换(V/I 变换)	201
11.3 过程输入通道	202
11.3.1 模拟量输入通道	202
11.3.2 A/D 转换器及其与单片机的接口	203
11.4 信号的非线性补偿技术	207
11.4.1 线性化处理方法	207
11.4.2 利用微机进行非线性化处理	210
小结	212
思考与练习	213
第 12 章 自动检测技术的综合应用	214
12.1 传感器的选用原则	214
12.2 综合应用举例	216
12.2.1 高炉炼铁自动检测与控制	216
12.2.2 蒸馏塔自动检测与控制	219
12.2.3 传感器在汽车中的应用	221

12.2.4	传感器在空气污染监测中的应用	227
12.2.5	IC卡智能水表的应用	228
12.2.6	传感器在全自动洗衣机中的应用	229
12.2.7	传感器在电冰箱中的应用	230
12.2.8	传感器在空调器中的应用	233
12.2.9	传感器在厨具中的应用	233
12.2.10	传感器在燃气热水器中的应用	235
12.2.11	传感器在家用吸尘器中的应用	235
12.2.12	家用电器中常用的部分国产热敏电阻	236
	小结	237
	思考与练习	238
第13章	实验	239
13.1	检测与转换技术实验须知	239
13.2	检测与转换技术实验报告书写要点	240
13.3	实验	241
	实验一 金属箔式应变片——全桥性能实验	241
	实验二 直流全桥的应用——电子称实验	242
	实验三 湿敏传感器实验	243
	实验四 差动变压器的应用——振动测量实验	244
	实验五 电涡流式传感器的位移特性实验	246
	实验六 电容式传感器的位移特性实验	247
	实验七 霍尔传感器的应用	249
	实验八 压电式传感器振动实验	250
	实验九 光纤传感器的测速实验	251
	实验十 光电式传感器转速测量实验	252
13.4	THSRZ-1型传感器系统综合实验装置	252
第14章	传感器的应用小制作	254
14.1	声光控楼道灯	254
14.2	智能灭火机器人	257
14.3	二路防撞自动循迹车	261
14.4	单片机控双驱车	265
14.5	单片机可编程双驱车	270
14.6	电冰箱温度超标指示器	272
14.7	家用电子秤	273
14.8	测光文具盒电路	274
14.9	太阳能热水器水位报警器	275
	小结	276
	参考文献	277

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 学好《自动检测与转换技术》课程大有用武之地

传感器技术是材料学、力学、电学、磁学、微电子学、光学、声学、化学、生物学、精密机械、仿生学、测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术,乃至系统科学、人工智能、自动化技术等众多学科相互交叉的综合性高新技术密集型前沿技术,广泛应用于航空航天、兵器、信息产业、机械、电力、能源、交通、冶金、石油、建筑、邮电、生物、医学、环保、材料、灾害预测预防、农林渔业、食品、烟酒制造、建筑、汽车、舰船、机器人、家电、公共安全等领域,可以说是无处不在。敏感元件与传感器技术发展迅猛,是当代科学技术发展的重要标志,并与通信技术、计算机技术构成信息科学技术的三大支柱。21世纪是人类全面进入信息电子化的时代,人类探知领域和空间的拓展,使得人们需要获得的自然信息的种类日益增加,需要信息传递的速度加快,信息处理能力增强,因此要求与之相对应的信息获取技术,即传感器技术必须跟上信息化发展的需要。传感器是人类探知自然界信息的触角,为人们认识和控制相应的对象提供条件和依据。当计算机技术和通信技术飞速发展时,信息获取装置,即传感器发展的相对滞后造成了“大脑发达、五官不灵”的现象,这已经开始引起人们的警觉和各发达国家的重视,从而对传感器技术及其产品的需求迅速提升。传感技术将成为高新技术发展方面争夺的一个重要领域。

另外,石油、化工、冶金、建筑、电力、铁路等部门的发展迫切需要传感器技术,敏感元件及传感器广泛用于计算机、开关电源、彩色显示器、程控交换机和通信机、工业自动化装备、彩电、空调、冰箱测温控温及电路温度补偿马达启动保护、过热保护等。我国有近百万座大、中型油罐及十余万压力容器液体检测,仅需光纤传感器产值就达20余亿元,铁道油罐车光纤装油自

动计量系统,需要量达10亿元以上。另外,煤气光纤相位计、应变光纤传感器、光纤阀位回讯器等广泛用于冶金、化工、医药、食品等部门,有数亿元的市场需求。

我国的汽车工业发展很快,每辆汽车需要10~20只传感器。高级轿车电子化控制系统水平的关键就在于所用的传感器的水平和数量,用传感器对温度、压力、位置、距离、转速、加速度、湿度、电磁、光电、振动等进行实时准确的测量,一般需要30~100种传感器,这将为传感器发展提供一个广阔的市场空间。开发新型压力、温度、流量、位移等传感器,为汽车工业解决电喷系统、空调排污系统和自动驾驶系统所需的传感器显得十分迫切。

当代农业是知识密集、技术密集的产业,设施农业可以有效提高农业生产效益和增强抗灾能力,可借助温室及其配套装置来调节和控制作物生产环境条件,摆脱自然制约,以达到高产、高效和优质的目的。信息获取手段是实现高水平设施农业的关键技术之一,设施农业用传感器的品种较多,主要用于温度、湿度、土壤干燥度、CO₂、光照度、土壤养分等参数的测量。信息获取技术还在农田和果园生产、农业生物学研究、农药残留量检测等方面得到了广泛的应用。

在生物与医学领域,对人体的健康状况进行诊断需要进行多种生理参数的测量,研制以传感器作为前端的信息获取系统,开展无创伤测量是一个前沿课题。国内已经成功地开发出了用于测量近红外组织血氧参数的检测仪器。人类基因组计划的研究也大大促进了对酶、免疫、微生物、细胞、DNA、RNA、蛋白质、嗅觉、味觉和体液组份及血气、血压、血流量、脉搏等传感器的研究。今后还要进一步实现这些功能的集成化、微型化,使许多不连续的分析过程连续化、自动化,完成实时、在位分析,实现高效率、快速度、少耗样、低成本、无污染、大批量生产的目标。用于抗生素、维生素、氨基酸、生长因子、杀虫剂、洗涤剂及合成的有机化合物等检测的传感器也随着生物技术、生物材料科学及其他相关学科不断发展、改进。

保护环境和生态平衡,实现可持续发展,必须进行大气监测和江河湖海水质检测,需要大量用于污水流量、pH值、电导、浊度、COD、BOD、TP、TN、矿物油、氰化物、氨氮、总氮、总磷、金属离子浓度,特别是重金属离子浓度,以及风向、风速、温度、湿度、工业粉尘、烟尘、烟气、SO₂、NO、O₃、CO等参数测量的传感器,这些传感器中的大多数急待开发。

然而,由于世界各国对传感器技术的重视程度和投入远不如计算机技术和信息技术,所以目前传感器技术的发展大大滞后于整个信息技术的发展,成为制约信息技术、自动化技术发展的瓶颈,这也意味着传感器技术有着巨大的发展空间和广阔的市场前景。

我国传感器技术的发展始于20世纪50年代初期,经过几十年的发展,已形成了一定规模,基本涵盖了信息采集的各个领域。产品开发涵盖光敏、热敏、力敏、电压敏、磁敏、气敏、湿敏、声敏、射线敏、离子敏、生物敏等各种传感器,以及变送器、二次仪表等多种类、多形式产品,与国外研制领域相当。目前,我国传感器第一大用户为冶金工业,但其所需的100种专用高附加值传感器几乎全部依靠进口;汽车工业对传感器也将会有一个较大的市场需求;化工行业对安全监测的传感器需求量也很大。我国加入世界贸易组织(WTO)也给我国传感器市场带来了机遇与挑战,加速我国传感器新兴产业的建设及其市场的繁荣。今后传感器的总需求量将稳定增长,传感器市场需求的产品结构将向着增加投资类产品的比例发展,其中农业、环保、医疗卫生及食品检测用传感器是广阔的新市场。投资类用传感器将呈现较大幅度增长,各工业部门为节约原材料、降低能耗、提高产品质量及提高劳动生产率和经济效益,将大量需用工业控制用传感器,以实现传统产业的改造,尤其是我国“西部开发”工程的启动将大幅度拉动传感器的需求增长。



所以,在我们的社会生活中,传感器将无处不在,学习好《自动检测及转换技术》大有可为,对今后的学习和工作都会带来很大的帮助。

1.2 测量的基本概念

为了获得精确可靠的数据,选择合理的测量方法非常重要。测量方法多种多样,从不同的角度有不同的分类。

1. 电测法和非电测法

在现代测量中,人们广泛采用电测法测量非电量。电测法是指在检测回路中含有测量信息的电信号转换环节,可以将被测的非电量转换为电信号输出。例如,电容式传感器中的交流电桥,将被测参数所引起的电容变化量转换为电压信号输出。电测法可以获得很高的灵敏度和精确度,输出信号可实现远距离传输,便于实现测量过程的自动化、数字化和智能化。显然,除电测法以外的测量方法都属于非电测法,如丈量土地、用体温计测体温、用弹簧管压力表测压等。

2. 直接测量和间接测量

直接测量就是用预先标定好的测量仪表直接读取被测量的测量方法。例如,用万用表测量电压、电流、电阻等,简单而迅速。间接测量需利用被测量与某中间量的函数关系,先测出中间量,再通过相应的函数关系计算出被测量的数值,过程较为复杂。例如,用伏安法测量电阻值,以及通过测量导线电阻、直径及长度求电阻率等,都属于间接测量。

3. 静态测量和动态测量

根据被测量是否随时间变化,可分为静态测量和动态测量。静态测量是测量那些不随时间变化或变化很缓慢的物理量;动态测量则是测量那些随时间而变化的物理量。例如,用光纤陀螺仪测量火箭的飞行速度和方向就属于动态测量,而超市中物品的称重则属于静态测量。应当注意的是,静态与动态是相对的,可以把静态测量看作是动态测量的一种特殊方式。

4. 接触式测量和非接触式测量

根据测量时是否与被测对象相互接触,可分为接触式测量和非接触式测量。例如,利用辐射式温度传感器进行温度的测量就属于非接触式测量。非接触式测量不会影响被测对象的运行工况,检测速度快。

5. 模拟式测量和数字式测量

根据测量结果的显示方式,可分为模拟式测量和数字式测量。模拟式测量是指测量结果可根据仪表指针在标尺上的定位进行连续读取的方法;数字式测量是指测量结果以数字的形式直接给出的方法。一般在精密测量时多采用数字式测量。

此外,测量结果还可以用计算机屏幕画面的方式显示。例如,连续变化的曲线、数据表格、工艺流程图及各种动态数据等,可通过屏幕画面提供信息,实现对整个生产过程的监视与控制。

在选择测量方法时,应综合考虑被测量本身的特点,所要求的精确度、灵敏度,以及测量的环境要求,力求测量科学、简单可靠。

1.3 测量误差及其分类

1.3.1 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,实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响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 Δx 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,所以在实际应用时,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)相对误差和最大引用(相对)误差等。

(1) 实际相对误差 γ :用测量值的绝对误差 Δx 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 γ_x :用测量值的绝对误差 Δx 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1000km的路程时,若测量结果为1001km,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:测量值的绝对误差 Δx 与仪器的量程 A_m 的百分比。引用误差的最大值叫做最大引用(相对)误差 γ_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,所以在测量仪表中,人们经常使用最大引用误差评价仪表的性能。最大引用误差又称为满度(引用)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,小于允许误差值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	±0.1%	±0.2%	±0.5%	±1.0%	±1.5%	±2.5%	±4.0%	±5.0%

【例 1.1】 某温度计的量程范围为0~500℃,校验时其最大绝对误差为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℃的两个温度计,欲测量80℃的温度,试问选用哪一个温度计好?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℃温度时可能出现的最大示值相对误差分别为

$$\begin{aligned} |\Delta x|_{m1} &= \gamma_{m1} A_{m1} = 0.5\% \times (300 - 0) = 1.5 \\ \gamma_{x1} &= \frac{|\Delta x|_{m1}}{x} \times 100\% = \frac{1.5}{80} \times 100\% = 1.875\% \end{aligned}$$

1.0级温度计测量时可能出现的最大绝对误差、测量80℃温度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 $\gamma_{x2} > \gamma_{x1}$, 显然用1.0级温度计比用0.5级温度计测量时, 示值相对误差反而小。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以上的区域内。

1.3.2 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。

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“精密性”, 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, 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; σ 为分布函数的标准误差。图 1.1 示出了相应的正态分布曲线。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。

测量结果符合正态分布曲线的例子非常多, 例如, 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。