



应用型本科信息大类专业“十二五”规划教材  
21世纪普通高等教育优秀教材

# 传感器技术 与应用

魏学业 主 编



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

应用型本科信息大类专业“十二五”规划教材  
21世纪普通高等教育优秀教材

# 传感器技术与应用

主 编 魏学业

副主编 白彦霞 吴卫华 陈公兴

梁桂英 陈朝大

华中科技大学出版社

中国·武汉

## 内 容 简 介

传感器技术与应用是自动化、测控仪器等专业的专业课。随着我国物联网相关产业的蓬勃发展,传感器技术也在同时拓展着自身的应用领域。本书的编者们怀着培养应用型人才的愿望,编写了《传感器技术与应用》这本书。

本书在介绍传感器技术的同时,注重理论联系实际;在表达方式上力求做到语言通俗、简洁易懂,以提高学生的学习兴趣。

本书共 19 章。第 1 至 17 章介绍了传感器的基础知识,以及电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、热电式传感器、流量检测仪表、压电传感器、光电式传感器和集成式温度传感器等内容。这一部分围绕着基本原理、测量电路和应用实例三个方面进行介绍,使学生在掌握基本原理的基础上,学会将传感器得到的微弱信号通过测量电路转换成可测量的信号的方法。第 18 章和第 19 章介绍了温度和力学量参数的检测技术,使学生在掌握前面传感器的基础知识之后,能够扩展一下思路。

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书网”(www.ibook4us.com)免费注册下载,也可以发邮件至 hustpeiit@163.com 索取。

本书可作为高等院校,特别是应用型本科院校的自动化、测控仪器、电子信息等专业的教材,也可供从事相关领域的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术与应用/魏学业 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2013.7  
ISBN 978-7-5609-8507-7

I. 传… II. 魏… III. 传感器-高等学校-教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 276175 号

传感器技术与应用

魏学业 主编

策划编辑:康 序

责任编辑:张 琼

封面设计:李 嫒

责任校对:刘 竣

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.25

字 数:460千字

版 次:2013年7月第1版第1次印刷

定 价:35.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

只有无知，没有不满。

*Only ignorant, no resentment.*

.....迈克尔·法拉第(Michael Faraday)

迈克尔·法拉第(1791—1867)：英国著名物理学家、化学家，在电磁学、化学、电化学等领域都作出过杰出贡献。

# 应用型本科信息大类专业“十二五”规划教材

## 编审委员会名单

(按姓氏笔画排列)

卜繁岭	于惠力	方连众	王书达	王伯平	王宏远
王俊岭	王海文	王爱平	王艳秋	云彩霞	尼亚孜别克
厉树忠	卢益民	刘仁芬	朱秋萍	刘锐	刘黎明
李见为	李长俊	张义方	张怀宁	张绪红	陈传德
陈朝大	杨玉蓓	杨旭方	杨有安	周永恒	周洪玉
姜峰	孟德普	赵振华	骆耀祖	容太平	郭学俊
顾利民	莫德举	谈新权	富刚	傅妍芳	雷升印
路兆梅	熊年禄	霍泰山	魏学业	鞠剑平	



# 前言

## PREFACE

传感器技术与应用是自动化、仪器仪表等专业的基础课程,涉及电路、电测等专业的基础知识。传感器是工业自动化设备、测控仪器等获取信息的必要手段。相关专业的学生通过学习本课程,可以更好地理解控制理论、过程控制等课程的内容。

本书的初稿来自于不同学校的多名编者,其主要内容是他们在传感器及其相关课程中的教学内容,同时也参考了国内外传感器技术的专著和相关论文。本书的部分内容来源于编者的一些实际项目中的实例。

本书是根据部分应用型本科院校的培养方案,以培养应用型人才为主要目的而编写的。为此,在本书的编写过程中,编者注重理论与实际的结合,重在应用。在内容上略去了烦琐的公式推导和理论分析,以简洁和实用的表述方式,系统地介绍了传感器技术及其应用。从传感器的基本知识开始,围绕应用基础、设计基础、应用实例等展开。

本书力求让学生在“传感器技术与应用”课程中达到事半功倍的效果,使学生不仅能将已经学到的电路、信号与系统、电子测量、控制理论等课程的知识融入到本课程中,而且能灵活运用已经掌握的理论知识到实际工作中。

本书的编写得到了北京交通大学海滨学院专业建设和实习基地建设项目的资助,同时也得到了北京化工大学北方学院、江苏理工学院、广东技术师范学院天河学院、桂林电子科技大学信息科技学院的支持,在此表示感谢。

本书由北京交通大学海滨学院魏学业担任主编,由北京化工大学北方学院白彦霞、江苏理工学院吴卫华、广东技术师范学院天河学院陈公兴与陈朝大、桂林电子科技大学信息科技学院梁桂英担任副主编。其中,魏学业编写了第1、14、19章,白彦霞编写了第2、3、4、9、18章,吴卫华编写了第5、6、7、8、15章,陈公兴编写了第9、11、13章,梁桂英编写了第12、16、17章,陈朝大编写了第10章。最后由魏学业审核并统稿。

为了方便教学,本书还配有电子课件等教学资源包,任课教师和学生可以登录“我们爱读书网”(www.ibook4us.com)免费注册下载,也可以发邮件至

hustpeiit@163.com索取。

传感器技术处于快速发展之中,测量方法和手段也在不断更新。限于编者自身的学识和水平,书中难免存在疏漏和错误之处,恳请读者指正。

编 者

2012年7月

目  
录

## CONTENTS

<b>第 1 章 传感器基础知识</b> .....	(1)
1.1 概述 .....	(1)
1.2 传感器的基本特性 .....	(5)
1.3 传感器的基本测量电路 .....	(12)
思考与练习题 .....	(21)
<b>第 2 章 电阻式传感器</b> .....	(22)
2.1 电阻应变式传感器 .....	(22)
2.2 压阻式传感器 .....	(36)
2.3 热电阻式传感器 .....	(40)
2.4 气敏电阻 .....	(43)
2.5 湿敏电阻 .....	(45)
思考与练习题 .....	(47)
<b>第 3 章 电容式传感器</b> .....	(48)
3.1 电容式传感器 .....	(48)
3.2 电容式传感器的等效电路及输出电路 .....	(54)
3.3 影响电容式传感器精度的因素及提高精度的措施 .....	(59)
3.4 电容式传感器的应用 .....	(60)
思考与练习题 .....	(62)
<b>第 4 章 电感式传感器</b> .....	(63)
4.1 自感式传感器 .....	(63)
4.2 差动变压器式(互感式)传感器 .....	(69)
4.3 电涡流式传感器 .....	(71)
4.4 电感式传感器的应用 .....	(75)
思考与练习题 .....	(77)
<b>第 5 章 热电式传感器</b> .....	(78)
5.1 热电偶温度传感器 .....	(78)



5.2 PN 结型温度传感器 .....	(86)
思考与练习题 .....	(87)
<b>第 6 章 压电传感器</b> .....	(88)
6.1 压电效应 .....	(88)
6.2 压电材料 .....	(90)
6.3 压电传感器的等效电路和测量电路 .....	(92)
6.4 压电传感器的应用 .....	(96)
思考与练习题 .....	(98)
<b>第 7 章 光电式传感器</b> .....	(99)
7.1 光电效应 .....	(99)
7.2 光电器件 .....	(101)
7.3 光电式传感器的应用 .....	(112)
思考与练习题 .....	(113)
<b>第 8 章 超声波传感器</b> .....	(114)
8.1 超声检测的物理基础 .....	(114)
8.2 超声波传感器 .....	(116)
8.3 超声波检测技术的应用 .....	(117)
思考与练习题 .....	(121)
<b>第 9 章 流量检测仪表</b> .....	(122)
9.1 流量检测基础知识 .....	(122)
9.2 节流式流量计 .....	(124)
9.3 转子流量计 .....	(128)
9.4 涡街流量计 .....	(129)
9.5 电磁流量计 .....	(131)
9.6 容积式流量计 .....	(133)
9.7 质量流量计 .....	(135)
思考与练习题 .....	(136)
<b>第 10 章 物位传感器</b> .....	(137)
10.1 概述 .....	(137)
10.2 浮力式液位传感器 .....	(138)
10.3 静压式物位传感器 .....	(138)
10.4 超声波物位传感器 .....	(140)
思考与练习题 .....	(144)
<b>第 11 章 磁敏传感器</b> .....	(146)
11.1 磁敏电阻器 .....	(146)
11.2 磁敏电阻器的应用 .....	(148)
11.3 磁敏二极管和磁敏三极管 .....	(150)
11.4 磁敏传感器 .....	(157)

11.5 磁敏传感器的应用 .....	(159)
思考与练习题 .....	(160)
<b>第 12 章 红外传感器</b> .....	(161)
12.1 红外辐射的基本知识 .....	(161)
12.2 红外探测器 .....	(162)
12.3 红外探测器的应用 .....	(164)
思考与练习题 .....	(166)
<b>第 13 章 成分测量传感器</b> .....	(167)
13.1 湿度及其测量 .....	(167)
13.2 气体成分测量 .....	(169)
13.3 浓度的测量 .....	(171)
13.4 湿敏传感器的应用 .....	(172)
思考与练习题 .....	(174)
<b>第 14 章 集成式温度传感器</b> .....	(175)
14.1 AD590 集成式温度传感器 .....	(175)
14.2 DS18B20 集成式温度传感器 .....	(177)
思考与练习题 .....	(183)
<b>第 15 章 光纤传感器</b> .....	(185)
15.1 光纤的基本知识 .....	(185)
15.2 光纤传感器的结构与分类 .....	(190)
15.3 光纤传感器的应用 .....	(194)
思考与练习题 .....	(197)
<b>第 16 章 化学传感器</b> .....	(198)
16.1 气体传感器 .....	(198)
16.2 湿度传感器 .....	(201)
思考与练习题 .....	(205)
<b>第 17 章 智能传感器</b> .....	(206)
17.1 概述 .....	(206)
17.2 智能传感器的设计 .....	(207)
17.3 传感器的智能化实例 .....	(214)
17.4 智能式传感器 .....	(215)
17.5 智能结构 .....	(216)
思考与练习题 .....	(218)
<b>第 18 章 温度检测仪表</b> .....	(219)
18.1 概述 .....	(219)
18.2 热电偶温度计 .....	(221)
18.3 热电阻温度计 .....	(224)
18.4 其他接触式温度检测仪表 .....	(226)

18.5 非接触式温度检测仪表 .....	(229)
思考与练习题 .....	(232)
<b>第 19 章 力学量检测技术</b> .....	(233)
19.1 压力的测量 .....	(233)
19.2 力的测量 .....	(241)
19.3 转矩的测量 .....	(245)
19.4 称重系统 .....	(248)
思考与练习题 .....	(251)
附录 A 标准化热电偶分度表 .....	(253)
附录 B 钨铼热电偶分度表 .....	(256)
附录 C 热电阻分度表 .....	(260)
参考文献 .....	(263)

# 第1章 传感器基础知识

传感器技术作为信息科学的一个重要分支,与计算机技术、自动控制技术和通信技术等一起构成了信息技术的完整的学科内容。在人类进入信息时代的今天,传感器作为信息获取与信息转换的重要手段,是信息科学最前端的器件,传感器技术也是实现信息化的基础技术之一。



## 1.1 概述

传感器能够把从自然界中采集到的各种物理量、化学量等转换成电信号,再经过电子电路变换后进行处理,从而实现对非电量的检测。

本书主要介绍传感器的工作原理、特性参数、测量电路和典型应用等方面的知识。书中涉及的传感器主要包括电阻式、电感式、电容式、应变式、压电式、磁电式、热电式、光电式、辐射式等类型。

### 1.1.1 传感器的定义和组成

#### 1. 传感器的定义

国家标准 GB/T 7665—2005 对传感器下的定义是:“能感受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,通常由敏感元件和转换元件组成。”因此,传感器是一种检测装置,它能感受到被测量的信息,并能将感受到的信息进行检测并按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。

#### 2. 传感器的组成

传感器是由敏感元件、转换元件、信号调理与转换电路组成的。敏感元件是能够直接感受(或响应)被测信息(通常为非电量)的元件,转换元件则是能将敏感元件感受(或响应)到的信息转换为电信号的元件,信号调理与转换电路是用于将来自转换元件的微弱信号转换成便于测量和传输的较强信号。传感器的组成如图 1-1 所示。

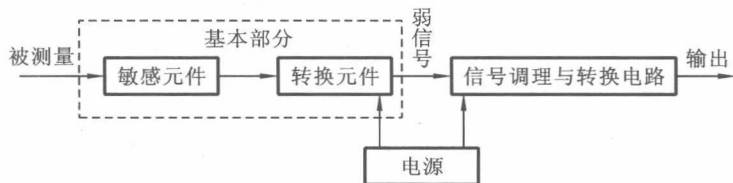


图 1-1 传感器的组成

传感器各部分的作用如下。

#### 1) 敏感元件

敏感元件直接与被测对象接触,将被测量(非电量)预先变换为另一种非电量。如应变式压力传感器的弹性膜片就是敏感元件,其作用是将压力转换成弹性膜片的变形。

## 2) 转换元件

转换元件又称为变换元件,能将敏感元件的输出量转换成电信号。一般情况下,转换元件不直接感受被测量(特殊情况下例外)。如应变式压力传感器中的应变片就是转换元件,其作用是将弹性膜片的变形转换成电阻值的变化。

值得注意的是,并不是所有的传感器都必须同时含有敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出电信号,它就同时兼为转换元件。敏感元件和转换元件合二为一的传感器很多,如压电传感器、热电偶、热电阻、光电器件等。

## 3) 信号调理与转换电路

信号调理与转换电路也称为二次仪表,能将转换元件输出的电信号放大并转变成易于处理、显示和记录的信号。信号调理电路的类型视传感器的类型而定,通常采用的有电桥电路、放大器电路、变阻器电路和振荡器电路等。

## 4) 电源

电源的作用是为传感器提供能源。需要外部接电源的传感器称为无源传感器,不需要外部接电源的传感器称为有源传感器。如电阻式、电感式和电容式传感器就是无源传感器,工作时需要外部电源供电;而压电传感器、热电偶是有源传感器,工作时不需要外部电源供电。

### 1.1.2 传感器的地位和作用

以减少劳动力和减轻劳动强度,以及提高产品质量和提高产品的一致性为动力,人们对自动化设备提出了更多的需求和更高的要求。自动化设备是现代工业生产过程、交通、军事等领域不可缺少的部分,随着产品质量和控制精度的提高,人们对自动化设备的依赖性越来越强。为了实现对上述领域的控制,就需要获取信息,那么传感器就是获取信息的必要手段,可以说传感器是实现自动控制的源头。如果没有传感器,就无法获取信息,就无法输出控制信号,也就无法实现自动控制。

传感器技术不仅对科学技术的发展起着基础和支柱的作用,而且对产品的质量和产品的一致性起着决定性的作用,因此被世界各国列为科学攻关的关键技术之一。可以说,没有传感器就没有现代化的科学技术,没有传感器也就没有人类高质量的生活及生活所必需的合格产品。传感器技术的发展推动了自动化技术的发展,自动化技术的发展也要求新的传感器技术出现。传感器技术是一个国家的科学技术和国民经济发展水平的标志之一。

### 1.1.3 传感器的分类

一般来说,测量同一种被测参数,可以采用多种传感器。反过来,同一种传感器也可以用来测量多种被测参数。因此,传感器的分类方法有很多种。

#### 1. 根据传感器是否需要提供外部电源分类

根据传感器是否需要提供外部电源,可以将传感器分为有源传感器和无源传感器两种。

有源传感器也称为能量转换型传感器,其特点是它无须外部电源就能工作,敏感元件本身能将非电量直接转换成电信号。它无能量放大作用,只是将一种能量转换成另一种能量,所以要求从被测对象获取的能量越大越好。例如,压电式传感器、超声波传感器是压/电转换型传感器,热电偶是热/电转换型传感器,光电池是光/电转换型传感器,等等。

与有源传感器相反,无源传感器的敏感元件本身不产生能量,而是随被测量而改变本身的电特性,因此必须采用外加激励源对其进行激励,才能输出电量信号。大部分传感器,例

如热电阻传感器(热/电阻转换型)、压敏电阻传感器(压/电阻转换型)、湿敏电容式传感器(湿/电容转换型)、压力电感式传感器(压/电感转换型),都属于无源传感器。由于无源传感器需要为敏感元件提供激励源才能工作,所以与有源传感器相比无源传感器通常需要更多的引线,并且传感器的灵敏度也会受到激励信号的影响。

## 2. 根据被测参数进行分类

传感器通常以被测物理量命名,测量温度的传感器称为温度传感器,测量压力的传感器称为压力传感器,测量流量的传感器称为流量传感器,测量位移的传感器称为位移传感器,测量速度的传感器称为速度传感器,等等。例如,热电阻温度传感器、应变片式压力传感器、电感式位移传感器、容积式流量计等。

## 3. 根据输出信号的类型进行分类

根据输出信号的类型可以将传感器分为模拟式传感器与数字式传感器两种。

模拟式传感器是将被测量转换为模拟电信号直接输出,输出信号的幅度表示被测对象的变化量。数字式传感器是将被测量转换为数字信号输出,被测对象的变化量通常由输出信号的数字大小来表征。

数字式传感器是模拟式传感器与数字技术相结合的产物,随着集成电路技术的发展,数字式传感器的种类将会越来越多,如集成式温度传感器就是数字式温度传感器。也可以通过数字芯片将模拟信号转换成数字信号,例如将 V/F 芯片与模拟式传感器相结合,就可以输出脉宽调制的数字信号。数字信号具有抗干扰能力强、易于传输等特点。

## 4. 根据传感器的工作原理进行分类

按传感器的工作原理可以将传感器分为电阻式传感器(被测对象的变化引起了电阻的变化)、电感式传感器(被测对象的变化引起了电感的变化)、电容式传感器(被测对象的变化引起了电容的变化)、应变式电阻传感器(被测对象的变化引起了敏感元件的应变)、压电式传感器(被测对象的变化引起了电荷的变化)、热电式传感器(温度的变化引起了输出电压的变化)等种类。

## 5. 按传感器的基本效应分类

按传感器的基本效应可以将传感器分为物理传感器、化学传感器等种类。

物理传感器是把被测量的一种物理量转化成为便于处理的另一种物理量的元器件或装置。主要的物理传感器有光电式传感器、压电式传感器、压阻式传感器、电磁式传感器、热电式传感器等。例如,光电式传感器的主要原理是光电效应,当光照射到物质上时就产生电效应,比如说光敏电阻就是光的变化引起了电阻的变化。物理传感器按其构成可细分为物性型传感器和结构型传感器两种。

(1) 物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理特性的变化来实现信号的转换的。例如,利用材料在不同湿度下的变化特性制成的湿敏传感器,利用材料在光照下的变化特性制成的光敏传感器,利用材料在磁场作用下的变化特性制成的磁敏传感器等。

(2) 结构型传感器是依靠传感器元件的结构参数变化来实现信号的转换的,主要将机械结构的几何尺寸或形状的变化,转换为相应的电阻、电感、电容等物理量的变化,从而实现被测参数的测量。例如:变极距型电容式传感器就是通过极板间距的变化来实现位移、压力等物理量的测量的;变气隙电感式传感器就是利用衔铁的位置变化来实现位移、振动等物理量的测量的。

化学传感器是将各种化学物质的特性(例如电解质浓度、空气湿度等)的变化定性或定



量地转换成电信号的装置,例如离子敏传感器、气敏传感器、湿敏传感器和电化学传感器等。

无论何种类型的传感器,它作为非电量测量与控制系统的首要环节,都应能达到快速、准确、可靠且经济地实现信息获取和转换的基本要求。具体的要求有:①传感器反应速度快,可靠性高;②传感器的输出量与被测对象之间具有确定的关系;③传感器的精度适当,稳定性好,满足静态、动态特性的要求;④传感器的适应性强,对被测对象影响小,不易受干扰;⑤传感器的工作范围或量程足够大,具有一定的过载能力;⑥使用经济,成本低,寿命长。

### 1.1.4 传感器的发展方向

传感器技术是世界各国在高新技术领域争夺的一个制高点。从20世纪80年代起,日本将传感器列于优先发展的高新技术,美国和欧洲国家等也将此技术列为国家高科技和国防技术的重点内容,同时我国也将传感器技术列入国家高新技术发展的重点。有学者认为,今后传感器的研究和开发方向应是环保传感器、医疗卫生和食品业检测器、微机械传感器、汽车传感器、高精度传感器、新型敏感材料等。

传感器的发展趋势可概括为以下几个方面。

#### 1. 传感器的小型化、集成化

由于航空航天和医疗器械的需要,以及为了减小传感器对被测对象的影响,传感器必须向小型化方向发展,以便减小仪器的体积和质量。同时为了减少转换、测量和处理环节,传感器也应向集成化方向发展,从而进一步减小体积、增加功能、提高稳定性和可靠性。

传感器的集成化分为三种情况:一是将具有同样功能的传感器集成在一起,从而使对一个点的测量变成对一个面和空间的测量;二是将不同功能的传感器集成在一起,从而形成一个多功能或具有补偿功能的传感器;三是将传感器与放大、运算及补偿等器件一体化,组装成一个具有处理功能的器件。

集成传感器的优势是传统传感器无法达到的,它不是一个个传感器的简单叠加,而是将辅助电路中的元件与传感元件同时集成在一块芯片上,使之具有校准、补偿、自诊断和网络通信功能,它可以降低成本、减小体积、增强抗干扰性能。

#### 2. 传感器的智能化

智能化传感器就是传统传感器与微处理器、测量电路、补偿电路等集成在一起或组装在一起的成果,是一种带计算机的传感器。它不仅具有传统传感器的感知功能,而且还具有判断和信息处理功能。与传统传感器相比,智能化传感器具有以下几个功能。

(1) 具有修正、补偿功能:可在正常工作中通过软件对传感器的非线性、温度漂移、响应时间等进行修正和补偿。

(2) 具有自诊断功能:传感器上电后,其内部程序就对传感器进行自检,如果某一部分出现了问题,能够指示传感器某一点出现了故障或某一部分出现了故障。

(3) 多传感器融合和多参数测量功能。

(4) 具有数据处理功能:通过设定的算法自动处理数据和存储数据。

(5) 具有通信功能:传感器获取的数据,可以通过总线将测量结果传输给信息处理中心,信息处理中心也可以将算法或阈值等传输给传感器,从而实现信息的传输与反馈。

(6) 可设置报警功能:可以通过总线设置报警的上限值和下限值。

#### 3. 传感器的网络化

将多个传感器通过通信协议连接在一起就组成了一个传感器网。特别是传感器与无线

技术、网络技术相结合,出现了一个新网络——传感器网或物联网,它已经引起了人们广泛的关注。

基于 Zigbee 技术的无线传感器网以 IEEE 802.15.4 协议为基础,如今已得到了迅猛发展,它具有功耗极低、组网方式灵活、成本低等优点,在军事侦察、环境检测、医疗健康、科学研究等众多领域具有广泛的应用前景。

#### 4. 生物传感器

生物传感器是利用生物特异性识别过程来实现检测的传感器件,生物传感器中的生物敏感元件包括生物体、组织、细胞、细胞核、细胞膜、酶、抗体、核酸等,而生物传感器就是利用这些从微观到宏观多个层次相关物质的特异识别能力来实现检测的器件。传统上光学检测器是生物传感器的主流,然而近年来随着界面科学(如分子自组装技术)与纳米科学(如扫描探针显微镜)的发展,电化学纳米生物传感器获得了前所未有的发展机遇并引起了极大的关注。



## 1.2 传感器的基本特性

在生产过程中,要求对各种各样的参数进行检测和控制,这就要求传感器不仅能感受到非电量的变化,还能不失真地将其变换成另一种非电量或电量输出。这取决于传感器的基本特性,即传感器的输入-输出特性,它是由传感器的内部结构参数和性能参数相互作用后在外部的表现。不同类型的传感器有不同的内部结构和性能参数,这些内部参数决定了它们具有不同的外部特性。

传感器的输入(被测量)一般有两种形式:①静态信号——输入信号不随时间变化或变化极其缓慢;②动态信号——输入信号随时间的变化而变化。由于输入信号的不同,传感器所呈现出来的输入-输出特性也不同,因此存在静态和动态两种特性。具有良好的静态和动态特性的传感器可以降低或抵消测量过程中的误差。

本节将介绍传感器的静态和动态的特性及传感器的标定方法。

### 1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性就是传感器在稳态信号作用下的输入与输出的关系。静态特性主要包括线性度、灵敏度、分辨力、迟滞性、重复性、漂移。

#### 1. 线性度

线性度(linearity)是指传感器的输入与输出成线性关系的程度。在理想情况下,传感器的输入-输出特性应是线性的,可用式(1-1)表示。

$$y = a_0 + a_1x \quad (1-1)$$

式中: $y$ 代表输出量; $x$ 代表输入量; $a_0$ 和 $a_1$ 为常数( $a_1$ 就是下面要介绍的灵敏度)。

而在实际应用中,传感器的静态输入与输出一般是非线性的,可用式(1-2)表示。

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

式中: $y$ 仍然代表输出量, $x$ 仍然代表输入量,而常数项变成了 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 。

式(1-2)中的2次方项、3次方项等高次项的出现,使得输出与输入之间的关系不是式(1-1)的线性比例关系了,而是非线性关系。在实际工作中,为了计算的方便,常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线,线性度(非线性误差)就是这个近似程度的一个性能指标。

将非线性曲线拟合为直线的方法有多种,下面介绍几种方法。

### 1) 两点法

将零输入时的输出点和满量程时的输出点相连的直线作为拟合直线,如图 1-2 所示。也就是零输入时传感器的输出为  $y_{\min}$ ,最大输入  $x_{\max}$  时输出为  $y_{\max}$ ,将  $(0, y_{\min})$  和  $(x_{\max}, y_{\max})$  这两点连成直线,作为传感器的近似特性曲线。此方法十分简单,但一般来说非线性误差较大。

### 2) 最小二乘法拟合

将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线,此拟合直线称为最小二乘法拟合直线,如图 1-3 所示。

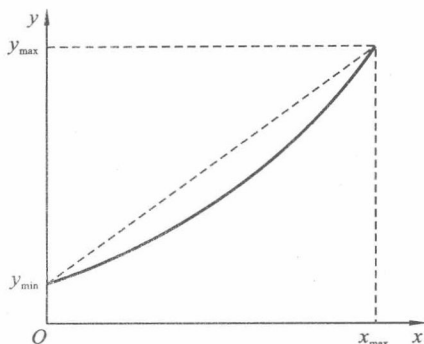


图 1-2 零输入-满量程输出拟合

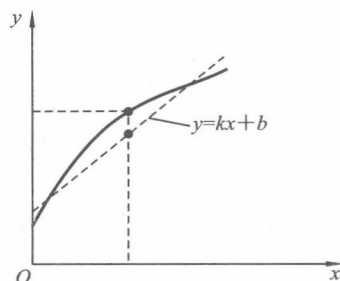


图 1-3 最小二乘法拟合

### 3) 切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合

如果传感器的非线性项的方次不高,在输入量变化范围不大的条件下,可以用切线或割线拟合、过零旋转拟合、端点平移拟合等来近似地代表实际曲线的一段,这就是传感器非线性化特性的线性化处理,如图 1-4 所示。

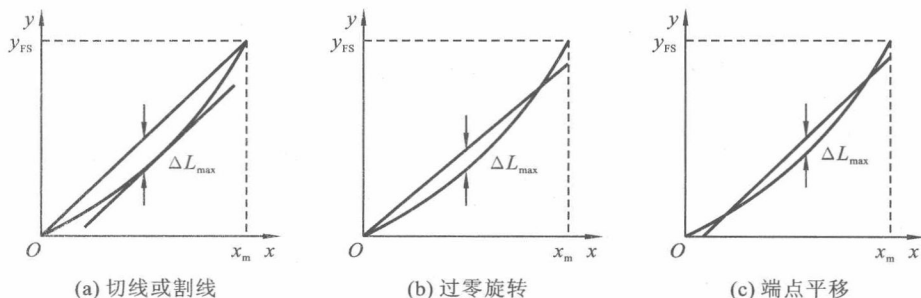


图 1-4 几种非线性拟合

### 4) 分段拟合

由于计算机处理速度的提高,并且要求测量的精度提高,因而可以采用上面介绍的某一种方法,使用计算机进行分段线性化拟合,如图 1-5 所示。

输入-输出特性曲线与理想直线的偏离程度称为非线性误差(non-linearity error),非线性误差有绝对误差(absolute error)和相对误差(relative error)两种表示方式。传感器的输出值与其线性拟合值的偏差称为绝对误差,绝对误差  $\Delta L$  用式(1-3)表示。

$$\Delta L = |L_{\text{out}} - L_{\text{linear}}| \quad (1-3)$$

式中: $L_{\text{out}}$  为传感器的输出值; $L_{\text{linear}}$  为传感器的线性拟合值。 $\Delta L$  在传感器的输出范围内的最大值  $\Delta L_{\max}$  称为传感器的最大绝对误差。传感器的绝对误差与传感器的满量程比称为传感