



21世纪高职高专规划教材

传感器与检测技术



朱自勤 主编

12
2

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高职高专规划教材

传感器与检测技术

主 编 朱自勤
副主编 林锦实 齐卫红 施大发
参 编 秦 梅 李永冰 胡新华
主 审 高东梅



机械工业出版社

根据教育部有关精神,针对高职高专教育特点,由中国机械工业教育协会和机械工业出版社组织全国 80 多所院校编写的 21 世纪高职高专规划教材之一,该书系统地介绍了检测技术及现代检测系统的组成,传感器的基本原理、基本特性、信号转换电路及其在非电量检测系统中的应用。

全书共分 9 章。分别介绍了检测技术的基本概念及作用、测量误差和数据处理;传感器的基本概念、基本特性及常用敏感元件;能量控制型传感器(包括电位器式、应变片式、电容式和电感式传感器);物性型传感器(包括压电式、超声波式、磁电式、光电式和核辐射传感器);环境量检测传感器(包括温度、气敏、湿敏和离子敏传感器等);智能传感器;传感器的标定;现代测量系统;检测仪器。本书每章后附有大量练习题。

本书内容丰富,取材新颖,重点突出,重视知识的应用及实践技能的培养,可作为 2 年制和 3 年制高等职业技术教育及职大、开放性教育的教材,也可供从事检测技术、自动控制和仪器仪表等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/朱自勤主编. —北京:机械工业出版社, 2005.1

21 世纪高职高专规划教材

ISBN 7-111-15884-9

I. 传... II. 朱... III. 传感器 - 高等学校: 技术学校 - 教材
IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 137798 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: 余茂祚

责任编辑: 余茂祚 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣

封面设计: 饶 薇 责任印制: 李 妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·11.5 印张·279 千字

定价: 17.00 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、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据教育部有关精神,针对高职高专教育特点,由中国机械工业教育协会和机械工业出版社组织全国80多所院校编写的21世纪高职高专规划教材之一。在编写中,为适应现代职业教育的特点和规律,本书将传感器与检测技术有机地结合在一起,使学生能够更全面地学习和掌握信号传感、信号采集、信号转换、信号处理和信号传输的整个过程;本书还增加了传感器一章,使学生对制作传感器的全过程有一个全面的认识;本书紧密联系传感器与检测技术的最新发展,全面介绍这些领域的最新知识,以拓宽学生的思路。

全书共分9章。第1章介绍了检测技术的基本概念及作用、测量误差和数据处理;第2章介绍了传感器的基本概念、基本特性及常用敏感元件;第3章介绍了能量控制型传感器,包括电位器式、应变片式、电容式和电感式传感器;第4章介绍了物性型传感器,包括压电式、超声波式、磁电式、光电式和核辐射传感器;第5章介绍了环境量检测传感器,包括温度、气敏、湿敏和离子敏传感器等;第6章介绍的是智能型传感器;第7章为传感器的标定;第8章为现代测量系统;第9章为检测仪器。本书每章后附有大量练习题。

本书由河南工业职业技术学院朱自勤主编,副主编有辽宁机电职业技术学院林锦实、西安理工大学高等技术学院齐卫红和湖南机电职业技术学院施大发,参编的有太原理工大学长治学院秦梅、日照职业技术学院李永冰及金华职业技术学院胡新华。其中第1、2章由胡新华编写,第3章由朱自勤编写,第4章由秦梅编写,第5、6章由李永冰编写,第8章由齐卫红编写,第7、9章由林锦实编写。

本书由高东梅主审,她认真审阅了全部书稿,提出了大量宝贵意见。本书在编写过程中得到了河南工业职业技术学院韩全力、黄宗建和王宏颖的大力支持,在此一并表示感谢。

本书内容丰富,取材新颖,重点突出,重视知识的应用及实践技能的培养。本书可作为2年制和3年制高等职业技术教育及职大、开放性教育的教材,也可供从事检测技术、自动控制 and 仪器仪表等工作的工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免有缺点和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	6.1 智能传感器的概念	109
第1章 检测技术的基本概念	6.2 智能传感器实现途径	109
1.1 检测技术的基本概念及作用	6.3 智能传感器的发展前景和研 究热点	110
1.2 测量的基本概念	6.4 智能传感器应用举例	113
1.3 测量误差的分析	复习思考题	115
1.4 有效数字的处理	第7章 传感器的标定	116
复习思考题	7.1 传感器的静态特性标定	116
第2章 传感器的基本知识	7.2 传感器的动态特性标定	117
2.1 传感器的组成与分类	7.3 测振传感器的标定	119
2.2 传感器的基本特性	7.4 压力传感器的标定	119
2.3 弹性敏感元件	复习思考题	124
复习思考题	第8章 现代测量系统	125
第3章 能量控制型传感器	8.1 微机化检测系统的基本结构 及特点	125
3.1 电位器式传感器	8.2 传感器信号的预处理方法	126
3.2 应变片式电阻传感器	8.3 传感器信号的放大电路	132
3.3 电感式传感器	8.4 数据采集	134
3.4 电容式传感器	8.5 传感器信号的线性化与标度 变换	137
复习思考题	8.6 数字滤波	143
第4章 物性型传感器	8.7 微机化检测系统设计与应用 实例	148
4.1 压电式传感器	复习思考题	159
4.2 超声波传感器	第9章 检测仪器	160
4.3 磁电式传感器	9.1 模拟仪器	160
4.4 光电式传感器	9.2 数字仪器	162
4.5 核辐射传感器	9.3 智能仪器	164
复习思考题	9.4 虚拟仪器	166
第5章 环境量检测传感器	9.5 网络化检测仪器	170
5.1 温度传感器	复习思考题	174
5.2 气敏传感器	参考文献	175
5.3 湿敏传感器		
5.4 离子敏传感器		
复习思考题		
第6章 智能传感器		

第 1 章 检测技术的基本概念

1.1 检测技术的基本概念及作用

1.1.1 检测技术的基本概念

随着科学技术的发展,检测技术已广泛应用于人类科研、生产和生活等活动领域,检测技术既是服务于其他学科的工具,又是综合运用其他多门学科最新成果的尖端性技术。因此,检测技术的发展是科学技术和生产发展的重要基础,也是一个国家生产力发展程度和现代化程度的重要标志。

当我们涉足于检测领域时,常常见到检测、测量、测试和计量等术语,尽管文字和含义有所不同,但它们都包含了测量的过程。为避免混淆,有必要加以说明。

(1) 测量:以确定客观事物的量值为目的,借助于一定的工具和设备,用比较的方法取得被测量数据的过程,包括数据处理、显示或记录等步骤。

(2) 计量:以获得标准为目的的测量,包括基准器的研制、量值的传递、量值单位的定义和管理以及精密测量等,其规程具有一定的法律性和权威性。

(3) 检测:利用传感器把被测信息检取出来,并转换成测量仪表或仪器所能接收的信号,再进行测量以确定量值的过程;或转换成执行器所能接收的信号,实现对被测物理量的控制。

(4) 测试:带有试验性质的检测,在特定情况下,检测信号可由模拟被测物理量的信号发生装置产生。

传感技术与电子测量技术相结合,形成了非电量电测技术。由于微型计算机的问世并应用于检测领域,检测技术进入了智能化的时代。目前,在国外仪器仪表行业产品中,非电量电测仪表约占 92%~95%,其中智能化仪表占 80%~90%,成为仪器仪表的主要产品。国内也已转向生产智能化仪器仪表,其他工业企业部门也在进行技术改造,应用微型计算机实现生产过程的自动检测和自动控制。

1.1.2 检测技术的发展与展望

检测技术有力地促进了科学技术和生产的发展,而科学技术和生产的现代化,不仅对检测技术提出了更高的要求,也为检测技术提供了丰富的物质手段和技术条件,从而促进其不断发展。目前,检测技术的发展趋势可从以下四个方面进行综述。

1. 不断扩大测量范围 科学技术的发展要求检测量的范围不断扩大。为了满足超低温技术开发的需要,利用超导体的约瑟夫逊效应已开发出能检测 -200°C 超低温传感器,利用热电偶测温最高可达 $3\,000^{\circ}\text{C}$,辐射温度传感器原理上最高可测 10^5°C ,而可控聚核反应理想温度要求达到 10^8°C ,仍是高温检测的新课题。

2. 提高测量精度及可靠性 科学技术的发展对检测精度的要求也越来越高。仍以温度检测为例,一般实用温度计的测温精度为 $\pm(0.4\sim 4)^{\circ}\text{C}$,标准铂电阻温度计的精度可达 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。人体各部位的温度分布构成温度场,病变时其变化量很小,需要用精度为

$\pm (10^{-3} \sim 10^{-2})^{\circ}\text{C}$ 的温度计才能检测出来。在用于测量微生物的传感器中，则需要能分辨出小于 10^{-3}°C 温差的热敏元件。

随着人类探求自然奥秘的范围不断扩大，检测环境变得越来越复杂，对检测可靠性的要求也越来越高。例如，科学探测卫星里装有探测太空的各种参量的检测装置，不仅要求体积小、省电，而且要求具有极高的可靠性和工作寿命，需在极低温和强辐射下保持正常工作。

3. 开发检测的新领域与新技术 随着人类活动领域的扩大，检测对象也在扩大。目前，检测技术向宏观世界和微观世界发展。

开发无接触式检测技术取代接触式检测有着重要的意义。现已开发的无接触式检测技术有光、磁、超声波、同位素和微波等，但目前无接触式传感器尚存在检测精度不高和品类不多等问题，人们正在研究利用新的原理和方法开发新型的无接触式传感器。

在大规模集成电路技术和微型计算机技术的支持下，传感器的发展出现了“多样、新型、集成、智能”的趋势。

(1) 新型：其含意有三个方面。

1) 采用新型敏感材料、新原理、新效应或新工艺。

2) 利用原有的物理和化学效应，根据被测物理量的要求，巧妙地运用于传感技术。如谐振传感器近年来已广泛用于温度、湿度、气体和力等参数的测量。

3) 利用集成技术和计算机技术开发的新型传感器。

(2) 集成化：其含义也有三个方面。

1) 将众多单体敏感元件集成在同一衬底上构成二维图像的敏感元件，主要用于光和图像传感器领域。例如作为工业视觉，电荷耦合器件 (CCED) 和 MOS 摄像元件就是典型的例子。

2) 把传感器与放大、运算及温度补偿等环节集成在一个基片上，如集成压力传感器就是将硅膜片、压阻电桥、放大器和温度补偿电阻集成为一个器件，称为“热敏晶闸管器件”。

3) 将两种或两种以上敏感元件集成在一起，称为多功能传感器。如用 $\text{MgCr}_2\text{O}_4 - \text{TiO}_2$ 陶瓷做成的湿-气敏元器件。

(3) 智能化：由检测系统固体化和智能化的构成及发展过程可知，固体化和智能化的结果，逐渐模糊了检测系统和传感器的界限，智能化传感器本身就是智能化检测系统，从而开创了“材料、器件、电路、仪表”一体化的新途径。

仿生学的研究、微电子技术的发展及微处理器的应用为检测技术固体化和智能化发展开辟了广阔道路，但是真正的智能，今天还称不上，关键仍在于开发传感技术。例如，相当于人的视觉、听觉、触觉和嗅觉的敏感元件已达到一定水平，而相当于味觉的敏感元件至今尚属空白。随着科学技术的发展，检测技术必将攀登一个个新的高峰。

1.1.3 课程的任务、特点和学习方法

1. 课程的任务 本课程的主要任务是传授工业生产过程中信息检测技术及常用技术。对本课程的学习，提出以下几点要求：

1) 熟悉传感器的原理、结构、特性和应用，能根据需要合理选用传感器。

2) 掌握检测中信号的特点，熟悉传感器接口电路和信号处理电路技术，了解新型仪表电路技术，从而明确如何获得可测量的信号，并生成控制信号。

3) 了解常用显示和记录技术，建立一般的检测系统，掌握误差分析和数据处理技术，

从而明确如何获取正确的测量结果。

4) 了解电动仪表概况, 掌握其使用技术, 以适应工业生产现状, 并作为引入微型计算机应用的依据。

5) 能综合运用微型计算机和检测等方面的技术, 组成微机化检测系统, 为企业技术改造、安装及使用新设备及提高工业生产过程自动化程度奠定基础。

2. 课程的特点和学习方法

1) 本课程是一门知识和技术都很密集的新型学科, 直接与本课程有关的基础课程有数学、物理学、工程力学、电工学、自动控制理论、数字技术和微机原理等。因此, 在学习时, 必须对相关课程有一定的了解。

2) 本课程各章内容相互独立, 自成体系, 联系松散, 学习时可能会感到找不到重点, 摸不着规律。在学习时应以检测对象为基点, 以传感器及其接口与处理电路为基础, 以检测系统为目标, 沿着检测对象、传感器、测量电路和测量指示的路线, 把各部分内容联系起来。

3) 本课程是一门实践性很强的应用技术, 学习时务必联系实际, 着眼于应用, 要富于设想, 善于借鉴, 乐于实践, 勇于开拓, 学而用之。

1.2 测量的基本概念

1.2.1 测量的定义

测量就是借助于专用的技术工具或手段, 通过实验的方法, 把被测量与同性质的标准量进行比较, 求取二者比值, 从而得到被测量数值大小的过程。其数学表达式为

$$x = A_e A_x \quad (1-1)$$

式中 x ——被测量;

A_e ——测量的单位;

A_x ——被测量的数值。

式(1-1)称为测量的基本方程式。它说明被测量的大小与所选用的测量单位有关, 单位越小, 数值越大。因此, 一个完整的测量结果应包含测量值和所选测量单位两部分内容。

测量的目的是为了准确获取表征被测对象特征的某些参数的定量信息, 然而测量过程中难免存在各种误差, 因此测量结果不仅要能确定被测量的大小, 或其与另一变量的关系, 而且要说明误差的大小, 给出可信度。这就要对测量结果进行数据处理与误差分析, 只有如此, 才能掌握被测对象的特性和规律, 以控制某一过程, 或对某事作出决策。

由式(1-1)可知, 测量过程有三个要素: 测量单位、测量方法和测量仪器与设备。综上所述, 测量技术的含义可包括下述全过程: 按照被测对象的特点, 选择合适的测量仪器与测量方法; 通过测量、数据处理和误差分析, 准确得到被测量的数值; 为提高测量精度而改造测量方法及测量仪器, 从而为生产过程的自动化等提供可靠的依据。

1.2.2 测量方法的分类

测量方法是指被测量与其单位进行比较的实验方法。按不同的分类方法进行分类, 可得到不同的分类结果。

1. 按测量过程的特点分类 可分为直接测量和间接测量。

(1) 直接测量: 直接测量是针对被测量选用专用仪表进行测量, 直接获取被测量值的过

程，如用温度表测温度和用电位差计测电动势等。按所用仪表和比较过程的特点分类，直接测量法可分为偏差法、零位法和微差法。

1) 偏差法。用事先分度(标定)好的测量仪表进行测量，根据被测量引起显示器的偏移值直接读取被测量的值。它是工程上应用最广泛的测量方法。

2) 零位法。将被测量 x 与某一已知标准量 s 完全抵消，使作用到检测仪表上的效应等于零，如天平和电位差计等。测量精度主要取决于标准量的精度，与测量仪表精度无关，因而测量精度较高，在计量工作中应用很广。

3) 微差法。将零位法和偏差法结合起来，把被测量的大部分抵消，选用灵敏度较高的仪表测量剩余部分的数值，被测量便等于标准量和仪表偏差值之和。如天平上的游标和电位差计上的毫伏表等。与偏差法相比，微差法可得到较高的精度；与零位法相比，微差法可省去微进程的标准量。

(2) 间接测量：用直接测量法测得与被测量有确切函数关系的一些物理量，然后通过计算求得被测量值的过程称为间接测量。如由测量电压 U 和电流 I 而求功率 $P=UI$ 的过程。

2. 按测量仪表是否与被测物体相接触分类 可分为接触测量法和非接触测量法。

(1) 接触测量法：检测仪表的传感器与被测对象直接接触，承受被测参数的作用，感受其变化，从而获得信号，并测量其信号大小的方法，称接触测量法。例如用体温计测体温等。

(2) 非接触测量法：检测仪表的传感器不与被测对象直接接触，而是间接承受被测参数的作用，感受其变化，从而获得信号，以达到测量目的的方法，称非接触测量法。例如，用辐射式温度计测温度和用光电转速表测转速等。非接触测量法不干扰被测对象，既可对局部点检测，又可对整体扫描，特别对于运动对象、腐蚀性介质及危险场合的参数检测，它更方便、安全和准确。

3. 按测量对象的特点分类 可分为静态测量法和动态测量法。

(1) 静态测量法：静态测量方法是指被测对象处于稳定情况下的测量。此时被测参数不随时间而变化，故又称稳态测量。

(2) 动态测量法：动态测量是指在被测对象处于不稳定的情况下进行的测量。此时被测参数随时间而变化。因此，这种测量必须是在瞬时完成，才能得到动态参数的测量结果。

此外，从被测参数分布来看，还有点参数测量法和场参数测量法。前者是指对被测对象某个局部点的参数进行测量；后者是指测量被测对象某个参数的平面分布或空间分布。由于动态测量和场参数测量属于专门研究课题，本书仅考虑稳态的点参数的检测。

1.3 测量误差的分析

测量的目的是希望得到被测事物的真实量值——真值。但是，在实际测量中无论如何也不能绝对精确地测得被测量真值，总会出现误差。因此，测量的目的仅在于根据实际的需要求得被测量真值的逼近值。测量值与真值的差异程度称为误差，实际计算中用约定真值代替真值，用精度高一级的仪表测得的测量值可视为低一级仪表的约定真值。掌握测量误差的概念和明确产生误差的原因及消除方法是实现测量目的的重要步骤。

1.3.1 误差的分类

1. 按误差的表示方法分类 可分为绝对误差和相对误差。

(1) 绝对误差：某被测量的仪表示值 A_x 与其约定真值 A_0 的差值，称为绝对误差 Δ ，即

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

当 $A_x > A_0$ 时，测量有正误差；反之有负误差。在计量工作和实验室测量中，常用修正值 C 表示真值 A_0 与示值 A_x 之差，它等于绝对误差的相反数，即

$$C = A_0 - A_x = -\Delta \quad (1-3)$$

一般，绝对误差和修正值的量纲必须与仪表示值量纲相同。绝对误差可表示测量值偏离实际值的程度，但不能表示测量的准确程度。

(2) 相对误差：即百分比误差，分为实际相对误差、示值（标称）相对误差和满度（引用）相对误差。

1) 实际相对误差等于绝对误差与约定真值的百分比，用 γ_A 表示，即

$$\gamma_A = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad \text{实际} \quad (1-4)$$

2) 示值相对误差等于绝对误差与示值的百分比，用 γ_x 表示，即

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad \text{示值} \quad (1-5)$$

3) 满度相对误差等于绝对误差与仪表满量程值 A_{FS} 的百分比，用 γ_n 表示，即

$$\gamma_n = \frac{\Delta}{A_{FS}} \times 100\% \quad \text{满度} \quad (1-6)$$

A_{FS} 为仪表刻度上限值 A_{max} 和下限值 A_{min} 之差，当 Δ 为最大值 Δ_{max} 时，称为最大满度误差，常用来定义仪表的准确度 S ，即

$$S = \frac{|\Delta_{max}|}{A_{FS}} \times 100 \quad (1-7)$$

压力传感器的准确度等级分别为 0.05、0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5 和 2.0 等。

2. 按误差的性质分类 可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差：在相同测量条件下多次测量同一物理量，其误差大小和符号保持恒定或按某一确定规律变化，此类误差称作系统误差。系统误差表征测量的准确度。

(2) 随机误差：在相同测量条件下多次测量同一物理量，其误差没有固定的大小和符号，呈无规律的随机性，此类误差称为随机误差。通常用精密度表征随机误差的大小。准确度和精密度统称为精确度，简称精度。

(3) 粗大误差：明显偏离约定真值的误差称为粗大误差。它主要是由于测量人员粗心大意所致，如测错、读错或记错等。含有粗大误差的数值称为坏值，应予以剔除。

3. 按被测量与时间关系分类 可分为静态误差和动态误差。

(1) 静态误差：被测量不随时间变化时测得的测量误差称为静态误差。

(2) 动态误差：被测量在随时间变化过程中所测得的测量误差称为动态误差。动态误差值由动态测量和静态测量所得误差的差值求得。

1.3.2 随机误差的处理

1. 随机误差的特性 实践中常见的随机误差分布是正态分布，如图 1-1 所示，它有以下几个特性：

(1) 对称性：绝对值出现正误差和负误差的概率相等。

(2) 单峰性：只有一个峰值，峰值就是概率密度函数 $P(\delta)$ 的极大值。峰值在随机误差 $\delta = 0$ 的纵轴上。该特性说明绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小。

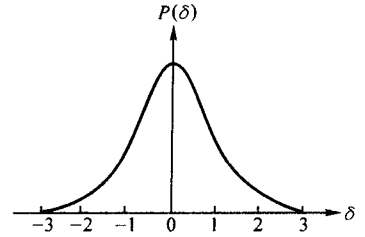


图 1-1 正态分布曲线

(3) 互抵性：对一系列等精度的 n 次测量，当 $n \rightarrow +\infty$ 时，各次测量的随机误差 δ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的代数和趋于零。这是曲线对称、正负误差可以抵消的必然结果。

(4) 有界性：绝对值很大的误差出现的概率趋近于零，即误差的绝对值实际上不会超过某个限值。根据正态分布的概率积分可得，当一组测得的标准误差取随机误差 δ 的 C (置信系数) 倍时，其置信概率 P 的对应值见表 1-1。

表 1-1 置信系数与置信概率的对应关系

C	1	1.96	2	2.58	3
P	0.6287	0.95	0.9545	0.99	0.9973

可见，对一组既无系统误差又无粗大误差的等精度测量，当置信区间取 $\pm 2\delta$ 或 $\pm 3\delta$ 时，误差值落在该区间之外的可能仅有 0.5% 或 0.3%。因此，常把 2δ 或 3δ 值称为极限误差，又称随机不确定度，记为 $\Delta = 2\delta$ 或 $\Delta = 3\delta$ ，它随置信概率的不同而不同。

2. 随机误差的计算方法 国内外广泛采用标准误差 (方均根误差) σ 来评定测量随机误差的大小。其计算方法有以下几种：

(1) 标准法——贝塞尔公式：设 n 次等精度测量的测得值为 x_1, x_2, \dots, x_n 。

1) 测得值的算术平均值 \bar{x} 为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-8)$$

式中 \bar{x} ——算术平均值；

n ——测量次数；

x_i ——第 i 次等精度测量值。

2) 各测得值 x_i 的剩余误差 (残差) v_i 为

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-9)$$

式中 v_i ——剩余误差；

x_i ——第 i 次测量值；

\bar{x} ——算术平均值。

3) 标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} \quad (1-10)$$

式中 σ ——标准误差；

v_i ——剩余误差；

n ——测量次数。

(2) 绝对差法——佩特斯公式

$$\sigma = 1.2533 \frac{\sum |v_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \approx \frac{5}{4} \frac{\sum |v_i|}{\sqrt{n(n-1)}} \quad (1-11)$$

式中 σ ——标准误差；

v_i ——剩余误差；

n ——测量次数。

(3) 极差法：所谓极差，就是在 x_1, x_2, \dots, x_n 中的最大值与最小值之差，用 R_n 表

示，即

$$R_n = x_{\max} - x_{\min} \quad (1-12)$$

式中 R_n ——极差；

x_{\max} ——测量的最大值；

x_{\min} ——测量的最小值。

根据测量次数 n 查阅极差系数表 1-2，得极差系数 d_n ，则标准误差 σ 为

$$\sigma = \frac{R_n}{d_n} \quad (1-13)$$

式中 σ ——标准误差；

R_n ——极差；

d_n ——极差系数。

表 1-2 n 为 10 以内的极差系数表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_n	—	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97	3.08

应用贝塞尔公式精度高，但计算麻烦；佩特斯公式计算速度快，但精度低；极差法计算方便、迅速，当测量次数不太多 ($n < 10$) 时，其计算精度与贝塞尔公式所计算的精度相当。

1.3.3 系统误差的处理

1. 系统误差的分类及产生原因 产生系统误差的原因主要有：检测所用传感器和仪表本身性能有限；检测系统安装、布置及调整不当；测量者视觉原因；测量环境条件（如温度和压力等）变化；测量方法不完善；测量依据的理论不完善等。系统误差（简称系差）按性质分类，可分为已定系差和未定系差两大类。

(1) 已定系差：指在测量过程中误差大小和符号都不变的系差。

(2) 未定系差：在测量过程中大小和符号变化不定，或按一定规律变化的系差。未定系差按其变化规律不同，又可分为如下几类：

1) 线性变化（或累进变化）系差。在测量过程中随着时间或测量次数的增加，按一定比例不断增大或不断减小的误差。

2) 周期性变化的系差。系差的数值和符号按周期性规律变化。

3) 复杂规律变化的系差。系差的数值和符号不是简单地按线性或周期性变化，而是按较复杂的规律变化。

2. 系统误差的发现

(1) 恒定系差的检验：恒定系差不影响剩余误差的计算，即不影响测量结果的精密度，

在处理随机误差时不可能发现。因此，一般采用对改变测量条件的多次测量结果进行比较的方法来确定其存在与否。

(2) 未定系差的发现

1) 剩余误差观察法。观察一系列等精度测量剩余误差的数值和符号，若数值有规律地递增或递减，并在开始和末尾的符号相反，则判定有线性系差；若符号有规律地正负交替变化多次，则判定有周期性系差。

2) 马利科夫判据用于检查线性系差。按一系列等精度测量剩余误差，对其前后两半部分求和，若两和的差 M 近似为零，则不含线性误差；若 M 大，则存在线性误差。

3. 消除或减弱系统误差的测量方法

(1) 已定系差的消除方法

1) 替代法。在测量未知量后，记下读数，再测可调的已知量，使仪表指示与上次相同，此时未知量就等于已知量。

2) 相消法及交校法。适当安排测量方法，对同一量做两次测量，使恒定系差在两次测量中方向相反，取两次读数的算术平均值。

(2) 未定系差的消除方法

1) 用对称观测法（又称等距观测法）消除线性系差。

2) 采用补偿法消除因某个条件变化或仪器的某个环节的非线性引起的系差。

3) 对周期性变化的系差，只要读取相隔半周期的两次测量值，取其算术平均值便可消除。

1.4 有效数字的处理

1. 有效数字与测量误差 因为在测量中不可避免地存在误差，所以测量数据只能是一个近似数。当我们用这个数表示一个量时，通常规定误差不得超过末位单位数字的一半。这种误差不大于末位单位数字一半的数，从它左边第一个非零数字起，直到右边最后一个数字止，都叫做有效数字。例如 0.1080 V 表示有 4 位有效数字，其测量误差不超过 $\pm 0.00005\text{ V}$ ，实际电压可能是 $0.10795\sim 0.10805\text{ V}$ 之间任一值。若知道一个量的误差大小，则可确定该量的有效数字。例如频率 $f = 10000\text{ Hz}$ ，已知相对误差 $\gamma = \pm 0.5\%$ ，可求出测量误差 $\Delta f = \pm 50\text{ Hz}$ ，则该频率数据应写成 $1.00 \times 10^4\text{ Hz}$ 或 10.0 kHz ，而不能写成 10 kHz 或 10000 Hz 。

2. 数字的舍入规则 当需要 n 位有效数字时，对超过 n 位的数字要根据舍入规则进行处理，目前广泛采用舍入规则。若保留 n 位有效数字，则后面的数字舍入规则为：

1) 小于第 n 位单位数字的 0.5 就舍掉。

2) 大于第 n 位单位数字的 0.5，则第 n 位加 1。

3) 恰为第 n 位单位数字的 0.5，则第 n 位为偶数或零时就舍去，为奇数时则进 1。

上述舍入规则可概括为：小于 5 舍，大于 5 入，等于 5 取偶数。

3. 参加中间运算的有效数字的处理

1) 加法运算。运算结果的有效数字位数应与参与运算的各数中小数点后的有效位数相同。

2) 乘除运算。运算结果的有效数字位数应与参与运算的各数中有效位数最小的相同。

3) 乘方及开方运算。运算结果的有效数字位数比原数据多保留一位。

4) 对数运算。取对数前后有效数字位数应相同。

在运算前可将各数先行删节，原则上可按结果有效位数多保留 1~2 位安全数字。

复习思考题

1. 填空：

(1) 测量就是 ()。测量过程可用数学表达形式描述为 ()。对测量结果的要求 ()。测量过程的三个要素是 ()。测量技术的含义可以明确为下面的全过程：()。

(2) 产生测量误差的原因有 ()。用精度高一级仪表测得的值可视为 ()。三种误差的分类方法及其划分误差的类型分别是 ()。仪表的精确度等级通常是由 () 来确定的。我国电工仪表精度分为七级，即 () 级。

(3) 常见随机误差分布是 ()，随机不确定度记为 ()。系统误差的类型有 ()，可通过 () 方法发现，用 () 方法消除或减弱。

2. 计算题：

(1) 欲测 150V 电压，若要求示值误差不大于 $\pm 0.5\%$ ，应选用下列哪种仪表合适？

① 0.5 级 250V 量程 ② 0.2 级 300V 量程 ③ 0.2 级 500V 量程

(2) 某 250V 量程电压表，测约定真值为 220V 电压，示值为 210V，试确定其精度等级。

(3) 有 3 台测温仪表，量程均为 600℃，精度等级分别为 2.5 级、2 级和 1.5 级，现要测量温度为 500℃ 的物体，允许相对误差不超过 2.5%，问选用哪一台最合适（从精度和经济性综合考虑）？

3. 问答题：

(1) 检测及测试的概念分别是什么？

(2) 在学习本课程时应沿着什么路线把各部分联系起来？

第 2 章 传感器的基本知识

2.1 传感器的组成与分类

2.1.1 传感器的定义

广义地说，传感器是一种能把物理量或化学量转变成便于利用的电信号的器件。国际电工委员会（International Electrotechnical Committee）的定义为：“传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的信号。”Gopel 等的说法是：“传感器是包括承载体和电路连接的敏感元件”，而“传感器系统则是组合有某种信息处理能力的传感器”。总之，传感器是能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件或装置。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。

传感器输出信号有很多形式，如电压、电流、频率和脉冲等，输出信号的形式由传感器的原理确定。

2.1.2 传感器的组成

通常，传感器由敏感元件、转换元件及测量电路组成。其中，敏感元件是指传感器中直接感受被测量的部分；转换元件是指传感器能将敏感元件的输出转换为适于传输和测量的电信号部分；测量电路是将传感器输出的电参量转换成电能量。应该说明，并不是所有的传感器都能明显区分敏感元件与转换元件两个部分，而是二者合为一体。例如，半导体、气体和湿度传感器等都是将其感受的被测量直接转换为电信号，没有中间转换环节。但是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变换为容易传输、处理、记录和显示的形式。随着半导体器件与集成技术在传感器中的应用，传感器的信号调节与转换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。因此，信号调节与转换电路及其所需电源都应作为传感器的组成部分，如图 2-1 所示。

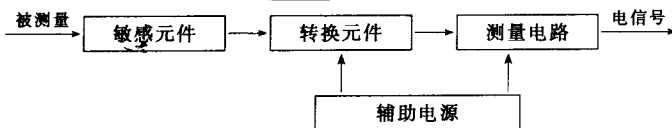


图 2-1 传感器的组成

常见的信号调节与转换电路有放大器、电桥、振荡器和电荷放大器等，它们分别与相应的传感器相配合。

2.1.3 传感器的分类

传感器的种类繁多，不胜枚举。传感器分类方法很多，常见的分类方法见表 2-1。

2.1.4 传感器的作用与地位

人类社会已进入信息时代，人们的社会活动主要依靠对信息资源的开发及获取、传输与处理。传感器处于研究对象与检测系统的接口位置，即检测与控制系统之首。因此，传感器

便成为感知、获取与检测信息的窗口，一切科学研究与自动化生产过程要获取的信息，都要通过传感器获取并通过它转换为容易传输与处理的电信号，所以传感器的作用与地位就特别重要了。若将计算机比喻为人的大脑，那么传感器则可以比喻为人的感觉器官。就可以设想，没有功能正常而完美的感觉器官，就不能迅速而准确地采集与转换欲获得的外界信息，纵有再好的大脑也无法发挥其应有的作用。科学技术越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖性就越大。所以，20世纪80年代以来，世界各国都将传感器技术列为重点发展的高新技术，备受重视。

表 2-1 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说 明
按输入量分类	位移传感器、速度传感器、温度传感器、压力传感器等	传感器以被测物理量命名
按工作原理分类	应变片式、电容式、电感式、压电式、热电式等	传感器以工作原理命名
按物理现象分类	结构型	传感器依赖其结构参数变化实现信息转换
	物性型	传感器依赖其敏感元件物理特性的变化实现信息转换
	复合型	兼有结构型和物性型两者的性质
按能量关系分类	能量转换型（有源型）	传感器直接将测量的能量转换为输出量的能量
	能量控制型（无源型）	由外部供给传感器能量，而由被测量来控制输出的能量
按输出信号分类	模拟式传感器 数字式传感器 开关量传感器	输出为模拟量 输出为数字量 输出为开关量

2.2 传感器的基本特性

传感器的特性是指传感器所特有性质的总称。而传感器的输入/输出（I/O）特性是其基本特性，一般把传感器作为二端网络研究时，I/O特性是二端网络的外部特性，即输入量和输出量的对应关系。由于输入作用量的状态（静态和动态）不同，同一个传感器所表现的I/O特性也不一样，因此有静态特性和动态特性之分。由于不同传感器的内部参数各不相同，它们的静态特性和动态特性也表现出不同的特点，对测量结果的影响也各不相同。因此，从分析传感器的外特性入手，分析它们的工作原理，I/O特性与内部参数的关系，误差产生的原因、规律和量程关系等是一项重要内容。本章主要从静态角度研究传感器的I/O特性。

静态特性是指当输入量为常量或变化极慢时传感器的I/O特性。衡量传感器静态特性的主要指标有线性度、迟滞、重复性、分辨率、稳定性、温度稳定性和各种抗干扰稳定性等。

1. 线性度 传感器的I/O关系或多或少地都存在非线性问题，在不考虑迟滞和蠕变等

因素的情况下，其静态特性可用下列多项式代数方程来表示，即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2-1)$$

式中

y ——输出量；

x ——输入量；

a_0 ——零点输出；

a_1 ——理论灵敏度；

a_2, a_3, \dots, a_n ——非线性项系数。

式(2-1)中的各项系数决定特性曲线的具体形式。

静态特性曲线可由实际测试获得，在获得特性曲线之后，可以说问题已经解决。但是为了标定和数据处理方便，希望得到线性关系。

在采用直线拟合线性化时，将 I/O 校正曲线与其拟合直线之间的最大偏差称为线性度，通常用相对误差 γ_L 表示，即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad \text{相对误差. 线性度 (2-2)}$$

式中 ΔL_{\max} ——非线性最大偏差；

y_{FS} ——满量程输出。

由此可见，线性度的大小是以一定的拟合直线为基准而得出来的。拟合直线不同，非线性误差也不同，所以选择拟合直线的主要出发点应是获得最小的非线性误差。另外，还应考虑使用和计算方便等。

目前常用的拟合方法有理论拟合、过零旋转拟合、端点拟合、端点平移拟合和最小二乘法拟合等。前4种方法如图2-2所示。图中实线为实际输出的校正曲线，虚线为拟合直线。

在图2-2a中，拟合直线为传感器的理论特性，与实际测试值无关。这种方法十分简便，但非线性最大偏差 ΔL_{\max} 很大；图2-2b为过零旋转拟合，常用于校正曲线过零的传感器。拟合时，使 $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_{\max}$ 。这种方法也比较简单，非线性误差比前一种小很多；图2-2c中，把校正曲线两端点的连线作为拟合直线。这种方法比较简便，但 ΔL_{\max} 较大；图2-2d是在图2-2c的基础上使直线平移，移动距离为图2-2c的 ΔL_{\max} 的一半。这条校正曲线分布于拟合直线的两侧， $\Delta L_1 = \Delta L_2 = \Delta L_3 = \Delta L_{\max}$ 。与图2-2c相比，

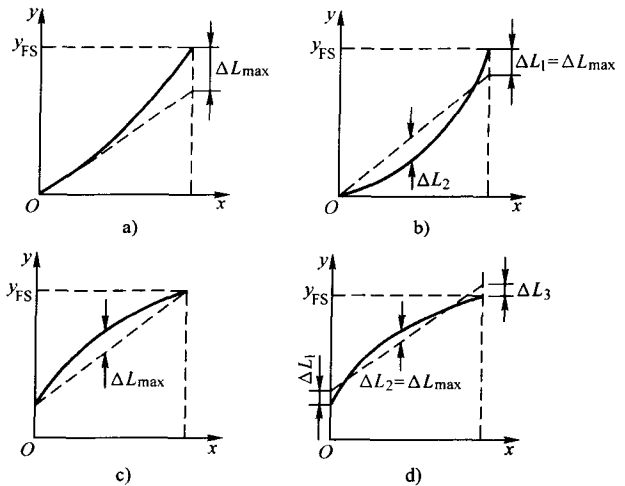


图2-2 各种直线拟合方法

图2-2d的非线性误差减小一半，提高了精度。

2. 迟滞 传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中输出与输入曲线不重合时称为迟滞。迟滞特性如图2-3所示。迟滞大小一般由实验方法测得，迟滞误差 γ_H 一般以