



高等职业技术教育机电类专业规划教材

机械工业出版社精品教材

自动检测与 转换技术

第2版

梁 森 王侃夫 黄杭美 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

附光盘

高等职业技术教育机电类专业规划教材
机械工业出版社精品教材

自动检测与转换技术

(第 2 版)

编 著 梁 森 王侃夫 黄杭美
光盘制作 梁佳莹
主 审 倪成凤



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、调试等方面的知识，对测量技术的基本概念、抗干扰技术、电磁兼容性及其在检测系统中的应用也作了介绍。

本书反映了近十年来的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十年来从事科研和技术改造的成果总结，有较强的真实性和可参考性。每章均附有启发性的思考题及应用型习题。

本书还附带多媒体光盘，既便于教师授课，又可作为学生的辅助学习材料，以加深对课程内容的理解。

本书可作为高职、高专的自动化、仪表仪器、计算机、数控、机械、机电一体化、汽车制造、楼宇智能化等专业的教材，也可供生产、管理和运行人员及有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动检测与转换技术/梁森等编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2005.1

高等职业技术教育机电类专业规划教材

ISBN 7-111-15543-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 112817 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: 于宁 版式设计: 冉晓华 责任校对: 申春香

封面设计: 姚毅 责任印制: 石冉

北京中兴印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·20.5 印张·507 千字

定价: 36.00 元 (含 1CD)

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、88379646

68326294、68320718

封面防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高职、高专教学基本要求及教育部启动的“高等学校教育质量与教学改革工程”的精神编写的。作者力图体现现代教育所要求的先进性、科学性和教育、教学适用性，降低了难度，压缩了公式推导及繁琐的计算，突出了应用。

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、维护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及最新成果，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生产车间，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。

针对本书第1版以测量原理划分章节带来的不足之处，这次修订时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相关联的章节中作了集中论述，其中温度测量贯彻了 ITS-90 的新标准。

本书可作为两年制、三年制高职、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、数控、机械、机电一体化、汽车、楼宇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。

IV

本书还附带图片精美、内容丰富的多媒体光盘。主要内容为自动检测与转换技术的自学与提高，并向读者展示了近千张实用传感器照片（附说明）、动画演示、传感器现场使用录像、本书习题辅导及电子教案，可作为学生的辅助学习材料，以增加学习本课程的兴趣，加深对课程内容的理解，对完成课后作业及复习考试有一定帮助，亦可作为教师授课的辅助工具。

本书由上海电机学院梁森（绪论、第一、二、三、四、六、八、十、十三章、第十二章部分及统稿），王侃夫（第七、十一、十四章及第十二章部分），杭州职业技术学院黄杭美（第五、九章）编著，多媒体光盘由东华大学梁佳莹制作，是凡、冯喆、孙怡劼等在绘图等方面做了大量的工作。

倪成凤研究员（教授）担任本书的主审，他对书稿进行了认真、负责、全面的审阅。在本书编写过程中，还得到了上海交通大学朱承高、忻建华，上海大学黄正荣、朱铮良，福州大学郑崇苏、河南工业职业技术学院王煜东、原上海机电工业学校阮智利、温州职业技术学院徐虎、广西机电职业技术学院秦培林、上海发电设备成套设计研究所刘春林、上海电气自动化研究所张玉龙、上海电气自动化研究所周宜、上海工业自动化仪表研究所范铠、姜世昌、上海重型机器厂陈克、上海量具刃具厂宋伟强、上海汽轮机厂陈禹明、上海精良电子公司段超、天津图尔克传感器公司李倚天、上海华东电子仪器厂朱美丽、郑学芳、上海轴承滚子厂黄吉平等专家、工程技术人员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，他们对本书提出了许多宝贵意见，编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。我们热忱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，并欢迎您将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，也可以在 <http://www.liangsen.net> 网站[梁老师答疑网]上留言，与作者交流及探讨。

作者

目 录

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	6	
第三节 传感器及其基本特性	9	
思考题与习题	13	
第二章 电阻传感器	15	
第一节 电阻应变式传感器	15	
第二节 测温热电阻传感器	28	
第三节 气敏电阻传感器	33	
第四节 湿敏电阻传感器	35	
思考题与习题	38	
第三章 电感式传感器	43	
第一节 自感式传感器	43	
第二节 差动变压器式传感器	47	
第三节 电感式传感器的应用	50	
思考题与习题	56	
第四章 电涡流式传感器	60	
第一节 电涡流式传感器的工作 原理	60	
第二节 电涡流式传感器的结构及 特性	61	
第三节 电涡流式传感器的测量 转换电路	62	
第四节 电涡流式传感器的应用	64	
第五节 接近开关简介	70	
思考题与习题	74	
第五章 电容式传感器	77	
第一节 电容式传感器的工作原理 及结构形式	77	
第二节 电容式传感器的测量转换 电路	81	
第三节 电容式传感器的应用	82	
第四节 压力和流量的测量	88	
思考题与习题	92	
第六章 压电式传感器	95	
第一节 压电式传感器的工作原理	95	
第二节 压电式传感器的测量转换 电路	97	
第三节 压电式传感器的应用	99	
第四节 振动测量及频谱分析	101	
思考题与习题	107	
第七章 超声波传感器	110	
第一节 超声波物理基础	110	
第二节 超声波换能器及耦合技术	113	
第三节 超声波传感器的应用	116	
第四节 无损探伤	120	
思考题与习题	123	
第八章 霍尔传感器	126	
第一节 霍尔元件的工作原理 及特性	126	
第二节 霍尔集成电路	128	
第三节 霍尔传感器的应用	130	
思考题与习题	134	
第九章 热电偶传感器	137	
第一节 温度测量的基本概念	137	
第二节 热电偶传感器的工作原理	139	
第三节 热电偶的种类及结构	141	
第四节 热电偶冷端的延长	144	
第五节 热电偶的冷端温度补偿	145	
第六节 热电偶的应用及配套仪表	147	
思考题与习题	150	
第十章 光电传感器	153	
第一节 光电效应及光电元件	153	
第二节 光电元件的基本应用电路	162	
第三节 光电传感器的应用	164	
第四节 光电开关及光电断续器	173	
思考题与习题	176	
第十一章 数字式位置传感器	180	
第一节 位置测量的方式	180	
第二节 数字式角编码器	182	
第三节 光栅传感器	187	
第四节 磁栅传感器	194	

第五节 容栅传感器	198	第四节 传感器在现代汽车中的	
思考题与习题	200	应用	286
第十二章 新型传感器	205	第五节 传感器在数控机床中的	
第一节 集成温度传感器及应用	205	应用	290
第二节 磁性传感器及应用	212	第六节 传感器在机器人中的应用	295
第三节 光纤传感器及应用	224	第七节 传感器在智能楼宇中的	
第四节 图像传感器及应用	233	应用	301
思考题与习题	246	思考题与习题	308
第十三章 检测系统的抗干扰技术	249	附录	312
第一节 干扰源及防护	249	附录 A 常用传感器的性能及选择	312
第二节 检测技术中的电磁兼容		附录 B 中华人民共和国法定计量	
原理	252	单位	313
第三节 几种电磁兼容控制技术	258	附录 C 本书涉及到的部分计量单	
思考题与习题	272	位	315
第十四章 检测技术的综合应用	274	附录 D 工业热电阻分度表	315
第一节 现代检测系统的基本结构	274	附录 E 镍铬-镍硅 (镍铝) K 型热电偶	
第二节 带计算机的检测系统简介	276	分度表 (自由端温度为 0℃)	
第三节 带计算机的检测技术应用		317
实例	282	习题参考答案	319
		参考文献	321

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、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 (起停等)、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。

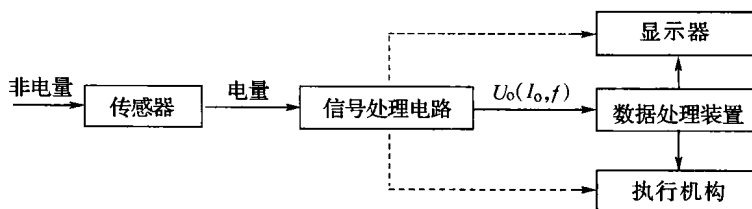


图 0-1 自动检测系统原理框图

1. 系统框图

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方框内，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。

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）。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。

3. 显示器

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 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。

4. 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。

5. 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。

6. 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。很显然，该系统是一个自动检测系统与控制的闭环系统。

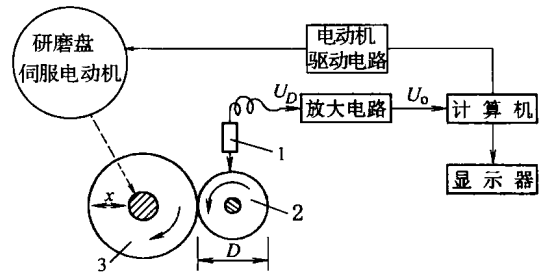


图 0-2 工业检测控制系统

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地提高。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，硅和砷化镓电子元器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器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 Internet 网，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。

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、电磁兼容原理及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计算机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，部分传感器原理可对实物来讲解和学习。

本书所附光盘的主要内容之一为自动检测与转换技术的阅读与理解，可作为学生的辅助学习材料。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；看到各种传感器的照片；了解传感器的选型、安装、调试和使用，可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。

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

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。

对于测量方法，从不同的角度出发，有不同的分类方法。

1. 静态测量和动态测量

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。

2. 直接测量和间接测量

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。

3. 模拟式测量和数字式测量

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。

4. 接触式测量和非接触式测量

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。

5. 在线测量和离线测量

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。

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° , 这种真值称为理论真值。又如, 在标准条件下, 水的三相点为 273.16K , 银的凝固点是 961.78°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。

一、绝对误差和相对误差

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

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

2. 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 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

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

(2) 满度 (引用) 相对误差 γ_m 测量下限为零的仪表的满度相对误差 γ_m 是用绝对误差 Δ 与仪器满度值 A_m 的百分比来表示的。即

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

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 (1-3) 中, 可用量程 ($A_{\max} - A_{\min}$) 来代替分母中的 A_m 。上式中, 当 Δ 取最大值 Δ_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 Δ_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 7 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。

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°C

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	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$	$\pm 5.0\%$

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。这些术语的叫法十分普遍，但有时也容易引起混乱。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 γ_x 随示值的减小而增大。例如用上述温度表来测量 80°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°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 0.70MPa ，试求：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) 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， γ_x 总是大于（满度时等于） γ_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°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，下面对此作一些简介。

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、电子元器件老化、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计算修正，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程度。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，服从一定的统计规律。因此通过增加测量次数，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。在许多场合可以发现，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 1-1）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。多数随机误差都服从正态分布规律，测量结果符合正态分布曲线的例子很多，例如某校男生的身高的分布，交流电源相电压的波动，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。

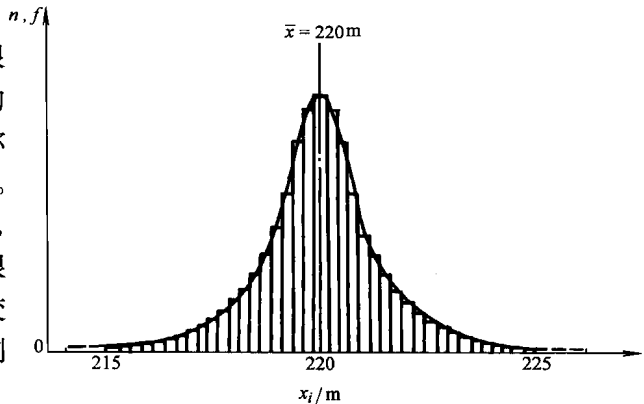


图 1-1 统计直方图

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

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。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，将水银温度计插入 100℃ 沸水中，水银柱不可能立即上升到 100℃。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，产生误差。从图 1-2 可以看出，用不同品质的心电图仪测量同一个人的心电图时，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。



图 1-2 用不同品质的心电图仪描绘出的心电图比较

a) 动态误差较小的心电图仪测量结果 b) 动态误差较大的心电图仪测量结果

一般静态测量要求仪器的带宽从 0Hz（直流）至 10Hz 左右。而动态测量要求带宽超过 10kHz。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。

第三节 传感器及其基本特性

一、传感器定义及组成

传感器是一种能感受规定的被测量，并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置。常用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 1-3 所示。

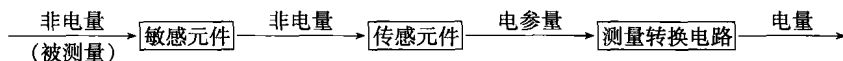


图 1-3 传感器组成框图

图中的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与被测量有确定关系、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的。

图 1-4 为一台测量压力用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,通过齿条带动齿轮转动,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 α 。电位器为传感元件,它将角位移转换为电参量——电阻的变化 (ΔR)。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,电位器又属于分压比式测量转换电路。

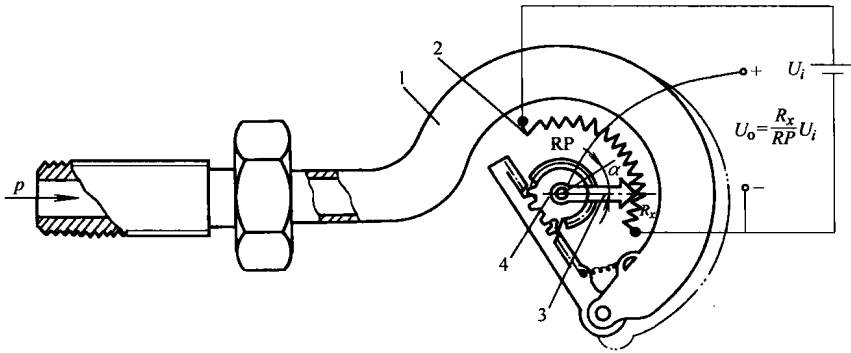


图 1-4 电位器式压力传感器

1—弹簧管（敏感元件） 2—电位器（传感元件、测量转换电路） 3—电刷 4—传动机构（齿轮-齿条）

结合上述工作原理,可将图 1-4 方框中的内容具体化,见图 1-5。

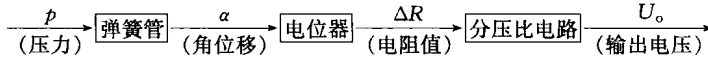


图 1-5 电位器式压力传感器原理框图

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、压力、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。

本教材采用第二种分类法。例如,第二章为电阻式传感器,分别论述了各种不同的电阻传感器利用电阻变化的原理来测量各自不同的对象。

考虑到某些物理量(例如流量、振动等)的测量可以采用多种不同的测量原理来测量,所以本教材还在有关章节中,集中论述某一物理量的多种测量方法。例如在第五章中,就论述了测量流量的几种不同方法。又如,在第七章中就集中论述了无损探伤的概念;在第九章集中论述了温度的测量方法及 ITS-90 国际温标等。

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)