



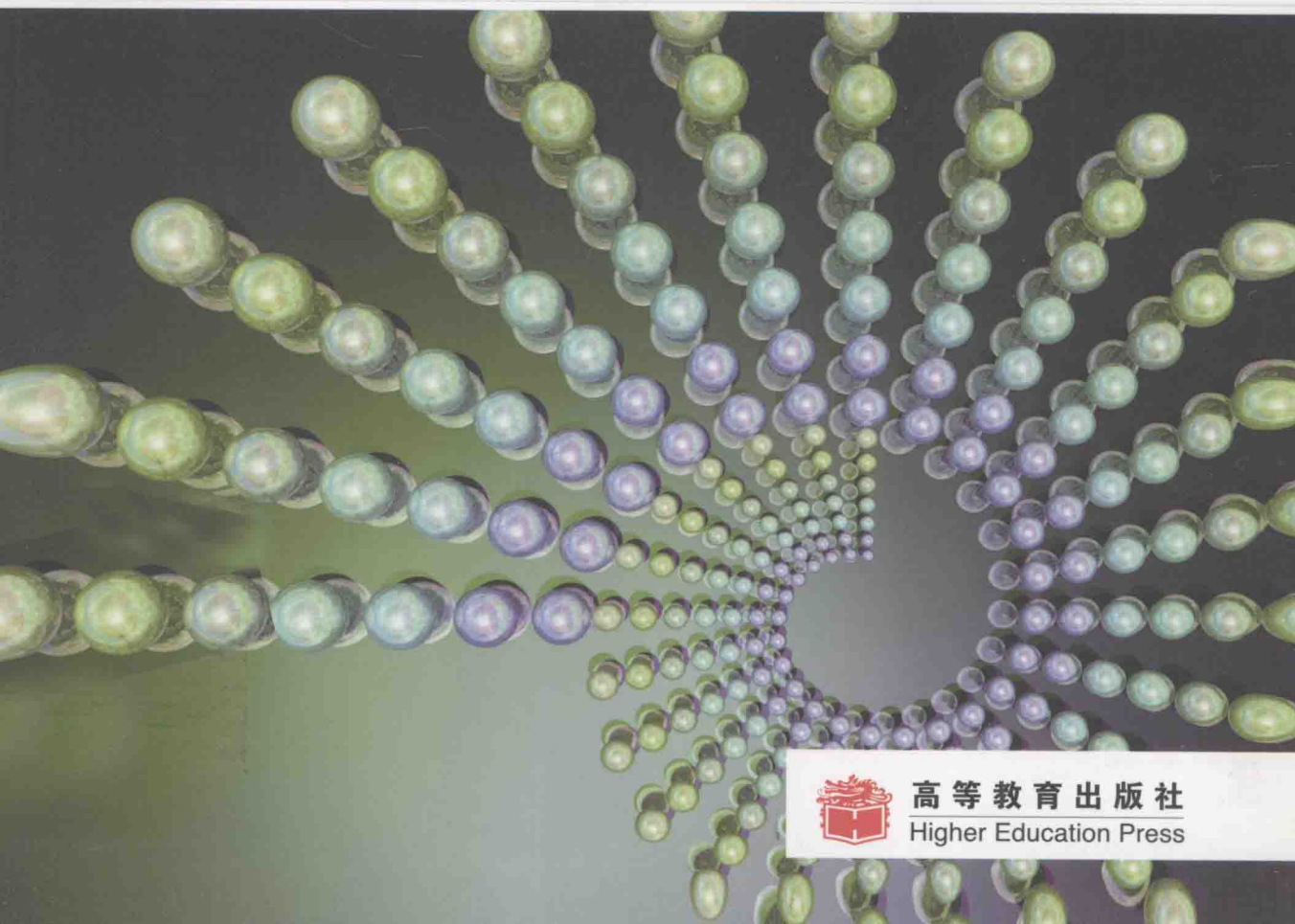
中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

传感器及应用

(机电技术应用专业)

第2版

主编 吴 旗



高等教育出版社
Higher Education Press

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

传感器及应用

CHUANGANQI JI YINGYONG

(机电技术应用专业)

第2版

主编 吴 旗



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是根据教育部颁布的《中等职业学校机电技术应用专业教学指导方案》中主干课程传感器及应用的教学基本要求，并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级标准编写的中等职业教育国家规划教材。

本书主要内容包括传感器的基本概念、参量传感器、发电传感器、其他传感器、传感器的信号处理、抗干扰技术、检测仪表概述、传感器在机电产品中的应用等。

本书可作为中等职业学校机电技术应用专业教材，也可作为相关行业岗位培训教材或自学用书。

图书在版编目（CIP）数据

传感器及应用/吴旗主编. —2 版. —北京：高等教育出版社，2010.1（2011 重印）
机电技术应用专业
ISBN 978-7-04-025997-1

I. 传... II. 吴... III. 传感器—专业学校—教材
IV.TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 224837 号

策划编辑 陈大力 责任编辑 陈大力 封面设计 于 涛
版式设计 马敬茹 责任校对 杨凤玲 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京七色印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 10.75
字 数 250 000

购书热线 010—58581118
咨询电话 400—810—0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2002 年 7 月第 1 版
2010 年 1 月第 2 版
印 次 2011 年 1 月第 3 次印刷
定 价 19.80 元（含光盘）

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究
物料号 25997—00

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，教育部组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲编写而成的，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定通过。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为学校选用教材提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的学校的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001 年 5 月

第2版前言

根据全国使用本书第1版读者的反馈意见,本次修订除增加了光纤传感器及汽车电子防盗系统等内容外,还就有关章节进行了调整:将第1版中的第二章常用传感器及测量转换电路、第五章第四节集成传感器和第五节智能传感器,以及新增加的光纤传感器的内容统一进行整合,调整为本版第二章参量传感器、第三章发电传感器及第四章其他传感器;对第1版中第二章的内容进行了拆分,以便于学生学习时的复习与总结。

本书主要内容包括传感器的基本概念、参量传感器、发电传感器、其他传感器、传感器的信号处理、抗干扰技术、检测仪表概述和传感器在机电产品中的应用。其中,参量传感器、发电传感器和其他传感器三章可根据行业及地方经济的需要,在讲课时进行部分筛选;检测仪表概述一章可作为选学内容。

本书由江苏省常州轻工职业技术学院吴旗任主编,其中第一章,第二章第一、二、四节,第三章第一、三节,第四章第一、三节,第五章,第六章和第八章第一、三节由吴旗编写;第二章第三、五、六节,第三章第二、四、五节,第四章第二、四、五节,第七章和第八章第二节由江苏省常州轻工职业技术学院俞亚珍编写。

作者根据传感器涉及面广、种类繁多、应用广泛及学生学习困难的特点,制作了辅助学生学习和教师教学的相关教学光盘,光盘主要包含演示文稿、电子挂图、动画、视频等教学资源,通过多媒体技术,将抽象的理论知识形象、生动地表现出来,方便读者学习,希望广大读者能喜欢并提出宝贵意见。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

本书采用出版物短信防伪系统,用封底下方的防伪码,按照本书最后一页“郑重声明”下方的使用说明进行操作,可查询图书真伪并有机会赢得大奖。登录 <http://sv.hep.com.cn>,可获得图书相关信息及资源。

编 者
2009年8月

第1版前言

本书是根据教育部2001年颁发的《中等职业学校机电技术应用专业教学指导方案》中主干课程《传感器及应用教学基本要求》，并参照有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级标准编写的中等职业教育国家规划教材。

本书主要包括：传感器的基本概念，常用传感器及测量转换电路，抗干扰技术，传感器的信号处理，检测仪表概述和传感器在机电产品中的应用。其中，常用传感器及测量转换电路一章可根据行业及地方经济的需要，在讲课时进行部分筛选；检测仪表概述一章在课时允许的条件下可作为选学内容。本书根据传感器技术实践性强、内容分散、缺乏系统性和连续性，而又具有“机”与“电”之间的“桥梁”和“纽带”作用这样一些特点，注重基本概念、基本原理、基本方法的阐述，并考虑中等职业教育的特点，避免了理论推导，增强了实际应用等方面的知识。为了加强学生的动手能力，部分传感器增添了应用小制作的介绍，提供学生作为课外兴趣制作的参考。本书尽可能反映国内外传感器领域的新成果、新进展，着力体现中等职业教育以应用为主的宗旨，同时有利于学生分析问题、解决问题能力的培养与提高。

全书由江苏省常州轻工业学校吴旗任主编，其中第一章，第二章的第一、二、四、八、十、十一节，第三章，第四章和第六章第一节由吴旗编写；第二章的第三、五、六、七、九、十二、十三节，第五章和第六章第二节由江苏省常州轻工业学校俞亚珍编写。高等教育出版社请河海大学机电学院卞新高副教授审阅了全书，特此致谢。本书为中等职业学校机电类专业的教材，也可供有关专业师生及工程技术人员参考。

本书通过全国中等职业教育教材审定委员会审定，由北京科技大学罗圣国教授担任责任主审，北京科技大学陈工、马祥华副教授审稿。他们对书稿提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2002年4月

目 录

第一章 传感器的基本概念	1
第一节 传感器的作用与分类	1
第二节 传感器的定义与基本特性	3
第三节 传感器的基本误差和精度	5
第四节 传感器中的弹性敏感元件	8
习题一	12
第二章 参量传感器	14
第一节 电阻应变式传感器	14
第二节 热电阻传感器	21
第三节 气敏、湿敏电阻传感器	25
第四节 差动变压器式传感器	29
第五节 电涡流式传感器	35
第六节 电容式传感器	38
习题二	43
第三章 发电传感器	45
第一节 热电偶传感器	45
第二节 磁电式传感器	52
第三节 霍尔式传感器	56
第四节 压电式传感器	61
第五节 超声波传感器	67
习题三	70
第四章 其他传感器	71
第一节 光电式传感器	71
第二节 数字式传感器	79
第三节 光纤传感器	85
第四节 集成传感器	87
第五节 智能传感器	90
习题四	93
第五章 传感器的信号处理	94
第一节 传感器信号的预处理	94
第二节 仪表放大器及 A/D 转换器的选择	96
第三节 传感器信号的非线性校正	99
第四节 传感器的标定与选择	102
习题五	104
第六章 抗干扰技术	105
第一节 干扰的来源与途径	105

第二节	抗电磁干扰技术	108
习题六		112
第七章	检测仪表概述	113
第一节	检测仪表的基本概念	113
第二节	常用检测仪表	115
第三节	常用物理量检测系统的故障判断	122
习题七		124
第八章	传感器在机电产品中的应用	125
第一节	机器人中的传感器	125
第二节	家用电器中的传感器	136
第三节	汽车电子防盗系统	144
习题八		149
附录		150
附录一	实验	150
附录二	传感器的分类	152
附录三	几种常用传感器性能特点比较	153
附录四	热电阻新、旧分度号对照	154
附录五	热电阻分度表	154
附录六	镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	155
附录七	铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	157
习题参考答案		162
参考文献		163

第一章 传感器的基本概念

本章力求通过对传感器的作用与分类、传感器的基本特性、传感器的测量误差与精度以及弹性敏感元件的简要介绍,使读者对传感器技术涉及的一些基本概念有一些了解。

第一节 传感器的作用与分类

一、传感器的地位

中国有句古话:“工欲善其事,必先利其器。”用这句话来说明传感器技术在现代科学技术中的重要性是很恰当的。所谓“事”,就是指发展现代科学技术的伟大事业,而“器”则是指利用传感器技术而制造的仪器、仪表、工具等。所以说传感器技术是科学实践和生产实践的必要手段,它的水平高低是科学技术现代化的重要标志,因此,它在发展国民经济中的作用也就不言而喻了。

人的体力劳动是外界刺激通过人体五官(视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉)接收来自外界的信息,并将这些信息传递给大脑,在大脑中将这些信息进行运算、处理,然后传给肌体如手、足等来执行某些动作。假如希望用机器代替人完成这一过程,则发现大脑可与当今的计算机相当,肌体相当于机器的执行器,五种感觉器官就相当于一个新的名称——“传感器”。执行器是人类四肢的外延,计算机是人类大脑或智力的外延,传感器是人类五官的外延。这三者结合,发挥了人类改造自然的积极作用。

近年来,随着家电工业的兴起,传感器技术也进入了人们的日常生活之中,例如电冰箱中的温度传感器、监视煤气溢出的气敏传感器、防止火灾的烟雾传感器、防盗用的光电传感器等。在机械制造业中,通过对机床的加工精度、切削速度、床身振动等许多静态、动态参数进行在线测量,可控制加工质量;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,一辆现代化汽车所用的传感器多达数十种,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,传感器技术用得更多,许多尖端的检测技术都是因国防工业需要而发展起来的,如研究飞机的强度,就要在机身、机翼上贴几百片应变片,并进行动态特性的测试。

二、传感器的作用

随着自动化等新技术的发展,传感器的使用数量越来越大,一切现代化仪器、设备几乎都

离不开传感器。

在工业生产中，尤其是自动化生产过程中，用各种传感器来监测和控制生产过程中的各个参数，如温度、压力、流量、pH 等，以便使设备工作在最佳状态，产品达到最好的质量。

在机器制造业中，以前只是测量一些静态的性能参数，而现在要进行动态特性测量，如在切削状态下的动态稳定性、自激现象、加工精度等，因此要利用有关的传感器测量刀架、床身等有关部位的振动、机械阻抗等参数来检验其动态特性。在超精加工中，要求对零件尺寸精度进行在线检测与控制，只有具有“耳目”作用的传感器才能提供有关信息。

农业是国民经济的基础，为了尽快加速发展农、林、渔业，必须掌握农田土地实际状态、作物分布，掌握森林资源，观察海洋环境，探测鱼群等，所有这些工作都离不开传感器。

机电一体化技术是科学技术发展的必然产物，它使产品提高了自动化程度，提高了功能和经济效益。作为高科技代表的机电一体化系统一般由机械本体、传感器、控制装置和执行机构四部分组成，如图 1-1 所示。传感器把代表机械本体的工作状态、生产过程等工业参数转换成电量，从而便于采用控制装置使控制对象按给定的规律变化，推动执行机构适时地调整机械本体的各种工业参数，使机械本体处于自动运行状态，并实行自动监视和自动保护。显然，传感器是机械本体与控制装置的“纽带”和“桥梁”，在机电一体化系统中起着重要作用。

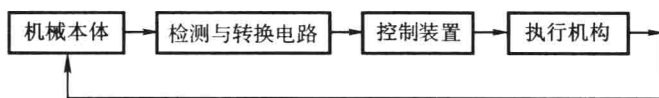


图 1-1 机电一体化系统的组成

目前，传感器技术已成为一些发达国家的最重要的热门技术之一，其主要原因是它可以促进科学技术的飞跃发展，并给人们带来巨大的经济效益。可以说，自动化水平是衡量一个国家现代化水平的重要方面，而自动化水平是用传感器的种类、质量和数量来衡量的。

三、传感器的分类

传感器名目繁多，分类方法不尽相同。常见的分类方法有以下几种。

1. 按工作原理分类

按工作原理可以分成参量传感器、发电传感器及特殊传感器。其中：参量传感器有触点传感器、电阻传感器、电感式传感器、电容式传感器等；发电传感器有光电池、热电偶传感器、霍尔式传感器、压电式传感器、磁电式传感器等。特殊传感器是不属于以上两种类型的传感器，如数字式传感器、光纤传感器、红外探测器、激光检测等。

这种分类方法的优点是能把传感器按工作原理分门别类地归纳起来，避免名目过多，且较为系统。

2. 按被测量性质分类

按被测量性质可以分成机械量传感器、热工量传感器、成分量传感器、状态量传感器、探伤传感器等。其中：机械量有力、长度、位移、速度、加速度等；热工量有温度、压力、流量等；成分量传感器是检测各气体、液体、固体化学成分传感器，如检测可燃性气体泄漏的气敏传感器；状态量传感器是检测设备运行状态的传感器，如由干簧管、霍尔元件做成的各种接

近开关；探伤传感器是用来检测金属制品内部的气泡和裂缝，检测人体内部器官的病灶等的各种传感器，如超声波探头、CT 探测器等。

这种分类方法对使用者比较方便，容易根据测量对象的性质来选择所需用的传感器。

3. 按输出量种类分类

按输出量种类可分成模拟式传感器和数字式传感器。模拟式传感器输出与被测量成一定关系的模拟信号，如果需要与计算机配合或用数字显示，还必须经过模/数（A/D）转换电路。数字式传感器输出的是数字量，可直接与计算机连接或作数字显示，读取方便，抗干扰能力强。

4. 按传感器的信号处理方法分类

按传感器的信号处理方法可以分成直接传感器、差动传感器和补偿传感器。直接传感器是单独将被测量转换成所需要的输出信号，它的结构最简单，但灵敏度低，易受外界干扰。差动传感器是把两个相同类型的直接传感器接在转换电路中，使两个传感器所经受的相同干扰信号相减，而有用的被测量信号相加，从而提高了灵敏度和抗干扰能力，改善了特性曲线的线性度。补偿传感器要求显示装置的指示自动跟随被测量变化而变化，它一般是把输出的电信号通过反向传感器变换成非电量，再与被测量进行比较，产生一个偏差信号。此偏差信号通过正向通路中的传感器变换成电量，再经过测量、放大，然后输出供指示或记录，从而大大提高了测量精度和抗干扰能力。但这类传感器往往结构复杂，价格偏高，本书将介绍前两种结构形式的传感器。

传感器常常按工作原理及被测量性质两种分类方式合二为一进行命名，例如电感式位移传感器、光电式转速计、压电式加速度计等。这种命名使被测量与传感器的工作原理一目了然，便于使用者正确选用。

第二节 传感器的定义与基本特性

一、传感器的定义与组成

传感器是能感受规定的被测量并按照一定规律转换成有用输出信号（一般为电信号）的器件或装置。它通常由敏感元件、传感元件和测量转换电路组成，如图 1-2 所示。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的部分，传感元件指传感器中能将敏感元件输出转换为适于传输和测量的电信号部分。由于传感器输出信号一般都很微弱，需要有信号调节与转换电路将其放大或转换为容易传输、处理、记录和显示的形式，这一部分一般称为测量转换电路。

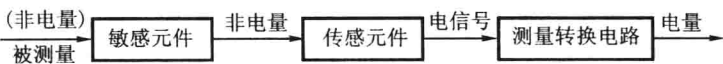


图 1-2 传感器组成方块图

传感器输出信号有很多形式，如电压、电流、频率、脉冲等，输出信号的形式由传感器的原理确定。常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器、电荷放大器等，它们分别与

相应的传感器相配合。

有些国家和有些学科领域，将传感器称为变换器、检测器或探测器等。应该说明，并不是所有的传感器都能明显分清敏感元件、传感元件和测量转换电路三个部分，它们可能是三者合为一体。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的测量转换电路可以安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上。例如半导体气体传感器、湿度传感器等，它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号，没有中间转换环节。

二、传感器的基本特性

1. 精度

精度是评价传感器优良程度的一个指标。精度分为准确度和精密度。所谓准确度就是测量值对于真值的偏离程度，为修正这种偏差需要进行校正，但完全校正是很麻烦的。因此，使用时需尽可能地减小误差。所谓精密度就是即使测量相同对象，每次测量也会得到不同测量值，即为离散偏差。精密度高的传感器价格也高，使用时注意不要损坏。

2. 稳定性

传感器的稳定性有两个指标，一是系统指示值在一段时间中的变化，以稳定度表示；二是系统外部环境和工作条件变化引起指示值的不稳定，用环境影响系数表示。稳定度指在规定时间内，测量条件不变的情况下，由检测系统中随机性变动、周期性变动、漂移等引起指示值的变化。一般以精密度数值和时间的长短来表示。例如，某仪表电压指示值每小时变化 1.3 mV，则稳定度可表示为 1.3 mV/h。环境影响系数是指检测系统由外界环境变化引起指示值变化的量。它是由温度、湿度、气压、振动、电源电压及电源频率等一些外加环境因素所引起的。

3. 输入输出特性

传感器输入输出特性可分静态特性和动态特性。静态特性是指输入的被测量不随时间变化或随时间变化很缓慢时，传感器的输出量与输入量的关系。它主要有线性度、灵敏度、迟滞、分辨率与分辨力等。

(1) 线性度 传感器的线性度是指传感器输出 - 输入的实际特性曲线和拟合直线（如图1-3 所示）之间的最大偏差与输出量程范围之比，即

$$\gamma_L = \frac{|\Delta_L|_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\%$$

(1-1)

式中 γ_L ——线性度；

$|\Delta_L|_{\max}$ ——最大非线性绝对误差；

$y_{\max} - y_{\min}$ ——输出量程范围。

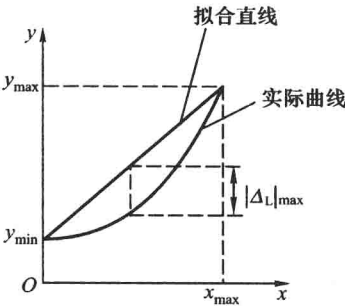


图 1-3 线性度示意图

线性度又称为非线性误差。通常总是希望输出 - 输入特性曲线为线性，但实际的输出 - 输入特性只能接近线性，实际曲线与拟合直线之间存在的偏差就是传感器的非线性绝对误差。

(2) 灵敏度 传感器的灵敏度是指传感器在稳定标准条件下，输出变化量与输入变化量的比值，即

$$K = \frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

式中 K ——灵敏度，线性传感器的灵敏度是个常数；

Δy ——输出量的变化量；

Δx ——输入量的变化量。

(3) 迟滞 传感器的迟滞是指传感器的正向特性与反向特性的不一致程度。产生迟滞现象的主要原因是传感器的机械部分不可避免地存在着间隙、摩擦及松动等。

(4) 分辨率与分辨力 分辨率和分辨力都是用来表示仪表或装置能够检测被测量的最小量值的性能指标。前者以最大量程的百分数表示，是一个量纲一（习惯上称为无量纲）的量；后者以最小量程的单位值表示，是一个有量纲的程。

(5) 动态特性 传感器要检测的输入信号是随时间而变化的，传感器的特性应能跟踪输入信号的变化，这样才可以获得准确的输出信号。如果输入信号变化太快，传感器就可能跟踪不上。这种跟踪输入信号变化的特性就是响应特性，即为动态特性。动态特性是传感器的重要特性之一。

第三节 传感器的基本误差和精度

一、传感器的基本误差

任何测量不可能绝对准确，都存在误差，只要误差在允许范围内即可认为符合标准。传感器也不例外。所谓传感器的误差，即传感器的输出值与理论输出值的差值。因此，设计与制造传感器时允许有误差，但必须在规定的误差范围之内。为了使传感器能满足一定的精度要求，需要掌握误差的种类、产生误差的原因和克服与减少误差的方法。

1. 测量误差的基本概念

由传感器的定义得知，传感器是将未知的物理量转换成人们可知的电信号，实际上传感器就是一种测量器具，所以传感器的误差也就是测量误差。下面介绍有关测量的部分名词。

(1) 真值 被测量本身所具有的真正值称之为真值。量的真值是一个理想的概念，一般是不知道的。但在某些特定情况下，真值又是可知的，例如一个整圆的圆周角为 360° 等。

(2) 约定真值 由于真值往往是未知的，所以一般用基准器的量值来代替真值，称做约定真值，它与真值之差可以忽略不计。

(3) 实际值 误差理论指出，在排除了系统误差的前提下，对于精度测量，当测量次数为无限多时，测量结果的算术平均值接近于真值，因而可将它视为被测量的真值。但是测量次数是有限的，故按有限测量次数得到的算术平均值只是统计平均值的近似值。而且由于系统误差不可能完全被排除掉，故通常只能把精度更高一级的标准器具所测得的值作为“真值”。为了强调它并非是真的“真值”，故把它称为实际值。

(4) 标称值 (示值) 由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

(5) 测量误差 用器具进行测量时, 所测量出来的数值与被测量的实际值之间的差值。

2. 误差的分类

在测量中由不同因素产生的误差是混合在一起同时出现的。为了便于分析研究误差的性质、特点和消除方法, 下面将对各种误差进行分类讨论。

(1) 按表示方法分类

① 绝对误差——指示值 A_x 与约定真值 A_0 的差值, 即 $\Delta = A_x - A_0$ 。在计量中常使用修正值 α , $\alpha = A_0 - A_x = -\Delta$ 。只要得到修正值 α 、示值 A_x , 便可得知约定真值 A_0 。

② 相对误差——针对绝对误差有时不足以反映示值偏离约定真值大小程度而设定的, 在实际测量中相对误差有下列表示形式:

a. 实际相对误差 γ_A ——用绝对误差 Δ 与约定真值 A_0 的百分比表示, 即

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

b. 标称相对误差 γ_x ——用绝对误差 Δ 与示值 A_x 的百分比表示, 即

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

c. 满度 (或引用) 相对误差 γ_m ——用绝对误差 Δ 与仪器满刻度值 A_m 的百分比表示, 即

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

式中, 当 Δ 取为满度时的 Δ_m 时, 满度 (或引用) 相对误差就被用来确定仪表的精度等级 S (如 $0.5\% < \text{满度相对误差} \leq 1\%$ 时, 则称精度等级为 1 级), 即

$$S = \frac{|\Delta|_m}{A_m} \times 100 \quad (1-6)$$

当仪表显示值下限不为零时, 精度等级 S 应用下式表达:

$$S = \frac{|\Delta|_m}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100 \quad (1-7)$$

其中 $A_{\max}$ 和 $A_{\min}$ 分别为仪表刻度盘的上限与下限。我国电工仪表等级分为七级, 即 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 级。

【例 1】 今有 0.5 级的 $0 \sim 300^\circ\text{C}$ 和 1.0 级的 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 两个温度计, 要测 80°C 的温度, 试问采用哪一个温度计好?

解: 用 0.5 级仪表测量时, 最大标称相对误差为

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta_{m1}}{A_x} \times 100\% = \frac{300 \times (\pm 0.5\%)}{80} \times 100\% = \pm 1.875\%$$

用 1.0 级仪表测量时, 最大标称相对误差为

$$\gamma_{x2} = \frac{\Delta_{m2}}{A_x} \times 100\% = \frac{100 \times (\pm 1.0\%)}{80} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

$$|\gamma_{x2}| < |\gamma_{x1}|$$

显然, 用 1.0 级仪表比用 0.5 级仪表更合适。因此, 在选用传感器时应兼顾精度等级和量程。

③ 容许误差——根据技术条件的要求, 规定某一传感器误差不应超过的最大范围。

(2) 按误差出现的规律分类

① 系统误差——指误差的数值是一个常数或按一定规律变化的值。它又可分为恒值误差和变值误差。

恒值误差是指在一定条件下，误差的数值及符号都保持不变的系统误差；变值误差是指在一定条件下，误差按某一确定规律变化的系统误差。系统误差主要由以下几个因素引起的：材料、零部件及工艺缺陷；环境温度和湿度；压力变化及其他外界干扰。

系统误差表明了一个测量结果偏离真值和实际值的程度。系统误差愈小，测量愈准确，所以常常用准确度来表征系统误差大小。系统误差是有规律的，它可以通过实验方法或引入修正值的方法予以修正。

② 随机误差——由于偶然因素的影响而引起的误差，其数值大小和正负号不定，而且难以估计。但是总体仍服从一定统计规律，它不能通过实验方法加以消除，但能运用统计处理方法减少其影响。随机误差表现了测量结果的分散性。在误差理论中常用精密度来表征随机误差的大小。随机误差愈小，精密度愈高。

③ 粗大误差——指在一定的条件下测量结果显著地偏离其实际值时所对应的误差。从性质上看，粗大误差并不是单独的类别，它本身既具有系统误差的性质，也可能具有随机误差的性质，只不过在一定测量条件下其绝对值特别大而已。粗大误差是由于测量方法不妥、各种随机因素的影响以及测量人员粗心所造成的。

(3) 按被测量随时间变化的速度分类

① 静态误差——指在测量过程中，被测量随时间变化很缓慢或基本不变时的测量误差。

② 动态误差——在被测量随时间变化时所测得的误差。例如用笔式记录仪测得的结果，由于记录笔有惯性量，输出量在时间上不能与被测量的变化一致，而造成的误差就属于动态误差。动态误差是在动态测量时产生的，动态测量的优点是检测效率高和环境影响小。

(4) 按使用条件分类

① 基本误差——指检测系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓标准条件指一般传感器在实验室、制造厂或计量部门标定刻度时所保持的工作条件，如电源电压 $220 \times (1 \pm 5\%) \text{ V}$ ，温度 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ，湿度小于 80%，电源频率 $50 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$ 等。基本误差是检测仪表在额定条件下工作所具有的误差，检测仪表的精度就是由基本误差决定的。

② 附加误差——当使用条件偏离规定标准条件时，除基本误差外还会产生附加误差，例如由于温度超过标准引起的温度附加误差、电源附加误差以及频率附加误差等。这些附加误差在使用时会叠加到基本误差上去。

二、仪表精度与测量精度

1. 仪表精度与测量精度的关系

仪表精度一般分为七个等级，实际上就是取最大满度（引用）相对误差，对于数字仪表和光学仪表等还具有更高精度的等级。一般而言，七个等级在工业仪表中是具有代表性的。而真正反映测量精度的是实际相对误差。从最大满度（引用）误差和实际相对误差的定义公式不难看出，被测量的大小愈接近量程，相对误差就愈接近于最大满度（引用）误差，因此对

于同等级精度的仪表，选择适当的量程，使被测量位于仪表量值的上限附近，将能充分利用仪表精度获得较精确的测量结果。

2. 附加误差对实际测量精度的影响

在检测仪表的技术说明书中，除了给出基本误差外，还给出了工作条件变化时可能产生的附加误差。如果实际工作条件不是仪表规定的标准状态，这时必须考虑到附加误差的影响。那么此时仪表的测量误差究竟是多少，下面举例加以说明。

【例2】 上例中 1.0 级温度仪表最大标称相对误差为 $\pm 1.25\%$ ，若电源电压变化为 $\pm 10\%$ 时产生的附加误差 $\leq \pm 0.5\%$ ，试估算实际测量误差。

解： 按最坏的情况考虑，每次误差都达到技术指标规定的极限值，即

基本误差 $\gamma_{x1} = \pm 1.25\%$

附加误差 $\gamma_{x2} = \pm 0.5\%$

若两项误差按相同的符号同时达到上述极限值，则应把上述误差相加，得

$$\gamma_x = \gamma_{x1} + \gamma_{x2} = \pm (1.25\% + 0.5\%) = \pm 1.75\%$$

计算结果和实际校验情况显然不符。这是因为各项误差不可能同时按相同的符号出现最大值，有的甚至互相抵消。实践证明，考虑附加误差的影响时按概率统计的方法将得到比较切合实际的结果，即求得各项误差的均方根值来估算测量误差：

$$\gamma_x = \pm \sqrt{\sum \gamma_{xi}^2} = \pm \sqrt{(1.25\%)^2 + (0.5\%)^2} = \pm 1.35\%$$

这样处理的结果比较符合实际情况。测量误差 $\gamma_x = \pm 1.35\%$ 也就代表了测量精度。

第四节 传感器中的弹性敏感元件

一、弹性敏感元件的基本特性

物体因外力作用而改变原来的尺寸或形状称为变形，如果在外力去掉后能完全恢复其原来的尺寸和形状，那么这种变形称为弹性变形，具有这类特性的物体称为弹性元件。在传感器中用于测量的弹性元件称为弹性敏感元件。

弹性敏感元件是许多传感器及检测仪表中的基本元件，它往往直接感受被测物理量（如力、压力等）的变化，并将其转化为弹性元件本身的应变或位移，然后由各种形式的传感元件把它转变为电量。

弹性敏感元件的输入量与输出量之间的关系，称为弹性敏感元件的基本特性。弹性敏感元件的基本特性包括刚度、灵敏度、弹性滞后和弹性后效等，其中刚度和灵敏度是表征弹性敏感元件的重要指标。

1. 刚度

刚度是使弹性敏感元件产生单位变形所需要的外部作用力（或压力），其表达式为

$$k = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{dF}{dx} \quad (1-8)$$

式中 k ——刚度；
 F ——作用于弹性元件上的外力；
 x ——弹性元件产生的变形。

图 1-4 中弹性特性曲线上某点 A 的刚度可通过 A 点作曲线的切线求得，此切线与水平线夹角 θ 的正切就代表该弹性元件在 A 点处的刚度。如果弹性特性是直线，显然它的刚度是一个常数。

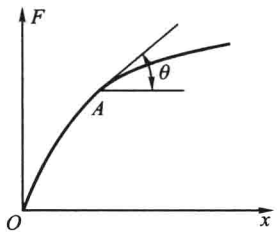


图 1-4 弹性特性曲线

2. 灵敏度

灵敏度是刚度的倒数，它表示弹性敏感元件在承受单位输入量（力、压力等）时所产生的变形大小，一般用 K 表示，即

$$K = \frac{dx}{dF} \tag{1-9}$$

在非电量检测中往往希望弹性灵敏度为常数，此时弹性敏感元件的弹性特性是线性的，即 $K = x/F = \text{常数}$ 。

对于不同的弹性敏感元件，由于其输入量的形式不同，所以灵敏度的具体含义也不同。

二、弹性敏感元件的形式及应用范围

根据弹性敏感元件在传感器中的作用，对它提出了一些要求，如具有好的弹性特性、足够的精度、长期使用和温度变化时的稳定性等。因而对制作弹性敏感元件的材料提出了多方面的要求，如弹性模量的温度系数要小，线膨胀系数小且恒定，有良好的机械加工和热处理性能等。我国通常使用合金钢、碳钢、铜合金和铝合金等材料制作弹性敏感元件。

1. 弹性敏感元件的形式

传感器中弹性敏感元件的输入量通常是力（力矩）或流体压力（统称压力），即使其他非电被测量输入给弹性敏感元件，也是先将它们变换成力或压力再输入给弹性敏感元件。弹性敏感元件输出的是应变或位移（线位移或角位移），即弹性敏感元件将力或压力变换成应变或位移。因此，弹性敏感元件形式上基本分成两大类，即力变换成应变或位移的变换力的弹性敏感元件和压力变换成应变或位移的变换压力的弹性敏感元件。

变换力的弹性敏感元件通常有等截面轴、环状弹性敏感元件、悬臂梁、扭转轴等。变换压力的弹性敏感元件通常有弹簧管、波纹管、等截面薄板、波纹膜片和膜盒、薄壁圆筒和薄壁半球等。

2. 变换力的弹性敏感元件

(1) 等截面轴 等截面轴又称柱式弹性敏感元件，可以是实心柱体或空心圆柱体，如图 1-5 所示。实心等截面轴在力的作用下弹性敏感元件的位移很小，因此常用它的应变作输出量。其主要的优点是结构简单、加工方便、测量范围宽，可承受数万牛顿的载荷，但其灵敏度低。空心圆柱体的灵敏度高，在同样的截面积下轴的直径可加大，可提高轴的抗弯能力，但其过载能力弱，

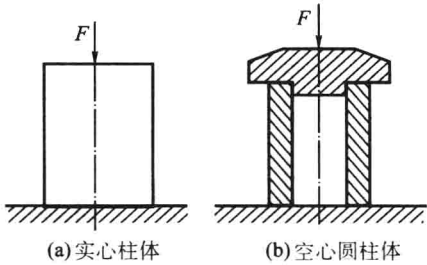


图 1-5 等截面轴弹性元件