

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

DIANQI  
XINXILEI

# 传感器原理与 传感器技术

■ 贾石峰 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

# 传感器原理与传感器技术

主 编 贾石峰  
副主编 姜香菊 杨伟新 刘春娟  
主 审 任恩恩



机械工业出版社

本书系统地阐述了传感器的工作原理、基本结构、转换电路及其工程应用技术。全书共 15 章,第 1 章介绍传感器的基础理论;第 2 章~第 11 章按传感器工作原理分类,分别介绍了应变式、电感式、电容式、压电式、磁电式、光电式、气敏及湿敏、热电式、核辐射、超声波传感器的基本工作原理、特性与结构、转换电路、应用技术;第 12 章介绍了传感器与单片机接口技术,论述了传感器与单片机结合为测控系统的实用技术;第 13 章和第 14 章分别介绍了现代传感器信息融合及智能传感器的基础理论,反映传感器的新理论与新发展;第 15 章介绍传感器的标定方法与可靠性技术,论述了传感器检测的一般工程处理方法。书中每章都提供了较多的应用实例,并附有课后思考题与习题。

本书取材新颖、内容丰富、广深兼顾,可适应不同层次对象使用。可作为自动化、电气工程、自动控制、电子信息、电子技术、测控技术与仪器仪表等各种机电类专业的本科生和专科生教材,也可供从事传感器、测控技术工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

传感器原理与传感器技术/贾石峰主编. —北京:机械工业出版社, 2009. 8

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 28014 - 9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 142261 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: 闫晓宇 责任编辑: 王 荣

版式设计: 霍永明 责任校对: 吴美英 责任印制: 乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16.5 印张 · 407 千字

0 001—2 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 28014 - 9

定价: 28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379711

封面防伪标均为盗版

# 前 言

传感器作为信息获取的工具，在当今信息时代的重要性显而易见，在现代科技领域中所处的地位越来越突出，传感器技术是现代信息技术的支柱，是自动化测控系统工作的重要保障，随着科学技术的发展，人们的生产、生活及一切与自然界有关的活动对传感器的依赖性会越来越大。作为自动控制与自动检测系统重要环节的传感器，对系统的测控质量和效果具有举足轻重的作用。因此，传感器理论与传感器技术的研究、应用、探索已成为国内外重点发展的科学技术领域，近年来取得了巨大的进步和成就。传感器技术是现代新技术的基础和支撑技术。

本书是在作者多年从事传感器理论教学、工程实践和科学研究的基础上，根据传感器理论与技术的特点和专业基础课的性质，并从实用技术角度出发编写而成的。本书系统地介绍了传感器的基本理论、基本技术、标定方法、可靠性技术与实验内容，重点阐述了各类传感器（应变式、电感式、电容式、压电式、磁电式、光电式、气敏及湿敏、热电式、核辐射、超声波传感器）的工作原理、组成结构、基本特性、转换电路及其工程应用技术，并对现代传感器新理论、新方法和新技术作了简要介绍，举例分析了多种常用传感器与计算机的实用接口技术。

本书不仅完成对课程知识点的全面介绍，更在分析传感器的基本概念、基本理论基础，强调其工程应用的价值。同时，本书注重近年来传感器领域的理论和技术的发展，根据我国高等教育的需要，有选择地将部分新理论、新方法和新技术编入其中。

全书共分为15章，第4、5、6、8、12章由兰州交通大学贾石峰执笔，第1、2、3章由兰州交通大学姜香菊执笔，第9、10、11、14、15章由西北民族大学杨伟新执笔，第7、13章由兰州交通大学刘春娟执笔。兰州交通大学董海鹰教授、赵峰副教授、王庆贤高工在本书编写过程中付出了大量辛勤劳动，并给予书稿许多宝贵的建议；王一刚、刘宇、王丹、杨伟、马长安、黄晨在本书编写工作中承担了部分书稿的编写工作和大量绘图工作。全书由贾石峰统稿。

本书在编写过程中，得到了多方面的帮助和支持，兰州交通大学博士生导师任恩恩教授仔细审阅了书稿，并提出了许多宝贵的指导意见；同时，我们有幸参考了许多行业文献和专家著作；机械工业出版社也给予了本书大力的支持和帮助。在此一并表示诚挚的谢意。

编者水平有限，书中难免存在疏漏、失误之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

# 目 录

前言	
<b>第1章 传感器的基础理论</b> ..... 1	
1.1 传感器概述..... 1	
1.2 传感器的基本特性..... 5	
本章小结..... 13	
思考题与习题..... 13	
<b>第2章 应变式传感器</b> ..... 14	
2.1 应变式传感器的工作原理..... 14	
2.2 应变式传感器的结构类型及特性..... 16	
2.3 电阻应变片的转换电路..... 23	
2.4 应变式传感器的应用..... 27	
本章小结..... 30	
思考题与习题..... 31	
<b>第3章 电感式传感器</b> ..... 33	
3.1 自感式电感传感器..... 33	
3.2 互感式电感传感器..... 41	
3.3 电涡流式传感器..... 47	
本章小结..... 52	
思考题与习题..... 53	
<b>第4章 电容式传感器</b> ..... 55	
4.1 电容式传感器的工作原理..... 55	
4.2 电容式传感器的类型及特性..... 56	
4.3 电容式传感器的转换电路..... 61	
4.4 电容式传感器的应用..... 66	
本章小结..... 68	
思考题与习题..... 68	
<b>第5章 压电式传感器</b> ..... 70	
5.1 压电式传感器的工作原理及等效电路..... 70	
5.2 压电式传感器的结构及特性..... 73	
5.3 压电式传感器的转换电路..... 77	
5.4 压电式传感器的应用..... 80	
本章小结..... 84	
思考题与习题..... 84	
<b>第6章 磁电式传感器</b> ..... 86	
6.1 磁电感应式传感器..... 86	
6.2 霍尔传感器..... 91	
6.3 磁敏电阻..... 100	
6.4 磁敏二极管和磁敏晶体管..... 103	
本章小结..... 108	
思考题与习题..... 108	
<b>第7章 光电式传感器</b> ..... 110	
7.1 光电式传感器的工作原理..... 110	
7.2 光电式传感器的结构及特性..... 112	
7.3 光电式传感器的应用..... 124	
7.4 红外线传感器..... 128	
7.5 光纤传感器..... 132	
7.6 光栅传感器..... 140	
本章小结..... 145	
思考题与习题..... 145	
<b>第8章 气敏与湿敏传感器</b> ..... 147	
8.1 气敏传感器的作用及分类..... 147	
8.2 半导体气敏传感器的工作原理..... 149	
8.3 半导体气敏传感器的类型与结构..... 150	
8.4 气敏传感器的特性..... 152	
8.5 气敏传感器的应用..... 153	
8.6 气体分析仪..... 154	
8.7 湿敏传感器及其应用..... 157	
本章小结..... 162	
思考题与习题..... 162	
<b>第9章 热电式传感器</b> ..... 163	
9.1 热电偶..... 164	
9.2 热电阻..... 175	
9.3 半导体热敏元件..... 181	
本章小结..... 185	
思考题与习题..... 186	
<b>第10章 核辐射传感器</b> ..... 187	
10.1 核辐射的基础知识..... 187	
10.2 核辐射传感器的组成..... 191	
10.3 核辐射传感器的应用..... 192	
10.4 放射性辐射的防护..... 196	
本章小结..... 196	
思考题与习题..... 196	

<b>第 11 章 超声波传感器与微波传感器</b> .....	197	13.6 传感器融合研究的重点问题 .....	227
11.1 超声波传感器的工作基础 .....	197	本章小结 .....	229
11.2 超声波传感器的应用 .....	202	思考题与习题 .....	229
11.3 微波传感器的原理与应用 .....	205	<b>第 14 章 智能传感器</b> .....	230
本章小结 .....	208	14.1 智能传感器概述 .....	230
思考题与习题 .....	208	14.2 智能传感器的功能及特点 .....	231
<b>第 12 章 传感器与单片机接口技术</b> .....	209	14.3 智能传感器的实现途径 .....	233
12.1 力传感器与单片机的接口 .....	209	14.4 智能传感器系统智能化的功能实现方法 .....	234
12.2 PN 结温度传感器与单片机的接口 .....	213	14.5 智能传感器的形式 .....	235
12.3 热敏电阻传感器与单片机的接口 .....	214	14.6 智能传感器的应用 .....	236
12.4 霍尔传感器与单片机的接口 .....	215	本章小结 .....	240
12.5 主动式红外传感器与单片机的接口 .....	217	思考题与习题 .....	240
本章小结 .....	219	<b>第 15 章 传感器标定与可靠性技术</b> .....	241
思考题与习题 .....	219	15.1 传感器的静态标定 .....	241
<b>第 13 章 传感器信息融合</b> .....	220	15.2 传感器的动态标定 .....	241
13.1 传感器融合的基础知识 .....	220	15.3 传感器的可靠性技术 .....	244
13.2 人体生物传感器的融合 .....	221	15.4 传感器的可靠性管理 .....	250
13.3 数据融合系统的建模 .....	222	15.5 传感器的可靠性试验 .....	252
13.4 多传感器数据层次化融合的结构 .....	223	本章小结 .....	255
13.5 传感器融合的应用 .....	224	思考题与习题 .....	256
		<b>参考文献</b> .....	257

# 第 1 章 传感器的基础理论

## 1.1 传感器概述

传感器是人类探知自然界信息的触角。在人类文明的发展历史中，感受、处理外部信息的传感技术一直扮演着一个重要的角色。在古代，传感技术由人的感官来实现，人观天象而仕农耕，察火色而冶钢铁。从 18 世纪产业革命以来，特别是在 20 世纪信息革命中，传感技术越来越多地由人造感官，即传感器来实现。

人可以通过五种感官（视、听、嗅、味、触）接受外界的信息，经过大脑的思维（信息处理），做出相应的动作。人们常常将传感器称之为“电五官”，如果用由计算机控制的自动化装置来代替人的劳动，则计算机相当于人的大脑，而传感器相当于人的五官。人体器官是极好的传感器，例如人的手指触觉是极其灵敏的，并且具有多种功能，它可以感受物体的冷热（温度）、软硬、轻重及外力的大小。另外，它有特殊的手感，如对织物的手感、对液体粘度的手感等。但人体器官也有不足之处，在许多方面传感器的性能已经凌驾于人的感官之上。例如，传感器可以轻而易举地测量人体所无法感知的量，如紫外线、红外线、超声波、磁场等，从这个意义上讲，传感器具有人类梦寐以求的“特异功能”。另外，传感器也可以把人不能看到的物体通过数据处理变为视觉图像。CT 就是一个例子，它能把人体的内部形貌用断层图像显示出来。

在当今信息社会，传感器应用领域更加广泛，在国防、航空、航天、交通运输、能源、机械、石油、化工、轻工、纺织等所有的部门和环境保护、生物医学工程等各个方面都发挥着重要作用。例如，在工业生产中，传感器采集各种信息，起到工业耳目的作用；在铁路运输中，为了保障动车组的安全高速运行，机车的各种状态信息都需要通过传感器进行信息收集；在航空航天技术中，我国的神舟七号和目前制造的大飞机，都用了数以千计的传感器。

除了在国防、工业生产以及高科技产品中被广泛应用以外，在人们的日常生活中也处处有传感器的身影。例如，人们在高楼大厦中安装的防火系统，就是通过传感器检测火灾信息来达到自动喷水灭火的目的；人们通过在煤气灶上安装的温度传感器来达到在危险情况下自动关闭煤气阀，防止煤气泄漏的目的；人们通过在汽车安全带上安装的压力传感器来检查安全带的状态，达到提醒司机系好安全带的目的；人们通过在摩托车防盗器上安装的震动测量传感器来检查摩托车是否被移动或者碰撞，以达到保护摩托车安全的目的；人们通过在手机上安装的触摸屏来达到手写输入的目的……

可以说，目前生活中到处都有传感器的身影，传感器正以其不可替代的作用在当今科技的舞台上扮演着重要的角色。

### 1.1.1 传感器的定义

现代信息产业的三大支柱是传感器技术、通信技术和计算机技术，它们分别构成了信息

系统的“感官”、“神经”和“大脑”。传感器是信息采集的首要部件，鉴于其重要性，世界各国自 20 世纪 80 年代开始都已经将其列为重点发展的关键技术。

当前，传感器技术已受到世界各国普遍重视，并已发展成为一种专门的学科。现代科学技术不断地发展，世界正面临着—场新的技术革命，这场革命的主要基础就是信息技术，它是以极大地提高劳动生产力和工作效率为主要特征的。信息技术的关键在于信息的采集和信息处理，而信息采集主要依靠各种类型的传感器。一个自动控制系统，首先要由传感器检测到信息，才能进行自动控制。传感器的精度及其可靠性的高低，都决定着系统的性能。

国家标准 GB 7665—1987 对传感器的定义是：“能够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，通常由敏感元件、转换元件和调节转换电路组成”。“可用输出信号”通常指的是便于处理和传输的电信号；掌握被测量转换成可用输出信号的规律是人类探究传感器世界的核心任务；“转换元件和调节转换电路”要完成对初步得到的电信号进行下一步处理的工作，从而适应系统需求。

换句话说，传感器就是借助于检测元件（敏感元件）接收一定形式的信息，并按一定规律将它转换成另一种信息的装置。它获取的信息，可以是各种物理量、化学量和生物量，而转换后的信息也有各种形式。目前，将传感器获取的信息转变为电信号是最常用的一种形式。

### 1.1.2 传感器的功能及组成

#### 1. 传感器的功能

传感器的作用就是测量。没有传感器，就不能实现复杂测量；没有测量，也就没有科学技术。传感器的功能主要表现在以下几个方面。

(1) 信息收集 信息的收集指将被测量按照一定的规律转换成可用输出信号从而达到有效控制的目的。例如，在 2003 年抗击非典时期广泛使用的红外测温仪，就是利用红外传感器将人体的温度信息采集上来，从而达到测量人体温度的目的。

(2) 信号数据的转换 把以文字、符号、代码、图形等多种形式记录在纸或胶片上的信号数据转换成计算机、传真机等易处理的信号数据，或者读出记录在各种媒体介质上的信息并进行转换。例如，CD 机上的信息读出磁头就是一种传感器。

#### 2. 传感器的组成

传感器通常由敏感元件、转换元件和调节转换电路 3 部分组成。其中，敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分，转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成电信号的部分，调节转换电路是指将非适合电量进一步转换成适合电量的部分，如图 1-1 所示。当传感器的输出为标准化信号（例如电压信号范围为 0~5V，或电流信号范围为 4~20mA）时，传感器则被称为变送器。

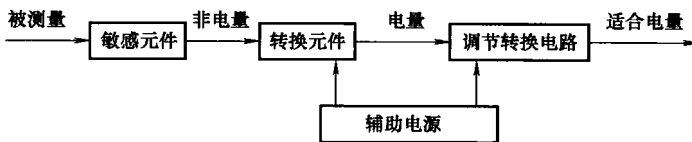


图 1-1 传感器组成



### 1.1.3 传感器的分类

传感器种类繁多,功能各异。由于同一被测量可用不同转换原理实现探测,利用同一种物理法则、化学反应或生物效应可设计制作出检测不同被测量的传感器,而功能大同小异的同一类传感器可用于不同的技术领域,故传感器有不同的分类法。常用的分类方法有如下几种。

#### 1. 根据传感器感知外界信息所依据的基本效应

(1) 基于物理效应 基于物理效应的传感器比较多,如光、电、声、磁、热等效应进行工作的物理传感器。

(2) 基于化学反应 基于化学反应的传感器,包括化学吸附、选择性化学反应等进行工作的化学传感器等。

(3) 基于酶、抗体、激素等分子识别功能 基于酶、抗体、激素等分子识别功能的传感器,包括生物传感器等。

#### 2. 按工作原理的不同

按工作原理的不同进行分类,可将传感器分为应变式、电容式、电感式、磁电式、压电式、热电式等类型。

#### 3. 根据传感器使用的敏感材料的不同

根据传感器使用的敏感材料的不同进行分类,可将传感器分为半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、金属传感器、高分子材料传感器、复合材料传感器等。

#### 4. 按照被测量的不同

按照被测量的不同进行分类,可将传感器分为力学量传感器、热量传感器、磁传感器、光传感器、放射线传感器、气体成分传感器、液体成分传感器、离子传感器和真空传感器等。

#### 5. 按能量关系的不同

按能量关系的不同进行分类,可将传感器分为能量控制型和能量转换型两大类。所谓能量控制型是指其变换的能量是由外部电源供给的,而外界的变化(即传感器输入量的变化)只起到控制的作用。如用电桥测量电阻温度变化时,温度的变化改变了热敏电阻的阻值,热敏电阻阻值的变化使电桥的输出发生变化。

#### 6. 按传感器是利用场的定律还是利用物质的定律进行分类

按传感器是利用场的定律还是利用物质的定律进行分类,可将传感器分为结构型传感器和物质型传感器。二者组合兼有两者特征的传感器称为复合型传感器。场的定律是关于物质作用的定律,例如动力场的运动定律、电磁场的感应定律、光的干涉现象等。利用场的定律做成的传感器,有电动式传感器、电容式传感器、激光检测器等。物质的定律是指物质本身内在性质的规律。例如弹性体遵从的胡克定律,晶体的压电性,半导体材料的压阻、热阻、光阻、湿阻、霍尔效应等。利用物质的定律做成的传感器,有压电式传感器、热敏电阻、光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等。

#### 7. 按是否依靠外加能源工作进行分类

按是否依靠外加能源工作进行分类,可将传感器分为有源传感器和无源传感器。有源传感器的敏感元件工作不需要外加电源,无源传感器工作时需外加电源。例如老式镇流器荧光

灯所用辉光启动器中的应变片就是无源传感器，而压电传感器就是有源传感器。

### 8. 按输出量是模拟量还是数字量进行分类

按输出量是模拟量还是数字量进行分类，可将传感器分为模拟量传感器和数字量传感器。

## 1.1.4 传感器的发展趋势

### 1. 努力实现传感器新特性

由于自动化生产程度的不断提高，研制出一批检测范围宽、灵敏度高、精度高、响应速度快及互换性好的新型传感器，以确保自动化生产检测和控制的准确性是科研发展的趋势。

### 2. 确保传感器的可靠性，延长其使用寿命

确保传感器工作可靠性的意义很直观，因为它直接关系到电子设备的抗干扰性和误动作问题。可靠性主要体现在：具有较长的使用寿命，能在恶劣的环境下工作。所以，提高传感器的可靠性，延长其使用寿命是传感器发展的又一趋势。

### 3. 提高传感器集成化及智能化的程度

集成化是实现传感器小型化、智能化和多功能化的重要保证，现已能将敏感元件、温度补偿电路、信号放大器、电压调制电路和基准电压等单元电路集成在同一芯片上。根据需要，可将大规模集成电路、执行机构与多种传感器集成在单个芯片上，以实现传感器与信息处理功能的一体化。所以，提高传感器集成化及智能化的程度是传感器发展的又一方向。

### 4. 传感器微型化

微机电系统是一种轮廓尺寸在毫米量级，组成元件尺寸在微米量级的可运动微型机电装置，其技术借助于集成电路的制造技术来制造机械装置，可制造出微型齿轮、微型电动机、泵、阀门、各种光学镜片及各种悬臂梁，它们的尺寸仅有30~100 $\mu\text{m}$ 。微机电系统与微电子技术的结合，为实现信号检测、信号处理、控制及执行机构集于一体的微型集成传感器提供了可能性，采用这种技术可以制成力、加速度、光学、化学等微型集成传感器，它们在生物、医学、通信、交通运输、军事、航天及核能利用等领域有非常重要的应用价值。由此可见，传感器微型化也是传感器发展的一个重要方面。

### 5. 新型功能材料开发

传感器技术的发展是与新材料的研究开发密切结合在一起的，可以说，各种新型传感器孕育在新材料中，例如半导体材料和新工艺的发展，促进了半导体传感器的迅速发展，研制和生产出一批新型半导体传感器。压电半导体材料促进了压电集成传感器的形成；高分子压电薄膜的出现，使机器人的触觉系统更加接近人的皮肤功能。可以预测，不久的将来，高分子材料、金属氧化物、超导体与半导体的结合材料、非晶半导体、超微粒陶瓷、记忆合金、功能性薄膜等新型材料，将导致一批新型传感器的出现。

### 6. 发展仿生物传感器

狗的嗅觉非常灵敏，蝙蝠的超声波可以测距，海豚良好的声呐系统可以发现水雷。发展以上及其他生物所具有的感觉传感器，是当前世界的新潮流。

### 7. 多传感器信息融合

多传感器信息融合是指对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理，从而产生新的有意义的信息，而这种新信息是任何单一传感器所无法获得的。

早在20世纪80年代中期,一些西方发达国家就开始广泛开展多传感器信息融合技术的研究与应用,现在已研制出“多传感器多平台跟踪情报相关处理”等近百种多传感器信息融合系统,并相继出版了多部信息融合方面的专著。国内对该领域的研究则在20世纪90年代初才开始,逐渐形成高潮,现已研制出少量的初级多传感器信息融合系统。除军事应用外,多传感器信息融合在工业、交通和金融领域都有广泛的应用。所以说,多传感器信息融合是传感器发展的一个难点。

## 1.2 传感器的基本特性

传感器的特性是指传感器的输入量和输出量之间的对应关系。通常把传感器的特性分为两种:静态特性和动态特性。

静态特性是指输入不随时间而变化的特性,它表示传感器在被测量各个值处于稳定状态下,输出与输入的关系。

动态特性是指输入随时间而变化的特性,它表示传感器对随时间变化的输入量的响应特性。

一般来说,传感器的输入和输出关系可用微分方程来描述。理论上,将微分方程中的一阶及一阶以上的微分项取为零时,即可得到静态特性。因此传感器的静态特性是其动态特性的一个特例。

传感器除了有描述输入与输出量之间的关系特性外,还有与使用条件、使用环境、使用要求等有关的特性。

### 1.2.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时,传感器的输出与输入的关系。衡量传感器静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞、重复性和零点漂移等。

#### 1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间的线性程度。通常,为了方便标定和数据处理,理想的输出-输入关系应该是线性的。但实际遇到的传感器的特性大多是非线性的,如果不考虑迟滞和蠕变等因素,传感器的输出-输入特性一般可用下列多项式表示:

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

式中, $x$ 为输入量(被测量); $y$ 为输出量; $a_0$ 为零位输出; $a_1$ 为传感器的灵敏度; $a_2$ 、 $a_3$ 、 $\cdots$ 、 $a_n$ 为非线性项的待定常数。

各项系数不同,决定了特性曲线的形状各不相同。理想特性方程为 $y = a_1x$ ,是一条经过原点的直线,传感器的灵敏度为一常数。当特性方程中仅含有奇次非线性项,即 $y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots$ 时,特性曲线关于坐标原点对称,且在输入量 $x$ 相当大的范围内具有较宽的准线性。当非线性传感器以差动方式工作时,可以消除电气元件中的偶次分量,显著地改善线性范围,并可使灵敏度提高一倍。

传感器的静态特性曲线可通过实际测试获得。在实际应用中,为了得到线性关系,往往引入各种非线性补偿环节,如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理,或采用差动结构,使传感器的输出-输入关系为线性或接近线性。但如果非线性项的方次不高,在输

入量变化范围不大的条件下, 可以用一条直线(切线或割线)近似代表实际曲线的一段, 如图 1-2 所示, 这种方法称为传感器非线性特性的线性化。所采用的直线称为拟合直线。实际特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差, 如图中  $\Delta L$  值, 取其中最大值与满量程输出之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标, 即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中,  $\gamma_L$  为线性度;  $\Delta L_{\max}$  为最大非线性绝对误差;  $Y_{FS}$  为满量程输出。

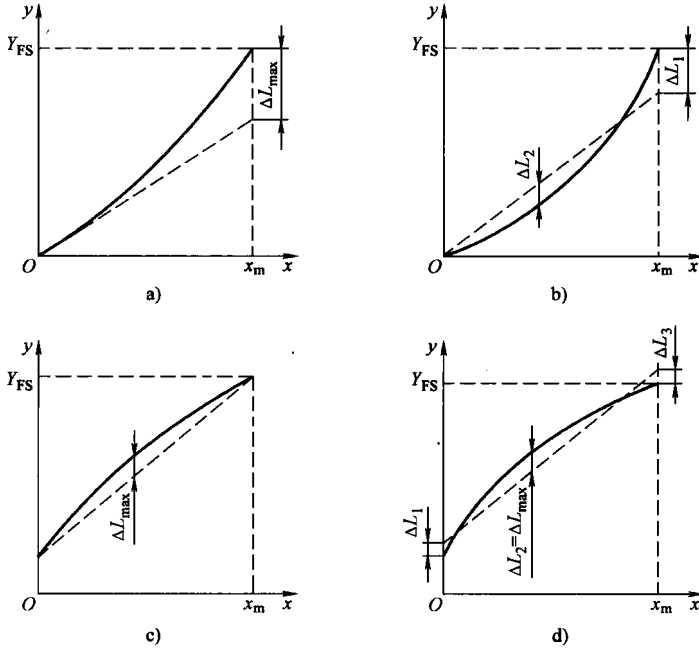


图 1-2 几种直线拟合方法

a) 理论拟合 b) 过零旋转拟合 c) 端点连线拟合 d) 端点平移拟合  
 $x$ —传感器的输入量  $y$ —传感器的输出量  $x_m$ —输入最大值

由图 1-2 可见, 非线性误差是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线计算出来的。即使是同类传感器, 基准直线不同, 所得线性度也不同。选取拟合直线的方法很多, 用最小二乘法求取的拟合直线的拟合精度最高。

## 2. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下的输出变化量  $\Delta y$  与引起此变化的输入变化量  $\Delta x$  之比, 用  $S$  表示, 即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-3)$$

传感器的灵敏度表征传感器对输入量变化的反应能力。例如, 有两个声光控开关, 其中一个在 80dB 的声音下才能感知声音的存在从而产生足够的电信号以接通电路, 另一个在 10dB 的声音下就能感知声音的存在从而产生足够的电信号以接通电路, 那么显然后一个开关的灵敏度要高一些。

对于线性传感器，灵敏度就是其静态特性的斜率，即  $S = \frac{y}{x}$  为常数；而非线性传感器的灵敏度为变量，用  $S = \frac{dy}{dx}$  表示。传感器的灵敏度如图 1-3 所示。一般希望传感器的灵敏度高，而且在满量程范围内是恒定的，即传感器的输出-输入特性为直线。

### 3. 迟滞

传感器在正（输入量增大）反（输入量减小）行程期间，其输出-输入特性曲线不重合的现象称为迟滞，如图 1-4 所示。也就是说，对于同一大小的输入信号，传感器的正反行程输出信号大小不相等。产生这种现象的主要原因是传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷。例如，弹簧在受到的拉力变大（输入量增大）时长度增加，当拉力逐渐减小（输入量减小）时长度又会变短，直至外力消失恢复原状。如果对其测量就会发现，在相同作用力的情况下，拉力逐渐增加时与拉力逐渐减小时的弹簧长度变化曲线并不相同。这种不同就是所谓的迟滞现象。

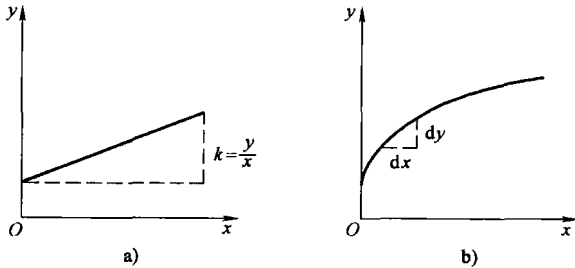


图 1-3 传感器的灵敏度

a) 线性传感器 b) 非线性传感器

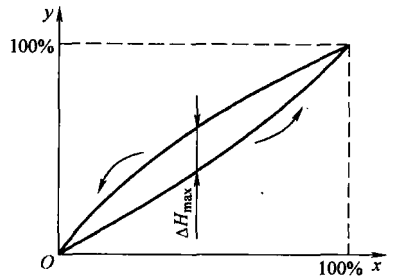


图 1-4 迟滞特性

迟滞  $\gamma_H$  的大小一般要由实验方法确定。用最大输出差值  $\Delta H_{\max}$  或其一半对满量程输出  $Y_{FS}$  的百分比表示，即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

或

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中， $\Delta H_{\max}$  为正反行程输出值间的最大差值。

### 4. 重复性

重复性  $\gamma_R$  指在同一工作条件下，输入量按同一方向做全量程连续多次变化时，所得特性曲线不一致的程度，如图 1-5 所示。重复性误差属于随机误差，常用标准偏差表示，也可用正反行程中的最大偏差表示，即

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-6)$$

或

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中， $\sigma$  为最大超调量； $\Delta R_{\max}$  为同一方向做全量程连续多次变化时，输出值的最大偏差。

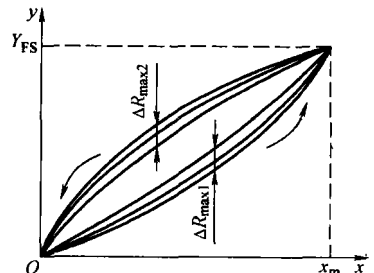


图 1-5 重复性

### 5. 零点漂移

当传感器无输入时,每隔一段时间对传感器的输出进行读数,其输出偏离零值的情况,即为零点漂移,其值为

$$\delta_0 = \frac{\Delta Y_0}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中,  $\Delta Y_0$  为最大零点偏差。

### 6. 温度漂移

温度漂移指温度变化时传感器输出值偏离程度。一般用单位温度变化时,其输出最大偏差与满量程的百分比表示,即

$$\delta_t = \frac{\Delta P_{\max}}{Y_{FS} \cdot \Delta T} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中,  $\Delta P_{\max}$  为输出最大偏差;  $\Delta T$  为温度变化范围。

## 1.2.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。由于传感器的惯性和滞后,当被测量随时间变化时,传感器的输出往往来不及达到平衡状态,处于动态过渡过程之中,所以,传感器的输出量也是时间的函数,此时,输出量与输入量之间的关系要用动态特性来表示。

例如,将数显温度计从一个温度为  $T_0$  的环境中移动到另外一个温度为  $T_1$  的环境中时,温度计的测温端(热电偶)的介质环境从  $T_0$  升至  $T_1$ ,而温度计反映出来的温度从  $T_0$  变化到  $T_1$  要经历一段时间,即温度计要经过一段时间才能反映出环境的实际温度。这就是所谓的动态误差,如图 1-6 所示。

传感器的种类和形式很多,但它们的动态特性一般都可以用下列的微分方程来描述:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-10)$$

式中,  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\cdots$ 、 $a_n$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $\cdots$ 、 $b_m$  是与传感器的结构特性有关的常系数。

研究动态特性可以从时域和频域两个方面采用时域响应法和频率响应法来分析。由于输入信号的时间函数形式是多种多样的,在时域内研究传感器的响应特性时,只能研究几种特定的输入时间函数(如阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等)的响应特性。在频域内研究动态特性一般是采用正弦函数得到频率响应特性。为了便于比较、评价或动态定标,最常用的输入信号为阶跃信号和正弦信号。因此,对应的方法为阶跃响应法和频率响应法。

#### 1. 阶跃响应

当给静止的传感器输入一个单位阶跃函数信号时,即

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-11)$$

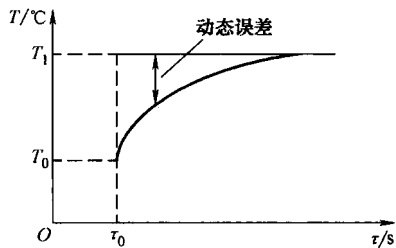


图 1-6 动态测量

其输出特性称为阶跃响应特性。为表征传感器的动态特性，常用以下几项指标来衡量阶跃响应特性，如图 1-7 所示。

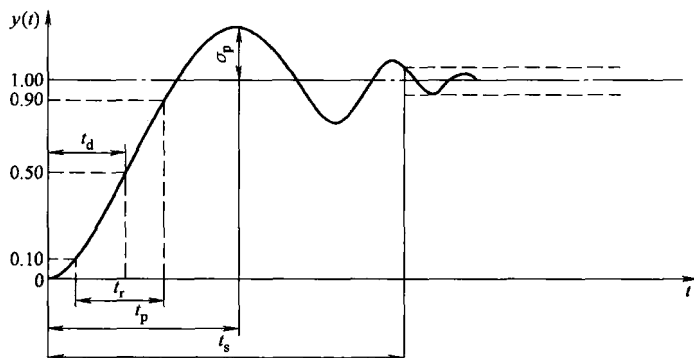


图 1-7 阶跃响应特性

- (1) 最大超调量  $\sigma_p$  指响应曲线偏离阶跃曲线（稳态值）的最大值。若稳态值为 1，则最大百分比超调量为

$$\sigma_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-12)$$

最大超调量能说明传感器的相对稳定性。

- (2) 延迟时间  $t_d$  阶跃响应达到稳态值 50% 所需要的时间。

- (3) 上升时间  $t_r$  上升时间有几种定义：

- 1) 响应曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间；
- 2) 响应曲线从稳态值的 5% 上升到 95% 所需要的时间；
- 3) 响应曲线从零到第一次到达稳态值所需要的时间。

对有振荡的传感器常用 3) 定义，对无振荡的传感器常用 1) 定义。

- (4) 峰值时间  $t_p$  响应曲线到第一个峰值所需要的时间。

- (5) 响应时间  $t_s$  响应曲线衰减到与稳态值之差不超过  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$  所需要的时间。

这些是时域响应的主要指标。对于一个传感器，并不需要把每一个指标都提出来，往往根据具体的要求只提出几个需要的性能指标就可以了。

## 2. 频率响应

在采用正弦输入研究传感器频域动态特性时，常用幅频特性和相频特性来描述传感器的动态特性，其重要指标是频带宽度，简称带宽。带宽是指增益变化不超过某一规定分贝值的频率范围。

在定常线性系统中，拉氏变换为广义的傅里叶变换，即取  $s = \sigma + j\omega$  中的  $\sigma = 0$ ，则  $s = j\omega$ ，即拉氏变换局限于  $s$  平面的虚轴，则得到傅里叶变换。

因此对式 (1-10) 的输出进行拉氏变换得

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1-13)$$

把  $s = j\omega$  代入式 (1-13) 得

$$Y(j\omega) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1-14)$$

同样有

$$X(j\omega) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1-15)$$

则

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)s^m + b_{m-1}(j\omega)s^{m-1} + \cdots + b_0}{a_n(j\omega)s^n + a_{n-1}(j\omega)s^{n-1} + \cdots + a_0} \quad (1-16)$$

$H(j\omega)$ 称为传感器的频率响应函数,简称频率响应或频率特性。很明显,频率响应是传递函数的一个特例。不难看出,传感器的频率响应 $H(j\omega)$ 就是在初始条件为零时,输出的傅里叶变换与输入的傅里叶变换之比,是在“频域”对系统传递信息特性的描述。

通常,频率响应函数 $H(j\omega)$ 是一个复变函数,它可以用指数形式表示,即

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{Y}{X} e^{j\omega} = A(\omega) e^{j\omega} \quad (1-17)$$

其中

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{Y}{X}$$

即

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2} \quad (1-18)$$

$A(\omega)$ 称为传感器的幅频特性,也称为传感器的动态灵敏度(或增益)。 $A(\omega)$ 表示传感器的输出与输入的幅值比随输入信号频率而变化的关系。

若以 $H_R(\omega) = \text{Re}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]$ ,  $H_I(j\omega) = \text{Im}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]$ 分别表示 $H(j\omega)$ 的实部和虚部,则频率特性的相位角为

$$\varphi(\omega) = \arctan\left[\frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)}\right] = \arctan\left\{\frac{\text{Im}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]}{\text{Re}\left[\frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}\right]}\right\} \quad (1-19)$$

$\varphi(\omega)$ 表示传感器的输出信号相位随频率而变化的关系。对于传感器, $\varphi$ 通常是负的,表示传感器的输出滞后于输入的相位角度,且 $\varphi$ 随 $\omega$ 变化,故称之为传感器的相频特性。

### 3. 典型环节传感器系统的动态响应分析

多数传感器输出与输入的关系均可用零阶、一阶或二阶微分方程来描述,据此可把传感器分为零阶传感器、一阶传感器和二阶传感器。下面将分别讨论这几种传感器的数学模型。

(1) 零阶传感器系统 由式(1-10)可知,由于零阶传感器的系数只有 $a_0$ 、 $b_0$ ,故零阶系统的微分方程为

$$a_0 Y(t) = b_0 X(t) \quad (1-20)$$

或

$$Y(t) = \frac{b_0}{a_0} X(t) = KX(t) \quad (1-21)$$

式中, $K$ 为静态灵敏度。

(2) 一阶传感器系统 由式(1-10)可知,一阶系统的微分方程为



$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-22)$$

或

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (1-23)$$

即

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Kx \quad (1-24)$$

式中,  $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ , 为一阶系统的时间常数;  $K = \frac{b_0}{a_0}$ , 为一阶系统的静态灵敏度。

对式(1-24)进行拉氏变换, 得

$$(\tau s + 1)Y(s) = KX(s) \quad (1-25)$$

则传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1-26)$$

频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{K}{j\omega\tau + 1} \quad (1-27)$$

幅频特性为

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} \quad (1-28)$$

相频特性为

$$\varphi(\omega) = \arctan(-\omega\tau) = -\arctan(\omega\tau) \quad (1-29)$$

当  $\omega\tau \ll 1$  时,  $A(\omega) = K$ , 说明传感器的输出与输入为线性关系, 时间常数  $\tau$  越小, 频率特性越好; 当  $\varphi(\omega)$  很小时,  $\varphi(\omega) \approx -\omega\tau$ , 所以相位差与频率  $\omega$  成线性关系, 这时测试是无失真的,  $y(t)$  能真实反应输入  $x(t)$  的变化规律。

若输入为阶跃函数, 幅值为  $A$ , 则式(1-24)的解为

$$y = KA \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (1-30)$$

由式(1-30)可知, 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $y = KA$ , 即一阶传感器系统的稳态响应输出是输入的  $K$  倍。暂态响应是一个指数函数, 当  $t = \tau$  时

$$y(\tau) = KA(1 - e^{-1}) = 0.632KA \quad (1-31)$$

此时, 响应曲线值达到稳态值的 63.2%。  $\tau$  越小, 响应曲线越接近于阶跃曲线。

(3) 二阶传感器系统 很多传感器, 如振动传感器、压力传感器等属于二阶传感器。由式(1-10)得出二阶系统的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-32)$$

或

$$\frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (1-33)$$