

2011年上海市优秀教材
普通高等教育“十二五”规划教材

自动检测技术 及应用

梁森 欧阳三泰 王侃夫 编著

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

2011年上海市优秀教材
普通高等教育“十二五”规划教材

自动检测技术及应用

第2版

梁 森 欧阳三泰 王侃夫 编著
郑崇苏 主审

机械工业出版社

本书介绍在工业、科研等领域常用传感器的工作原理、特性参数、调理电路、综合应用等知识,对测量技术的基本概念、测试数据处理、抗干扰技术、电磁兼容原理、现代测试技术以及虚拟仪器在检测技术中的应用等也作了介绍。

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,有利于各校安排对应的课程设计。

每章的最后均给出了拓展阅读网络参考资料列表及链接网址,并在各章节的对应位置,按顺序做了标记,以便于读者更好地理解学习本书各部分时所遇到的知识难点。所链接的拓展阅读网络参考资料的总字数超过20万字,可供读者在线阅读或下载。

本书的配套网站上还提供了配套教案、电子课件、授课视频资料、几十个动画和十几段传感器应用的现场录像、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的机械设计制造及其自动化、机械电子、数控、汽车、测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、智能楼宇、电子信息等专业的教材,也可供生产、管理、运行及其他工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动检测技术及应用/梁森,欧阳三泰,王侃夫编著. —2 版.
—北京:机械工业出版社,2011.12
2011 年上海市优秀教材普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-34300-4
I. ①自… II. ①梁…②欧…③王… III. ①自动检测-高等学校-教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 215607 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:贡克勤 责任编辑:贡克勤 王小东

版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23.75 印张 · 587 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34300-4

定价:45.00 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

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

《自动检测技术及应用 第2版》是普通高等教育“十二五”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后能获得作为科研、工业领域工程师和技术人员所必须掌握的传感器、现代检测系统组成等方面的基本理论和综合应用技术。

本书共分13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、调理电路和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、计算机接口技术以及虚拟仪器在检测技术中的应用等也作了介绍。

本书于2006年出版至今,已经印刷10多次,受到广大读者的好评。随着检测技术的不断进步,有必要在保留第1版特色的基础上进行修订,这就是本书第2版。

作者广泛听取了众多读者的各种建议,删除了第1版某些章节中的部分内容,例如不确定度、最小二乘法、计算机总线技术等,将删除的内容放到与本书配套的教辅网站上。增加了能反映本学科在近几年里的技术进步及最新成果的介绍。以较大篇幅介绍近几年出现的、并得到广泛应用的新型传感器。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。在修订过程中,作者还先后深入几十家工控公司以及生产车间,了解、收集了众多传感器产品的技术资料、图片和实际应用,实地拍摄或测绘了许多图片,编入各章节中的有关应用实例和电路中。

针对本书以测量原理划分章节带来的不足之处,这次修订中,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、振动频谱分析等内容在相关的章节中作了集中论述。

本书的第一个特色是:在第2~12章的最后一节,安排了“工程项目设计实例”,总共11个。相当部分内容是作者多年来从事科研开发、技术改造的成果总结。作者还依据多位工程技术人员的实际经验,从工程项目的技术指标和要求出发,介绍了具体的设计过程、传感器的选型、电路的设计、系统调试、数据分析、项目总结等,具有较高的真实性和可参考性,有利于读者将所学理论知识应用于工作岗位。

本书的第二个特色是:有较多的启发性思考题及应用型习题。尽量减少了死记硬背的题型,要求学生灵活应用本章学过的知识来解决实际问题。一些习题还具有知识拓展的功能,要求学生利用网络,收集有关资料,拓宽思路。因此,有利于不同专业方向学校安排对应的课程设计,有利于各校根据自己专业方向来布置合适的作业。

本书的第三个特色是：每章的最后给出了较多的拓展阅读网络参考资料列表，给出了链接网址，并在各章节的对应位置，按顺序做了标记，以便于读者更好地理解学习本书各部分时所遇到的知识难点。所链接的拓展阅读网络参考资料的总字数超过 20 万字，读者可以有选择地上网阅读，或下载有兴趣的资料。作者将这些参考资料的标题和网址放到与本书配套的课程网站上，读者可以很方便地单击打开所要阅读的内容。

本书的第四个特色是：作者为本书的出版建立了一个对应的“传感器与检测技术教辅网站”，网址是：<http://www.liangsen.net> 以及 <http://www.sensor-measurement.net>。

作者将原配套光盘的内容放到上述课程网站上。包含 13 个章节的多媒体电子教案、授课视频、对应的专业拓展资料、传感器的现场应用照片、传感器公司的网站链接、多媒体课件、几十个动画、上千张实用照片和十几段现场使用录像，部分录像有英文和德文配音；同时还上传了作业辅导。学生在学习各章时，可以上网观看有关章节的内容，了解检测技术的发展历史，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，增加学习本课程的兴趣，培养自主学习和终身学习的习惯。配套的课程网站还提供了在线练习，有利于读者检验自己的掌握程度。还建设了在线答疑 BBS。读者和作者可以在 BBS 上交流学习心得，相互提问和回答有关传感器与检测技术的难题。

本书可作为普通高等学校的机械设计制造及其自动化、机械电子、数控、汽车、测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、智能楼宇、电子信息等专业的教材，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 48 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。

本书由上海电机学院梁森（绪论，第 2、3、4、5、8、9、10、12 章及统稿），王侃夫（第 6、7、11 章）、湖南工程学院欧阳三泰（第 1、13 章）编著。

福州大学的郑崇苏老师担任本书的主审，对书稿进行了认真、负责、全面的审阅。

在本书的编写过程中，还得到了上海交通大学的朱承高、忻建华、金涛、阙沛文，上海大学的朱铮良，上海电机学院的苏中义、倪成凤、王海群、周琴、王洋，湖南工程学院的黄绍平、胡俊达、贺攀峰，湖南科技大学的吴新开，福州大学的薛昭武，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，哈尔滨工业大学的于石生，华北电力大学的李春曦，北京理工大学的徐晓彤，杭州职业技术学院的黄杭美，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铠、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、中国铁道科学研究院、北京声振联合高新技术研究所、容向系统科技有限公司、北京信息科技大学等多

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相关资料，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，本书内容可能还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 liangsen2@126.com，或在上述教辅网站的 BBS 上留言。

作 者

目 录

前言

绪论	1	思考题与习题	81
0.1 检测技术在国民经济中的地位和作用	1	本章拓展阅读网络参考资料列表	84
0.2 工业检测技术的内容	1	第4章 电涡流传感器	85
0.3 自动检测系统的组成	2	4.1 电涡流传感器的工作原理	85
0.4 自动检测系统举例	3	4.2 电涡流传感器的结构及特性	87
0.5 检测技术的发展趋势	4	4.3 电涡流传感器的测量转换电路	88
0.6 本课程的任务和学习方法	5	4.4 电涡流传感器的应用	90
绪论拓展阅读网络参考资料列表	5	4.5 接近开关及应用	95
第1章 检测技术的基本概念	6	4.6 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	99
1.1 测量的基本概念及方法	6	思考题与习题	101
1.2 测量误差及数据处理	9	本章拓展阅读网络参考资料列表	104
1.3 传感器及其基本特性	17	第5章 电容传感器	105
思考题与习题	23	5.1 电容传感器的工作原理及结构形式	105
本章拓展阅读网络参考资料列表	25	5.2 电容传感器的测量转换电路	111
第2章 电阻传感器	26	5.3 电容传感器的应用	114
2.1 电阻应变传感器	26	5.4 压力、液位和流量的测量	119
2.2 测温热电阻传感器	36	5.5 工程项目设计实例——利用电容压力 传感器测量地面沉降	123
2.3 气敏电阻传感器	41	思考题与习题	127
2.4 湿敏电阻传感器	44	本章拓展阅读网络参考资料列表	130
2.5 工程项目设计实例——利用铂热电阻 测控电烘箱温度	47	第6章 压电传感器	131
思考题与习题	54	6.1 压电式传感器的工作原理	131
本章拓展阅读网络参考资料列表	59	6.2 压电式传感器的测量转换电路	134
第3章 电感传感器	61	6.3 压电式传感器的结构和应用	137
3.1 自感传感器	61	6.4 振动测量及频谱分析	140
3.2 差动变压器传感器	67	6.5 工程项目设计实例——压电式传感器在 齿轮箱故障诊断中的应用	146
3.3 电感传感器的应用	71	思考题与习题	154
3.4 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	75		

本章拓展阅读网络参考资料列表	156	思考题与习题	253
第7章 超声波传感器	157	本章拓展阅读网络参考资料列表	258
7.1 超声波物理基础	157	第11章 数字式位置传感器	259
7.2 超声波换能器及耦合技术	162	11.1 位置测量方式	259
7.3 超声波传感器的应用	165	11.2 角编码器	261
7.4 无损探伤	169	11.3 光栅传感器	267
7.5 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	173	11.4 磁栅传感器	274
思考题与习题	179	11.5 工程项目设计实例——鞋楦机的数字 化逆向制造系统	278
本章拓展阅读网络参考资料列表	181	思考题与习题	283
第8章 霍尔传感器	182	本章拓展阅读网络参考资料列表	287
8.1 霍尔元件的工作原理及特性	182	第12章 检测系统的抗干扰技术	288
8.2 霍尔集成电路	184	12.1 噪声及防护	288
8.3 霍尔传感器的应用	186	12.2 检测技术中的电磁兼容原理	291
8.4 工程项目设计实例——油、气管道腐蚀 及裂纹的漏磁法探伤检测	191	12.3 几种电磁兼容控制技术	298
思考题与习题	197	12.4 工程项目设计实例——K型热电偶抗 干扰放大器的设计	313
本章拓展阅读网络参考资料列表	199	思考题与习题	319
第9章 热电偶传感器	200	本章拓展阅读网络参考资料列表	321
9.1 温度测量的基本概念	200	第13章 传感器在现代检测系统中的综合 应用	323
9.2 热电偶传感器的工作原理	203	13.1 现代检测系统的基本结构	323
9.3 热电偶的种类及结构	205	13.2 基于虚拟仪器的检测系统	333
9.4 热电偶冷端的延长	208	13.3 传感器在汽车中的应用	341
9.5 热电偶的冷端温度补偿与集成 温度传感器	210	13.4 传感器在数控机床中的应用	346
9.6 热电偶的应用及配套仪表	213	13.5 传感器在机器人中的应用	350
9.7 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	215	13.6 传感器在智能楼宇中的应用	353
思考题与习题	219	思考题与习题	359
本章拓展阅读网络参考资料列表	221	本章拓展阅读网络参考资料列表	363
第10章 光电传感器	222	附录	364
10.1 光电效应及光电元件	222	附录A 常用传感器的性能及选择	364
10.2 光电元件的基本应用电路	231	附录B 压力单位及转换对照表	366
10.3 光电传感器的应用	233	附录C 工业热电阻分度表	366
10.4 光电开关及光电断续器	241	附录D 镍铬-镍硅(镍铝)K型热电偶 分度表(自由端温度为0℃)	368
10.5 CCD图像传感器及应用	244	部分习题参考答案	370
10.6 工程项目设计实例——光电传感器 在带钢开卷机纠偏控制中的应用	248	参考文献	371

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自动检测技术提供了新的理论基础和制造工艺, 同时对自动检测技术提出了更高的要求。

0.1 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几十种之多, 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, 就要在机身、机翼上贴上几百片应变片进行动态测量; 在导弹和航天器的研制中, 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、运行姿势试验等。近年来, 随着家电行业的发展, 检测技术也进入了人们的日常生活中, 例如, 自动检测并按需要调节房间温度、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。

0.2 工业检测技术的内容

自动检测技术的内容较为广泛, 常见的自动检测涉及的内容如表 0-1 所示。

表 0-1 自动检测涉及的内容

被测量类型	被 测 量	被测量类型	被 测 量
热工量 ^[1]	温度、热量、比热容、热流、热分布、压力（压强）、差压、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 ^[2]	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 ^[3]	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、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，在生产科研、生活中，需要检测的量远不止以上所列举的项目。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，本书主要介绍非电量的检测，对电工和电子课程中未讲述的一些电量的测量也做了简要介绍。

0.3 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。

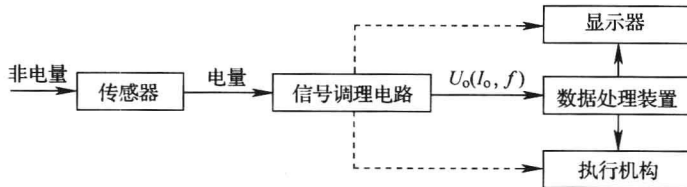


图 0-1 自动检测系统原理框图

(1) 系统框图 系统框图 (System block diagram) 用于表示一个系统各部分和各环节之间的关系，用来描述系统的输入、输出、中间处理等基本功能和执行逻辑过程的概念模式。在产品说明书、科技论文中，能够清晰地表达比较复杂的系统各部分之间的关系及工作原理。

在检测系统中，将各主要功能或电路的名称画在框内，按信号的流程，将几个框用箭头联系起来，有时还可以在箭头上标出信号的名称。对具体的检测系统或传感器而言，必须将框图中的各项赋予具体的内容。

(2) 传感器 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 1.3 节)。

(3) 信号调理电路 信号调理电路 (Signal conditioning)^[4] 包括放大 (或衰减) 电路、滤波电路、隔离电路等。放大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 (Monitor) 有以下几种：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)^[5] 和液晶 (LCD)^[6] 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；后者耗电少、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 (Data processing) 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，对动态测试结果做频谱分析 (Spectrum analysis, 包括幅值谱分析、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调理电路直接驱动，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 (Relay)、电磁铁 (Solenoid)、电磁阀门 (Solenoid valve)^[7]、电磁调节阀 (Solenoid regulating valve)^[8]、伺服电动机 (Servomotor)^[9] 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。

0.4 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比较典型的自动控制系统。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 ，计算机一方面对直径参数做一系列的运算、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^[10]的径向位移 x ，直到工件加工到规定要求为止。该系统是一个自动检测与控制的闭环系统，也称反馈控制系统^[11]。

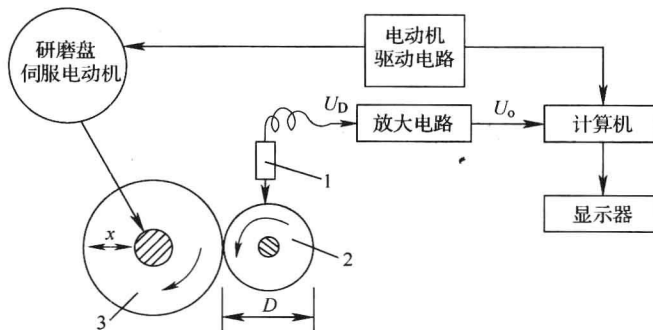


图 0-2 自动磨削控制系统
1—传感器 2—被研磨工件 3—研磨盘

0.5 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,人们都可以发现自动检测技术的广泛运用。当前,检测技术的发展趋势主要体现在以下几个方面:

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^[12]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、化学效应,开拓检测领域

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形超声波无损探伤、放射性测厚、中子探测爆炸物^[13]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,并且已开始渗透到人类的日常生活之中。

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,硅和砷化镓电子元器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调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更高的传感器。

4. 采用计算机技术,使自动检测技术智能化

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网络化检测系统

随着微电子技术的发展,现在已可以将十分复杂的信号调理和控制电路集成到单块芯片中。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。通过企业内外网络实现多个检测系统之间的数据交换和共享,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^[14]。

总之, 自动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, 今后还将有更大的发展。

0.6 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、信号调理电路和应用。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/专业知识和适当的理论知识。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、仪表等设备, 重视实验, 才能学得活、学得好。

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, 可利用讨论课的方式来学习和掌握。读者还必须掌握上网查阅资料的技巧, 收集网上有关资料后, 才能完成课后的一些习题, 这种训练方法有利于读者掌握最新的技术发展和学科动态。

读者还可以从本书的配套教辅网站 (www.liangsen.net 或 <http://www.sensor-measurement.net/>) 上, 下载有关章节的多媒体课件和众多的专业拓展阅读资料, 了解检测技术的发展历史, 了解传感器的选型、安装、调试和使用, 以便于更好地理解学习本书各部分时所遇到的知识难点。

绪论拓展阅读网络参考资料列表

网址: <http://www.liangsen.net/news.php?id=2427>

或 <http://www.sensor-measurement.net/news.php?id=2427>

序号	作者	扩展阅读文章题目	序号	作者	扩展阅读文章题目
1	张华	热工测量仪表	8	上海工业自动化仪表研究所	调节阀、控制阀及通用阀门
2	Beckwith T. G.	机械量测量	9	百度百科	伺服电动机
3	百度百科	几何量测量	10	百度百科	砂轮
4	郭斌, 欧阳焯	微弱信号调理电路和模数转换电路的探讨	11	百度百科	闭环系统
5	百度百科	LED 显示器	12	百度百科	失效率
6	百度百科	液晶显示器	13	颜志国, 成诚	中子探测技术在安全检查中的应用
7	百度百科	电磁阀	14	童利标, 徐科军	IEEE 1451 网络化智能传感器标准的发展及应用探讨

第1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、流量计、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。

1.1 测量的基本概念及方法

1.1.1 测量的一般概念

测量 (Measurement)^[1] 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”，就是使用一定准确度等级的测量仪器、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。

1.1.2 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，用光纤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，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 $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots)$, 经过计算求得被测量。

例如,为了求出某一匀质金属球的密度,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 $\rho = m / \left(\frac{1}{6} \pi D^3 \right)$, 求得到球的密度 ρ 。

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,但无法实时监控产品质量。

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及特点。

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,用弹簧秤测量物体质量;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,但准确度不高。

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,有时采用自动平衡随动系统。自动平衡电位差计^[2]原理示意图如图1-1所示。

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,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, U_R 的指示值即表示被测电压值 U_x , 图中的 RP 为灵敏度调节电位器。零位式测量的特点是准确度高,但平衡复杂,多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准确度高的优点的一种测量方法。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,

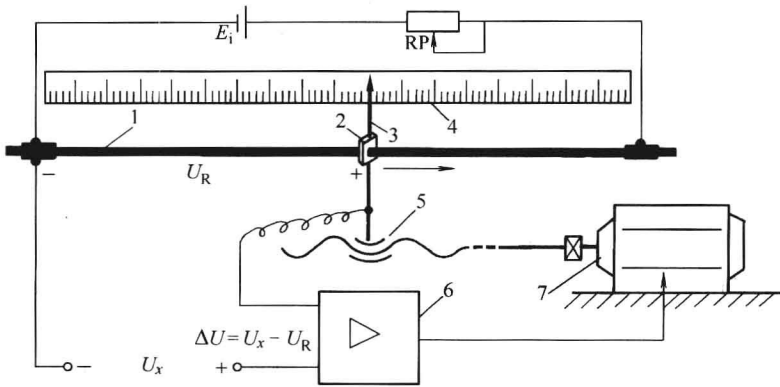


图 1-1 自动平衡电位差计原理示意图

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

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，用电子秤测量物体的重量，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^[3]，都属于微差式测量。

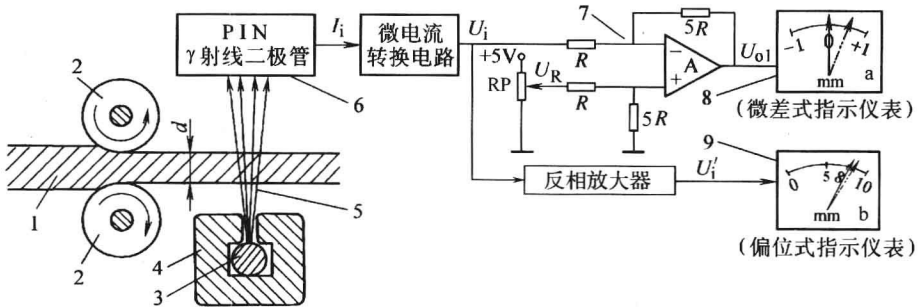


图 1-2 核辐射钢板测厚仪原理图

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 射线源和射线探测器之间，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

准确度。

1.2 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)。在一定条件下, 任何一个被测量的大小都有一个客观存在的实际值, 称为真值。真值是一个可以接近却难以达到的理想概念。测量的目的就是要力图得到被测量的真值, 但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制, 只能获得该物理量的近似值。

真值有理论真值、约定真值 (Conventional true value)、相对真值 (Relatively true value) 之分。例如, 平面三角形的三个内角之和为 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, 这类真值称为约定真值。相对真值: 准确度高一级或几级的仪表的误差与准确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。

1.2.1 测量误差

1. 测量误差^[4]的表示方法

(1) 绝对误差 一个被测量值 A_x 与真值 A_0 之间总是存在着一个差值, 这种差值称为绝对误差 (Absolute Error), 用 Δ 表示, 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 、被测量值 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 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 (Relative error)。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 (Nominal relative error) 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。引用误差 (Quoted error) 是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

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