



中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 自动检测技术

## (电气运行与控制专业)

梁 森  
王侃夫 编  
黄杭美



4-43



机械工业出版社



325

317574-45

2008.12

中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 自动检测技术

(电气运行与控制专业)

梁 森 王侃夫 黄杭美 编  
责任主审 吴锡龙  
审 稿 黄正荣 朱承高



机械工业出版社

本书是经教育部审定的中等职业技术教育国家规划教材。主要介绍在工业生产及生活等领域常用传感器的工作原理、特性参数、选型、安装使用、调试及测量数据分析等方面的知识，对测量技术的基本概念、弹性元件、抗干扰技术、电磁兼容性及微机在检测系统中的应用也做了介绍。

本书突出了传感器应用和工艺方面的内容，反映了新技术和新器件在自动检测领域中的应用。内容介绍深入浅出，点面结合。书中的许多应用实例是作者近 20 年来的科研和技术改造的成果总结，有较强的实践性和可参考性。每章均有思考题和习题，题型形式多样，可帮助读者巩固基本概念，掌握必要的计算，提高理论联系实际的能力，并附有参考答案。

本书可作为中职电气运行与控制类、自动化控制类、汽车电器类、电子信息类、仪器仪表类及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。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

自动检测技术/梁森等编. —北京: 机械工业出版社, 2002.5  
中等职业教育国家规划教材. 电气运行与控制专业  
ISBN 7-111-10356-4

I. 自... II. 梁... III. 自动检测—专业学校—教材  
IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 035199 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·16 印张·395 千字

0 001—4 000 册

定价: 19.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

## 中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001 年 10 月

# 前 言

本书是根据教育部制定的中等职业电气运行与控制专业自动检测技术教学大纲编写的。

根据中等职业教育培养目标的要求,本书力图使学生学完本书后能获得作为生产第一线的技术、管理和运行人员所必须掌握的传感器、自动检测系统和抗干扰技术等方面的基本知识和基本技能。

本书着重介绍工业、科研、生活中常用传感器的工作原理、测量转换电路及传感器的应用。各章节的重点放在传感器的选型、调试、测量数据分析等解决实际问题的基本技能上。

在考虑取材的深度和广度时,主要着眼于提高中职学生的应用和工艺知识水平,故压缩了理论推导,突出了应用实例。

为了适应检测技术日新月异的发展趋势,反映本学科在近几年里的技术进步,本书舍弃了一些过时或少用的传感器,而以较大篇幅介绍近十年出现的、并得到广泛应用的传感器。其素材多来源于最近几年国内外专利文献、科技论文等。在编写过程中,作者还先后深入几十家有关厂商和车间,了解、收集较先进的产品技术资料、图片,甚至实地测绘了许多图纸。有相当大部分应用电路和实例是作者二十年来从事科研开发、技术改造的成果总结,均编入有关的各章节中,因此具有较高的真实性和可参考性。

针对原书以测量原理划分章节带来的不足之处,这次编写中对经常遇到的,诸如温度、压力、流量、液位、振动等被测量以及无损探伤、接近开关、位置检测等有较大实用价值的内容在有关联的章节中作了集中论述。其中温度的测量贯彻了 ITS—1990 的新标准。

本书可作为中等职业技术学校电类、自动化类、仪表仪器类等专业的教材,亦可供其他有关专业如计算机、机械、汽车等专业的师生及有关工程技术人员参考。本书每章均附有启发性的思考题及应用型习题。

本书由上海电机技术高等专科学校梁森(绪论、第一、二、四、八、十、十二及统稿)、王侃夫(第七、十一、十三章)、杭州职业技术学院黄杭美(第三、五、六、九章)编。

在本书编写过程中,还得到了福州大学的郑崇苏、上海机电工业学校的阮智利、温州职业技术学院的徐虎、上海理工大学的谢根涛、上海交通大学忻建华、河南工业技术学院的王煜东、上海发电设备成套设计研究所的刘春林、上海重型机器厂的陈克、上海电气自动化研究所的张玉龙、上海量具刃具厂的宋伟强、上海电气自动化研究所的周宜、上海工业自动化仪表研究所的范铠、姜世昌、上海汽轮机厂的陈禹明、上海科技大学的朱铮良、山东职业技术学院学院的罗明华、广西职业技术学院学院的秦培林、常州职业技术学院学院的吴旗、广东康宇测绘仪表公司的段超、天津图尔克传感器公司的李倚天、上海华东电子仪器厂的朱美丽、郑学芳、上海轴承滚子厂的黄吉平以及深圳精星电子公司、上海 803 研究所等多家单位的大力支持,上海电机技术高等专科学校的郭泉老师在绘图等方面也做了大量的工作,编者在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,以及传感器技术发展较快,本书的内容不免存在遗漏和不妥之处,敬请读者批评指正。我们热诚盼望本书能对从事和学习自动检测技术的广大读者有所帮助,并希望您能把对本书的意见和建议通过 E-mail 告诉我们。E-mail 地址是 [liangwan@shtel.net.cn](mailto:liangwan@shtel.net.cn)

编 者

# 目 录

前言		
绪论	.....	1
<b>第一章 检测技术的基本概念</b>	.....	5
第一节 测量的基本概念及方法	.....	5
第二节 测量误差及分类	.....	7
第三节 传感器及其基本特性	.....	11
思考题与习题	.....	14
<b>第二章 电阻式传感器</b>	.....	17
第一节 电阻应变式传感器	.....	17
第二节 测温热电阻传感器	.....	29
第三节 气敏电阻传感器	.....	33
第四节 湿敏电阻传感器	.....	36
思考题与习题	.....	39
<b>第三章 电感式传感器</b>	.....	44
第一节 自感式传感器	.....	44
第二节 差动变压器式传感器	.....	48
第三节 电感式传感器的应用	.....	51
思考题与习题	.....	56
<b>第四章 电涡流式传感器</b>	.....	59
第一节 电涡流式传感器的工作原理	.....	59
第二节 电涡流式传感器的结构及特性	.....	60
第三节 测量转换电路	.....	61
第四节 电涡流传感器的应用	.....	63
第五节 接近开关简介	.....	67
思考题与习题	.....	71
<b>第五章 电容式传感器</b>	.....	74
第一节 电容式传感器的工作原理及 结构形式	.....	74
第二节 电容式传感器的测量转换电路	.....	78
第三节 电容式传感器的应用	.....	79
第四节 压力和流量的测量	.....	84
思考题与习题	.....	88
<b>第六章 压电式传感器</b>	.....	91
第一节 压电式传感器的工作原理	.....	91
第二节 压电式传感器的测量转换电路	.....	93
第三节 压电式传感器的应用	.....	94
第四节 振动测量	.....	97
思考题与习题	.....	100
<b>第七章 超声波传感器</b>	.....	102
第一节 超声波物理基础	.....	102
第二节 超声波换能器及耦合技术	.....	105
第三节 超声波传感器的应用	.....	108
第四节 无损探伤	.....	111
思考题与习题	.....	115
<b>第八章 霍尔传感器</b>	.....	117
第一节 霍尔元件的结构及工作原理	.....	117
第二节 霍尔元件的特性参数	.....	118
第三节 霍尔集成电路	.....	119
第四节 霍尔传感器的应用	.....	120
思考题与习题	.....	125
<b>第九章 热电偶传感器</b>	.....	127
第一节 温度测量的基本概念	.....	127
第二节 热电偶传感器的工作原理	.....	129
第三节 热电偶的种类及结构	.....	131
第四节 热电偶冷端的延长	.....	134
第五节 热电偶的冷端温度补偿及 技术处理	.....	135
第六节 热电偶的应用及配套仪表	.....	136
思考题与习题	.....	139
<b>第十章 光电传感器</b>	.....	142
第一节 光电效应与光电元件	.....	142
第二节 光电元件的基本应用电路	.....	151
第三节 光电传感器的应用	.....	153
第四节 光电开关及光电断续器	.....	163
思考题与习题	.....	165
<b>第十一章 数字式位置传感器</b>	.....	170
第一节 位置测量的方式	.....	170
第二节 数字式角编码器	.....	172

第三节	光栅传感器 .....	176	第三节	带微机的检测技术综合	
第四节	磁栅传感器 .....	182	应用实例 .....	228	
第五节	容栅传感器 .....	185	第四节	传感器在现代汽车中的应用 .....	232
第六节	感应同步器 .....	188	思考题与习题 .....	236	
思考题与习题 .....	193		<b>附录</b> .....	239	
<b>第十二章</b>	<b>检测系统的抗干扰技术</b> .....	197	附录 A	几种常用传感器的性能比较 .....	239
第一节	干扰源及防护 .....	197	附录 B	中华人民共和国法定计量单位 .....	240
第二节	检测技术中的电磁兼容原理 .....	200	附录 C	本书涉及到的部分计量单位 .....	242
第三节	几种电磁兼容控制技术 .....	205	附录 D	工业热电阻分度表 .....	243
思考题与习题 .....	218		附录 E	镍铬-镍硅(镍铝)K型热电偶分	
<b>第十三章</b>	<b>检测技术的综合应用</b> .....	221	度表(自由端温度为0℃) .....	245	
第一节	现代检测系统的基本结构 .....	221	习题参考答案 .....	247	
第二节	带微机的检测系统简介 .....	223	<b>参考文献</b> .....	249	



# 绪 论

检测 (Detection) 是利用各种物理、化学效应, 选择合适的方法与装置, 将生产、科研、生活等各方面的有关信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的过程。能够自动地完成整个检测处理过程的技术称为自动检测与转换技术。

在信息社会的一切活动领域中, 从日常生活、生产活动到科学实验, 时时处处都离不开检测。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。

## 一、检测技术在国民经济中的地位和作用

检测技术是现代化领域中很有发展前途的技术, 它在国民经济中起着极其重要的作用。

在机械制造行业中, 通过对机床的许多静态、动态参数如工件的加工精度、切削速度、床身振动等进行在线检测, 从而控制加工质量。在化工、电力等行业中, 如果不随时对生产工艺过程中的温度、压力、流量等参数进行自动检测, 生产过程就无法控制甚至产生危险。在交通领域, 一辆现代汽车中的传感器就有十几种之多, 分别用以检测车速、方位、负载、振动、油压、油量、温度、燃烧过程等。在国防科研中, 检测技术用的更多, 许多尖端的检测技术都是因国防工业需要而发展起来的。例如, 研究飞机的强度, 就要在机身、机翼上贴上几百片应变片并进行动态测量。在导弹、卫星的研制中, 检测技术就更为重要, 必须对它们的每个构件进行强度和动态特性的测试, 运行姿势测量等。近年来, 随着家电工业的兴起, 检测技术也进入了人们的日常生活中。例如, 自动检测并调节房间的温度、湿度; 自动检测衣服的污度和重量、利用模糊技术制作智能洗衣机等。

近几十年来, 自动控制理论、计算机技术迅速发展, 并已应用到生产和生活的各个领域。但是, 由于作为“感觉器官”的传感器技术没有与计算机技术协调发展, 出现了信息处理功能发达, 检测功能不足的局面。目前许多国家已投入大量的人力、物力, 发展各类新型传感器, 检测技术在国民经济中的地位也日益提高。

## 二、工业检测技术的内容

工业检测技术的内容较广泛, 常见的工业检测涉及的内容如表 0-1 所示。

表 0-1 工业检测涉及的内容

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	工作机械的运动状态 (启停等)、生产设备的异常状态 (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



显然，在实际工业生产中，需要检测的量远不止以上所举的项目。而且随着自动化、现代化的发展，工业生产将对检测技术提出越来越多的新要求，本教材只向读者介绍基本非电量的检测技术。

### 三、自动检测系统的组成

目前，非电量的检测多采用电测量法，即首先将各种非电量转变为电量，然后经过一系列的处理，将非电量参数显示出来，其原理框图如图 0-1 所示。

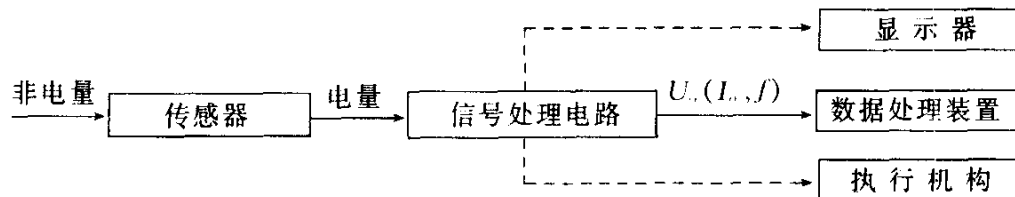


图 0-1 自动检测系统原理框图

所谓系统框图，就是将系统中的主要功能块或电路的名称画在框内，按信号的流程，将几个方框用箭头联系起来，有时还可以在箭头上标出信号的名称。在产品说明书、科技论文中，利用框图可以较简明、清晰地说明系统的构成及工作原理。

对具体的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。我们将从第一章开始学习框图的画法。

传感器 (Transducer) 在本教材中是指一个能将被测的非电量变换成电量的器件 (传感器的确切定义见第一章第三节)。信号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电压、电流或频率信号等，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、数字显示、图像显示及记录仪等。模拟量是指连续变化量。模拟显示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。

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；后者耗电省、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，常用的记录仪有笔式记录仪、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，完成这些工作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。

所谓执行机构通常是指各种继电器，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。

当代的检测系统越来越多地使用计算机或微处理器来控制执行机构的工件。检测技术、计算机技术与执行机构等配合就能构成某些工业控制系统，图 0-2 所示的自动磨削控制系统就是一个典型的例子。图中的传感器快速检测出工件的直径参数  $D$ ，计算机一方面对该参数作一系列的运算、比较、判断等工作，然后将有关参数送到显示器显示出来。另一方面发出控制信号，控制研磨盘的径向位移  $x$ ，直到工件加工到规定要求为止。

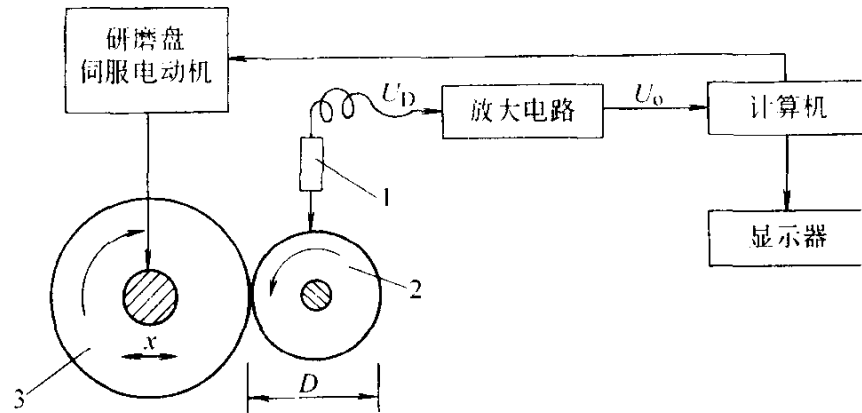


图 0-2 工业检测控制系统

1—传感器 2—被研磨工件 3—研磨盘

#### 四、检测技术的发展趋势

近年来，随着半导体、计算机技术的发展，新型或具有特殊功能的传感器不断涌现出来，检测装置也向小型化、固体化及智能化方向发展，应用领域也越加宽广。上至茫茫太空，下至海底、井下，大至工业生产系统，小至家用电器、个人用品，我们都可以发现检测技术的广泛运用。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、量程范围、延长使用寿命、提高可靠性

随着科学技术的不断发展，对检测系统测量精度的要求也相应地在提高。近年来，人们研制出许多高精度的检测仪器以满足各种需要。例如，用直线光栅测量直线位移时，测量范围可达二、三十米，而分辨率可达微米级；人们已研制出能测量小至几个帕的微压力和大到几千兆帕高压的压力传感器；开发了能够测出极微弱磁场的磁敏传感器等。

从 20 世纪 60 年代开始，人们对传感器的可靠性和故障率的数学模型进行了大量的研究，使得检测系统的可靠性及寿命大幅度的提高。现在许多检测系统可以在极其恶劣的环境下连续工作数十万小时。目前人们正在不断努力进一步提高检测系统的各项性能指标。

##### 2. 应用新技术和新的物理效应，扩大检测领域

检测原理大多以各种物理效应为基础，近代物理学的进展如纳米技术、激光、红外、超声、微波、光纤、放射性同位素等新成就都为检测技术的发展提供了更多的依据。如图像识别、激光测距、红外测温、C 型超声波无损探伤、放射性测厚、中子探测爆炸物等非接触测量得到迅速的发展。

20 世纪 70 年代以前，检测技术主要用于工业部门。如今，检测领域正扩大到整个社会需要的各个方面。不仅包括工程、海洋开发、宇宙航行等尖端科学技术和新兴工业领域，而且已涉及生物、医疗、环境污染监测、危险品和毒品的侦察、安全监测等方面，并且已开始渗入到人类的日常生活设施之中。

##### 3. 发展集成化、功能化的传感器

随着半导体集成电路技术的发展，硅和砷化镓电子元件的高度集成化有可能大量地向传

感器领域渗透。人们将传感元件与信号处理电路制作在同一块硅片上，从而研制出体积更小、性能更好、功能更强的传感器。例如，已研制出高精度的 PN 结测温集成电路；又如，人们已能将排成阵列的上千万个光敏元件及扫描放大电路制作在一块芯片上，制成彩色 CCD 数码照相机和摄像机。今后还将在光、磁、温度、压力等领域开发新型的集成度很高的传感器。

#### 4. 采用微机技术，使检测技术智能化

自 20 世纪 70 年代微处理器问世以来，人们已迅速将微机技术应用到测量技术中，使检测仪器智能化，从而扩展了功能，提高了精度和可靠性，目前研制的检测系统大多都带有微处理器。

#### 5. 发展网络化传感器及检测系统

随着微电子技术的发展，已可以将十分复杂的信号处理和电路集成到单块芯片中去。传感器的输出不再是模拟量，而是符合某种协议格式（可即插即用）的数字信号。从而可以通过企业内部网络，也可以通过 Internet 网，实现数据交换和共享。可以远在千里之外，随时随地浏览现场工况，实现远程调试、远程故障诊断、远程数据采集和实时操作，从而构成网络化的检测系统。

总之，检测技术的蓬勃发展适应了国民经济发展的迫切需要，是一门充满希望和活力的新兴技术，取得的进展已十分瞩目，今后还将有更大的飞跃。

### 五、本课程的任务和学习方法

本课程的任务是：在阐明测量基本原理的基础上，逐一分析各种传感器是如何将非电量转换为电量的，并介绍相应的测量转换电路、信号处理电路及各种传感器在工业中的应用。对误差处理、弹性元件及电磁兼容原理和抗干扰技术给予适当的介绍，对自动检测技术的综合应用以及带有微处理器的自动检测系统也举了较多的实例。

本课程涉及的学科面广，需要有较广泛的基础和专业知识。学好这门课程的关键在于理论联系实际。要举一反三，富于联想，善于借鉴，关心和观察周围的各种机械、电气等设备及生活环境设施，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。

本书各章均附有数量较多的应用实例及思考题与习题，引导读者循序渐进地掌握检测技术的基本概念和实际应用能力。部分分析思考题及联系实际较紧密的应用型设计题可利用习题课或讨论课的方式来学习和掌握，部分传感器原理可依靠对照实物的方法来讲解和学习。

# 第一章 检测技术的基本概念

测量是检测技术的主要组成部分，测量得到的是定量的结果。人类生产力的发展促进了测量技术的进步。商品交换必须有统一的度、量、衡；天文、地理也离不开测量；17世纪工业革命对测量提出了更高的要求，如蒸汽机必需配备压力表、温度表、流量表、水位表等仪表。现代社会要求测量必须达到更高的准确度、更小的误差、更快的速度、更高的可靠性，测量的方法也日新月异。本章主要介绍测量的基本概念、测量方法、误差分类、测量结果的数据统计处理，以及传感器的基本特性等内容，是检测与转换技术的理论基础。

## 第一节 测量的基本概念及方法

### 一、测量的一般概念

测量（Measurement）是借助专门的技术和仪表设备，采用一定的方法取得某一客观事物定量数据资料的认识过程。

所谓“定量”，就是使用一定精度等级的测量仪器、仪表，比较准确地测得被测量的数值。例如，用电子天平测量大气尘降，可以精确到0.1mg；又如，用磁敏三极管可以测出地球磁场万分之一的变化，从而可以用于探矿或判定海底沉船的位置。

测量过程实质上是一个比较的过程，即将被测量与一个同性质的、作为测量单位的标准量进行比较，从而确定被测量是标准量的若干倍或几分之几的比较过程。用天平测量物体的质量就是一个典型的例子。

测量结果可以表现为一定的数字，也可表现为一条曲线，或者显示成某种图形等，测量结果包含数值（大小和符号）以及单位。

### 二、测量方法分类

对于测量方法，从不同的角度出发，有不同的分类方法。根据被测量是否随时间变化，可分为静态测量和动态测量。例如，用激光干涉仪对建筑物的缓慢沉降作长期监测就属于静态测量；又如，用光导纤维陀螺仪测量火箭的飞行速度、方向就属于动态测量。

根据测量的手段不同，可分为直接测量和间接测量。用标定的仪表直接读取被测量的测量结果，该方法称为直接测量。例如，用磁电式仪表测量电流、电压；用离子敏MOS场效应晶体管测量pH值和甜度等。间接测量的过程比较复杂。首先要对与被测量有确定函数关系的量进行直接测量，将测量值代入函数关系式，经过计算求得被测量。

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。要求精密测量时，绝大多数测量均采用数字式测量。

根据测量时是否与被测对象接触，可分为接触式测量和非接触式测量。例如用多普勒超声测速仪测量汽车超速与否就属于非接触测量。非接触测量不影响被测对象的运行工况，是目前发展的趋势。

另外，为了监视生产过程，或在生产流水线上监测被加工件质量的测量称为在线测量，反

之,则称为离线测量。例如,现代自动化机床均采用边加工、边测量的方式,就属于在线测量,它能保证产品质量的一致性。离线测量虽然能测出产品的合格与否,但无法实时监控生产质量。

根据测量的具体手段来分,又可分为偏位式测量、零位式测量和微差式测量。下面简单介绍这三种测量方式的测量过程和特点。

### 1. 偏位式测量

直接以仪表的偏移量表示被测量的测量方式称为偏位式测量。例如,用弹簧秤测物体质量等,均是直接以指针偏移的大小来表示被测量。在这种测量方式中,必须事先用标准量具对仪表刻度进行校正。显然,采用偏位式测量的仪表内不包括标准量具。

偏位式测量易产生灵敏度漂移和零点漂移。例如,随着时间的推移,弹簧的刚度发生变化,弹簧秤的读数就会产生误差,所以必须定期对偏位式仪表进行校验和校准。偏位式测量虽然过程简单、迅速,但精度不高。

### 2. 零位式测量

在测量过程中,被测量与仪表内部的标准量相比较,当测量系统达到平衡时,用已知标准量的值决定被测量的值,这种测量方式称为零位式测量。在零位式测量仪表中,标准量具是装在测量仪表内的。用调整标准量来进行平衡操作过程。当两者相等时,用指零仪表的零位来指示测量系统的平衡状态。

例如,用天平来测量物体的质量;用平衡式电桥来测量电阻值等均属于零位式测量。在上述测量中,平衡操作花费的时间较多。

零位式测量的特点是精度高,但平衡复杂,多适用于缓慢信号的测量。

### 3. 微差式测量

微差式测量法是综合了偏位式测量法速度快和零位式测量法精度高的优点而提出的测量方法。这种方法预先使被测量与测量装置内部的标准量取得平衡。当被测量有微小变化时,测量装置失去平衡,用上述偏位式仪表指示出其变化部分的数值。

例如,用天平(零位式仪表)测量化学药品,当天平平衡之后,又增添了少许药品,天平将再次失去平衡。这时我们即使用最小的砝码也称不出这一微小的差值。但是我们可以从天平指针在标尺上移动的格数来读出这一微小差值。又如,用电子秤测物体质量,用不平衡电桥测量电阻值。以及图 1-1 所示的钢板厚度测量的例子都属于微差式测量。

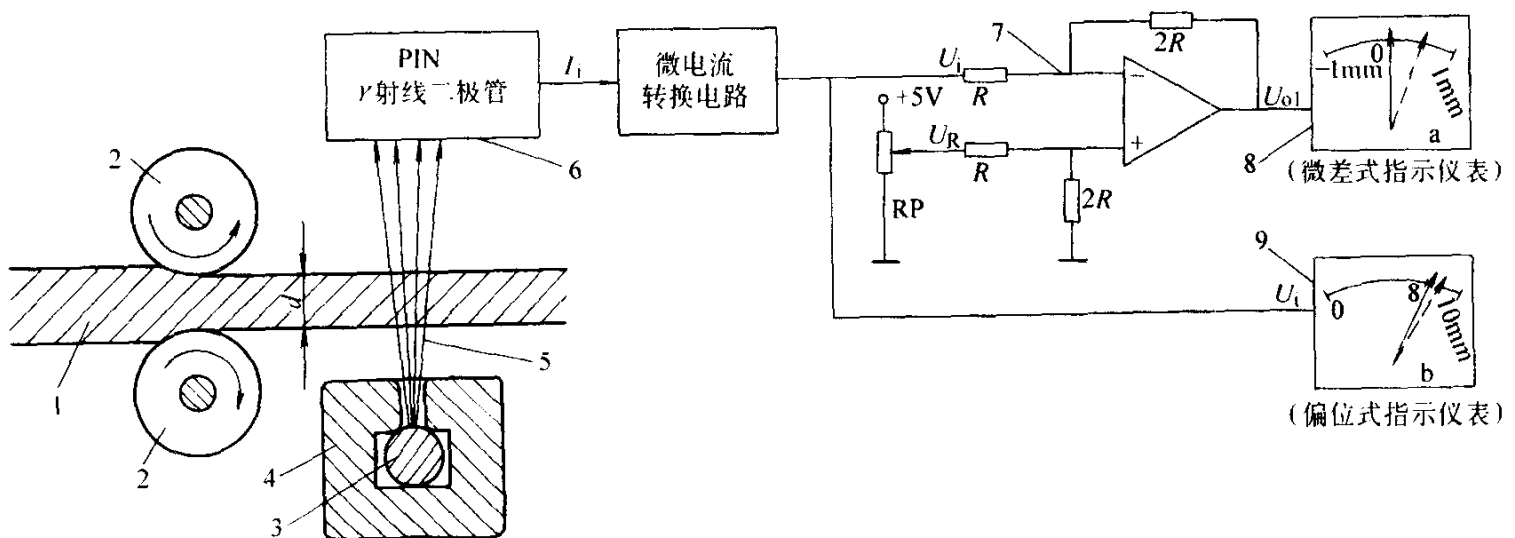


图 1-1 核辐射钢板测厚仪原理图

- 1-被测钢板 2-轧辊 3- $\gamma$ 射线源 4-铅盒 5- $\gamma$ 射线 6- $\gamma$ 射线探测器  
7-差动放大器 8-指示仪表 a 9-指示仪表 b

在线测量钢板厚度前，先将标准厚度的钢板放置于  $\gamma$  射线和射线探测器之间，调节电位器 RP，使差动放大器的输出  $U_{oi}$  为零，测量系统达到平衡。当移开标准钢板后，RP 所决定的参考电压  $U_R$  就成为电压比较装置中的标准量。被测钢板进入测量位置时，若被测钢板的厚度等于标准钢板的厚度，则  $U_i$  等于  $U_R$ ，差动减法放大器的输出为零，放大指示仪表 a 指在零位（中间位置）；若被测钢板的厚度不等于标准厚度， $U_i$  将大于或小于  $U_R$ ，其差值经差动放大器放大后，由指示仪表 a 指示出厚度的偏差值。用上述方法测量时，分辨率较高，但量程较小。在本例中，只能测量厚度变化在  $\pm 1\text{mm}$  之间的钢板，但可分辨  $0.1\text{mm}$  甚至更小的变化量。如果将  $U_i$  直接接到指示仪表 b 上，就是偏位式测量，其测量范围可达  $0\sim 10\text{mm}$ ，但分辨率则低得多。

微差式测量装置在使用时要定期用标准量校准（包括调零和调满度），才能保证其测量精度。

## 第二节 测量误差及分类

测量的目的是希望通过测量求取被测量的真值（True Value）。所谓真值，是指在一定条件下被测量客观存在的实际值。真值有理论真值、约定真值、相对真值之分。例如，三角形三个内角之和为  $180^\circ$ ，这种真值称为理论真值。又如，在标准条件下，水的三相点为  $273.16\text{K}$ ，金的凝固点是  $1064.18^\circ\text{C}$ ，这类真值均称为约定真值。相对真值：凡精度高一级或几级的仪表的误差与精度低的仪表的误差相比，前者的误差是后者  $1/3$  以上时，则高一级仪表的测量值可以认为是相对真值。相对真值在误差测量中的应用最为广泛。

测量值与真值之间的差值称为测量误差（Measuring Error）。测量误差可按其不同特征进行分类。

### 一、绝对误差和相对误差

#### （一）绝对误差（Absolute Error）

绝对误差  $\Delta$  是指测量值  $A_x$  与真值  $A_0$  之间的差值，即

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

#### （二）相对误差（Relative Error）

有时绝对误差不足以反映测量值偏离真值程度的大小，所以引入了相对误差。相对误差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、示值相对误差和满度相对误差等。

（1）示值（标称）相对误差  $\gamma_x$  示值相对误差  $\gamma_x$  是用绝对误差  $\Delta$  与被测量  $A_x$  的百分比来表示的，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-2)$$

（2）满度（引用）相对误差  $\gamma_m$  测量下限为零的仪表的满度相对误差  $\gamma_m$  是用绝对误差  $\Delta$  与仪器满度值  $A_m$  的百分比来表示的，即：

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

上述相对误差在多数情况下均取正值。对测量下限不为零的仪表而言，在式（1-2）

中,用量程 ( $A_{x\max} - A_{x\min}$ ) 来代替分母中的  $A_x$ 。上式中,当  $\Delta$  取最大值  $\Delta_m$  时,满度相对误差常被用来确定仪表的准确度等级  $S$ ,即

$$S = \left| \frac{\Delta_m}{A_m} \right| \times 100 \quad (1-4)$$

根据准确度等级  $S$  及量程范围,可以推算出该仪表可能出现的最大绝对误差  $\Delta_m$ 。准确度等级  $S$  规定取一系列标准值。我国模拟仪表有下列七种等级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。它们分别表示对应仪表的满度相对误差所不应超过的百分比。从仪表面板上的标志可以判断出仪表的等级。仪表在正常工作条件下使用时,各等级仪表的基本误差不超过表 1-1 所规定的值。等级的数值越小,仪表的价格就越贵。

表 1-1 仪表的准确度等级和基本误差

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

仪表的准确度习惯上称为精度,准确度等级习惯上称为精度等级。根据仪表的等级可以确定测量的满度相对误差和最大绝对误差。例如,在正常情况下,用 0.5 级、量程为  $100^\circ\text{C}$  温度表来测量温度时,可能产生的最大绝对误差为

$$\Delta_m = (\pm 0.5\%) \times A_m = \pm 0.5\% \times 100^\circ\text{C} = \pm 0.5^\circ\text{C}$$

在测量领域中,还经常使用正确度、精密度、精确度等名词来评价测量结果。这些术语的使用十分普遍,但有时也比较容易引起混乱。本教材只采用精度这个名词来表达测量结果误差的大小。

在正常工作条件下,可以认为仪表的最大绝对误差是不变的,而示值相对误差  $\gamma_x$  随示值的减小而增大。例如用上述温度表来测量  $80^\circ\text{C}$  温度时,相对误差  $\gamma_x = (\pm 0.5/80) \times 100\% = \pm 0.525\%$ ,而用它来测量  $10^\circ\text{C}$  温度时,相对误差  $\gamma_x = (\pm 0.5/10) \times 100\% = \pm 5\%$ 。

**例 1-1** 某压力表精度为 2.5 级,量程为  $0 \sim 1.5\text{MPa}$ ,测量结果显示为  $0.70\text{MPa}$ ,求: 1) 可能出现的最大满度相对误差  $\gamma_m$ 。2) 可能出现的最大绝对误差  $\Delta_m$  为多少  $\text{kPa}$ ? 3) 可能产生的最大示值相对误差  $\gamma_x$ 。

**解** 1) 可能出现的最大满度相对误差可以从精度等级直接得到,即  $\gamma_m = 2.5\%$ 。

$$2) \Delta_m = \gamma_m \times A_m = 2.5\% \times 1.5\text{MPa} = 0.0375\text{MPa} = 37.5\text{kPa}$$

$$3) \gamma_x = \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \frac{0.0375}{0.70} \times 100\% = 5.36\%$$

由上例可知,  $\gamma_x$  总是大于(等于)  $\gamma_m$ 。

**例 1-2** 现有 0.5 级的  $0 \sim 300^\circ\text{C}$  的和 1.0 级的  $0 \sim 100^\circ\text{C}$  的两个温度计,要测量  $80^\circ\text{C}$  的温度,试问采用哪一个温度计好?

**解** 用 0.5 级表测量时,可能出现的最大示值相对误差为

$$\gamma_x = \frac{\Delta_{m1}}{A_x} \times 100\% = \frac{300 \times 0.5\%}{80} \times 100\% = 1.875\%$$

若用 1.0 级表测量时,可能出现的最大示值相对误差为

$$\gamma_x = \frac{\Delta_{m2}}{A_x} \times 100\% = \frac{100 \times 1.0\%}{80} \times 100\% = 1.25\%$$

计算结果表明,用 1.0 级表比用 0.5 级表的示值相对误差反而小,所以更合适。由上例



可知，在选用仪表时，应兼顾精度等级和量程，通常希望示值落在仪表满度值的  $2/3$  以上。

## 二、粗大误差、系统误差和随机误差

误差产生的原因和类型很多，其表现形式也多种多样，针对造成误差的不同原因，也有不同的解决办法，下面对此做一些简介。

### 1. 粗大误差 (Gross Error)

明显偏离真值的误差称为粗大误差，也叫过失误差。粗大误差主要是由于测量人员的粗心大意及电子测量仪器受到突然而强大的干扰所引起的。如测错、读错、记错、外界过电压尖峰干扰等造成的误差。就数值大小而言，粗大误差明显超过正常条件下的误差。当发现粗大误差时，应予以剔除。

### 2. 系统误差 (Systematic Error)

系统误差也称装置误差，它反映了测量值偏离真值的程度。凡误差的数值固定或按一定规律变化者，均属于系统误差。按其表现的特点，可分为恒值误差和变值误差两大类。恒值误差在整个测量过程中，其数值和符号都保持不变。例如，由于刻度盘分度差错或刻度盘移动而使仪表刻度产生误差，皆属此类。

大部分附加误差属于变值误差。例如，环境温度波动使电源的电压下降、电子元件老化、机械零件变形移位、仪表零点漂移等。

系统误差是有规律性的，因此可以通过实验的方法或引入修正值的方法予以修正，也可以重新调整测量仪表的有关部件予以消除。

### 3. 随机误差 (Random Error)

在同一条件下，多次测量同一被测量，有时会发现测量值时大时小，误差的绝对值及正、负以不可预见的方式变化，该误差称为随机误差，也称偶然误差，它反映了测量值离散性的大小。随机误差是测量过程中许多独立的、微小的、偶然的因素引起的综合结果。

存在随机误差的测量结果中，虽然单个测量值误差的出现是随机的，既不能用实验的方法消除，也不能修正，但是就误差的整体而言，它服从一定的统计规律。因此可以通过增加测量次数，利用概率论的一些理论和统计学的一些方法，利用看似毫无规律的随机误差的分布特性，进行测量结果的数据统计处理。多数随机误差都服从正态分布规律在许多场合可以被发现。由于存在随机误差，所以对同一被测量进行多次等精度测量，其结果每次均不同。

在这里，我们以超声波测距仪多次测量两座大楼之间的距离为例来说明。由于空气的抖动、气温的变化、仪器受到电磁波干扰等原因，所以即使用精度很高的测距仪去测量，也会发现测量值时大时小。而且无法预知下一时刻的干扰情况。

如果测量次数  $n \rightarrow \infty$  时，则无限多的直方图（见图 1-2）的顶点中线的连线就形成一条光滑的连续曲线，称为高斯误差分布曲线或正态分布曲线。测量结果符合正态

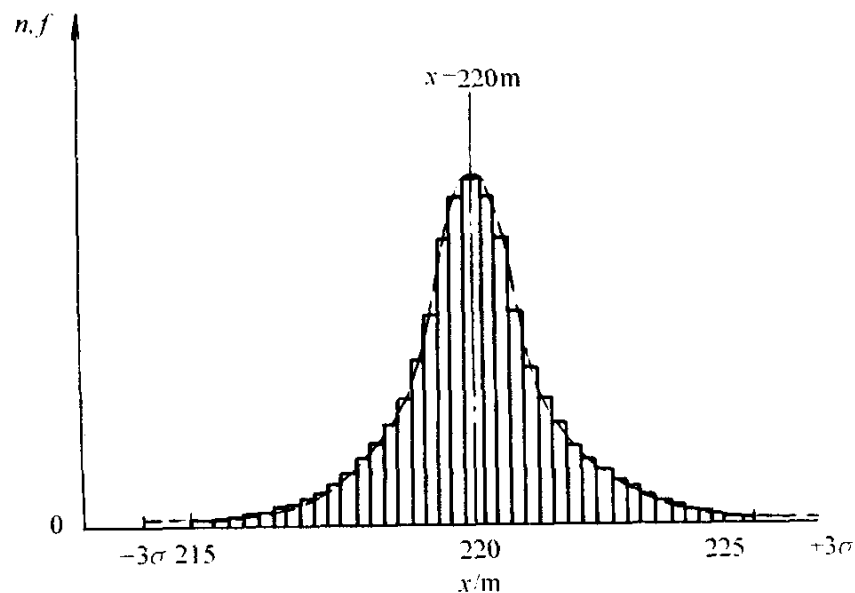


图 1-2 统计直方图

分布曲线的例子很多，例如某校男生身高的分布，以及用激光测量某桥梁长度等。

对正态分布曲线进行分析，可以发现如下规律：

(1) 有界性 在一定的条件下，随机误差的测量结果  $x_i$  有一定的分布范围，超过这个范围的可能性非常小。当某一次测量结果的误差超过一定的界限后，即可认为该误差属于粗大误差，应予以剔除。

(2) 对称性  $x_i$  对称地分布于图中的  $\bar{x}$  两侧，当测量次数增多后， $\bar{x}$  两侧的误差相互抵消。

(3) 集中性 绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的次数多，因此测量值集中分布于算术平均值  $\bar{x}$  附近。人们常将剔除粗大误差后的  $\bar{x}$  值看成测量值的最近似值。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} \quad (1-5)$$

### 三、静态误差和动态误差

#### 1. 静态误差 (Static Error)

在被测量不随时间变化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 (Dynamic Error)

当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，这种误差称为动态误差。例如，将水银温度计插入  $100^\circ\text{C}$  沸水中，水银柱不可能立即上升到  $100^\circ\text{C}$ 。如果此时就记录读数，必然产生误差。图 1-3 示出了一个突变的被测量所引起阶跃响应曲线。在  $t_1$  时刻，被测量  $x$  突然从零阶跃到  $x_1$ ，但测量仪表的输出无法立即跟上输入的变化，得到图 b 所示的响应曲线。图中所示的主要性能指标有：延迟时间  $t_d$ 、上升时间  $t_r$ 、峰值响应时间  $t_p$ 、调整时间  $t_s$ 、超调量  $M_p$  等，仪表的输出最终稳定在静态误差上。

引起动态误差的原因很多。例如，用笔式记录仪记录心电图时，由于记录笔有一定的惯性，所以记录的结果在时间上滞后于心电的变化，有可能记录不到特别尖锐的窄脉冲。又如，用放大器放大含有大量高次谐波的周期信号（例如很窄的矩形波）时，由于放大器的频响及电压上升率不够，故造成高频段的放大倍数小于低频段，最后在示波器上看到的波形失真很大。

一般静态测量要求仪器的带宽从  $0\text{Hz}$ （直流）至  $2\text{Hz}$  左右。而动态测量要求带宽超过  $10\text{kHz}$ 。这就要求采用高速运算放大器，并尽量减小电路的时间常数。

对用于动态测量、带有机械结构的仪表而言，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。

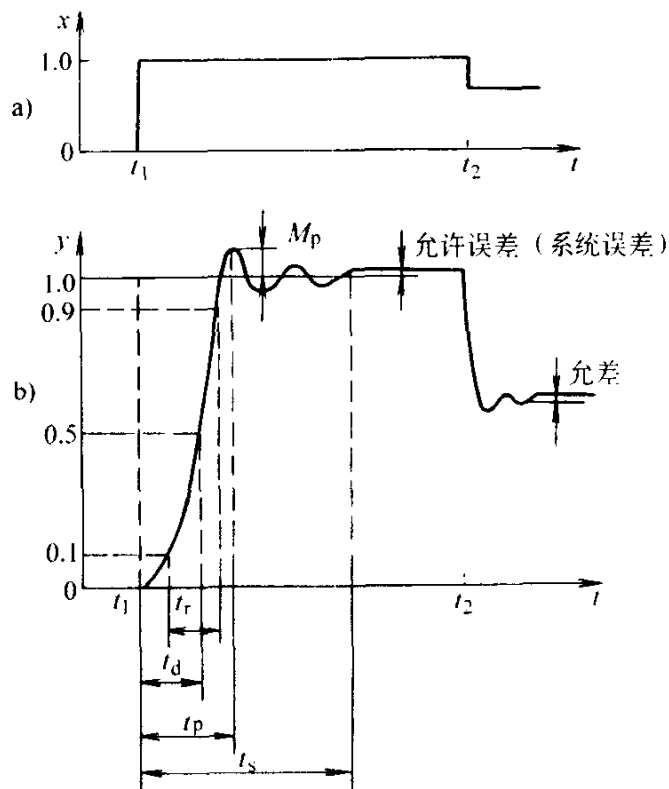


图 1-3 阶跃响应曲线  
a) 输入信号 b) 输出响应