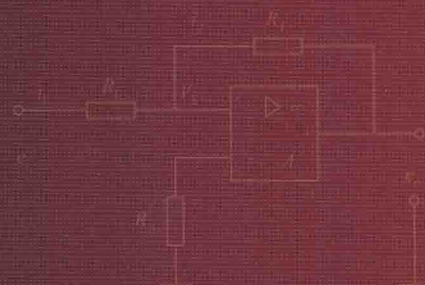
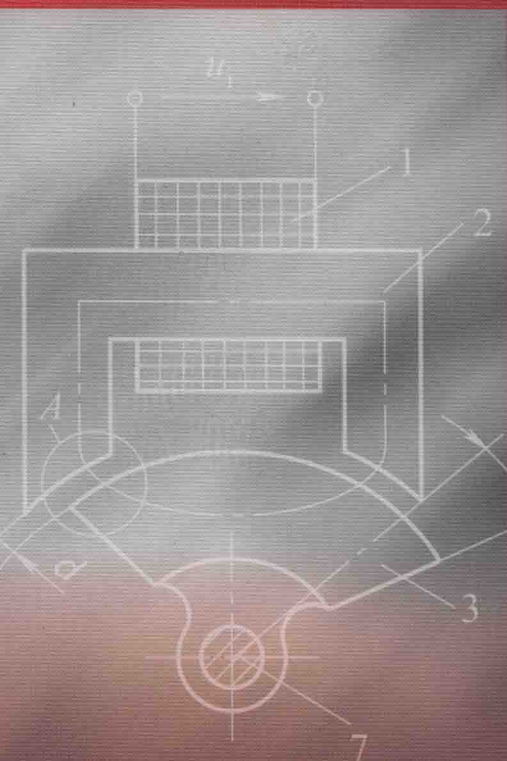


高职高专机电一体化专业 规划教材

传感器与测试技术

郭雷 主编 刘艳军 副主编



化学工业出版社

高职高专机电一体化专业规划教材

传感器与测试技术

郭 雷 主 编

刘艳军 副主编

马宏革 主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书系统地介绍了各类传感器的基本原理与应用方面的知识,以及典型工程参数测试方面的知识。主要内容包括传感器与测试技术概述、传感器基础理论、各种常用传感器的原理与应用、计算机在感测系统中的应用、典型工程参数测试、系统抗干扰技术等。

本书通俗易懂、图文并茂、内容丰富、技术实用,符合高职高专学生的特点。

本书可作为高职高专院校、成人高校、广播电视大学的机电类相关专业“传感器与测试技术”及相近课程的教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器与测试技术/郭雷主编. —北京:化学工业出版社, 2010.9

高职高专机电一体化专业规划教材

ISBN 978-7-122-09252-6

I. 传… II. 郭… III. 传感器-测试技术-高等学校: 技术学院-教材 IV. TP212.06

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第146160号

责任编辑:王金生 丁友成

文字编辑:徐卿华

责任校对:徐贞珍

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张9 字数218千字 2010年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:19.00元

版权所有 违者必究

前 言

传感器技术是信息产业的三大支柱之一，传感器在机械电子工程、控制、测试、计量等领域，都是必不可少的获取信息的关键部件。测试技术是信息技术的重要组成部分，在科学实验、工业过程控制等许多活动中都要以测试为基础。测试工作不仅为这些活动提供可靠的技术保证，也成为提高科学研究水平、提高产品质量和经济效益的必不可少的技术手段。因此，传感器技术与测试技术二者是相辅相成共同发展的。我国高等院校的许多专业都开设和传感器与测试技术相关的课程，其目的就是为了适应社会信息化的发展，使大学生将来能够更好地为社会服务。

针对高职教育的特点，我们在教材的编写过程中特别重视理论与实际应用相结合。为此，本书作了以下方面的考虑。

① 注重理论知识，基础理论知识尽量做到全而不深，通俗易懂。目前一些高职院校为加强对学生职业能力的培养，过分强调操作能力，忽略了基础理论知识的讲授，以致学生在实际工作中后劲不足，上升空间有限，结果导致高职学生所学知识缺乏含金量，最终成为简单的“操作工”。

② 突出实践性，每一种类型的传感器，在工作原理之后都有相应的应用案例；并且专门给出了几种典型工程参数的测试过程。

本书由承德石油高等专科学校郭雷主编并负责统稿，承德石油高等专科学校刘艳军任副主编。本书第1、8章由承德石油高等专科学校吴凤泉编写，第2章由承德石油高等专科学校付德永编写，第3、4章由刘艳军编写，第5、7章由郭雷编写，第6章由渤海船舶职业学院官桂香编写，全书由包头轻工职业技术学院马宏革主审。

在本书的编写过程中，参考了相关著作和论文，在此特向相关作者表示衷心的感谢！

由于传感器技术、测试技术知识面广，而编者水平有限，书中不足之处在所难免，望读者不吝赐教。

编者
2010年5月

目 录

第 1 章 传感器与测试技术概述	1
1.1 传感器与测试技术的地位和作用	1
1.2 测试技术的概念	2
1.3 测试系统的组成	2
1.4 传感器与测试技术的发展方向	3
第 2 章 传感器基础理论	6
2.1 非电量与非电量电测	6
2.2 传感器的定义及分类	6
2.3 传感器命名方法及代号	8
2.3.1 传感器命名方法	8
2.3.2 传感器代号	9
2.3.3 传感器代号标记示例	9
2.4 传感器的静态特性	9
2.4.1 测量范围和量程	10
2.4.2 分辨力和阈值	10
2.4.3 静态灵敏度	11
2.4.4 线性度、迟滞	11
2.4.5 零漂和温漂	12
2.5 传感器的选用原则	13
思考题与习题	15
第 3 章 常用传感器及其典型应用	16
3.1 电容式传感器	16
3.1.1 电容式传感器的工作原理和结构	16
3.1.2 变极距型电容式传感器	16
3.1.3 变面积型电容式传感器	19
3.1.4 变介质型电容式传感器	19
3.1.5 电容式传感器的应用	21
3.2 电感式传感器	22
3.2.1 电感式传感器的工作原理	23
3.2.2 电感式传感器的应用	27
3.3 电涡流式传感器	29
3.3.1 电涡流式传感器的工作原理	29
3.3.2 电涡流式传感器的应用	30
3.4 电位器式传感器	32
3.4.1 电位器式传感器的工作原理	32
3.4.2 电位器式传感器的应用	34
3.5 压电式传感器	35
3.5.1 压电效应和压电材料	35
3.5.2 压电式传感器等效电路和灵敏度	38
3.5.3 压电式传感器的应用	39
3.6 热电偶传感器	44
3.6.1 热电效应	45
3.6.2 热电偶基本知识	45
3.6.3 热电偶的简易测试	47
思考题与习题	49
第 4 章 测试基础知识	50
4.1 信号及其描述	50
4.1.1 信息、信号、干扰	50
4.1.2 信号的分类	50
4.1.3 信号的描述	52
4.2 测试装置的基本特性	57
4.2.1 线性系统及线性时不变系统的主要性质	57
4.2.2 测试装置的动态特性	58
4.3 实现不失真测试的条件	65
4.3.1 不失真的涵义	65
4.3.2 实现不失真测试的条件	65
思考题与习题	66
第 5 章 信号调理电路	68
5.1 测量电桥	68
5.1.1 直流电桥	68
5.1.2 交流电桥	70
5.1.3 带感应耦合臂的电桥	71
5.2 信号放大电路	72
5.2.1 通用集成运算放大电路	72
5.2.2 测量放大器	76
5.3 调制与解调电路	80
5.3.1 调幅及其解调电路	80
5.3.2 调频及其解调电路	85
5.4 滤波器	87
5.4.1 滤波器的基本知识	87
5.4.2 无源 RC 滤波器	89
5.4.3 有源 RC 滤波器	91
思考题与习题	94

第 6 章 计算机在感测系统中的应用	97	7.3.1 压力的测量	121
6.1 感测系统的组成	97	7.3.2 流量的测量	124
6.1.1 一般感测系统的组成	97	思考题与习题	126
6.1.2 计算机控制的感测系统	98	第 8 章 测试系统的抗干扰技术	127
6.2 传感器与计算机的接口	100	8.1 干扰的类型及来源	127
6.2.1 开关量输入接口	100	8.1.1 外部干扰和内部干扰	127
6.2.2 数字量输入接口	101	8.1.2 差模干扰和共模干扰	127
6.2.3 模拟量输入接口	103	8.2 干扰的耦合方式	128
思考题与习题	104	8.2.1 静电耦合	129
第 7 章 典型工程参数的测试	105	8.2.2 磁场耦合	129
7.1 机械振动的测试	105	8.2.3 漏电流耦合	129
7.1.1 概述	105	8.2.4 共阻抗耦合	130
7.1.2 常用测振传感器	107	8.3 干扰抑制技术	130
7.1.3 其他测振设备	112	8.3.1 屏蔽技术	130
7.1.4 振动测试实例	114	8.3.2 接地技术	132
7.2 位移的测试	115	8.3.3 浮置(浮空、浮接)技术	133
7.2.1 概述	115	8.3.4 灭弧技术	134
7.2.2 常用位移传感器	116	8.3.5 其他干扰抑制技术	134
7.2.3 位移测试实例	118	思考题与习题	135
7.3 流体参量的测试	121	参考文献	136

第 1 章 传感器与测试技术概述

学习目标：掌握测试的基本概念及测试的主要工作内容，重点掌握测试系统的基本组成以及各组成部分的功用。对于生产、生活及科学技术领域中所遇到的一般测试系统，能正确地分析其组成，对其有概貌性的认识。此外，对测试技术的发展历史、现状及发展趋势要有一定的了解。

当今世界已经进入信息社会时代，其特点是科学技术发展迅速，对各种信息的需求也越来越多。在科学技术领域中，信息的获得一般都要以各种测试的结果为依据。任何科学理论的建立都要借助于大量的测试工作，生产工艺过程的自动控制、监视、产品质量的检测等也都离不开测试工作。测试工作是现代社会提高科学技术水平，实现生产过程自动化，保证产品质量和劳动生产率的重要技术手段。

1.1 传感器与测试技术的地位和作用

科学技术高速发展的今天，人们已经普遍认识到，科学技术的三大支柱（信息技术、能源技术、材料技术）之一——信息技术占有头等重要的地位，而测试技术即属于信息技术的范畴，它是信息技术三个方面（传感器技术、计算机技术和通信技术）的主要组成部分。

现代信息技术的三大支柱是传感器技术、通信技术和计算机技术，它们分别构成信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”，因此，传感器技术是信息社会的重要基础技术，传感器是信息获取系统的首要部件。鉴于传感器的重要性，在 20 世纪 80 年代，发达国家对传感器在信息社会中的作用就有了新的认识和评价，如美国把 20 世纪 80 年代看作传感器时代，把传感器技术列为 20 世纪 90 年代 22 项关键技术之一；日本曾把传感器列为 10 大技术之首；我国的“863”计划、科技攻关等计划中也把传感器研究放在重要的位置。传感器也是测控系统获得信息的重要环节，在很大程度上影响和决定了系统的功能。不仅工程技术领域中如此，就是在基础科学研究中，由于新机理和高灵敏度检测传感器的出现，也会导致该领域新的突破。例如约瑟夫森效应器件的出现，不仅解决了对于 10^{-13} T 超弱磁场的检测，同时还解决了对 10^{-12} A 以及 10^{-23} J 等物理量的高精度检测，还发现和证实了磁单极子的存在，对于多种基础科学的研究和精密计量产生了巨大的影响。所以国外一些著名专家评论说：“征服了传感器就等于征服了科学技术”；“如果没有传感器检测各种信息，那么支撑现代文明的科学技术，就不可能发展”；“惟有模仿人脑的计算机和传感器的协调发展，才能决定技术的将来”。

国力竞争的关键是科技水平，我国与发达国家的差距也主要是科技上的差距。我国已将科技兴国作为基本方针，而测试技术是科学发展必不可少的手段。伟大的化学家、计量学家门德列耶夫说过：“科学是从测量开始的，没有测量就没有科学，至少是没有精确的科学、真正的科学”。我国“两弹一星”元勋王大珩院士也说过：“仪器是认识世界的工具；科学是用斗量禾的学问。用斗去量禾就对事物有了深入的了解、精确的了解，就形成科学”。

科学上的发现和技术上的发明是从对事物的观察开始的。对事物的精细观察就要借助于仪器，就要测试，特别是在自然科学和工业生产领域更是如此。在对事物的观察、测试基础上经过分析推导，形成认识。到这一阶段还只能是假说、学说。实践是检验真理的惟一标准，只有在经过测试和考核，才能真正形成科学，所以说在科学发展的哪一阶段都离不开测试。国家中长期科学技术发展规划指出，仪器仪表和测试是“新技术革命”的先导和基础。

纵观科学发展史和科技发明史，许多重大发现和发明都是从仪器仪表和测试技术的进步开始。从20世纪初到现在，诺贝尔奖颁发给仪器发明、发展与相关的实验项目达27项之多。众所周知，没有哈勃望远镜就难以进行天体科学的研究，天体科学上的许多重大发现都是依靠哈勃望远镜的观测而得到的。扫描隧道显微镜的发明对纳米科技的兴起和发展可以说起到决定性作用。

1.2 测试技术的概念

测试 (Measurement and Test) 是测量 (Measurement) 与试验 (Test) 的概括，是人们借助于一定的装置，获取被测对象有关信息的过程。如果被测量不随时间变化，称这样的量为静态量，相应的测试称为静态测试；若被测量是随时间变化的，则称这样的量为动态量或过程，相应的测试称为动态测试或过程测试。

测试包括了两个方面的含义：一是测量，指的是使用测试装置通过实验来获取被测量的量值；二是试验，指的是在获取被测量量值的基础上，借助于人、计算机或一些数据分析与处理系统，从被测量中提取出被测对象的有关信息。由于被测对象的多样性和广泛性，在很多情况下对被测量进行直接测量是很困难的甚至是不可能的。例如，连续运动热轧钢板的厚度测量、油井井下的温度和压力监视、高速运转发电机的运行状态监视、机械加工过程中机床的振动测试等。此时，就需要先把被测量转换成某种易于被人们所接收、放大、处理及显示记录的参数或参量（一般为电参数或电参量），比如，将上述的厚度、温度、压力、振动参数等转换为电压信号、电流信号等。这种将被测量转换为另一种与之具有一定函数关系的参数或参量的过程叫做传感或测量变换。

1.3 测试系统的组成

基本的测试系统由传感器、信号调理电路、显示记录装置三部分组成（图 1-1）。

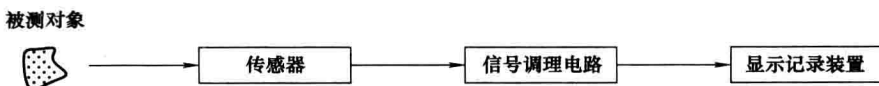


图 1-1 测试系统的组成

(1) 传感器

传感器的作用是感受被测量，并对其进行测量变换，将被测量转换成某种易于作进一步处理的参量或参数。传感器的种类很多，它们可以用来感受不同的被测量，如位移、速度、加速度、力、压力、温度、流量等，并且具有不同的静态、动态特性。

(2) 信号调理电路

被测量经传感器及其测量线路变换后所得到的电信号一般是很微弱的，不宜直接输出，

有时信号中还可能包括干扰等不需要的成分,或者传感器因工作原理等而存在着一定的非线性误差,此时要通过各种信号调理电路对传感器输出的信号作进一步的处理。信号调理电路主要有各种放大电路、测量电桥、调制与解调电路、滤波器、非线性校正装置等。

(3) 显示记录装置

它们的作用是将经转换处理后得到的包含被测量信息的输出信号以某种可为人的感官所直接或间接接受的形式表现出来,使人们能够获得有关被测量的信息,或以某种形式记录下来待日后重放,以作进一步的观测、分析。这类装置包括各种示波器、记录仪、分析仪等。

近年来,计算机在测试领域中应用得日益广泛,许多传统上靠硬件实现的功能都可以用计算机来实现,计算机的引入使得测试系统的功能、精度、信息获取能力等有了根本性的提高。这种计算机测试系统除上述三个基本组成部分外,主要增加了计算机、数据采集系统、数据分析与处理系统(硬件及软件)等,可以完成测试过程的控制、数据采集、数据分析与处理等工作,测试结果的显示记录也通常由显示器、打印机、绘图仪、存储器等来实现。

1.4 传感器与测试技术的发展方向

(1) 传感器的发展方向

当今世界发达国家对传感器技术发展极为重视,视为涉及国家安全、经济发展和科技进步的关键技术之一,将其列入国家科技发展战略计划之中。因此,近年来传感技术迅速发展,传感器新原理、新材料和新技术的研究更加深入、广泛,传感器新品种、新结构、新应用不断涌现、层出不穷。主要体现在以下几个方面。

① 微型化速度加快 值得特别关注的是近年来随着集成微电子机械加工技术的日趋成熟,传感器制作技术进入了一个展新阶段。微电子技术和微机械技术相结合,器件结构从二维到三维,实现进一步微型化、微功耗,并研究把传感器送入人体,进入血管,研究测试分子的重量和 DNA 基因突变的微型传感器等。

② 功能日渐完善 随着集成微光、机、电系统技术的迅速发展以及光导、光纤、超导、纳米技术、智能材料等新技术的应用,进一步实现信息的采集与传输、处理集成化、智能化,更多的新型传感器将具有自检自校、量程转换、定标和数据处理等功能,传感器功能得到进一步增强和完善,性能进一步提高,更加灵敏、可靠。

③ 生物、化学传感器研究速度加快 21 世纪中,全世界范围内对生命科学的研究加速,对人类生存的环境更加重视。新型生物传感器和化学传感器的研究和开发已成为重点和热点。

为了人类的健康,目前正在研发多种 DNA 传感器、蛋白质芯片、细胞芯片以及集成化的实验室芯片(Lab on Chip)或称微全分析系统(μ TAS);研发监测大气污染、水质污染所急需的各种新型传感器,以取代目前笨重、烦琐的检测系统。

④ 商品化、产业化前景广阔 在新型传感器研究开发的同时,注意新型材料、设计方法、生产工艺、测试技术和配套仪表等基础技术的同步发展,更加注重实用化,从而保证了成果转化和产业化的速度更快。

⑤ 创新性更加突出 新型传感器的研究和开发由于开展时间短,往往尚不成熟,因此蕴藏着更多的创新机会,竞争也很激烈,成果也具有更多的知识产权。所以加速新型传感器的研究、开发、应用具有更大意义。

⑥ 新型传感器研发的重点——基于 MEMS 技术的新型微传感器 微传感器（尺寸从几微米到几毫米的传感器总称）特别是以 MEMS（微电子机械系统）技术为基础的传感器已逐步实用化，这是今后发展的重点之一。

微机械设想早在 1959 年就被提出，其后逐渐显出采用 MEMS 技术制造各种微型新型传感器、执行器和微系统的巨大潜力。这项研发在工业、农业、国防、航空航天、航海、医学、生物工程、交通、家庭服务等各个领域都有巨大的应用前景。

（2）测试技术的发展方向

现代测试技术既是促进科学技术发展的重要手段，也是科学技术发展的结果。现代科技的发展不断地对测试技术提出更新、更高的要求，从而推动了测试技术的发展。另一方面，测试技术也不断地吸取其他技术领域（如物理学、化学、生物学、材料科学、微电子学、计算机科学等）的新成就、新技术，开发出新的测试方法和测试装置。近年来，测试技术在以下几个方面的发展尤为突出。

① 利用新原理制成的各种新型传感器层出不穷，可测试的对象迅速增多 传感器是实现测试、获取信息的基础，只有拥有多样、性能优良的传感器，才能适应各种各样的被测对象、测试精度及动态特性等测试要求。现今人们已普遍认为，传感技术决定着时代的发展。

早期的传感器大多属于结构型，它们的工作是基于某些物理定律，传感器本身某些结构参数随被测量的变化而变化。现代传感器的一个显著特点是物性型传感器的大量出现，这些传感器依靠传感器敏感元件材料的物理性质随被测量的变化而工作。一种新的物性型传感器通常是随着一种新材料的开发而出现的，由于这些新材料具有独特的物理性质，从而使得可测试的对象增多，也使得传感器的多功能、集成化、智能化以及小型化成为可能。目前发展最为迅速的新材料主要有半导体、电介质（晶体或陶瓷）、光导纤维、磁性材料、高分子合成材料、超导材料、液晶及所谓的“智能材料”（如形状记忆合金、具有自增殖功能的生物体材料）等。

计算机技术、微电子技术、微细加工技术和集成化工艺等方面的进展，大大促进了传感器的集成化、智能化。这些集成、智能传感器，或是由多个同一功能的敏感元件排列成线形、面形；或是将多种不同功能的敏感元件集成为一体而实现可同时进行多参数测试的功能；或是将传感器与某些测量电路（放大、运算、量程及增益的自动选择、自动校准与实时校准、温度补偿、非线性校正、过载保护等）甚至微处理器集成为一体。

② 测试装置中的电路设计得到迅速改进 在测试装置的电路设计中，广泛采用集成运算放大器和其他各种集成电路，大大改善了测试装置的特性（负载效应、非线性误差、漂移、功耗、干扰等），简化了测试装置的组成，促进了测试装置的小型化。

③ 出现了多参量测试系统 近年来出现了各种廉价的传感器和实时处理装置，多参量测试系统得到了迅速的发展。多参量测试系统可以同时多个参量进行测试，是自动化过程控制系统所必不可少的装置。这种系统也广泛用于设备运行状态的监测等场合。

④ 信息技术得到了广泛应用 凡是可扩展到获取信息的技术都是信息技术，其主体内容包括传感器技术、通信技术和计算机技术。

应用计算机进行信号的采集、分析与处理，使测试技术产生了巨大的变化，大幅度地提高了测试系统的精确度、测试能力和测试效率，实现了测试仪器的智能化。现代测试技术中应用了许多新的分析方法和手段（如各种快速傅里叶变换算法、各种可实现高速信号处理的芯片），使测试系统具有实时分析、记忆、逻辑决断、自校准、自适应控制和某些补偿能力。

虚拟仪器技术是近年来随着计算机技术的发展而在测试技术领域引发的一场技术革命。虚拟仪器是在通用计算机上,借助于专门的虚拟仪器开发软件,辅之以少量的硬件,就可根据用户的需要设计仪器的功能,用户可方便地在图形化界面上对仪器进行操作。虚拟仪器还可以用软件实现传统仪器靠硬件才能实现的功能以及某些传统仪器所不能实现的功能。“软件就是仪器”是虚拟仪器的理念。虚拟仪器可实现并扩展传统仪器的功能,可以充分利用计算机强大的计算处理、显示、传送、存储等功能,具有开发周期短、成本低、易于维护和升级等诸多特点,已成为当今测试仪器的主要发展方向。

网络技术在测试技术中的应用也越来越广泛。人们可以通过 Internet 或局域网实现数据交换与资源共享,可以在其他地方对现场工况进行监测,能够实现远程实时操作、远程测量、远程数据采集、远程调试、远程故障诊断,从而构成遍布各处的分布式测控网络。

第2章 传感器基础理论

学习目标：了解传感器的分类和命名方法，重点掌握传感器的静态特性，清楚静态特性中各指标的意义，熟悉传感器的选用原则，会根据测试任务及测试要求选用适当的传感器。

2.1 非电量与非电量电测

人们生活的世界是由物质组成的，一切物质都处在永不停止的运动之中。物质的运动形式很多，它们通过化学现象或物理现象表现出来。表征物质特性或其运动形式的参数很多，根据物质的电特性，可分为电量和非电量两类。电量一般是指物理学中的电学量，如电压、电流、电阻、电容、电感等；非电量则是指除电量之外的一些参数，如压力、流量、尺寸、位移量、重量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度、酸碱度等。

人们在科学实验和生产活动中，通过测量可以对物质或事物获得定量的概念并发现它们的规律性，从而认识物质及事物的本质。在众多的实际测量中，大多数是对非电量的测量。

随着科学技术的不断进步和自动化水平的提高，对非电量测量的精度、灵敏度及反应速度，尤其对被测量动态变化过程的测量和远距离的检测都提出了更高的要求，原有的对非电量的测量方法已无法适应这一需要。这就要求对原有的非电量测量方法加以改进，并采用新技术、新方法。采用传感器技术的非电量电测方法，就是目前应用非常广泛的测量方法。

非电量不能直接使用一般电工仪表和电子仪器测量，因为一般电工仪表和电子仪器要求输入的信号为电信号。在由电子计算机控制的自动化系统中，更是要求输入的信息为电量信号。一些在特殊场合下的非电量，如炉内的高温，带有腐蚀性液体的液位，煤矿内瓦斯的浓度等也无法进行直接测量，这也需要将非电量转换成电量进行测量。

这种把被测非电量转换成与非电量有一定关系的电量，再进行测量的方法就是非电量电测法。实现这种转换技术的器件叫传感器。

非电量电测法具有以下优点。

- ① 可进行微量检测，精度高，反应速度快。
- ② 可实现远距离遥测及遥控。
- ③ 可实现无损检测。
- ④ 能连续进行测量、记录及显示。
- ⑤ 可采用计算机技术对测量数据进行运算、存储及信息处理。
- ⑥ 测量安全可靠。

2.2 传感器的定义及分类

(1) 定义

国家标准 GB 7665—87——《传感器通用术语》中，对于传感器（Transducer/Sensor）的

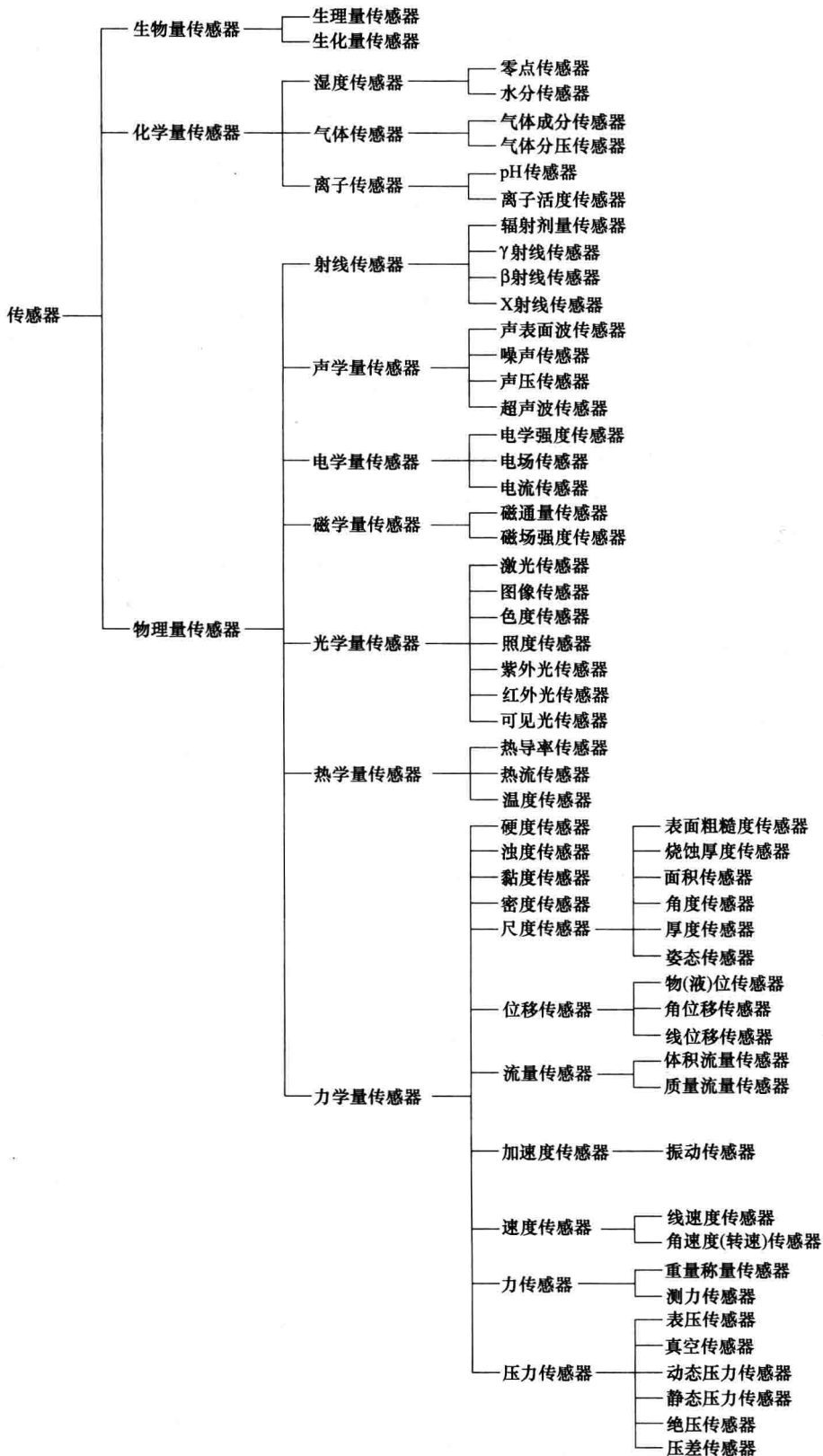


图 2-1 传感器按被测量分类的分类体系

定义作了如下规定：“能感受（或响应）规定的被测量并按照一定规律转换成可用信号输出的器件或装置。传感器通常由直接响应于被测量的敏感元件和产生可用信号输出的转换元件及相应的电子线路所组成”。

有时人们往往把传感器、敏感元件、换能器及转换器的概念等同起来。在非电量电测变换技术中，“传感器”一词是和工业测量联系在一起的，实现非电量转换成电量的器件称为传感器；在水声和超声波等技术中强调的是能量的转换，比如压电元件可以起到机-电或电-机能量的转换作用，所以把可以进行能量转换的器件称为换能器；对于硅太阳能电池来说，也是一种换能器件，它可以把光能转换成电能输出，但在这类器件上强调的是转换效率，习惯上把硅太阳能电池叫做转换器；在电子技术领域，常把能感受信号的电子元件称为敏感元件，如热敏元件、光敏元件、磁敏元件及气敏元件等。这些不同的提法，反映了在不同的技术领域中，只是根据器件用途对同一类型的器件使用着不同的技术术语而已。这些提法虽然含义有些狭窄，但在大多数情况下并不会产生矛盾，如热敏电阻可称为热敏元件，也可称为温度传感器。又如扬声器，当它作为声检测器件时，它是一个声传感器，如果把它当成喇叭使用，也只能认为它是一个换能或转换器件了。

（2）分类

传感器的分类方法较多，按利用场的规律或利用材料的物质法则可分为结构型传感器和物性型传感器；按依靠或不依靠外加能源工作可分为无源传感器和有源传感器；按输出量是模拟量还是数字量可分为模拟量传感器和数字量传感器等。最常用的分类方法有如下两种：第一种是按工作原理分类，如应变式、压阻式、压电式、光电式等；第二种是按被测量分类，如力、位移、速度、加速度等。在许多情况下往往将上述两种分类方法综合使用，如应变式压力传感器、压电式加速度传感器等。传感器按被测量分类，其分类体系如图 2-1 所示。

2.3 传感器命名方法及代号

2.3.1 传感器命名方法

（1）命名法的构成

一种传感器产品的名称，应由主题词加四级修饰语构成。

- ① 主题词——传感器。
- ② 第一级修饰语——被测量，包括修饰被测量的定语。
- ③ 第二级修饰语——转换原理，一般可后续以“式”字。
- ④ 第三级修饰语——特征描述，指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征，一般可后续以“型”字。
- ⑤ 第四级修饰语——主要技术指标（量程、精确度、灵敏度范围等）。

（2）命名法案例

① 题目中的用法 本命名法在有关传感器的统计表格、图书索引、检索及计算机汉字处理等特殊场合，应采用上述命名法所规定的顺序。

例：传感器，位移，应变 [计] 式，100mm

② 正文中的用法 在技术文件、产品样本、学术论文、教材及书刊的陈述句子中，作为产品名称应采用与上述命名法相反的顺序。

例：100mm 应变式位移传感器

当对传感器的名称简化表征时，除第一级修饰语外，其他各级可视产品的具体情况任选或省略。

在传感器科学研究的文献、报告及有关教材中，为方便对传感器进行原理及其分类的研究，允许只采用第二级修饰语，省略其他各级修饰语。

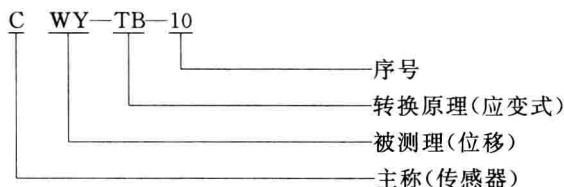
2.3.2 传感器代号

GB 7666—87 标准规定用大写汉语拼音字母和阿拉伯数字构成传感器完整的代号。

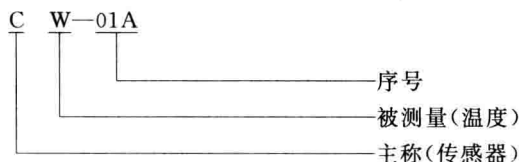
常用被测量和常用转换原理的代号应参照 GB 7666—87 的规定。

2.3.3 传感器代号标记示例

(1) 应变式位移传感器



(2) 温度传感器



2.4 传感器的静态特性

在分析传感器特性时一般将传感器等效为二端网络，如图 2-2 所示。传感器的特性分为静态特性和动态特性。

静态特性是指被测物理量不随时间变化或随时间变化极其缓慢（在所观察的时间间隔内，其随时间的变化可忽略不计）的情况下，传感器的输出与其输入之间的关系。在静态测试中，这种关系一般是一一对应的，可以用代数方程加以描述。最常用的方法是将传感器的输出与输入的关系用以下多项式表示：

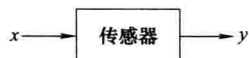


图 2-2 传感器等效图

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x^i = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (2-1)$$

式中 x ——传感器的输入；

y ——传感器的输出；

a_i ——传感器的特性参数。

当式 (2-1) 可以写为

$$y = a_0 + a_1 x \quad (2-2)$$

的形式时，传感器的输出-输入关系为一条直线，该传感器称为线性传感器。式 (2-2) 中 a_0 为传感器的零位输出， a_1 为传感器的静态增益（灵敏度）。若通过零位补偿使 $a_0 = 0$ ，则传

传感器具有理想的线性输入-输出关系:

$$y = a_1 x \quad (2-3)$$

理想的测试装置是线性时不变系统, 静态输出与静态输入之间为理想的线性比例关系。实际测试装置的静态输出输入特性大多是非线性的, 可通过静态标定 (也称为校准) 得到。在传感器静态校准过程中, 通常应标注其适用的温度范围。

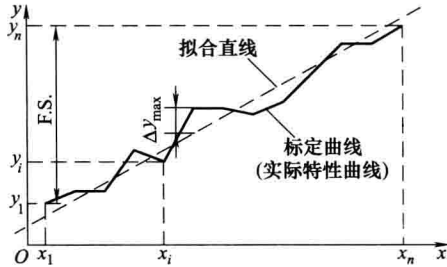


图 2-3 标定曲线与拟合直线

标定时先给测试装置一系列标准输入, 测出对应的一系列输出, 得到一系列的数据对 (x_i, y_i) ($i=0, 1, 2, \dots, n$)。以输入为横坐标、输出为纵坐标可以绘出测试装置的实际特性曲线, 称之为标定曲线或校准曲线 (见图 2-3)。由于测试装置的实际静态特性一般是非线性的而不便于直接使用, 所以通常是用一条理想直线近似地代替实际静态特性, 称之为拟合直线。拟合直线可以用端点连线、最小二乘拟合等方法确定。

2.4.1 测量范围和量程

(1) 测量范围

测量范围是指在保证传感器性能指标的前提下, 最大被测量 (测量上限) 和最小被测量 (测量下限) 所表示的区间。测量范围有单边、双边、对称及不对称之分, 如 $0 \sim 100\text{N}$, $5 \sim 40\text{kPa}$ 是单边测量范围; $-50 \sim +50^\circ\text{C}$ 是双边对称测量范围; $-10 \sim +20\text{g}$ 是双边不对称测量范围。

(2) 量程

量程是测量上限与测量下限的代数差。量程的计算公式为

$$x_{\text{FS}} = x_{\text{max}} - x_{\text{min}} \quad (2-4)$$

式中 x_{max} —— 测量范围的上限值;
 x_{min} —— 测量范围的下限值。

(3) 满量程输出

满量程输出又称校准满量程输出, 为工作特性所决定的最大输出和最小输出的代数差。满量程输出的计算公式为

$$Y_{\text{FS}} = Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}} \quad (2-5)$$

式中 Y_{max} —— 工作特性所决定的最大输出值;
 Y_{min} —— 工作特性所决定的最小输出值。

凡经过传感器输出-输入拟合而得到的输出值用 Y 表示, 而实测的输出值用 y 表示。对于线性传感器和具有单调特性的非线性传感器, 满量程输出可以用 $Y_{\text{FS}} = Y(x_{\text{max}}) - Y(x_{\text{min}})$ 计算; 而在要求不高的场合, 实际满量程输出 $Y_{\text{FS}} = y_{\text{max}} - y_{\text{min}}$ 。

2.4.2 分辨力和阈值

在整个传感器量程内都能产生可观测的输出量变化的最小输入量变化称为分辨力。计算公式如下:

$$R_x = \max |\Delta x_{i, \min}| \quad (2-6)$$

式中 $\Delta x_{i, \min}$ —— 在第 i 个测量点上能产生可观测输出变化的最小输入变化量;

$\max |\Delta x_{i,\min}|$ ——在整个量程内取最大的 $\Delta x_{i,\min}$ 。

分辨力与量程的比值称为分辨率，一般用百分数表示。传感器零点处的分辨力称为阈值或死区。

2.4.3 静态灵敏度

传感器的静态灵敏度（简称灵敏度）是输出变化量与相应的输入变化量之比，或者说是单位输入下所得到的输出。这里所说的输入量的变化必须很慢且不致引起输出量的动态响应。如果有动态响应，则必须采用达到稳态后的输出量。传感器在第 i 个测量点处的灵敏度可表示为

$$s_i = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Y_i}{\Delta x_i} \right) = \frac{dY_i}{dx_i} \quad (2-7)$$

式中 Δx_i ——在第 i 个测量点上传感器的变化量；

ΔY_i ——在第 i 个测量点上由 Δx_i 引起的传感器的输出变化量。

线性传感器的灵敏度为一常数，计算公式为

$$s = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2-8)$$

灵敏度是一个有量纲的量，其量纲取决于传感器输出量的量纲和输入量的量纲之比。假若某装置输入量为压力（量纲为 MPa），输出量为电压（量纲为 V），那么该装置灵敏度的量纲就是 V/MPa。即使输入量与输出量具有相同的量纲，为意义明确，也往往将它们写出来（例如 mV/mV）。式（2-8）也可用来计算非线性传感器的平均灵敏度。

2.4.4 线性度、迟滞

(1) 线性度

线性度也称为非线性度、非线性误差，用来表征标定曲线（实际特性曲线）接近拟合直线（为一理想直线）的程度，亦即测试装置的输入输出特性为线性的近似程度，它是反映测试装置精度的指标之一，其值越小越好。线性度定义为校准曲线对拟合直线的最大偏距与装置的满量程（F. S.）输出之比的百分数（见图 2-3）。即

$$\text{线性度} = \frac{\Delta y_{\max}}{\text{F. S.}} \times 100\% = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max} - y_{\min}} \times 100\% \quad (2-9)$$

独立线性度一般根据定义采用作图法求得，具体算法可参考 GB/T 18459—2001，即《传感器主要静态性能指标计算方法》。

作为拟合直线的最小二乘直线，应保证传感器实际特性对它的偏差的平方和为最小。最小二乘直线方程为

$$Y_{ls} = a + bx \quad (2-10)$$

式中 Y_{ls} ——传感器的理论输出；

a, b ——最小二乘直线的截距和斜率；

x ——传感器的实际输入。

最小二乘直线的截距和斜率可通过对传感器实际特性的直线拟合求出，计算公式如下：

$$a = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum \bar{y}_i - \sum x_i \cdot \sum x_i \bar{y}_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad b = \frac{m \sum x_i \bar{y}_i - \sum x_i \cdot \sum \bar{y}_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2-11)$$

式中 x_i ——传感器在第 i 校准点值；

\bar{y}_i ——传感器在第 i 校准点处的实际输出值；