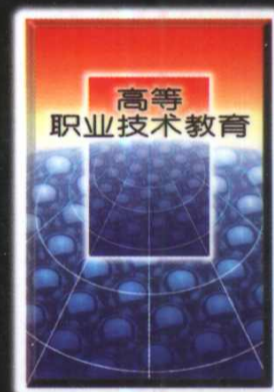


高等职业技术教育机电类专业规划教材



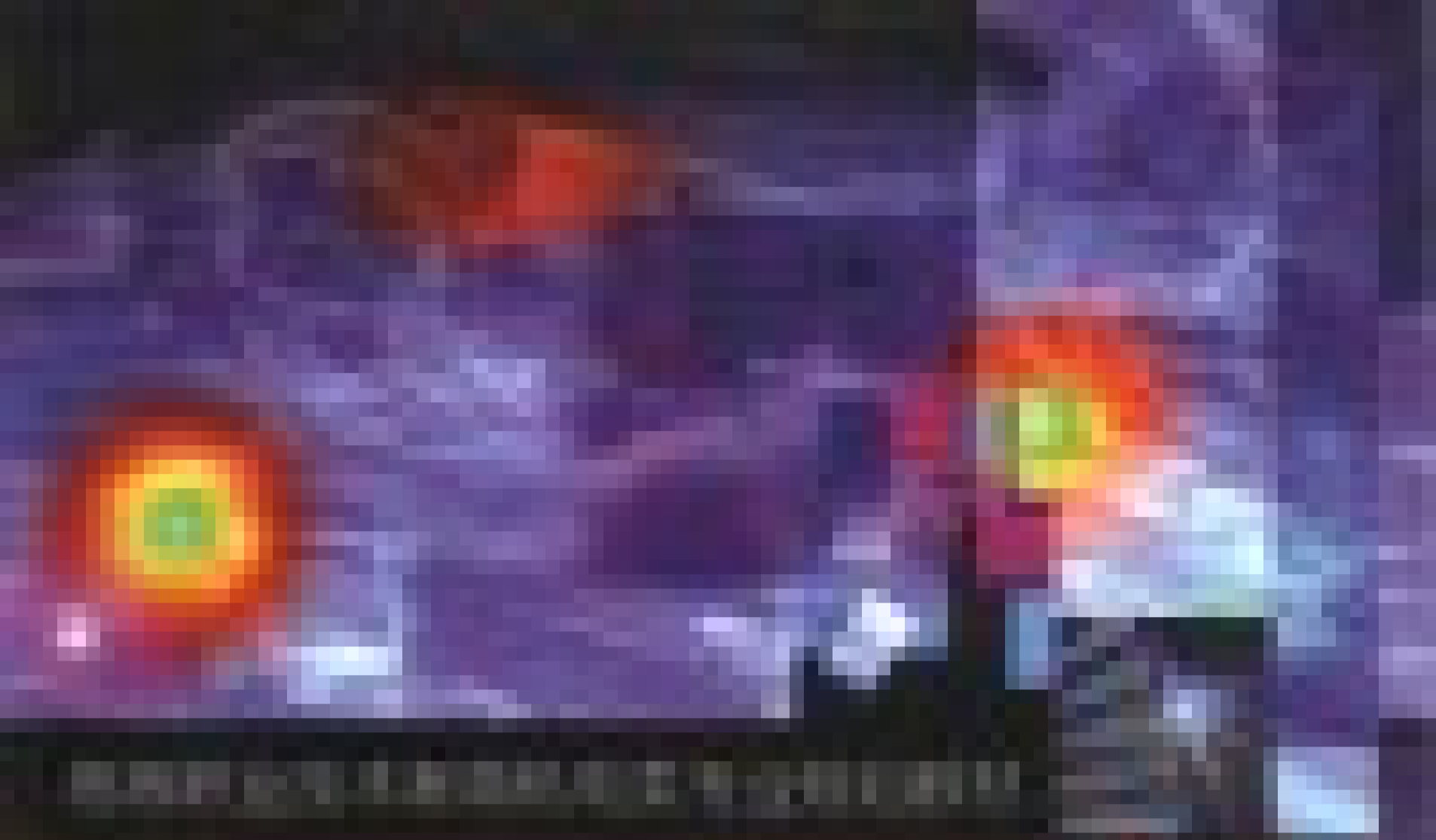
# 自动检测与 转换技术

梁 森 王侃夫 黄杭美 编著

74-43

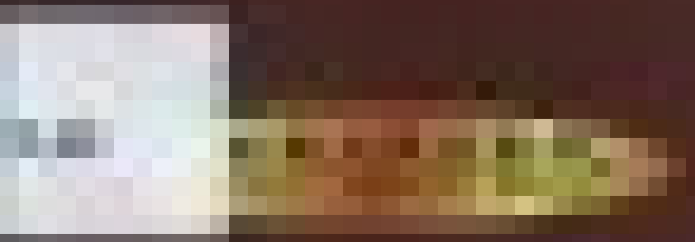
机械工业出版社  
China Machine Press





# 自动检测与 转换技术

作者：[模糊] [模糊] [模糊] [模糊] [模糊]



高等职业技术教育机电类专业规划教材

# 自动检测与转换技术

高等职业技术教育机电类专业教材编委会 组编

梁 森 王侃夫 黄杭美 编著



机械工业出版社

本书是高职高专机电类专业规划教材。主要介绍在工业、科研、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作了介绍。

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。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，有较强的实用性和可参考性。每章均有思考题和习题，题型形式多样，以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。

本书可作为高职高专电气工程类、自动化控制类、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

自动检测与转换技术/梁森等编著. —北京: 机械工业出版社,  
2002.5

高等职业技术教育机电类专业规划教材

ISBN 7-111-09946-X

I. 自... II. 梁... III. ①自动检测—高等学校: 技术学校—教材  
②转换器—高等学校: 技术学校—教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 013209 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: 韩 晶

封面设计: 姚 毅 责任印制: 付方敏

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·20.25 印张·501 千字

0 001—5 000 册

定价: 27.00 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

# 序

职业教育指受教育者获得某种职业或生产劳动的职业道德、知识和技能的教育。机电行业的职业技术教育是培养在生产一线的技术、管理和运行人员，他们主要从事成熟的技术和管理规范的应用与运作。随着社会经济的发展和科学技术的进步，生产领域的技术含量在不断提高。用人单位要求生产一线的技术、管理和运行人员的知识与能力结构与之适应。行业发展的要求促使职业技术教育的高层次——高等职业教育蓬勃成长。

高职教育与高等工程专科、中专教育培养的人才属同一类型，都是技术型人才，毕业生将就业于技术含量不同的用人单位。高等职业教育的专业设置必须适应地区经济与行业的需求。高等职业教育是能力本位教育，应以职业分析入手，按岗位群职业能力来确定课程设置与各种活动。

机械工业出版社出版了大量的本科、高工专、中专教材，其中有相当一批教材符合高等职业教育的需求，具有很强的职业教育特色，在此基础上这次又推出了机械类、电气类、数控类三个高职专业的高职教材。

专门课程的开发应遵循适当综合化与适当实施化。综合化有利于破除原来各种课程的学科化倾向，删除与岗位群职业能力关系不大的内容，有利于删除一些陈旧的内容，增添与岗位群能力所需要的新技术、新知识，如微电子技术、计算机技术等。实施化是课程内容要按培养工艺实施与运行人员的职业能力来阐述，将必要的知识支撑点溶于能力培养的过程中，注重实践性教学，注重探索教学模式以达到满意的教学效果。

本教材倾注了众多编写人员的心血，他们为探索我国机电行业高职教育作出可贵的尝试。今后还要依靠广大教师在实践中不断改进，不断完善，为创建我国的职业技术教育体系而奋斗。

**赵克松**



# 前 言

本书是根据高职、高专教学基本要求及机械工业电类高职教育教材建设协作组会议精神，并参照高职、高专电气类专业检测技术教学大纲编写的。

根据高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。

在考虑取材深度和广度时，主要着眼于提高高职、高专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、收集了较先进的产品技术资料、图片，甚至实地测绘了许多图样。有相当部分应用电路和实例是作者20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。

针对本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、频谱分析等有较大实用价值的内容在有关联的章节中做了集中论述。其中温度的测量贯彻了ITS—1990的新标准。

本书可作为高职、高专电类、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，参考学时为60~80学时。

本书由上海电机技术高等专科学校梁森（绪论、第一、二、三、五、八、九、十一、十三章及统稿）、王侃夫（第七、十二、十四章），杭州职业技术学院黄杭美（第四、六、十章）编著。

上海理工大学谢根涛副教授担任本书的主审，对书稿进行了认真、负责、全面的审阅。2001年7月在上海召开了本书的审稿会。参加审稿会的有上海交通大学忻建华副教授、河南工业技术学院王煜东副教授、上海发电设备成套设计研究所刘春林高级工程师、上海重型机器厂陈克高级工程师、上海电气自动化研究所张玉龙工程师等，与会专家均对本书提出了许多宝贵意见。

在本书的编写过程中，还得到了原上海机电工业学校的阮智利、温州职业技术学院的徐虎、福州大学的郑崇苏副教授、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

作 者

# 目 录

## 序

## 前言

## 绪论 ..... 1

## 第一章 检测技术的基本概念 ..... 5

第一节 测量的基本概念及方法 ..... 5

第二节 测量误差及分类 ..... 7

第三节 测量结果的数据统计处理 ..... 11

第四节 传感器及其基本特性 ..... 15

思考题与习题 ..... 20

## 第二章 弹性敏感元件 ..... 23

第一节 弹性敏感元件的基本特性 ..... 23

第二节 弹性敏感元件的材料 ..... 24

第三节 变换力的弹性敏感元件 ..... 25

第四节 变换压力的弹性敏感元件 ..... 27

思考题与习题 ..... 29

## 第三章 电阻式传感器 ..... 30

第一节 电位器式传感器 ..... 30

第二节 电阻应变式传感器 ..... 33

第三节 测温热电阻传感器 ..... 48

第四节 气敏电阻传感器 ..... 55

第五节 湿敏电阻传感器 ..... 58

思考题与习题 ..... 61

## 第四章 电感式传感器 ..... 66

第一节 自感式传感器 ..... 66

第二节 差动变压器式传感器 ..... 73

第三节 电感式传感器的应用 ..... 76

思考题与习题 ..... 82

## 第五章 电涡流式传感器 ..... 86

第一节 电涡流式传感器的工作原理 ..... 86

第二节 电涡流式传感器的结构及特性 ..... 88

第三节 电涡流式传感器的测量转换电路 ..... 89

第四节 电涡流传感器的应用 ..... 91

第五节 接近开关简介 ..... 96

思考题与习题 ..... 100

## 第六章 电容式传感器 ..... 103

第一节 电容式传感器的工作原理及结构形式 ..... 103

第二节 电容式传感器的测量转换电路 ..... 108

第三节 电容式传感器的应用 ..... 111

第四节 压力和流量的测量 ..... 117

思考题与习题 ..... 120

## 第七章 压电式传感器 ..... 124

第一节 压电式传感器的工作原理 ..... 124

第二节 压电式传感器的测量转换电路 ..... 127

第三节 压电式传感器的结构和应用 ..... 130

第四节 振动测量及频谱分析 ..... 132

思考题与习题 ..... 138

## 第八章 超声波传感器 ..... 142

第一节 超声波物理基础 ..... 142

第二节 超声波换能器及耦合技术 ..... 146

第三节 超声波传感器的应用 ..... 149

第四节 无损探伤 ..... 153

思考题与习题 ..... 156

## 第九章 霍尔传感器 ..... 159

第一节 霍尔元件的结构及工作原理 ..... 159

第二节 霍尔元件的特性参数 ..... 161

第三节 霍尔集成电路 ..... 161

第四节 霍尔传感器的应用 ..... 163

思考题与习题 ..... 167

## 第十章 热电偶传感器 ..... 170

第一节 温度测量的基本概念 ..... 170

第二节 热电偶传感器的工作原理 ..... 172

第三节 热电偶的种类及结构 ..... 175

第四节 热电偶冷端的延长 ..... 179

第五节 热电偶的冷端温度补偿及技术处理 ..... 181

第六节 热电偶的应用及配套仪表 ..... 184

思考题与习题 ..... 189

## 第十一章 光电传感器 ..... 191



第一节	光电效应及光电元件	191	第一节	现代检测系统的基本结构	286
第二节	光电元件的基本应用电路	201	第二节	带微机的检测系统简介	288
第三节	光电传感器的应用	203	第三节	带微机的检测技术综合 应用实例	293
第四节	光电开关及光电断续器	214	第四节	传感器在现代汽车中的应用	300
第五节	热释电元件及红外防盗报警	216	思考题与习题		304
思考题与习题		218	<b>附录</b>		306
<b>第十二章</b>	<b>数字式位置传感器</b>	223	附录 A	几种常用的传感器的性能 比较	306
第一节	位置测量的方式	223	附录 B	中华人民共和国法定计量 单位	307
第二节	数字式角编码器	225	附录 C	本书涉及到的部分计量单位	308
第三节	光栅传感器	229	附录 D	压力单位换算对照表	309
第四节	磁栅传感器	237	附录 E	工业热电阻对照表 (采用 ITS—1990 标准)	310
第五节	容栅传感器	243	附录 F	工业热电阻分度表	310
第六节	感应同步器和旋转变压器	246	附录 G	镍铬-镍硅(镍铝) K 型热电偶 分度表	312
思考题与习题		254	习题参考答案		313
<b>第十三章</b>	<b>检测系统的抗干扰技术</b>	258	<b>参考文献</b>		315
第一节	干扰源及防护	258			
第二节	检测技术中的电磁兼容原理	261			
第三节	几种电磁兼容控制技术	268			
思考题与习题		283			
<b>第十四章</b>	<b>检测技术的综合应用</b>	286			

# 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。

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方框图的画法。

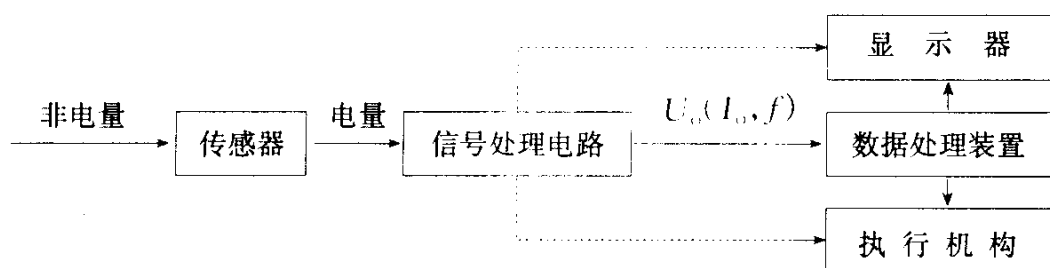


图 0-1 自动检测系统原理框图

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四节)。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作。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。

#### 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：

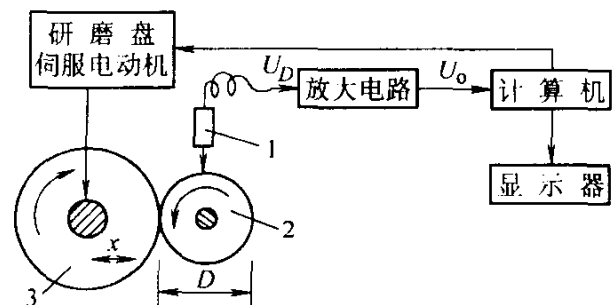


图 0-2 工业检测控制系统

1—传感器 2—被研磨工件 3—研磨盘

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、纳米技术等新的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控制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, 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, 弹性敏感元件的内容也可以分散在有关的章节中讲授。

# 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，如蒸气机必需配备压力表、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，即被将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做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 场效应管晶体测量 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。例如，为了求出某一匀质金属球是否纯金，就必须测出它的密度。可先用电子秤称出球的质量  $m$ ，再用长度传感器测出球的直径  $D$ ，然后通过公式

$$\rho = m / \left( \frac{1}{6} \pi D^3 \right)$$

才可得到球的密度  $\rho$ 。通过与纯金的密度比较，就可得到结论。

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



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产品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

在测量过程中，被测量作用于仪表内部的比较装置，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位式测量。例如，用弹簧秤测物体质量；用高斯计测量磁场强度等，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。为了缩短平衡过程，有时也采用自动平衡随动系统。图 1-1 是自动平衡电位差计的原理图。

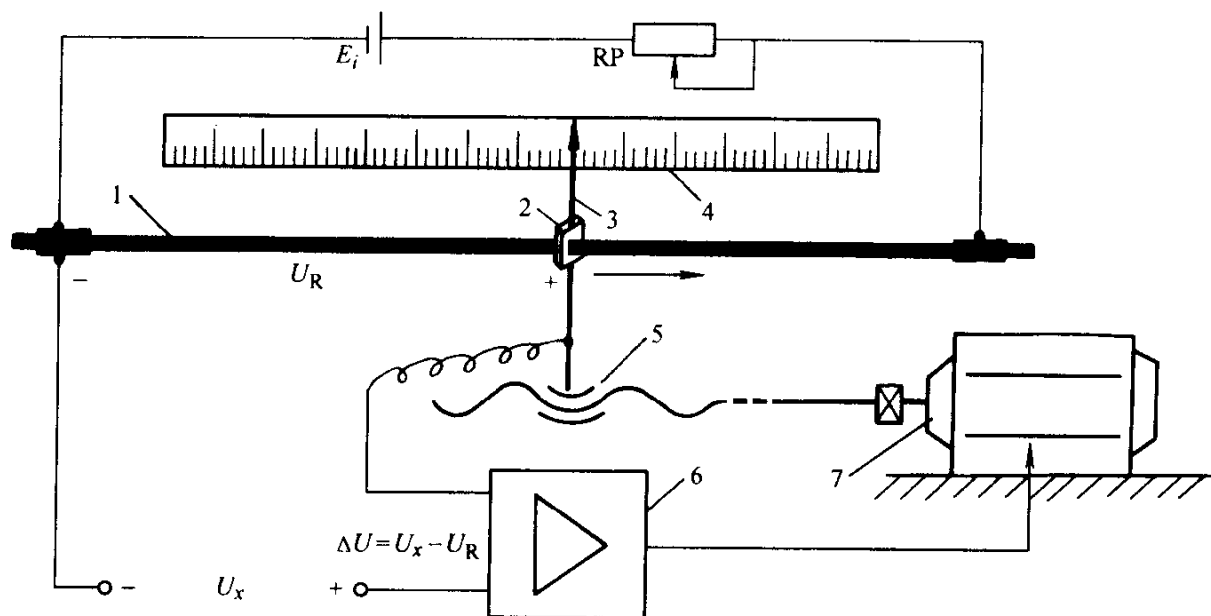


图 1-1 自动平衡电位差计原理示意图

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,从而带动滑线电阻的滑动臂电刷触点及指针移动,直到滑线电阻上的压降  $U_R$  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。

### 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 1-2 所示的钢板厚度测量的例子都属于微差式测量。

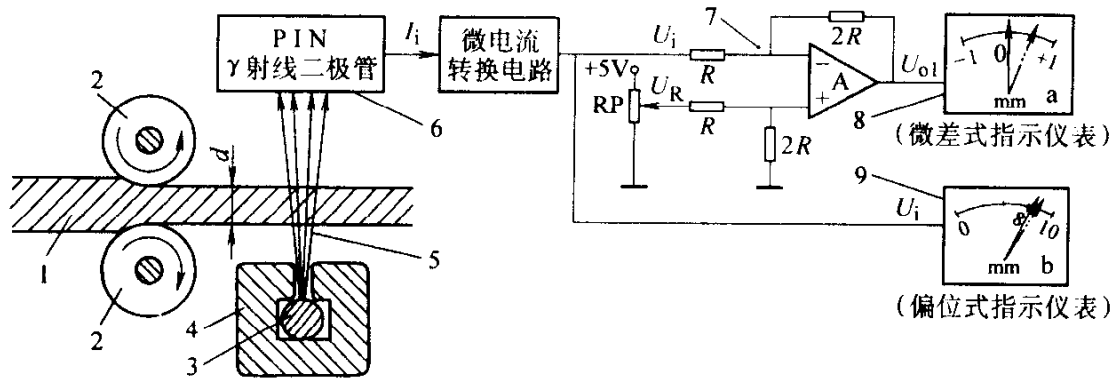


图 1-2 核辐射钢板测厚仪原理图

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  $U_{o1}$  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,分辨力较高,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  $0\sim 10\text{mm}$ ,但分辨力则低得多。

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。获知真值以下几种情况:理论真值、约定真值、相对真

值。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，前者优于后者的 2 倍以上时，则高精度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

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

在实验室和计量工作中，常用修正值  $C$  表示，即

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

由上式可知，由修正值  $C$ 、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) 实际相对误差  $\gamma_A$  实际相对误差  $\gamma_A$  是用绝对误差  $\Delta$  与被测量的真值  $A_0$  的百分比来表示的。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  $\gamma_x$  是用绝对误差  $\Delta$  与被测量  $A_x$  的百分比来表示的。即

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

(3) 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

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

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 (1-5) 中，用量程  $(A_{\max} - A_{\min})$  来代替分母中的  $A_m$ 。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

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

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。我国电工仪表中的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。