

普通中等专业教育机电类规划教材

# 自动检测与转换技术

上海电机技术高等专科学校 梁 森  
杭州机械工业学校 黄杭美 编  
上海市机电工业学校 阮智利

第2版

机械工业出版社

普通中等专业教育机电类规划教材

# 自动检测与转换技术

第 2 版

上海电机技术高等专科学校 梁 森  
杭州机械工业学校 黄杭美 编  
上海市机电工业学校 阮智利

机械工业出版社

本书是中等专业学校电气工程类专业《自动检测与转换技术》课程的规划教材。主要内容是工业中常用传感器的工作原理、转换电路（或测量电路）及其应用。对检测技术的基本概念、弹性元件、抗干扰技术及微型计算机在检测系统中的应用等知识也作了简要介绍。

本书内容丰富，层次清晰，重点突出，着重于实践。在取材上，考虑到中专生的特点，压缩了理论推导，尽量增加实际应用和工艺等方面知识，并尽可能反映国内外检测技术领域的新成果、新进展。每章均有思考题或习题，并附有答案。

本书可作为中等专业学校电气工程类、自动化类、仪器仪表类等专业的教材，亦可供其他有关专业师生及有关工程技术人员参考。

## 自动检测与转换技术

第2版

上海电机技术高等专科学校 梁 森  
杭州机械工业学校 黄杭美 编  
上海市机电工业学校 阮智利

\*

责任编辑：贡克勤 版式设计：王 颖  
封面设计：姚 毅 责任校对：李汝庚  
责任印刷：王国光

\*

机械工业出版社出版（北京市百万庄大街22号）

邮政编码：100037

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京第二外国语学院印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/16·印张 12·字数 285 千字

1998年7月第2版第9次印刷

印数 103301-128300 定价：13.00元

\*

ISBN 7-111-05575-6/TF·27(课)

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

# 第1版前言

本书是根据机械电子工业部机械类1986~1990年中等专业学校教材编审出版规划及原国家机械工业委员会中等专业学校教学大纲而编写的。

本书着重介绍工业中常用传感器的工作原理、转换电路(或测量电路)及其应用。同时简单介绍检测技术的基本概念、弹性元件、抗干扰技术及微型计算机在检测系统中的应用。在考虑取材深度和广度时,主要着眼于提高中专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,增加了传感器参数、安装使用的介绍,并注意尽量反映检测技术领域中的新技术、新动态。每章均附有思考题或习题。

本书可作为中等专业学校电类、自动化类、仪器仪表类等专业的教材,亦可供其它有关专业师生及有关工程技术人员参考。

本书由上海市机电工业学校阮智利(第一、三、十、十一章)、上海电机制造技术专科学校梁森(绪论、第二、七、八、十二章)、杭州机械工业学校黄杭美(第四、五、六、九章)三位同志合编。

温州机械工业学校徐虎老师担任主审。1989年11月在温州召开了本教材的审稿会。参加审稿会的单位有上海机械专科学校、温州机械工业学校、咸阳机器制造学校等。

在编写过程中,得到了上海电机制造专科学校申鸿光,上海机械专科学校谢根涛,温州机械工业学校黄再强,山东机械工业学校罗明华,上海汽轮机厂陈禹明,上海发电设备成套所戚德飞、郑安良,上海电气自动化研究所方建宾、徐兴康、林卫平、周宜,上海科技大学朱铮良,上海机床研究所朱恭安等同志以及“自动检测与转换技术”课程组全体同志的热情帮助和指正,编者在此谨表谢意。

由于我们的水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,殷切希望广大读者提出宝贵意见。

编者

1989.12

## 第 2 版 前 言

本书自 1990 年出版以来,得到了广大读者和全国各兄弟院校的大力支持,也收到了许多读者的宝贵意见。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,我们在第 1 版的基础上作了较大篇幅的修改和补充。在各章节中增补了许多本学科的新技术、新器件以及应用电路分析。其素材多来源于国内外有关厂商近两三年的科技成果和实用产品,并参考了国内外新近出版的有关文献资料,部分章节的有关内容是作者从事科研、技术改造成果的总结。

针对第 1 版所采用的以测量原理划分章节带来的问题,这次编写中对工业中经常遇到的诸如温度、压力、流量、液位、振动、位移等参量的测量作了较为集中的论述,其中温度的测量贯彻了 1990 年国际温标的有关规定。

上海机械高等专科学校的谢根涛老师担任主审,并于 1996 年 7 月召开审稿会。参加审稿会的有温州机械工业学校的徐虎、山东机械工业学校的罗明华、广西机械工业学校的秦培林、常州轻工业学校的吴旗、上海电气自动化研究所的周宜等。在本书第 2 版的编写过程中,得到了上海华东电子仪器厂的朱美丽、郑学芳、上海机床研究所的朱恭安、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等的大力支持。上海电机技术高等专科学校的顾伯良、胡迈在绘图等方面做了大量的工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限以及传感器技术发展较快,本书的内容不免仍有遗漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

1996 年 11 月

# 目 录

第1版前言		
第2版前言		
绪论	1	
第一章 检测技术的基本概念	5	
第一节 测量的基本概念	5	
第二节 测量误差及分类	7	
第三节 传感器及基本特性	9	
思考题与习题	12	
第二章 弹性敏感元件	14	
第一节 弹性敏感元件的基本特性	14	
第二节 弹性敏感元件的材料	15	
第三节 变换力的弹性敏感元件	15	
第四节 变换压力的弹性敏感元件	17	
思考题	19	
第三章 电阻式传感器	20	
第一节 电阻应变式传感器	20	
第二节 测温热电阻传感器	30	
第三节 气敏、湿敏电阻传感器	36	
思考题与习题	39	
第四章 电感式传感器	42	
第一节 自感式传感器	42	
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	
第四节 电涡流式传感器	55	
思考题与习题	59	
第五章 电容式传感器	62	
第一节 电容式传感器的工作原理及 结构形式	62	
第二节 电容式传感器的测量转换电路	67	
第三节 电容式传感器的应用	69	
思考题与习题	74	
第六章 压电式传感器	77	
第一节 压电式传感器的工作原理	77	
第二节 压电式传感器的测量转换电路	80	
第三节 压电式传感器的结构和应用	81	
思考题与习题	83	
第七章 超声波传感器	85	
第一节 超声波物理基础	85	
第二节 超声波换能器及耦合技术	86	
第三节 超声波传感器的应用	87	
思考题与习题	92	
第八章 霍尔传感器	93	
第一节 霍尔元件的结构及工作原理	93	
第二节 霍尔元件的特性参数	94	
第三节 霍尔集成电路	95	
第四节 霍尔传感器的应用	97	
思考题与习题	100	
第九章 热电偶传感器	101	
第一节 热电偶传感器的工作原理	101	
第二节 热电偶的种类及结构	103	
第三节 热电偶冷端的延长	107	
第四节 热电偶的冷端温度补偿及 技术处理	108	
第五节 热电偶的测温线路及应用	110	
思考题与习题	114	
第十章 光电传感器	115	
第一节 光电元件的工作原理及特性	115	
第二节 光电传感器的应用	123	
第三节 光电开关及光电断续器	128	
第四节 热释电元件在红外线检测中 的应用	130	
思考题与习题	131	
第十一章 数字式传感器	133	
第一节 转角-数字编码器	133	
第二节 光栅传感器	135	
第三节 磁栅传感器	139	
第四节 感应同步器	143	
思考题	149	
第十二章 检测技术的综合应用	150	
第一节 检测系统中的抗干扰技术	150	
第二节 微机在检测技术中的应用	162	
第三节 带微机的检测技术综合		

应用实例 .....	167	附录 C 热电阻新、旧分度号对照表 .....	178
思考题与习题 .....	173	附录 D 热电阻分度表 .....	178
附录 .....	174	附录 E 中华人民共和国法定计量单位 .....	180
附录 A 几种常用的传感器性能比较表 .....	174	习题参考答案 .....	182
附录 B 镍铬-镍硅(镍铝) K 热电偶分度表 (自由端温度为 0℃) .....	176	参考文献 .....	183

# 绪 论

检测(Detection),是利用各种物理效应,选择合适的方法与装置,将生产、科研、生活、……中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,一辆现代化汽车装备的传感器就有十几种,分别用以检测车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等。在国防科研中,检测技术用得更多,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。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、湿度等。

近20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,因此直接影响了计算机技术的推广应用。目前这个问题已得到了世界各国的高度重视,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

工业检测涉及的内容较广泛,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。

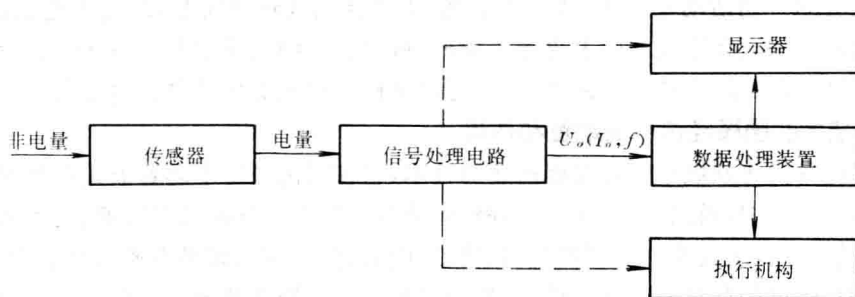


图 0-1 自动检测系统原理框图

传感器(Transducer)在本教材中是指一个能把被测的非电量转换成电量的器件(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功率的电压或电流、频率信号等,以推动后级的显示电路、数据处理电路及执行机构。

目前常用的显示器有四类:模拟显示、数字显示、图象显示及记录仪等。模拟显示是利用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,后者耗电省。图象显示是用CRT或LCD屏幕来显示读数或被测参数的变化曲线,有时还可用图表形式、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的动态变化过程,常用的记录仪有笔式记录仪、光线示波器、磁带记录仪、快速打字机等。

数据处理装置用来对测试所得的实验结果进行处理、运算、分析,对动态测试结果作频谱分析、幅值谱分析、能量谱分析等,完成以上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及控制各种被控对象。而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、伺服电动机等在电路中起通断、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,去驱动这些执行机构,从而为自动控制系统提供控制信号。

现在的检测系统越来越多地使用计算机(微机)来控制执行机构的工作。检测技术、计算机技术与执行机构等配合就能构成工业中的某些控制系统,图 0-2 所示的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工件的直径参数,计算机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,并且发出控制信号,控制研磨盘的水平运动,直到工件加工完毕为止。

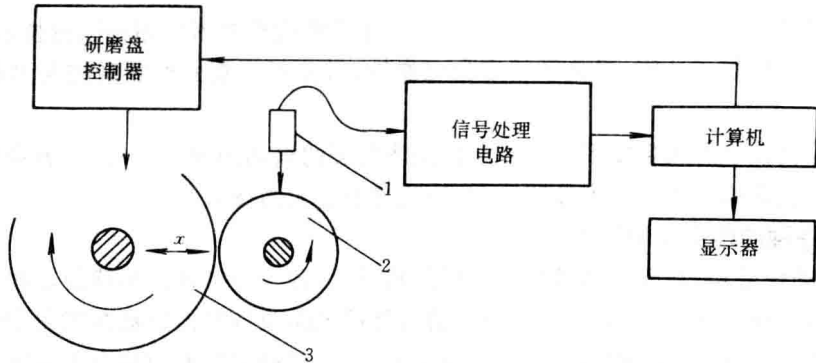


图 0-2 工业检测控制系统

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,检测技术的进展主要表现在以下几个方面:

##### (一) 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,而分辨力可达微米级。人们已研制出能测量小至几十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。从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。

##### (二) 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激光、红外、超声、微波、光纤、放射性同位素等新的成就都为检测技术的开发提供了更多的依据。如激光测距、红外测温、超声波无损探伤、放射性测厚等非接触测量得到迅速的发展。20世纪70年代前,检测技术主要用于工业部门,而今,检测的领域正扩大到整个社会需要的各个方面。不仅包括核工程、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、环境污染监测等方面,并且已开始渗入到人类的日常生活设施之中。

##### (三) 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,硅电子元件的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,从而制出体积小、性能好、功能强的传感器。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成千上万个光敏元件及扫描放大电路制作在一块芯片上,制成CCD摄像机。今后,还将在光、磁、温度、压力等领域开发新型的集成化、功能化的传感器。

##### (四) 采用微机技术,使检测技术智能化

从 20 世纪 70 年代微处理器问世后,人们已逐渐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,目前新研制的检测系统大多都带有微处理器。

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,且业已获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、弹性元件及抗干扰技术给予一定的简介,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作了介绍。

本课程涉及的学科面广,需要有较广泛的基础和专业知识,学好这门课的关键在于理论联系实际。要富于设想,善于借鉴,重视实验环节,这样才能学得活、学得好。

本教材的各章均附有数量较多的应用实例及思考题与习题,引导学生循序渐进地掌握检测技术的实际应用能力。部分分析思考题及应用实例的设计题可利用习题课或讨论课的方式来学习和掌握。

# 第一章 检测技术的基本概念

本章主要介绍测量的基本概念、测量误差分类、减小误差的方法以及传感器的基本特性，是检测与转换技术的理论基础。

## 第一节 测量的基本概念

测量(Measurement)是人们借助专门的技术和设备,通过实验的方法取得某一客观事物量值的认识过程,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。

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,测量结果总包含有数值(大小和符号)以及单位。

测量的方法多种多样,分类方法也各不相同。例如,根据被测量是否随时间变化,可分为静态测量与动态测量;根据测量手段,可分为直接测量与间接测量以及组合测量或联立测量;根据测量时是否与被测对象接触,可分为接触式测量与非接触式测量。另外,为监测生产过程,或在生产流水线上监视产品质量的测量称为在线测量,反之称为非在线测量。根据测量的具体手段来分,又可分为偏差式测量、零位式测量和微差式测量。下面,简单介绍偏差式、零位式和微差式测量的特点。

### 一、偏差式测量

在测量过程中,被测量作用于仪表的比较装置,使该比较装置产生偏移量,直接以仪表的偏移量表示被测量的测量方式称为偏差式测量。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,采用偏差式测量的仪表内不包括标准量具。例如,用弹簧秤测物体质量,用磁电式电压表测量电压等,均是直接以指针偏移的大小来表示被测量。

偏差式测量易产生灵敏度漂移和零点漂移。例如,日久天长,随着弹簧的弹性系数的变化,弹簧秤的读数会产生误差,所以必须定期对偏差式仪表进行校验和校准。偏差式测量虽然过程简单、迅速,但精度不高。

### 二、零位式测量

在测量过程中,被测量作用于仪表的比较装置,并被比较装置中的标准量所抵消,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。在上述测量中,平衡操作花费的时间较多。为了缩短平衡过程,有时采用了自动平衡的随动系统。图 1-1 是自动平衡电位差计的原理图。

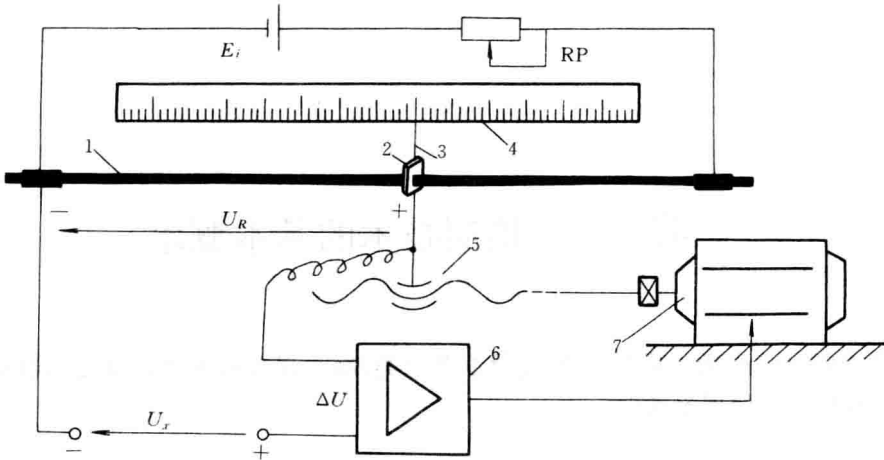


图 1-1 自动平衡电位差计原理示意图

1—滑线电阻 2—电刷 3—指针 4—刻度尺 5—传动机构  
6—检零放大器 7—伺服电动机

测量时,传感器的输出  $U_x$  与比较电压  $U_R$  反向串联,  $U_x$  与  $U_R$  叠加后的差值电压  $\Delta U$  送到检零放大器放大,其输出电压控制伺服电动机的正、反转状态,从而带动滑动电阻的滑动臂电刷触点及指针移动,直到滑动电阻上的压降  $U_R$  等于  $U_x$  时,检零放大器输出为零,伺服电动机停转,基准电压  $U_R$  的指示值就表示被测电压值  $U_x$ ,图中的  $RP$  为灵敏度调节电位器。

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。

### 三、微差式测量

微差式测量是检测技术中运用较多的测量方式,它综合了偏差式测量迅速和零位式测量精度高的优点。测量时,被测量作用于仪表的比较装置,被测量的大部分被比较装置中的标准量所抵消,然后再用类似于偏差式的方法来测出上述两者比较结果的剩余差值。例如,用不平衡式电桥测量电阻值以及图 1-2 所示的钢板厚度测量的例子都属于微差式测量。

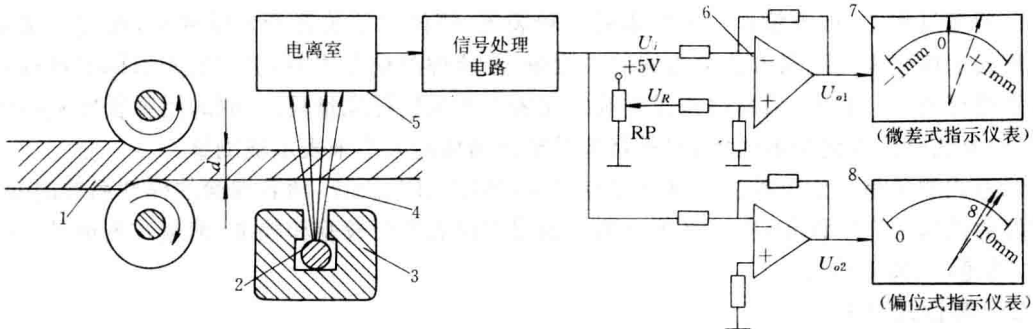


图 1-2 核辐射式钢板测厚仪原理图

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

当在线测量钢板厚度前,先将标准厚度的钢板放置于  $\gamma$  射线源和射线探测器之间,调节  $RP$ ,使差动放大器的输出  $U_{o1}$  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,若被测钢板的厚度不等

于标准厚度,  $U_i$  将不等于  $U_R$ , 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。采用微差式测量的仪表  $a$  与直接采用偏差式测量的仪表  $b$  相比, 前者分辨力高, 并适宜于在线测量及动态测量。微差式仪表在使用时要定期用标准量校准, 才能保证其精度。

## 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。在测量之前, 真值一般是未知的, 但可以有如下几种办法来判断真值。例如, 三角形内角之和为  $180^\circ$ , 这种真值称为理论真值。又如, 在标准条件下, 水的冰点和沸点分别是  $0^\circ\text{C}$  和  $100^\circ\text{C}$ , 以及金的凝固点是  $1064.18^\circ\text{C}$ , 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, 前者优于后者的 2 倍以上时, 则高一级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

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

在实验室和计量工作中, 常用修正值  $\alpha$  表示。即

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

由上式可知, 由修正值  $\alpha$ 、测量值  $A_x$  可求得真值  $A_0$ 。绝对误差是有量纲的。

#### (二) 相对误差(Relative error)

有时绝对误差不足以反映测量值偏离约定真值程度的大小, 所以还要用相对误差来表示。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

1. 实际相对误差  $\gamma_A$  实际相对误差  $\gamma_A$  用绝对误差  $\Delta$  与被测量的真值  $A_0$  的百分比表示。即

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

2. 示值(标称)相对误差  $\gamma_x$  示值相对误差  $\gamma_x$  用绝对误差  $\Delta$  与被测量  $A_x$  的百分比表示。即

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

3. 满度(引用)相对误差  $\gamma_m$  满度相对误差是用绝对误差  $\Delta$  与仪器满度值  $A_m$  的表示, 即

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

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精度等级  $S$ , 即

$$S = \left| \frac{\Delta_m}{A_m} \right| \times 100 \quad (1-6)$$

根据精度等级  $S$  及量程范围, 可以推算出该仪表可能出现的最大绝对误差  $\Delta_m$ 。精度等级  $S$  规定取一系列标准值。我国电工仪表中常用的模拟仪表的精度等级有下列七种: 0.1、0.2、0.5、

1.0、1.5、2.5、5.0。从仪表面板上的标志可以判断出仪表的精度等级。

**例** 现有 0.5 级的 (0~300)°C 的和 1.0 级的 (0~100)°C 的两个温度计,要测量 80°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 附近。

## 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,下面对此作一些简介。

### (一) 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。

### (二) 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之。

### (三) 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,误差的绝对值和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。虽然某个误差的出现是随机的,但就误差的整体而言,服从于一定的统计规律,多数随机误差都服从

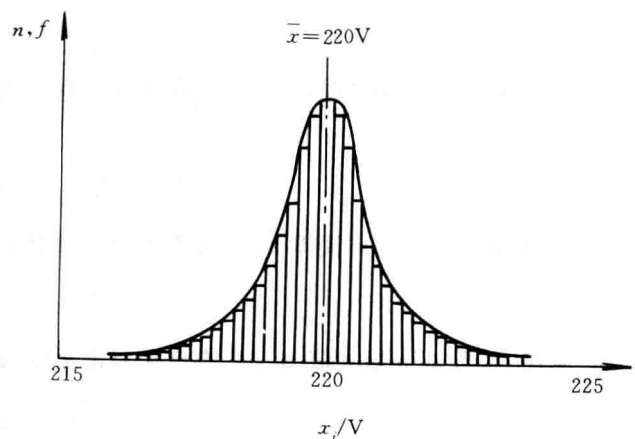


图 1-3 统计直方图



正态分布。在许多场合可以发现,由于存在随机误差,对同一被测量进行等精度多次测量,结果每次均不同,图 1-3 示出了对交流电源电压值多次测量的结果。图中,横坐标为测量值,纵坐标为测量值出现的次数  $n$  或概率  $f$ 。正态分布的特点是:

1. 有限性 在一定的条件下,随机误差的绝对值不会超过一定的界限,当某一误差超过一定的界限后,即可以认为该误差属于粗大误差。

2. 对称性 多次测量值  $x_i$  对称地分布在图中的  $\bar{x}$  两侧,当测量次数增多后, $\bar{x}$  左右两侧的误差相互抵消。

3. 集中性(单峰性) 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  $n$  个测量值的算数平均值  $\bar{x}$  附近,因此,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。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-7)$$

根据以上的数理统计概率理论可知,当存在随机误差的情况时,是有办法得到测量值的近似结果的。

### 三、静态误差和动态误差

#### (一) 静态误差 (Static error)

在被测量不随时间变化时所得的误差称为静态误差。我们前面讨论的误差多属于静态误差。

#### (二) 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,用笔式记录仪记录测量结果时,由于记录笔有一定的惯量,所以记录的结果在时间上滞后于被测量的变化,这种误差就属于动态误差。又如,用放大器放大正弦信号,由于放大器的频响及电压上升率偏低,故造成高频段的放大倍数小于低频段,这种误差也属于动态误差。

## 第三节 传感器及基本特性

### 一、传感器定义

传感器是一种以测量为目的,以一定的精度把被测量转换为与之有确定关系的、便于处理的另一种物理量的测量器件。传感器的输出信号多为易于处理的电量,如电压、电流、频率等。传感器由敏感元件、传感元件及测量转换电路三部分组成,如图 1-4 所示。

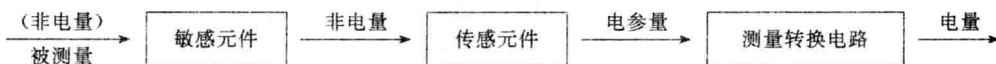


图 1-4 传感器组成框图

图中敏感元件是在传感器中直接感受被测量的元件。即被测量通过传感器的敏感元件转换成一与之有确定关系、更易于转换的非电量。这一非电量通过传感元件后就被转换成电参量。测量转换电路的作用是将传感元件输出的电参量转换成易于处理的电压、电流或频率量。



应该指出,不是所有的传感器都有敏感、传感元件之分,有些传感器是将两者合二为一了。

图 1-5 为一台测量压力  $p$  的电位器式压力传感器结构简图。当被测压力  $p$  增大时,弹簧管撑直,从而带动电位器的电刷产生角位移。电位器电阻的变化量反映了被测压力  $p$  值的变化。在这个传感器中,弹簧管为敏感元件,它将压力转换成角位移  $\alpha$ 。电位器为传感元件,它将位移转换为电参量电阻的变化。当电位器的两端加上电源后,电位器就组成分压比电路,它的输出量是与压力成一定关系的电压  $U_o$ 。因此在这个例子中,电位器又属于测量转换电路。

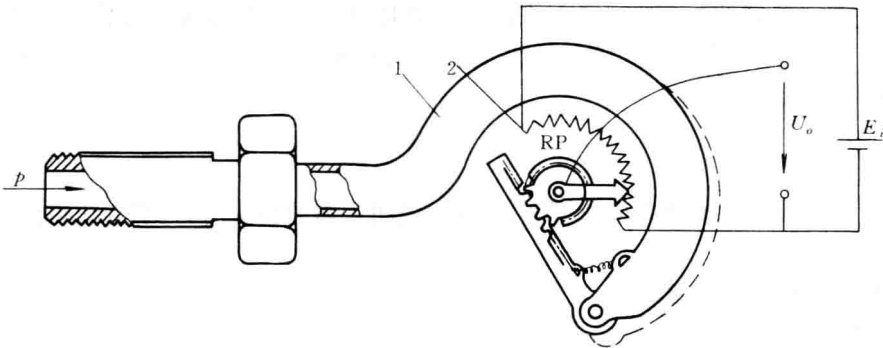


图 1-5 电位器式压力传感器

1—弹簧管（敏感元件） 2—电位器（传感元件、测量转换电路）

## 二、传感器分类

传感器的种类名目繁多,分类不尽相同。常用的分类方法有:

1. 按被测量分类 可分为位移、力、力矩、转速、振动、加速度、温度、流量、流速等传感器。
2. 按测量原理分类 可分为电阻、电容、电感、光栅、热电耦、超声波、激光、红外、光导纤维等传感器。
3. 按输入、输出特性的线性与否分类 可分为线性传感器和非线性传感器两大类。本教材主要介绍按测量原理分类的各种传感器。

## 三、传感器基本特性

传感器的特性一般指输入、输出特性。它有静态、动态之分。传感器动态特性的研究方法与控制理论中介绍的相似,故不再重复。下面仅介绍其静态特性的一些指标。

1. 灵敏度 (Sensitivity) 灵敏度是指传感器在稳态下输出变化值与输入变化值之比,用  $K$  来表示。即

$$K = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-8)$$

式中  $x$ ——输入量;

$y$ ——输出量。

对线性传感器,灵敏度为一常数;对非线性传感器,灵敏度随输入量的变化而变化。从输出曲线看,曲线越陡,灵敏度越高。可以通过作该曲线的切线的方法来求得曲线上任一点处的灵敏度,如图 1-6 所示,由切线的斜率可以看出,  $x_2$  点的灵敏度比  $x_1$  点高。

2. 分辨力 (Resolution) 分辨力是指传感器能检出被测信号的最小变化量。当被测量的