



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部高等职业教育示范专业规划教材
机械工业出版社精品教材

(电气工程及自动化类专业)

自动检测技术 及应用

第2版

武昌俊 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电子 课件

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部高等职业教育示范专业规划教材
机械工业出版社精品教材
(电气工程及自动化类专业)

自动检测技术及应用

第 2 版



机械工业出版社

本书是教育部高等职业教育示范专业规划教材。主要内容有：检测技术的基本知识；工业、生活等领域常用传感器的基本原理、转换电路及其应用；检测系统信号的处理、变换及抗干扰技术；自动检测技术的综合应用等。

本书突出了传感器的应用和制造工艺方面的内容，特别介绍了新技术、新器件在自动检测领域的新应用，具有较强的实用性和可参考性，旨在帮助读者提高理论联系实际的能力。

本书可作为高职高专电气自动化类、仪器仪表类、电子技术类、机电技术及数控类、计算机类等专业的教材，也可供生产技术、管理、运行人员及其他工程技术人员参考。

为方便教学，本书提供免费电子课件，凡选用本书作为授课用教材的老师，均可来电索取，咨询电话：010-88379375；Email：cmpgaozhi@sina.com。

图书在版编目(CIP)数据

自动检测技术及应用/武昌俊主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2010.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 教育部高等职业教育示范专业规划教材. 机械工业出版社精品教材

ISBN 978-7-111-30416-6

I. ①自… II. ①武… III. ①自动检测—高等学校：技术学校—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第068200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：于宁 责任编辑：于宁 封面设计：杨

责任校对：张晓蓉 责任印制：乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2010年6月第2版第1次印刷

184mm×260mm · 14.5印张 · 357千字

0001-4000册

标准书号：ISBN 978-7-111-30416-6

定价：25.00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

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者服务部：(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是根据高职高专电类专业的教学基本要求及教育部启动的“高等学校教育质量与教学改革工程”的精神编写的，体现了“以淡化理论，够用为度，培养技能，重在运用，能力为本位”的指导思想，适应于社会要求培养的人才具有“创造性、实用性”的需要。本教材力图使高职高专电类专业学生在学完本课程后，能获得具有从事生产一线的技术和运行人员所必须掌握的自动检测技术、传感器和抗干扰技术等方面的基本知识和基本应用技能。

针对第1版教材在教学中的使用情况和学生在生产实际应用中遇到问题的信息反馈，这次我们对本教材进行了必要的修改、充实和提高。修订中适当删减了一些陈旧、过时的内容，继续保持精选的内容，力求结合生产实际，突出能力的培养，尽可能地做到通俗易懂、方便自学。本次修订对第1版的第9章、第10章和第11章的知识进行了重组及修改，主要突出工程实践能力的培养，突出技能训练等内容，着重体现在知识的运用和实践能力的提高；另外考虑到近年来汽车行业的迅速发展，为此增加汽车上应用的传感器一章。

本教材着重于介绍常用传感器的工作原理，测量转换电路及其应用。在取材方面，既考虑了检测技术日新月异的发展趋势，也考虑到高职高专教育对象的实际基础水平，既有深度又有广度。因而，本教材主要的着眼点在于结合实际来提高高职高专学生的工艺知识水平和解决实际问题的能力，压缩了大量的理论推导，重在突出高职高专教育教学的适用性及生产实际的实用性。

本教材总学时为50学时左右(包括实验)，主要作为高职高专学校自动化类、仪器仪表类、电子技术类、机电技术类等电类专业的用书。教材中各章具有一定的独立性，其他有关专业(如计算机、数控、汽车类专业)可根据需要选用不同的章节，也可供有关从事检测、控制技术等工程技术人员参考。

全书共分12章。第1章较详细介绍了检测技术的基本知识；第2章至第10章按工作原理分类介绍各种类型传感器的基本原理、转换电路及其典型应用；第11章介绍了检测系统信号的处理、变换及抗干扰技术；第12章为自动检测技术的综合应用。

本教材由安徽机电职业技术学院武昌俊担任主编、负责统稿，并编写了绪论、第1、2、3章及附录。山西机电职业技术学院张广红任副主编并编写第4、5、7章；安徽机电职业技术学院黄鹏任副主编并编写第9、10章及第11.2节和全教材电子课件的制作；安徽机电职业技术学院鲁业安编写了第6、8章；安徽机电职业技术学院花汝华参加编写第1版第6、9章；陕西工业职业技术学院尚冬梅编写了第11.1节和第12章。全书承蒙安徽职业技术学院周副教授担任主审。主审以高度负责的态度审阅全文，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

本教材在编写过程中，得到安徽机电职业技术学院领导的亲切关怀和指导，电气工程系老师提出许多宝贵的修改意见；安徽机电职业技术学院孙晗同志为全书的文字录入、插图处理和编辑做了大量的工作；编写中参考和应用了许多专家、学者的著作。编者在此一并表示

衷心的感谢!

由于传感器技术发展较快,而且自动检测技术涉及的知识面非常广泛,也由于作者的水平有限,在接触领域和理解上又有一定局限性,因此,在内容选择和安排上,不免会存在遗漏和不妥之处,诚请读者批评指正。

编者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 检测技术的基本知识	5
1.1 测量的基本概念	5
1.1.1 测量	5
1.1.2 测量方法	5
1.2 测量误差及其分类	6
1.2.1 误差的表达方式	6
1.2.2 测量误差的分类	7
1.2.3 测量仪表的精确度与分辨率	8
1.3 测量结果的数据分析及其处理	10
1.3.1 测量结果的数据分析	10
1.3.2 测量结果的数据处理	11
1.3.3 测量系统静态误差的合成	13
1.4 传感器及其基本特性	14
1.4.1 传感器的定义及组成	14
1.4.2 传感器的分类	15
1.4.3 传感器的基本特性	15
1.4.4 传感器的技术指标	18
1.5 传感器中的弹性敏感元件	19
1.5.1 弹性敏感元件的基本特性	19
1.5.2 弹性敏感元件的形式及应用范围	20
复习思考题	24
第2章 电阻式传感器及其应用	25
2.1 电阻应变片式传感器	25
2.1.1 电阻应变片的结构和粘贴	25
2.1.2 电阻应变片的工作原理	27
2.1.3 测量转换电路	29
2.1.4 应用	32
2.2 电位器式传感器	36
2.2.1 工作原理及特点	36
2.2.2 结构及测量转换电路	36
2.2.3 电位器式电阻传感器应用举例	37
2.3 测温热电阻式传感器	38
2.3.1 热电阻的工作原理	38
2.3.2 热电阻材料及其结构	39
2.3.3 常用的热电阻	40
2.3.4 热电阻应用——热电阻式流量计	41
2.4 其他电阻式传感器	42
2.4.1 热敏电阻式传感器	42
2.4.2 湿敏电阻式传感器	44
2.4.3 气敏电阻式传感器	46
复习思考题	49
第3章 电感式传感器及其应用	50
3.1 自感式传感器	50
3.1.1 工作原理	51
3.1.2 自感式电感传感器的转换电路	53
3.1.3 应用	55
3.2 差动变压器式传感器	57
3.2.1 工作原理	57
3.2.2 主要性能	58
3.2.3 测量电路	59
3.2.4 应用	60
3.3 电涡流式传感器	62
3.3.1 电涡流式传感器的基本结构与工作原理	62
3.3.2 转换电路	64
3.3.3 应用	66
复习思考题	69
第4章 电容式传感器及其应用	70
4.1 电容式传感器的工作原理及其结构形式	70
4.1.1 变面积(A)式电容传感器	70
4.1.2 变极距(d)式电容传感器	71
4.1.3 变介电常数(ϵ)式电容传感器	72
4.1.4 差动电容传感器	74

4.2 电容式传感器的测量转换电路	75	6.2.1 光电开关	106
4.2.1 电桥电路	75	6.2.2 光电断续器	107
4.2.2 调频电路	76	6.3 电荷耦合器件	107
4.2.3 差动脉冲调宽电路	76	6.3.1 感光原理	108
4.2.4 运算放大器式电路	78	6.3.2 电荷传输原理	108
4.2.5 二极管T形网络	78	6.4 光电式传感器的应用	109
4.2.6 使用转换电路的注意事项	79	6.4.1 模拟式光电传感器	110
4.3 电容式传感器的应用	79	6.4.2 脉冲式光电传感器	113
4.3.1 电容传感器的优缺点及使用范围	79	6.5 热释电元件及红外人体检测	114
4.3.2 应用实例	80	6.5.1 热释电效应及传感器结构	115
复习思考题	82	6.5.2 用于人体探测的热释电传感器	115
第5章 热电偶传感器及其应用	83	复习思考题	116
5.1 热电偶传感器的工作原理	83	第7章 霍尔传感器及其应用	117
5.1.1 工作原理	83	7.1 霍尔元件的结构及其工作原理	117
5.1.2 热电偶定律	85	7.1.1 霍尔效应的工作原理	117
5.2 热电偶的种类和结构	87	7.1.2 霍尔元件的结构	118
5.2.1 热电偶的结构	87	7.2 霍尔元件的特性参数及其误差	118
5.2.2 热电偶的种类	88	7.2.1 霍尔元件的主要特性参数	118
5.2.3 常用热电偶简介及镍铬—镍硅热电偶分度表	89	7.2.2 霍尔元件的误差	119
5.3 热电偶的冷端补偿和测温电路	90	7.3 霍尔集成电路	120
5.3.1 热电偶的冷端补偿	90	7.3.1 霍尔元件的常用电路	120
5.3.2 热电偶的测温电路	91	7.3.2 常用霍尔集成电路	121
5.4 热电偶的应用及其配套仪表	94	7.4 霍尔传感器的应用	123
5.4.1 伺服式温度表	94	7.4.1 霍尔压力传感器	124
5.4.2 动圈仪表	95	7.4.2 霍尔电流传感器	124
5.4.3 数字式温度表	96	7.4.3 霍尔传感器用于角度检测	125
5.4.4 热电偶用于金属表面温度的测量	96	7.4.4 霍尔开关按键	125
5.4.5 热电偶用于管道内温度的测量	96	7.4.5 霍尔无刷电动机	126
复习思考题	97	7.4.6 用霍尔集成传感器进行无触点照明控制	126
第6章 光电传感器及其应用	98	复习思考题	127
6.1 光电效应及光电元器件	98	第8章 数字式传感器及其应用	128
6.1.1 光电效应及分类	98	8.1 码盘式传感器	128
6.1.2 光电元器件、特性及基本测量电路	98	8.1.1 增量式编码器	128
6.2 光电开关及光电断续器	106	8.1.2 绝对式编码器	130
		8.2 光栅传感器	132
		8.2.1 光栅的结构与类型	133
		8.2.2 基本工作原理	134

8.2.3 辨向及细分	135	10.3.1 氧量传感器在三元系统中的 作用	178
8.2.4 光栅传感器的应用	136	10.3.2 二氧化锆型氧量传感器	179
8.3 磁栅传感器	138	10.3.3 带加热的二氧化锆氧量 传感器	180
8.3.1 磁栅结构及工作原理	138	10.4 卡曼涡旋式空气流量传感器	182
8.3.2 信号处理方式	139	10.5 安全气囊系统及碰撞传感器	185
8.3.3 磁栅传感器的应用	140	10.5.1 碰撞传感器的功用与类型	186
8.4 感应同步器	142	10.5.2 滚球式碰撞传感器	186
8.4.1 种类和结构	142	10.5.3 滚轴式碰撞传感器	187
8.4.2 工作原理	144	10.5.4 偏心锤式碰撞传感器	187
8.4.3 感应同步器的信号处理 方式	145	10.5.5 水银开关式碰撞传感器	188
8.4.4 感应同步器数显表及其 应用	146	10.5.6 电子式碰撞传感器	189
复习思考题	149	复习思考题	189
第9章 其他类型传感器及其应用	150	第11章 信号的处理、变换及 抗干扰技术	190
9.1 压电式传感器	150	11.1 信号的处理与变换	190
9.1.1 压电效应	150	11.1.1 电桥电路	190
9.1.2 压电材料	152	11.1.2 模拟开关	191
9.1.3 测量电路	153	11.1.3 放大器	193
9.1.4 应用	154	11.1.4 信号转换电路	194
9.2 超声波传感器	156	11.1.5 线性化	196
9.2.1 超声波及其物理性质	156	11.2 抗干扰技术	198
9.2.2 超声波传感器的应用	158	11.2.1 电子测量装置的两种干扰	198
9.3 光纤传感器	164	11.2.2 屏蔽技术	199
9.3.1 光纤的基本概念	165	11.2.3 接地技术	201
9.3.2 光纤传感器的应用	166	11.2.4 滤波技术	204
复习思考题	168	11.2.5 光电耦合技术	206
第10章 汽车中常用传感器及其 应用	169	复习思考题	207
10.1 转速传感器	169	第12章 自动检测技术的综合 应用	208
10.1.1 电磁式转速传感器	169	12.1 传感器的选用原则	208
10.1.2 脉冲信号式转速传感器	170	12.1.1 传感器的选择要求	208
10.1.3 车速传感器	172	12.1.2 选用传感器的原则	208
10.2 液位传感器	175	12.2 自动检测系统的智能化	210
10.2.1 浮子簧开关式液位传感器	175	12.2.1 智能化的基本概念	210
10.2.2 热敏电阻式液位传感器	176	12.2.2 单片微机的选择	210
10.2.3 可变电阻式液位传感器	176	12.2.3 智能化传感器	210
10.2.4 电极式液位传感器	177	12.3 综合应用举例	211
10.3 氧量传感器	178		

12.3.1 传感器在汽轮机叶根槽 数控铣床中的应用·····	211	附录 A 测量的基准、标准和单位制 简介·····	218
12.3.2 传感器在陶瓷隧道窑温度、压力 检测控制系统中的应用·····	214	附录 B 几种常用传感器的性能比较·····	219
12.3.3 传感器在模糊控制洗衣机 中的应用·····	216	附录 C 工业热电阻分度表·····	220
复习思考题·····	217	附录 D 镍铬—镍硅热电偶分度表(自由端 温度为0℃)·····	221
附录·····	218	参考文献·····	223

绪 论

检测包含检查和测量两方面，是将生产、科研、生活等方面的有关信息通过合适的方法与装置进行分析或定量计算，以发现事物的规律性。在自动化系统中，人们为了有目的地进行控制，首先需要通过检测获取生产流程中的各种有关信息，然后对它们进行分析、判断，以便进行自动控制。

1. 检测技术

检测技术是以研究自动检测系统中的信息提取、信息转换及信息处理的理论和技术为主要内容的一门应用技术学科。广义上说，检测技术是自动化技术的四个支柱之一，检测技术的任务是：寻找与自然信息具有对应关系的各种表现形式的信号，以及确定的定性、定量关系；从反映某一信息的多种信号中挑选出在所处条件下最为合适的表现形式，及寻求最佳的采集、变换、处理、传输、存储、显示的方法和相应的设备。

信息采集是指从自然界诸多被检查与测量量(物理量、化学量、生物量与社会量等)中提取有用的信息。

信息变换是将所提取出的有用信息向电量、幅值、功率等形式转换。

信息处理的任务是根据输出环节的需要，将变换后的电信号进行数字运算(求均值、极值等)以及模拟量、数字量变换等处理。

信息传输的任务是在排除干扰的情况下经济地、准确无误地把信息进行远、近距离的传递。

虽然检测技术服务的领域非常广泛，但是从这门课程的研究内容来看，不外乎是传感器技术、误差理论、测试计量技术、抗干扰技术以及电量间互相转换的技术等。提高自动检测系统的检测分辨率、精度、稳定性和可靠性是本门学科的主要研究方向。

2. 自动检测系统的组成

自动检测系统是自动测量、自动计量、自动保护、自动诊断、自动信号等诸系统的总称，其原理框图如图 0-1 所示。对具体检测系统或传感器而言，必须将框图中的各项内容赋以具体的内容。

传感器是指一个能将被测的非电量转换成电量的器件，是连接被测对象和检测系统的接口。它提供给系统赖以进行处理和决策所必须的原始信息，是一些现代技术的起点，在很大程度上决定了系统的功能，是一个关键性器件。

信息处理电路的作用是把传感器输出的电量变成具有一定驱动和传输能力的信号(如电压、电流、频率等)，以推动后级的显示电路、数据处理装置及执行机构。

目前常用的显示器有四类：模拟显示器、数字显示器、图像显示器及记录仪等。模拟显示器是利用指针对标尺的相对位置来表示读数的，常见的有毫伏表、微安表、模拟光柱等。

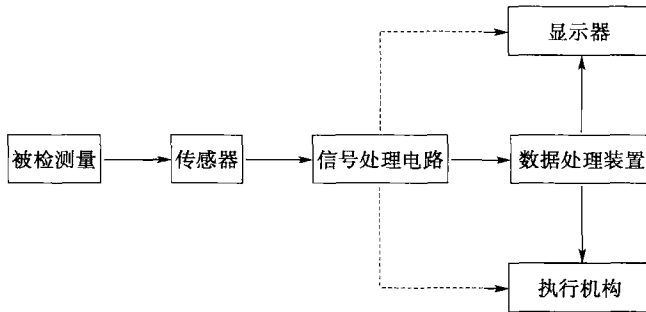


图 0-1 自动检测系统的原理框图

数字显示目前多采用发光二极管(LED)和液晶(LCD)等,以数字的形式来显示读数。前者亮度高、耐振动、可适应较宽的温度范围;后者耗电低、集成度高。目前还研制出了带背光板的LCD,便于在夜间观看LCD显示的内容。

图像显示是用CRT或点阵式的LCD来显示读数或被测参数的变化曲线,有时还可以用图表或彩色图等形式来反映整个生产线上的多组数据。

记录仪主要用来记录被检测对象的动态变化过程,常用的记录有笔式记录仪、高速打印机、绘图仪、数字存储示波器、磁带记录仪等。

数据处理装置是用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、分析,对动态测试结果做频谱分析(幅值谱分析、功率谱分析)、相关分析等,完成这些任务必须采用计算机技术。

数据处理的结果通常送到显示器和执行机构中去,以显示运算处理的各种数据或控制各种被控对象。在不带数据处理装置的自动检测系统中,显示器和执行机构由信号处理电路直接驱动,如图0-1中的虚线所示。

执行机构通常是指各种接触器、电磁铁、电磁阀门、电磁调节阀、伺服电动机等,它们在电路中是起通断、控制、调节、保护等作用的电器设备。许多检测系统能输出与被测量有关的电流或电压信号,作为自动控制系统的控制信号,去驱动这些执行机构。

3. 检测技术的作用

人类对客观世界的认识和改造总是以检测工作作为基础的。人类早期在从事生产活动时,就已经对长度(距离)、面积、时间和重量进行测量,其最初的计量单位或是与自身生理特点相联系(如长度),或是与自然环境相联系(如时间)。

在工程技术中的研究对象往往十分复杂,有些实际问题必须依靠实验研究来解决,而通过检测工作积累原始数据是工程设计和研究中的一项十分艰巨,也是十分重要的工作。

随着社会的进步和发展,自动检测技术已成为一些发达国家的最重要的热门技术之一,它可以给人们带来巨大的经济效益,并促进科学技术飞跃发展,因此在国民经济中占有极其重要的地位。

在实际工业生产中,检测技术的内容涉及极为广泛,如表0-1所示。

表 0-1 工业检测技术涉及的内容

被测量类型	被 测 量	被测量类型	被 测 量
热工量	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力(压强)、压差、真空度、流量、流速、物位、液位、界面	物体的性质和成分量	气体、液体、固体的化学成分、浓度、粘度、湿度、密度、酸碱度、浊度、透明度、颜色
机械量	直线位移、角位移、速度、加速度、转速、应力、应变、力矩、振动、噪声、质量(重量)	状态量	机械的运动状态(起、停等)、设备的异常状态(超温、过载、泄漏、变形、磨损、堵塞、断裂等)
几何量	长度、厚度、角度、直径、间距、形状、平行度、同轴度、粗糙度、硬度、材料缺陷	电工量	电压、电流、功率、电阻、阻抗、频率、脉宽、相位、波形、频谱、磁场强度、电场强度、材料的磁性能

在国防科研中，检测技术更为重要，用得更多，而且许多检测技术都是因国防科研需要而发展起来的。甚至在日常生活中，也离不开检测技术。如家庭煤气泄漏自动报警装置、空气温度的检测装置等等。自动检测技术渗透到各行各业，方方面面，也可以说检测技术直接影响着人类文明发展和进步。

4. 检测技术的发展趋势

检测技术所涉及的知识非常广泛，渗透到各个学科领域。由于科学和技术的发展，自动化程度越来越高，因而对自动检测系统的要求越来越高，促使自动检测系统的研究向着研制“在线”检测和控制，检测系统小型化、一体化及智能化，以及研究故障检测系统的方向发展。当前，检测技术的发展主要表现在以下几个方面。

(1) 不断提高检测系统的测量精度、可靠性、稳定性、抗干扰性及使用寿命。近年来，随着科学技术的不断发展，要求测量精度、可靠性和稳定性等尽可能的高。例如超精度的“在线”检测精度要求小于 $0.1\mu\text{m}$ 。对传感器可靠性、故障率的数学模型和计算方法的研究，大大提高了检测系统的可靠性。

为了使自动检测装置适应在各种复杂条件下可靠工作，要求研制的检测系统具有较高的抗干扰能力和适应生产要求的较长的使用寿命。

(2) 发展小型化、集成化、多功能化、多维化、智能化和高性能、扩大量程范围的检测装置。随着半导体材料的研究和新工艺的进展，已研制出了一批新型半导体传感器；光刻、扩散及各向异性腐蚀等集成电路新工艺也已渗透至传感器的制造过程中，从而使检测系统更趋于小型化、集成化、多维化、多功能化及性能更强。同时若将传感器、放大器、温度补偿电路等集成于同一芯片上，构成“材料—器件—电路—系统”一体化，将进一步增加检测系统的抗干扰能力。

自微处理器问世及迅速应用以来，测量系统、控制技术、显示和记录装置也在向数字化、智能化方向发展，使得自动检测技术须具有精确检测及数据处理等功能，以提高测量精度和可靠性，从而扩展检测功能。

另外，检测系统趋于多维化，对于测量信息的采集不是局限于某一点，而是能在较宽范围内立体获得信息且具有较高的空间分辨率，即从“计量”向状态识别靠近。

(3) 应用新技术和新的物理效应，扩大检测领域的应用。检测原理大多以各种物理效应为基础。近代物理学的进展，对仿生学的研究，仿造生物的感觉功能的新型传感器的开发

应用,使得检测技术的应用领域更广阔。如今的检测领域正向着整个社会需要各方面扩展,不仅用于工业部门,而且也涉及到工程、海洋开发、宇宙航行等尖端科学技术和新兴工业领域,生物、医疗、环境污染监测、危险品和毒品的侦察、安全监测方面,同时也已渗入到人类的日常生活之中等等。

(4) 网络化传感器及检测系统逐步发展。在“信息时代”社会里,本着资源共享的原则,信息网络化蓬勃发展。为了能随时随地浏览和控制现场工况,要求传感器及检测系统具有能符合某种协议格式的信息采集及传输的功能。即通过局域网、互联网等实现异地的数据交换和共享,从而实现远程调试、远程故障诊断、远程数据采集和实时操作,构成网络化的检测系统。

总之,检测技术的不断发展是为了适应国民经济发展的需求,取得的进展十分引人注目,今后将有更辉煌的飞跃。

5. 本课程的任务和学习要求

本课程的任务是:在阐述测量基本原理的基础上,分析各种传感器如何将非电量转换为电量,并对相应的测量转换电路、信号处理电路及在各领域中的应用作一介绍,同时也适当地介绍误差处理、弹性元件、抗干扰技术、信号的处理与变换及自动检测技术的综合应用等知识。目的是使学生掌握各类传感器的基本理论、工作原理、转换电路、主要性能和特点以及自动检测技术的相关知识,从而使学生能合理地选择、使用传感器;了解传感器的发展动向和运用检测技术的相关知识解决各领域中的实际问题等。

由于涉及到机、电、光等多方面知识,学科面广,需要有较广泛的基础和专业知识,学习本课程之前应有所准备。学习中要把握全书中重点和各章重点,弄清基本概念,做到理论联系实际,富于联想、善于借鉴,重视实验和实训,这样才能学得活、学得好,才有利于提高今后解决实际问题的能力。

第 1 章 检测技术的基本知识

检测技术的主要组成部分之一是测量，人们采用测量手段来获取所研究对象在数量上的信息，从而通过测量所得到的结果是定量的结果。现代社会要求测量必须达到高准确度、误差极小、速度更快、可靠性强等。为此要求测量的方法精益求精。本章主要介绍测量的基本概念；测量方法；误差定义及表示法；误差分类及处理；测量仪表精确度与分辨率；测量结果的数据统计与处理；传感器的定义、分类、静特性及技术指标和传感器中的弹性敏感元件等内容。这些内容是学习后面章节的基本知识。

1.1 测量的基本概念

1.1.1 测量

测量是借助专用的技术和设备，通过实验和计算等方法取得被测对象的某个量的大小和符号；或者取得一个变量与另一个变量之间的关系，如变化曲线等，从而掌握被测对象的特性、规律或控制某一过程等等。

测量是获取被测对象量值的惟一手段。它是将被测量与同性质的标准量通过专用的技术和设备进行比较，获得被测量对比标准量的倍数。标准量是由国际上或国家计量部门所指定的，其特性是足够稳定的。

测量结果一般表示为

$$X = AX_0 \quad (1-1)$$

式中 X ——被测量；

X_0 ——标准量；

A ——比值。

可见，比值 A 的大小取决于标准量 X_0 的单位大小。因此在表示测量结果时，必须包含两个要素：一个是比值大小及符号（正或负）；另一个是说明比值 A 所采用的单位，不注明单位，测量结果则失去实际意义。

1.1.2 测量方法

测量的方法多种多样，就测量方法而言，测量分为直接测量和间接测量。如用电压表、电流表等测量属于直接测量。它们的共同点是用一块分度（标定）好的仪表盘对被测量进行直接测量，从表盘上直接读出被测数值；若直接测量不方便，或直接测量的仪表不够精确，就利用被测量与某中间量间的函数关系，先测出中间量，然后通过相应的函数关系计算出被测量的数值，此法称为间接测量，如伏安法测量电阻的阻值。

根据测量结果的显示方式，测量分为模拟量测量和数字量测量。如用示波器测量交流电压属模拟量测量。

按被测量是否随时间变化,测量分为静态测量和动态测量。如在磨床加工中使用无杠杆传动的电触式传感器进行圆工件检测就是动态测量。

根据测量时是否与被测量对象接触,测量分为接触式测量和非接触式测量。

从不同角度考察,测量方法有不同的分类,但常用的具体测量方法有零位法、偏差法和微差法等。

零位法是指被测量与已知标准量进行比较,使这两种量对仪器的作用抵消为零(指零机构达到平衡),从而可以肯定被测量就等于已知标准量。如天平测量质量就是零位法的典型例子。天平的砝码就是已知标准量。零位法的测量误差显然主要来自标准量的误差和比较仪器的误差。此法的误差很小,因此零位法的测量精度较高,但平衡复杂,多用于缓慢信号的测量。

偏差法是指测量仪表用指针相对于表盘上分度线的位移来直接表示被测量大小。如用弹簧秤测物体的质量是直接从指针偏移的大小来表示被测量。在这种测量方法中,必须先用标准量具对仪表分度进行校正。该方法由于表盘上分度的精确度不易做得很高,测量精度一般不高,但测量过程简单、迅速、比较通用。

微差法是零位法和偏差法的组合。先将被测量与一个已知标准量进行比较,使该标准量尽量接近被测量,这相当于不彻底的零位法。而不足部分即被测量与该标准量之差,再用偏差法测量。例如图 1-1 的长度测量中标准长度 L_B , 它与被测量 L_x 进行比较后的差值 ΔL 用偏差法测出,则所得被测物体长度 $L_x = L_B + \Delta L$ 。

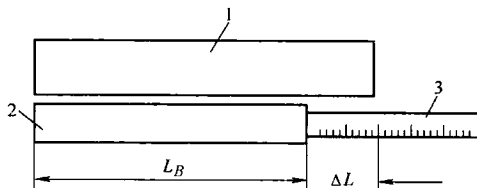


图 1-1 微差法测量示意图

1—被测物体 2—标准长度 3—测量尺

在测量中,即使测得的差值 ΔL 精度不高,但因其值较小,其误差对总的误差影响较小。另外微差法不必进行反复的平衡操作。因而微差法是综合了偏差法速度快和零位法测量精度高的优点而提出的测量方法,在工程测量中广泛使用。

1.2 测量误差及其分类

测量的目的是对被测量求真值。所谓真值是指某被测量在一定条件下其本身客观存在的真实的实际值。但由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响及人们认识能力所限等,测量和实验所得的数据和被测量的真值间不可避免地存在着差异,在数值上即表现为误差。即这种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,也可用相对和引用误差表示。

1.2.1 误差的表达方式

1. 绝对误差 某量值的测量值 A_x 与真值 A_0 之间的差为绝对误差 Δ , 即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-2)$$

由式(1-2)可知,绝对误差可能为正值或负值。

2. 相对误差 绝对误差 Δ 与被测量的真值 A_0 之比称为相对误差 γ , 用百分比形式

表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

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, 而采用相对误差来评定较为确切。

例如对 $L_1 = 100\text{mm}$ 的尺寸两次测量, 其测量误差分别为 $\Delta_1 = 10\mu\text{m}$, $\Delta_2 = 8\mu\text{m}$, 显然后者测量精度高, 但若对 $L_2 = 80\text{mm}$ 的尺寸测量, 测量误差为 $\Delta_3 = 7\mu\text{m}$, 此时用绝对误差就难以评定与前两次精度的高低, 必须用相对误差来评定。

因测量值与真值相近, 故也可近似用绝对误差与测量值之比作为相对误差, 此误差也称示值相对误差 γ_x , 即

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

由于绝对误差可能为正值或负值, 因此相对误差也可能为正值或负值。

3. 引用误差 相对误差可用来比较两种测量结果的准确程度, 但不能用来衡量不同仪表的质量。因为同一仪表在整个测量范围内的相对测量误差不是定值, 随着被测量的减小, 相对误差也增大。当被测量接近于量程的起始零点时, 相对误差趋于无限大。为了合理地评价仪表的测量质量引入了引用误差。所谓的引用误差 γ_m 是指被测量的绝对误差 Δ 与测量仪表的上限(满度)值 A_m 的百分比之值, 即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

1.2.2 测量误差的分类

误差产生的原因和类型很多, 其表现形式也多种多样, 根据造成误差的不同原因, 有不同的分类方法。

1.2.2.1 按误差的特点与性质划分

误差可分为系统误差、随机误差(也称偶然误差)和粗大误差。

1. 系统误差 在同一条件下, 多次测量同一量值时, 绝对值和符号保持不变, 或在条件改变时, 按一定规律变化的误差称为系统误差。例如, 标准量值的不准确、仪器仪表盘分度的不准确而引起的误差。系统误差按其表现规律分为: 不变系统误差和变化系统误差。不变系统误差是指误差绝对值和符号为固定的系统误差。如由于分度盘分度差错或分度盘移动而使仪表分度产生误差。变化系统误差是指误差绝对值和符号为变化的系统误差。如电子元件老化、机械零件变形移位、电源电压波动等产生的误差。

系统误差是有规律可循的, 因此可通过实验的方法或引入修正值的方法予以修正, 也可重新调整测量仪表的有关零部件来消除。

2. 随机误差 在同一条件下, 多次测量同一量值时, 绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差称为随机误差。例如, 仪器仪表中传动部件的间隙和摩擦、连接件的弹性变形等引起的示值不稳定。随机误差的出现, 就每次测量误差的个体而言是没有规律的, 不可预计它的大小和符号, 但在多次重复测量时, 测量结果的总体是遵从于统计规律, 因而可从理论上

计算出它对测量结果的影响, 即随测量次数 n 的增加, 随机误差 δ_i 的算术平均值 $\sum_{i=1}^n \delta_i / n$

将逐渐变小，测量精度将提高。随机误差不能用实验的办法消除。

3. 粗大误差 超出在规定条件下预期的误差称为粗大误差，也称过失误差。此误差值较大，明显歪曲测量结果，如测量时对错了标志、读错或记错了数、使用有缺陷的仪器及在测量时因操作不细心而引起的过失性误差等。当发现粗大误差时，应予以剔除。

1.2.2.2 按测量变化速度划分

误差可分为静态误差和动态误差。

1. 静态误差 被测量稳定不变时所产生的误差称为静态误差。前面讨论的误差多属于静态误差。

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不能与被测量的变化精确吻合时，产生的误差称为动态误差。例如用温度计测 100℃ 沸水时，如果一插入水中就读数，必然会产生误差，因为温度计不可能立即上升至 100℃。对于用带有机械结构的仪表进行动态测量，应尽量减小机械惯性，提高机械结构的谐振频率，才能尽可能真实地反映被测量的迅速变化。

1.2.3 测量仪表的精确度与分辨率

衡量仪表测量能力的指标，较多的是精确度，简称精度，与精度有关的指标为：精密程度、准确度和精确度等级。

精密程度是指测量仪表指示值不一致程度的量，即对某一稳定的被测量，在相同的工作条件下，由同一测量者使用同一个仪表，在相当短的时间内按同一方向连续重复的测量获得测量结果不一致的程度。例如一温度计的精密程度为 0.5 级，表明该温度计的不一致程度不会超过 0.5 级。不一致程度越小，说明仪表越精密。有时表面上看不一致程度为零，但并不说明该仪表精密程度越高，还要考察该仪表显示的有效位数多少。精密程度是由两个因素确定的：一个是重复性，它是由随机误差决定的；另一个是仪表能显示的有效值位数，能读出的有效值位数越多，精密程度越高。

准确度是指仪表指示值有规律地偏离真值的程度，如某电流的真值是 10.00mA，经某电流表多次测量结果是 10.01mA、10.02mA、10.03mA、10.02mA、10.04mA，则该电流表的准确度为 0.04mA。准确度是由系统误差衡量的，产生系统误差的原因较多，如仪表工作原理所利用的物理规律不完善；仪表本身有缺陷；测量环境有变化；测量时使用仪表的方法不正确等。这些误差是服从某一特定规律，产生原因是可知的，所以应尽可能消除或减小其误差，即可提高准确度。

精确度是精密程度和准确度两者总和，是反映测量仪表优良程度的综合指标。仪表的精密程度和准确度都高，其精确度才高，精确度是以测量误差的相对值来表示的。

实际测量中，精密程度高，准确度不一定高。因仪表本身可以存在较大的系统误差。反之，若准确度高，精密程度也不一定高。精密程度和准确度的区别，可以用图 1-2 射击的例子来说明。

图 1-2a 表示弹着点很分散，相当于精密程度差；图 1-2b 表示精密程度虽好，但准确度差；图 1-2c 才表示精密程度和准确度都很好。

在工程检测中，为了简单地表示仪表测量结果的可靠程度，引入一个仪表精确度等级，其定义为：仪表在规定工作条件下，其最大绝对允许误差值对仪表测量范围的百分数绝对