



21世纪普通高等教育规划教材

自动检测技术 及应用

梁 森 欧阳三泰 王侃夫 编著

$$1/2fa=2U/I^2+k1/2fa=2U/I^2+k$$

$$V=(e2+e1)/UI*RV=(e2+e1)/UI*R$$

$$e=mc2e=mc2$$

$$B=\cos90*BfB=\cos90*Bf$$

$$e=mc2e=mc2$$

$$1/2fa=2U/I^2+k1/2fa=2U/I^2+k$$

$$V=(e2+e1)/UI*RV=(e2+e1)/UI*R$$

$$B=\cos90*BfB=\cos90*Bf$$

$$e=mc2e=mc2$$

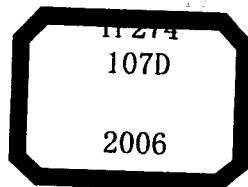
$$1/2fa=2U/I^2+k1/2fa=2U/I^2+k$$

$$V=(e2+e1)/UI*RV=(e2+e1)/UI*R$$

$$B=\cos90*BfB=\cos90*Bf$$



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育规划教材

自动检测技术及应用

梁 森 欧阳三泰 王侃夫 编著
梁佳莹 光盘制作
郑崇书 主 审

机械工业出版社

本书主要介绍在工业、科研等领域常用传感器的工作原理、特性参数、应用等知识，并对测量技术的基本概念、测试数据处理、抗干扰技术、电磁兼容原理、现代测试技术、计算机接口技术及虚拟仪器等也作了介绍。每章的最后一节均安排了“工程项目设计实例”，并附有较多的启发性思考题及应用型习题，有利于各校安排对应的课程设计。

本书附带有上百个动画和录像的多媒体光盘，还配套了一个“自动检测技术教辅网站”。师生可在网上阅读或下载 50 万字以上的专业拓展资料、有关图片、传感器公司网站链接、在线练习、BBS 在线答疑等。

本书可作为普通高等学校机械、数控、机电一体化、汽车制造、电气工程与自动化、智能楼宇、仪器仪表、计算机信息等专业方向的教材，也可供生产、管理、运行及其他工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动检测技术及应用/梁森等编著. —北京: 机械工业出版社, 2006.10
21 世纪普通高等教育规划教材
ISBN 7-111-19926-X

I. 自... II. 梁... III. 自动检测—高等学校—教材 IV. TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 112089 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: 陈延翔

封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2006 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·22.25 印张·549 千字

定价: 35.00 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)68326294

编辑热线电话(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

《自动检测技术及应用》是21世纪普通高等教育规划教材。根据高等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科研、工业领域技术人员所必须掌握的传感器、现代检测系统等方面的基本理论和应用技术。

本书共分十三章,主要介绍在工业、科研等领域常用传感器的工作原理、特性参数、综合应用等方面的知识,对测量技术的基本概念、测试数据处理、抗干扰技术、电磁兼容、现代测试技术、计算机接口技术及虚拟仪器在检测技术中的应用等也作了介绍。

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及最新成果,本书以较大篇幅介绍近十年出现的、并得到广泛应用的传感器。其素材大多来源于最近几年的国内外专利文献、科技论文以及厂商网站等。在编写过程中,作者还先后深入几十家工控公司、企业,并深入生产车间,了解、收集了众多产品技术资料、图片和应用,甚至实地测绘了许多图样。还有相当部分应用实例和电路是作者十几年来从事科研开发、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、振动频谱分析等有较大实用价值的内容在相关的章节中作了集中论述。

本书每章的最后一节均安排了“工程项目设计实例”,并附有较多的启发性思考题及应用型习题。要求学生利用网络技术,收集有关资料来完成指定的练习,有利于不同专业方向的学校安排对应的课程设计。

本书附带多媒体光盘,内容包括上百个动画、上千张实用照片(附说明)的PPT课件和十几段现场使用录像,并用英文和德文配音(可切换),还制作了授课教案和作业辅导。既可作为教师的授课课件,也可作为学生的自学与提高的辅助学习材料。学生在学习各章的同时,可参阅光盘各部分的有关内容,了解检测技术的发展历史,观看各种传感器图片,了解传感器的选型、安装、调试和使用,加深对课程内容的理解,对完成课后作业也有一定的帮助,还可以增加学习本课程的兴趣。

作者还为本书的出版建立了一个对应的“自动检测技术教辅网站”。师生们可在网上阅读或下载50万字以上的专业拓展资料、有关图片、传感器公司网站链接、在线练习、BBS在线答疑等。

本书可作为普通高等学校机械、数控、机电一体化、汽车制造、电气自动化、智能楼宇、仪表仪器、计算机信息等专业方向的教材,也可供生产、管理、运行及其他工程技术人员参考。本书的参考学时约为64学时,各校可根据各自的专业方向,选讲有关的工程设计实例,以减少对应的课时。

本书由上海电机学院梁森编写绪论、第二、三、四、五、八、九、十、十二章及统稿,王侃夫编写第六、七、十一章、湖南工程学院欧阳三泰编写第一、十三章),多媒体光盘由上海东方网梁佳莹制作。

福州大学的郑崇书老师担任本书的主审，对书稿进行了认真、负责、全面的审阅。2006年7月，在湖南工程学院召开了本书的审稿会。参加审稿的有：福州大学的郑崇书，湖南工程学院的胡俊达、贺攀峰，北京信息科技大学的栗书贤，南通大学的王士森，南京化工职业技术学院的王永红、湘潭电缆厂的张国琪，湘潭电机集团的李庆莲等。

在本书的编写过程中，还得到福州大学的薛昭武，上海电机学院的倪成凤、王海群、周琴，上海交通大学的朱承高、忻建华，上海交大自动检测研究所的金涛、阙沛文，上海大学的朱铮良，哈尔滨工业大学的于石生，华北电力大学的李春曦，杭州技术学院的黄杭美，原上海机电工业学校的阮智利，河南工业职业技术学院的王煜东，温州职业技术学院的徐虎，广西机电职业技术学院的秦培林，上海电气自动化研究所的张玉龙、周宜，上海发电设备成套设计研究院的刘春林，上海工业自动化仪表研究所的范锐、姜世昌，上海重型机器厂的陈克，上海精良电子公司的段超，天津德国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等专家，工程技术人员以及德国BLUM公司，深圳康宇测控仪表公司，北京世帝科学仪器公司，上海科先液压成套有限公司，中国石油天然气管道技术公司，上海803研究所，上海硅酸盐研究所，东方振动和噪声技术研究所，中国计量测试学会流量计量专业委员会，上海市计量测试技术研究院，铁道科学研究院，北京声振联合高新技术研究所，北京机械工业学院等多家单位的大力支持。他们对本书的有关内容提出了许多宝贵意见或提供了资料，作者在此一并表示衷心的感谢。

由于传感器技术发展较快，作者水平有限，本书内容难免存在遗漏和不妥之处，敬请读者批评指正。我们真诚希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，并欢迎通过E-mail，把对本书的意见和建议告诉我们。E-mail地址是liangwan@shtel.net.cn，也可以在<http://www.liangsen.net>网站（梁老师答疑网）的BBS上留言，与作者交流及探讨。需要复制多媒体课件的教师可与作者联系。希望读者能在学习相应章节时，上网浏览网站的对应内容。

作者

目 录

前言

绪论	1
----------	---

第一章 检测技术的基本概念

第一节 测量的基本概念及方法	5
第二节 测量误差及数据处理	7
第三节 测量不确定度	15
第四节 传感器及其基本特性	18
思考题与习题	25

第二章 电阻传感器

第一节 电阻应变传感器	28
第二节 测温热电阻传感器	37
第三节 气敏电阻传感器	42
第四节 湿敏电阻传感器	44
第五节 磁敏电阻传感器	47
第六节 工程项目设计实例 ——利用铂热电阻测控电烘箱 温度	51
思考题与习题	54

第三章 电感传感器

第一节 自感传感器	60
第二节 差动变压器传感器	63
第三节 电感传感器的应用	67
第四节 工程项目设计实例 ——电感传感器在轴承滚柱直径 分选中的应用	71
思考题与习题	76

第四章 电涡流传感器

第一节 电涡流传感器的工作原理	80
第二节 电涡流传感器的结构及特性	82
第三节 电涡流传感器的测量转换电路	83
第四节 电涡流传感器的应用	84
第五节 接近开关及应用	87

第六节 工程项目设计实例 ——电涡流传感器在棉花包金属 检测中的应用	91
思考题与习题	93

第五章 电容传感器

第一节 电容传感器的工作原理及 结构形式	97
第二节 电容传感器的测量转换电路	100
第三节 电容传感器的应用	103
第四节 压力、液位和流量的测量	107
第五节 工程项目设计实例 ——电容压力传感器在测量地面 沉降中的应用	111
思考题与习题	115

第六章 压电传感器

第一节 压电传感器的工作原理	119
第二节 压电传感器的测量转换电路	122
第三节 压电传感器的结构和应用	124
第四节 振动测量及频谱分析	127
第五节 工程项目设计实例 ——压电传感器在齿轮箱故障诊断 中的应用	132
思考题与习题	139

第七章 超声波传感器

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	145
第三节 超声波传感器的应用	147
第四节 无损探伤	150
第五节 工程项目设计实例 ——超声波传感器在铁路钢轨 探伤中的应用	154
思考题与习题	160

第八章 霍尔传感器

162

第一节	霍尔元件的工作原理及特性	162	第五节	容栅传感器	250
第二节	霍尔集成电路	164	第六节	工程项目设计实例 ——鞋楦机的数字化逆向制造 系统	253
第三节	霍尔传感器的应用	165	思考题与习题		259
第四节	工程项目设计实例 ——霍尔传感器在油气管道无损 探伤中的应用	170	第十二章 检测系统的抗干扰技术		263
思考题与习题		177	第一节	噪声及防护	263
第九章 热电偶传感器		179	第二节	检测技术中的电磁兼容原理	266
第一节	温度测量的基本概念	179	第三节	几种电磁兼容控制技术	272
第二节	热电偶传感器的工作原理	181	第四节	工程项目设计实例 ——抗干扰 K 型热电偶放大器的 设计	287
第三节	热电偶的种类及结构	183	思考题与习题		293
第四节	热电偶冷端的延长	186	第十三章 传感器在现代检测系统中 的应用		296
第五节	热电偶的冷端温度补偿与 集成温度传感器	187	第一节	现代检测系统的基本结构	296
第六节	热电偶的应用及配套仪表	192	第二节	检测系统中的计算机接口 总线	306
第七节	工程项目设计实例 ——热电偶在热力学测量水泵 效率中的应用	195	第三节	基于虚拟仪器的检测系统	312
思考题与习题		199	第四节	传感器在现代汽车中的应用	321
第十章 光电传感器		201	第五节	传感器在数控机床中的应用	325
第一节	光电效应及光电元件	201	第六节	传感器在机器人中的应用	329
第二节	光电元件的基本应用电路	209	第七节	传感器在智能楼宇中的应用	332
第三节	光电传感器的应用	211	思考题与习题		337
第四节	光电开关及光电断续器	218	附录		341
第五节	CCD 图像传感器及应用	220	附录 A	常用传感器的性能及选择	341
第六节	工程项目设计实例 ——光电传感器在带钢开卷机 跑偏控制中的应用	224	附录 B	压力单位转换对照表	343
思考题与习题		229	附录 C	工业热电阻分度表	343
第十一章 数字式位置传感器		234	附录 D	镍铬—镍硅 K 型热电偶分度表 (自由端温度为 0℃)	345
第一节	位置测量的方式	234	部分习题参考答案		347
第二节	角编码器	236	参考文献		348
第三节	光栅传感器	241			
第四节	磁栅传感器	247			

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, 研究飞机的强度时, 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、运行姿态测量等。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温度、湿度的空调机; 自动检测衣服污度和重量、利用模糊技术的智能洗衣机等。

近几十年来, 自动控制理论和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,本教材主要向读者介绍非电量的检测,对电工和电子课程中未讲述的一些电量的测量也做了介绍。

三、自动检测系统的组成

非电量的检测多采用电测法,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。自动检测系统原理框图如图 0-1 所示。

(1) 系统框图 所谓系统框图,就是将系统中的主要功能或电路的名称画在框内,按信号的流程,将几个框图用箭头联系起来,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予具体的内容。我们将从第一章开始学习框图的画法。

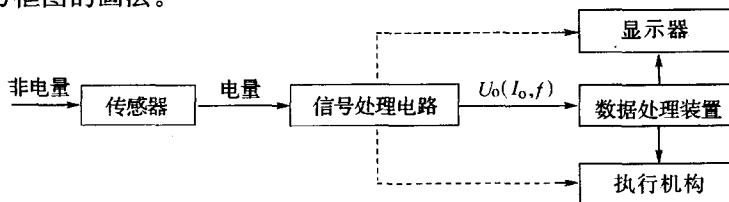


图 0-1 自动检测系统原理框图

(2) 传感器 (Transducer) 传感器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)。

(3) 信号处理电路 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,以推动后级的显示器、数据处理装置及执行机构。

(4) 显示器 目前常用的显示器有 4 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,并以数字的形式来显示读数。前者亮度高、耐震动、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 的内容。

图像显示是用 CRT 或点阵 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、无纸记录仪等。

(5) 数据处理装置 数据处理装置用来对测试所得的实验数据进行处理、运算、逻辑判断、线性变换,对动态测试结果作频谱分析(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。

(6) 执行机构 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。

四、自动检测系统举例

当代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自动检测的一个典型例子。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。很显然，该系统是一个自动检测与控制的闭环系统。

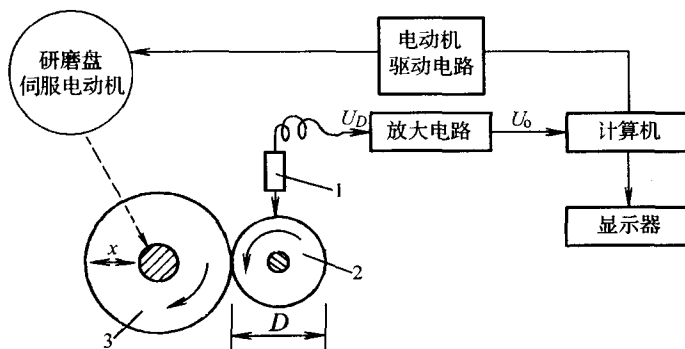


图 0-2 自动磨削控制系统
1—传感器 2—被研磨工件 3—研磨盘

五、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，而分辨力可达微米级；人们已研制出能测量低至几个帕的微压力和高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、摄像机以及可摄影的手机等。今后还将在光、磁、温度、压力等领域开发出新型的集成度很高的传感器。

4. 采用计算机技术,使检测技术智能化

自20世纪70年代微处理器问世以来,人们已迅速将计算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,现在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(如可即插即用)的数字信号。从而可以通过企业内部网络,也可以通过网络实现多个系统之间的数据交换和共享,从而构成网络化的检测系统。还可以远在千里之外,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。

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,目前取得的进展已十分瞩目,今后还将有更大的飞跃。

六、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,使读者逐一了解各种传感器如何将非电量转换为电量,掌握相应的测量转换、信号处理电路和应用。本书对误差处理、弹性元件、电磁兼容原理及抗干扰技术也给予适当的介绍,对自动检测技术的综合应用以及现代测试系统举了较多的实例,以使读者能解决工作现场的实际问题。

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。读者可根据自身的专业方向选做其中的一部分。对本书中的分析、思考题及应用型设计题,可利用习题课或讨论课的方式来学习和掌握。读者还需上网查阅有关资料后,才能完成课后的一些习题,这有利于读者掌握最新的技术发展。

本书所附光盘的主要内容为自动检测技术的自学与提高,该光盘的内容可作为读者的辅助学习材料。读者在学习各章节的同时,可参阅光盘各部分的有关内容,了解检测技术的发展历史,看到各种传感器的实物图片,了解传感器的选型、安装、调试和使用,这有助于增加学习本课程的兴趣,加深对课程内容的理解,对完成作业也有帮助。

由于传感器的品种繁多,检测技术的实践性较强,建议传感器原理可对照实物来学习和理解,并建议采用开卷的形式进行考核。

在学习过程中,还可以到与本书配套的 www.liangsen.net 教辅网站的BBS上,与版主进行讨论和下载有关的专业资料。

第一章 检测技术的基本概念

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，如蒸汽机必须配备压力表、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实践过程。

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，用磁敏电阻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。首先要对几个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 ρ 。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。目前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，用天平测量物体的质量、用平衡式电桥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，有时采用自动平衡随动系统。自动平衡电位差计原理示意图如图 1-1 所示。

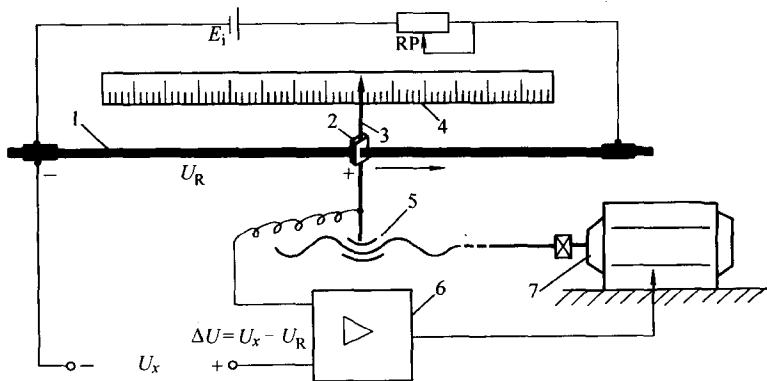


图 1-1 自动平衡电位差计原理示意图

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 ΔU 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 所示的核辐射钢板测厚仪都属于微差式测量。

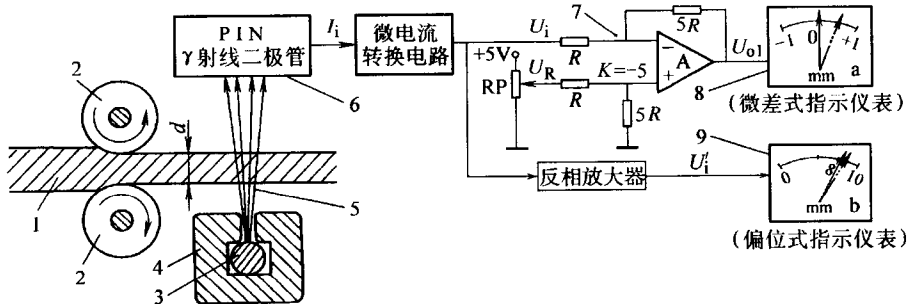


图 1-2 核辐射钢板测厚仪原理图

- 1—被测钢板 2—轧辊 3— γ 射线源 4—铅盒 5— γ 射线 6— γ 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 γ 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 0.1mm 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 测量误差及数据处理

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° ，这种真值称为理论真值。又如，国际科学与技术数据委员会 (CODATA) 1986 年推荐的阿伏加德罗常数为 $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 、在标准条件下，水的三相点为 273.16 K ，金的凝固点是 1064.18°C ；米是氪-86 的两个能级之间跃迁 $[2p(10) \rightarrow 5d(5)]$ 所产生的辐射 1650763.73 个波长的长度等，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，前者的误差是后者的 $1/3$ 以下时，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、测量误差

(一) 测量误差的表示方法

1. 绝对误差 (Absolute Error)

绝对误差 Δ 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

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

由式 (1-2) 可知，由修正值 C 、测量值 A_x 可求得真值 A_0 。绝对误差与被测量的量纲相同。

2. 相对误差 (Relative Error)

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，它表示绝对误差所占约定真值的百分比，一般多取正值。相对误差可分为示值相对误差和引用相对误差等。

(1) 示值 (标称) 相对误差 γ_x 示值相对误差 γ_x 是用绝对误差 Δ 与被测量 A_x 的百分比来表示的。即

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

(2) 引用误差 γ_m 有时也称满度相对误差。它用测量仪表的绝对误差 Δ 与仪器满度值 A_m 的百分比来表示的，即

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

对测量下限不为零的仪表而言，在式 (1-4) 中，用量程 ($A_{\max} - A_{\min}$) 来代替分母中的 A_m 。

式 (1-4) 中，当 Δ 取仪表的最大绝对误差值 Δ_m 时，引用误差常被用来确定仪表的准确度 (Degree of Accuracy) 等级 S ，即

$$S = \left| \frac{\Delta_m}{A_m} \right| \times 100 \quad (1-5)$$

根据给出的准确度等级 S 及量程范围，也可以推算出该仪表可能出现的最大绝对误差 Δ_m 。准确度等级 S 规定取一系列标准值。我国的模拟仪表有下列 7 种等级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。随着测量技术的进步，目前部分仪表还增加了以下几种准确度等级：0.005、0.02、0.05、0.35、4.0 等。它们分别表示对应仪表的引用误差所不应超过

的百分比。从仪表面板上的标志可以判断出仪表的等级。仪表的准确度等级和基本误差如表 1-1 所示。准确度等级的数值越小，仪表的就越昂贵。

表 1-1 仪表的准确度等级和基本误差

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差	±0.1%	±0.2%	±0.5%	±1.0%	±1.5%	±2.5%	±5.0%

仪表的准确度在工程中也称为“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最大引用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℃ 温度表来测量温度时，可能产生的最大绝对误差为

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

在正常工作条件下，仪表的最大绝对误差多数是不变的，而示值相对误差 γ_x 随示值的减小而增大。例如用上述温度表来测量 80℃ 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℃ 温度时，相对误差 $\gamma_x = (\pm 0.5 / 10) \times 100\% = \pm 5\%$ 。

例 1-1 某压力表准确度为 2.5 级，量程为 0~1.5MPa，求：1) 可能出现的最大满度相对误差 γ_m 。2) 可能出现的最大绝对误差 Δ_m 为多少 kPa？3) 测量结果显示为 0.70MPa 时，可能出现的最大示值相对误差 γ_x 。

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

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

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

由上例可知， γ_x 的绝对值总是大于（在满度时等于） γ_m 。

例 1-2 现有准确度为 0.5 级的 0~300℃ 的和准确度为 1.0 级的 0~100℃ 的两个温度计，要测量 80℃ 的温度，试问采用哪一个温度计好？

解 经计算，用 0.5 级表以及 1.0 级表测量时，可能出现的最大示值相对误差分别为 $\pm 1.88\%$ 和 $\pm 1.25\%$ 。计算结果表明，用 1.0 级表比用 0.5 级表的示值相对误差的绝对值反而小，所以更合适。

由上例可知，在选用仪表时应兼顾准确度等级和量程，通常希望示值落在仪表满度值的 2/3 以上。

(二) 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，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。

按误差性质分类，测量误差有：

(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) 在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值与被测量的真值之差，称为系统误差。即：系统误差 = 无限次测量均值 - 真值。有时也采用如下的表达：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。

引起系统误差的因素为系统效应。例如,环境温度、湿度波动、电源电压下降、电子元件老化、机械零件变形移位、仪表零点漂移等。又如,用零点未调整好的天平称量物体,称量结果会产生偏高或偏低。

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计算修正,也可以重新调整测量仪表的有关部件使系统误差尽量减小。

由于系统误差及产生的原因不能完全知晓,因此通过修正和调整只能有限程度地对系统误差进行补偿,其系统误差的模式比修正前的要小,但不能为零。

(3) 随机误差(Random Error) 测量结果与在重复条件下,对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值之差称为随机误差。由于实际上只能进行有限次测量,因而只能得出这一测量结果中随机误差的估计值。随机误差大多是由影响量的随机变化引起的,这种变化带来的影响称为随机效应,它导致重复观测中的分散性。测量列中的每一个测量结果的随机误差是不相同的。随着重复次数的增加,出现的随机误差的总和趋向于零,即随机误差可以认为是测量误差中期望为零的误差分量。

随机误差有时也采用如下的表达: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。随机误差反映了测量值离散性的大小。引起随机误差的因素称为随机效应。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。

存在有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,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,可以掌握看似毫无规律的随机误差的分布特性,并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,我们将在以下的内容中加以论述。

从测量的静态特性和动态特性来分类,还可将误差分为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。我们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,被测水温突然上升到 100°C ,玻璃水银温度计(属于一阶系统)的水银柱不可能立即上升到 100°C 。如果此时就记录读数,必然产生误差。

引起动态误差的原因很多。例如,用笔式记录仪(属于二阶系统)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。用不同品质的心电图仪测量同一个人的心电图时的曲线如图 1-3 所示。由于其中一台放大器的带宽不够,动态误差较大,描绘出的窄脉冲幅度偏小。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,电路中的积分常数较大,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,从而产生误差。