AR 超媒体教材
普通高等院校电子科学技术类“十四五”重点建设教材

传 感 器 技 术

（第三版）

高晓蓉　李金龙　彭朝勇　王　楠　**编**

西南交通大学出版社
·成　都·

内 容 简 介

本书以介绍传感器应用中所必需的基本技术和技能为目标，系统讲解了传感器技术的基本理论，详细阐述了各类传感器的工作原理、结构特点和测量电路，并给出了具体应用实例。全书共分 11 章，第 1 章介绍传感器的基本概念、数学模型、提高性能的措施和标定技术；第 2 章至第 4 章介绍传统的电阻、电容和电感式传感器；第 5 章至第 7 章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器；第 8 章和第 9 章介绍光电式传感器和光纤传感器；第 10 章介绍生物传感器、微传感器、智能传感器等新型传感器及多传感器系统中的数据融合技术；第 11 章为实验。

作者 2003 年及 2013 年分别编写的《传感器技术》第一版及第二版出版后，深受广大师生的欢迎，并获得西南交通大学优秀教材奖，在全国一直畅销不衰。随着传感器技术的发展以及作者近年在传感器及检测技术方面的科研经历和教学经验的丰富，作者对本书的内容进行了大量更新和补充，使得该书内容更加新颖和实用。

本书适合作为普通高等院校电子、电气及机械类专业学生的教材以及教学参考书，也可供传感器专业的相关技术人员阅读和参考。

图书在版编目（CIP）数据

传感器技术 / 高晓蓉等编. —3 版. 成都：西南交通大学出版社，2021.8
ISBN 978-7-5643-8099-1

Ⅰ. ①传… Ⅱ. ①高… Ⅲ. ①传感器－高等学校－教材 Ⅳ. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2021）第 131262 号

Chuanganqi Jishu
传感器技术
（第三版）

高晓蓉　李金龙　彭朝勇　王 楠／编

责任编辑／李华宇
封面设计／何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行
（四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼　610031）
发行部电话：028-87600564　　028-87600533
网址：http://www.xnjdcbs.com
印刷：成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸　185 mm×260 mm
印张　22　　字数　549 千
版次　2003 年 9 月第 1 版　　2013 年 2 月第 2 版　　2021 年 8 月第 3 版
印次　2021 年 8 月第 9 次

书号　ISBN 978-7-5643-8099-1
定价　49.80 元

课件咨询电话：028-81435775
图书如有印装质量问题　本社负责退换
版权所有　盗版必究　举报电话：028-87600562

第三版前言

在信息化和数字化时代背景下，随着对传感器技术新原理、新材料和新技术研究的不断深入，新品种、新结构、新应用不断涌现，智能化、可移动化、微型化、集成化、多样化已成为其重要发展趋势。

智能传感器实现多种传感功能的集成，完成信号探测、变换处理、逻辑判断、功能计算、双向通信以及自校准、自补偿、自诊断等功能。同时，通过与人工智能技术相结合，各种基于模糊推理、神经网络、专家系统的高度智能传感器成为研究热点。在克服了节点资源限制，满足网络扩展性、容错性的要求后，无线传感网络方兴未艾。特别是随着集成微电子机械加工技术的日趋成熟，更为传感器微型化发展提供了重要技术支撑。新材料技术的突破加快了新型传感器的涌现，除半导体材料、光导纤维外，有机敏感材料、陶瓷材料、超导材料、纳米材料和生物材料推陈出新，促进了生物传感器、光纤传感器、气敏传感器、数字传感器的发展。

在 2003 年第一版、2013 年第二版的基础上，第三版教材在完善原有传统传感器知识的同时，重点补充了对新型和智能化传感器的介绍。在第 2 章电阻式传感器中增加了气敏传感器、湿敏传感器；在第 5 章压电式传感器中补充了声表面波传感器和超声传感器；在第 8 章光电式传感器中涵盖了红外传感器的内容。新增加的第 10 章新型传感器，主要介绍了生物传感器、微传感器、智能传感器的原理、应用和发展趋势，同时补充了多传感器系统中的数据融合技术。

传感器技术是一门理论性和实践性都很强的学科，为此，结合编者 20 多年的“传感器技术”教学实践经验，在第三版教材中重新梳理和补充了实验内容，包括 4 个基础演示实验、4 个半自拟实验和 4 个小组课程设计实验。在团队协作的课程设计实验中，采取了基于 PBL（基于问题/项目的学习）和 TBL（基于团队的学习）的专业课教学模式，完成从“以教师为中心”到“以学生为中心”的转变，使学生成为知识的发现者。

作为一门理工科高年级的专业课程，深度挖掘和提炼“传感器技术”课程体系中所蕴含的思想价值和精神内涵是非常有必要的。为此，新版教材中融入中国高速铁路发展中的智能检测技术，列举中国高铁名片、中国基建等大国利器实例，以“润物细无声”的方式在课程中融入课程思政的内容，在潜移默化中坚定学生理想信念、厚植爱国主义情怀。

第三版教材中另一个突出特点是采用了 AR（增强现实）技术，实现了将真实世界信息和虚拟世界信息“无缝”集成，将教材内容科学直观地以视、音、图、文等电子方式展示出来，多角度、多维度地呈现教材内容，增强了学习的互动性和趣味性。结合教材内容设计制作的 60 个 AR 超媒体数字资源（42 个动画及模型、18 个微课及视频），在采用智能终端扫描教材相应位置的图片或二维码后，会呈现出传感器模型、工作原理动画及实际应用场景，让学习者身临其境地感受教材中描述的内容，激发学习兴趣，提升学习效果。

结合新工科专业人才培养要求，教材在编排上考虑了从知识维度和认知维度满足课程教学目标要求。知识技能方面，在各类传统传感器和新型传感器学习的基础上，建立传感器的基本概念，了解传感器在机器控制系统中的重要作用，理解传感器的检测原理和结构特点，掌握传感器的测量电路和典型应用。能力培养方面，针对具体检测目标需求，能够完成对传感器的选型及检测系统设计，利用掌握的传感器知识技能实现对实际场景物理量的检测和信号处理。情操培养方面，通过学习和实践，培养学生对传感器技术的兴趣、对自然科学的热爱；在团队合作的课程设计中锻炼学生的领导力，使其领会团队协作的重要性。

本书在编写过程中参阅、借鉴了有关书籍和文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的同事。

由于编者的水平和经验有限，书中难免存在不足之处，敬请广大专家、读者批评指正。

编　者

2021 年 7 月

第二版前言

传感器技术、计算机应用技术和通信技术是电子信息技术的三大主要组成部分。传感器技术是电子技术类、检测技术类和信息科学类的一门主要专业技术课，是现代科学技术中的一个重要领域。在当今的信息时代中，随着自动测控系统的发展，传感器作为信息捕捉的必要手段，对其依赖程度越来越大。传感器技术的发展推动了科学技术的进步，可以说，没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。

目前，传感器的重要性正日益为人们所认识，国内外都已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内外高校许多专业都开设了相应课程，传感器方面的教材和专著陆续问世，这些书籍在原理性与实用性、传统性与新型性，以及广度与深度上各有侧重。为适应传感器应用和发展的需要，同时达到拓宽专业面的目的，作者在多年传感器技术本科教学的基础上，结合自身的科研体会，于 2003 年编写和出版了这本教材。

针对近年来传感器新技术飞速发展的现状，本书在再版过程中精选内容，在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的前提下，以较大篇幅充实了新型传感器的内容，特别是增加了各章节中关于传感器具体应用的实例，同时补充了两个半自拟试验的内容，要求学生独立设计和完成，以锻炼学生分析问题和解决问题的实践能力。

鉴于传感器种类繁多，涉及的学科广泛，本书的重点放在原理阐述和实际应用的介绍上，既保证必要的、简明的数学推导，详细地给出物理概念，同时结合较多的应用实例，引导学生在学习本课程后，能收到举一反三、触类旁通的效果。

本书共分 10 章，除绪论和第 1 章外，传感器各章均具有一定的独立性。第 1 章概述有关传感器的基本概念；第 2 章至第 4 章介绍传统的电阻、电容和电感式传感器；第 5 章至第 7 章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器的结构、工作原理及其应用等；第 8 章和第 9 章介绍光电式传感器和光纤传感器的原理、特点、应用和发展前景；第 10 章为实验。

本书是作者结合多年来从事传感器技术教学和科研的实践体会编写而成的。在编写过程中参阅了一些国内公开发表的有关文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的同事。

由于编者的水平和经验有限，对书中的不妥之处，敬请批评指正。

编　者

2012 年 12 月

第一版前言

传感器技术（非电量测量技术）是电子技术类、检测技术类和信息科学类的一门主要的专业技术课，是现代科学技术中的一个重要领域。在当今的信息时代中，随着自动测控系统的发展，传感器作为信息捕捉的必要手段，对其依赖程度越来越大。传感器技术的发展推动了科学技术的巨大进步，可以说，没有传感器也就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器将没有现代科学技术的迅速发展。

目前，传感器的重要性正日益为人们所认识，国内外都已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一。国内高校许多专业都开设了相应课程，传感器方面的教材和专著陆续问世，这些书籍在原理性与实用性、传统性与新型性，以及广度与深度上各有侧重。为适应传感器应用和发展的需要，同时达到拓宽专业面的目的，作者在多年传感器本科教学的基础上，结合自身的科研体会，编写了这本教材。

针对近年来传感器新技术飞速发展的现状，本书通过精选内容，在不削弱传统的较为成熟的传感器基本内容的前提下，以较大篇幅充实了新型传感器的内容。鉴于传感器种类繁多，涉及的学科广泛，不可能也没有必要对各种具体传感器逐一剖析，本书的重点放在原理阐述和实际应用的介绍上，既保证必要的、简明的数学推导，详细地给出物理概念，同时结合较多的应用实例，引导学生在学习本课程后，能收到举一反三、触类旁通的效果。

为培养、锻炼学生的实践能力，在教材中还引入了实验环节，通过实验加深对基本概念的理解，进一步掌握传感器的检测方法，提高学生分析问题和解决问题的能力。本书共编排了六个实验。为达到开拓学生视野、启发思维的目的，本书设计的实验结合了科研成果（实验二、实验五），有一定的先进性和实用性，同时突出了铁路特色（实验一、实验二）和光电技术的特点（实验五、实验六）。为锻炼学生综合运用所学知识的能力，本书设计了两个半自拟实验（实验四、实验六），要求学生独立设计和完成，最大限度地锻炼学生的实践能力。

本书共分十章，除绪论和第一章外，传感器各章均具有一定的独立性。第一章概述有关传感器的基本概念；第二章至第四章介绍了传统的电阻、电容和电感类的传感器；第五章至第七章介绍压电式、热电式和磁敏式传感器的结构、工作原理及其应用等；第八章和第九章介绍光电式传感器和光纤传感器的原理、特点、应用和发展前景；第十章为实验。

本书编写过程中参阅了一些国内公开发表的有关文献，在此一并表示诚挚的谢意。同时感谢在本书编写和出版过程中给予帮助的领导、教师和同学。

由于传感器是多学科知识的综合，涉及内容多、面广，而编者的水平和经验有限，书中的疏漏及不妥之处在所难免，敬请批评指正。

编　者

2003 年 5 月

AR 超媒体数字资源索引

序号	资源名称	资源类型	页码
1	人机系统机能对应关系	微课	1
2	电气化铁路升降弓压力特性检测原理	AR 动画	3
3	电力机车受电弓升降弓时间检测原理	AR 动画	4
4	传感器的定义	微课	7
5	结构型和物性型传感器的比较	微课	9
6	大吨位电容称重传感器	AR 动画	11
7	加速度传感器模型	AR 模型	24
8	超声波流速计	AR 动画	34
9	容栅传感器	AR 动画	36
10	闭环技术	微课	39
11	应变计的横向效应	微课	58
12	电阻应变仪	微课	75
13	环形相敏检波器工作原理	AR 动画	78
14	膜片式应变压力计	AR 动画	83
15	筒形称重传感器	微课	84
16	筒形结构的称重传感器	AR 动画	85
17	应变式扭矩传感器	AR 动画	86
18	差动式变间隙型电容传感器	AR 动画	105
19	扇形平板结构差动变面积型电容传感器	AR 动画	109
20	柱面形结构差动变面积型电容传感器	AR 动画	109
21	变介质型电容传感器	AR 动画	110
22	变压器电桥电路	微课	115
23	运算放大器式电路	微课	118
24	差动式电容压差传感器	AR 动画	125
25	电容式加速度传感器	AR 模型	125
26	变气隙式自感传感器	AR 动画	130
27	差动式 E 形结构自感传感器	AR 动画	132
28	π形差动变压器结构原理	AR 动画	138
29	二极管相敏检波电路	微课	142
30	电涡流传感器工作原理	微课	144

续表

序号	资源名称	资源类型	页码
31	高频反射式电涡流传感器	AR 动画	144
32	电涡流传感器测量转速	AR 动画	149
33	电涡流阵列传感器单元线圈触发方式	AR 动画	151
34	压电陶瓷的压电机理	AR 动画	160
35	压电晶片的连接方式	微课	160
36	相控阵超声传感器的结构	AR 模型	172
37	相控阵超声传感器的波阵面形成	AR 动画	173
38	相控阵超声传感器的聚焦法则	AR 动画	173
39	采用相控阵超声探伤技术的中国高速列车轮对检测设备	AR 视频	174
40	热电偶传感器接触电势形成原理	AR 动画	193
41	热电偶冷端补偿方法	微课	199
42	热电偶冷端电桥补偿法	AR 动画	200
43	霍尔传感器测量转速	AR 动画	215
44	磁敏电阻工作原理	AR 动画	216
45	磁敏二极管工作原理	AR 动画	218
46	光生伏特效应原理	AR 动画	223
47	光位置传感器工作原理	AR 动画	233
48	色敏光电传感器	微课	235
49	光电数字转速表	AR 动画	237
50	CCD 图像传感器电荷定向转移输出	微课	243
51	CCD 图像传感器定向转移过程	AR 动画	243
52	线型 CCD 图像传感器工作过程	AR 动画	245
53	CCD 图像传感器尺寸测量基本原理	AR 动画	247
54	铁路轮对外形尺寸动态检测原理	AR 视频	250
55	铁路受电弓滑板磨耗动态检测原理	AR 动画	250
56	红外热成像原理检测钢轨缺陷	AR 动画	256
57	光纤微弯损耗光强调制原理	AR 动画	266
58	光纤波长调制与解调	微课	267
59	光纤位移传感器的光反射原理	AR 动画	270
60	无人驾驶概念车环境感知原理	AR 动画	303

目　录

绪　论 …… 1
习题及思考题 …… 6
第 1 章　传感器技术基础 …… 7
1.1　传感器的基本概念 …… 7
1.2　传感器的静态数学模型及其基本特性指标 …… 15
1.3　传感器的动态数学模型及其动态特性指标 …… 23
1.4　改善传感器性能的技术途径 …… 32
1.5　传感器的标定与校准 …… 42
习题及思考题 …… 45
第 2 章　电阻式传感器 …… 47
2.1　电位器式传感器 …… 47
2.2　电阻应变计的原理及特性 …… 55
2.3　测量电路及电阻应变仪 …… 64
2.4　电阻应变式传感器的应用 …… 80
2.5　气敏电阻传感器的原理及应用 …… 87
2.6　湿敏电阻传感器的原理及应用 …… 93
习题及思考题 …… 100
第 3 章　电容式传感器 …… 102
3.1　电容式传感器的工作原理和结构 …… 102
3.2　电容式传感器的测量电路 …… 111
3.3　电容式传感器的应用 …… 121
习题及思考题 …… 128
第 4 章　电感式传感器 …… 129
4.1　自感式传感器 …… 129
4.2　互感式传感器 …… 137
4.3　电涡流式传感器 …… 144
4.4　电感式接近传感器 …… 152
习题及思考题 …… 154

第 5 章　压电式传感器 …… 157
5.1　压电效应和压电材料 …… 157
5.2　压电式传感器的等效电路和测量电路 …… 160
5.3　压电式传感器的应用 …… 166
5.4　超声波传感器 …… 168
5.5　声表面波传感器 …… 174
习题及思考题 …… 182
第 6 章　热电式传感器 …… 184
6.1　热电阻 …… 184
6.2　热敏电阻 …… 188
6.3　热电偶 …… 192
6.4　PN 结型温度传感器 …… 202
习题及思考题 …… 204
第 7 章　磁敏式传感器 …… 206
7.1　霍尔传感器 …… 206
7.2　磁敏电阻器 …… 215
7.3　磁敏二极管和磁敏三极管 …… 217
习题及思考题 …… 220
第 8 章　光电式传感器 …… 221
8.1　光电效应 …… 222
8.2　基于外光电效应的光电器件 …… 224
8.3　基于内光电效应的光电器件 …… 226
8.4　新型光电传感器 …… 233
8.5　光电式传感器的应用 …… 235
8.6　光固态图像传感器 …… 242
8.7　红外传感器 …… 250
习题及思考题 …… 257
第 9 章　光纤传感器 …… 258
9.1　光纤传感器基础 …… 258
9.2　光纤传感器的调制技术 …… 263
9.3　光纤传感器应用举例 …… 268
习题及思考题 …… 271

第 10 章　新型传感器 …… 272
10.1　生物传感器 …… 272
10.2　微传感器 …… 279
10.3　智能传感器 …… 288
10.4　多传感器系统中的数据融合技术 …… 297
习题及思考题 …… 304
第 11 章　实　验 …… 305
11.1　基础演示实验 …… 305
实验 1-1　电位器式传感器及对接触线抬升量的测量 …… 305
实验 1-2　电阻应变式传感器及电阻应变仪的原理和使用 …… 309
实验 1-3　电涡流位移传感器的原理及其静态标定方法 …… 313
实验 1-4　光纤高低电压隔离信号传输实验 …… 317
11.2　半自拟实验 …… 320
实验 2-1　热电式传感器的温度自动控制实验 …… 320
实验 2-2　光电报警实验 …… 325
实验 2-3　热释电红外传感器探测人体 …… 330
实验 2-4　光电式传感器测速实验 …… 332
11.3　小组课程设计实验 …… 334
实验 3-1　基于红外热释电传感器的人体遥感装置设计 …… 334
实验 3-2　基于光电对射开关的列车测速装置设计 …… 335
实验 3-3　基于温度传感器的环境智能温控设计 …… 335
实验 3-4　基于超声传感器的智能小车避障设计 …… 336
参考文献 …… 337

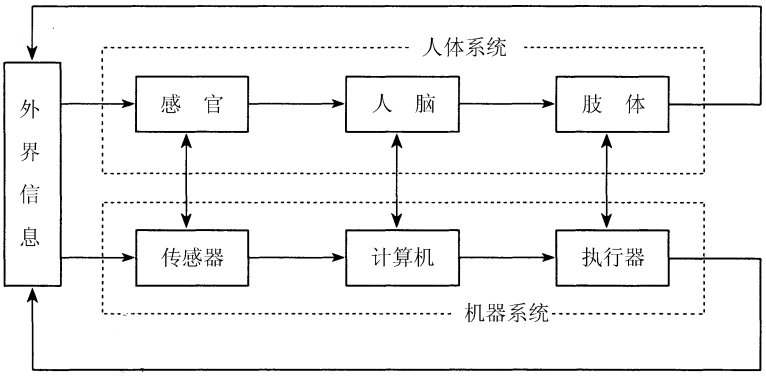
绪　论

传感器的英文是 Sensor 或 Transducer，Sensor 直译为“感觉”。

1. 人与机器系统的机能对应关系

我们知道，人类有五大感觉器官，即眼、耳、鼻、舌、皮肤，人类是通过这些感觉器官感知外界信息的。人脑对这些信息进行分析、处理，最后作出判断和反应，控制人类肢体的动作，这就是人体系统的组成。

对于机器系统而言，它包括传感器、计算机和执行器三部分。传感器是各种机械和电子设备的感觉器官，称为“机电五官”，用于感知外界信息。电子计算机对这些信息进行处理后，作出反应，控制各类执行器（如自动化机械及智能机器人等）。由此可以看到人与机器的机能对应关系，如图 0.1 所示，称为“机电五官”的传感器对应人类的五官，用于感知外界信息；计算机对应人类的大脑，用于分析和处理信息；而各种执行器则对应人类的肢体，完成各种操作和动作。



微课：人机系统机能对应关系

图 0.1　人与机器系统的机能对应关系

传感器作为“机电五官”，同人类的五官一样，能感觉到各种信息，诸如光、色、温度、压力、声音、湿度、气味及辐射等。而且，在很多方面，传感器的性能已经凌驾于人类五官之上。例如：它可以在人类无法忍受的高温、剧毒和放射性等恶劣环境下工作，还可以感知到人类五官所不能感知的量，如紫外线、红外线、超声波、磁场等。从这个意义上说，传感器具有人类梦寐以求的特异功能。其次，有些量虽然人的感官可以感受到，但是传感器的测量范围更宽、精度更高、可靠性更好。例如：在检测可见光方面，人眼的视觉残留约为 0.1 s，而光敏晶体管的响应时间可短到纳秒量级；人眼的角分辨率为 1′，而光栅测距的精确度可达

1″；激光定位的精度在月球与地球距离（3.8×10^5 km）范围内可达 10 cm 以内，这些都是人类五官所远远不能及的。最后，传感器可以把人所不能看到的物体通过数据处理变为视觉图像，CT（计算机断层扫描）就是一个典型的例子，它能把人体的内部组织形貌用断层图像显示出来。

2. 传感器的主要应用

图 0.2 给出了传感器的主要应用领域及相对需要量。其中，横轴列出的是传感器主要应用领域，纵轴是传感器的相对需要量。相对需要量大于 70 的应用领域有：信息处理、科技测试、设备控制、机器人、汽车、环境污染、医疗、防火、光能利用等。

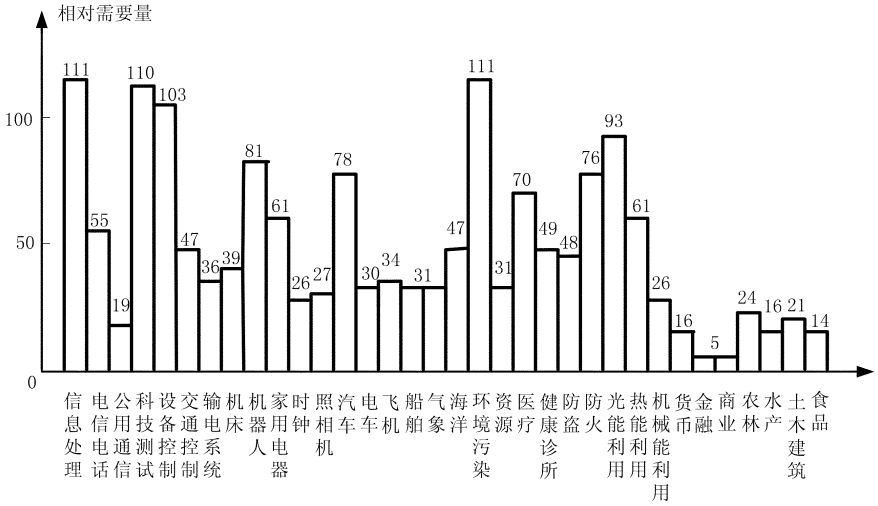


图 0.2　传感器的主要应用领域及相对需要量

由此可见，从太空探测到海洋开发，从各种复杂的工程系统到日常生活的衣食住行，几乎每一个现代化的项目，都离不开各种各样的传感器。可以这样说，没有传感器就没有现代化的自动测量和控制系统，没有传感器就没有现代科学技术的迅速发展。

【例 0.1】　化工产品自动化生产过程。

如图 0.3 所示，在化工产品自动化生产过程中，首先在进料时要对大吨位的原料进行自

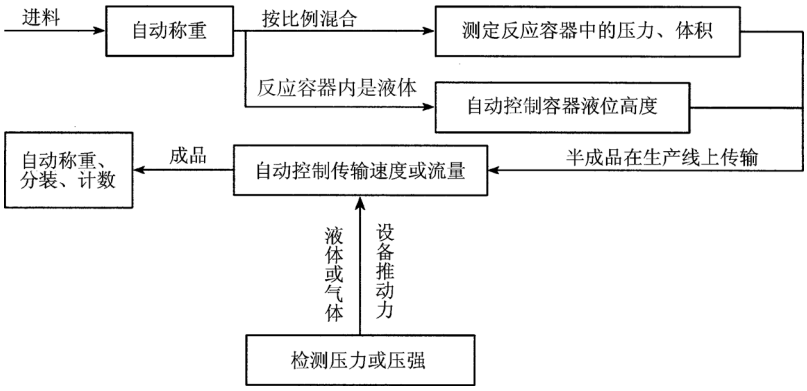


图 0.3　化工产品自动化生产过程

动称重，分析原料成分或浓度，使它们按比例混合。混合后，在反应容器中自动反应，又必须测定反应容器中的压力或体积，以保证和监测反应的顺利和正常进行。如果是液体，则需要自动控制容器液位高度。然后，半成品在生产线（管道）中传输，需要自动控制传输速度或流量，则必须使用液动或气动设备以产生推动力，因而要检测压力或压强……最后，成品进行自动分装、称重、计数等。

所有这些环节，都需要使用各种传感器对相应的参数进行检测和控制，使设备或系统自动、正常地运行在最佳状态，保证生产的高效率和高质量。

【例 0.2】 电力机车入库受电弓状态自动检测。

电气化铁路电力机车的牵引方式是非自给性的，电能是通过电力机车车顶受电弓滑板与接触网导线的滑动接触而取得的。因此，弓网关系是电气化铁路的主要特点之一，受电弓的性能直接影响电力机车的受流特性，因此对受电弓的检测非常必要。

图 0.4 是受电弓压力特性的检测原理。图 0.4（a）中，机车入库后，检测设备自动定位到受电弓的位置，通过安装在装置前端的应变式压力传感器，在匀速升弓和降弓过程中检测压力的变化，并给出随高度位置变化的升弓、降弓压力曲线和压差变化。而图 0.4（b）是列车通过式受电弓压力检测原理。

扫描下图可浏览 AR 资源——电气化铁路升降弓压力特性检测原理。

（a）定点式升降弓压力特性检测原理　　（b）通过式受电弓压力检测原理

图 0.4　受电弓压力特性的检测原理

图 0.5 是受电弓升降弓时间的检测原理。系统采用反射式光电传感器，自动检测受电弓从升弓位置到降弓位置的降弓时间以及从降弓位置到升弓位置的升弓时间。

【例 0.3】 航天器。

为使航天器按预先设计好的轨道正常运行，需控制航天器的飞行参数和姿态，并监测发动机的工作状态，这就需要利用多种传感器进行检测，将传感器获取的各种信号送到各类测量仪表和自动控制系统进行自动调节，使航天器正常运行。

扫描下图可浏览 AR 资源——电力机车受电弓升降弓时间检测原理。

图 0.5　电力机车受电弓升降弓时间的检测原理

从现代机器系统的组成就可以看到，传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节，如果没有传感器对原始信息进行精确、可靠的捕获和转换，那么，一切测量和控制都是不可能实现的。因此，传感器在工业检测与自动控制系统、汽车、家用电器、机器人、医疗及人体医学、环保、航空及航天、遥感技术及军事技术领域等方面都有重要的应用。

3. 传感器的地位和重要性

1）现代测量与自动控制的首要环节

传感器是信息采集系统的首要部件，是计算机的“五官”，如果没有传感器对原始信息进行精确、可靠的捕获和转换，一切测量和控制都是不可能实现的。

2）衡量国家综合实力的重要标志

传感器与传感器技术的发展水平是衡量一个国家综合实力的重要标志，也是判断一个国家科学技术现代化程度与生产水平高低的重要依据。

3）现代信息产业的三大支柱

现代信息产业的三大支柱为：传感器技术、计算机技术、通信技术。其中，传感器技术既是现代信息产业的源头，又是信息社会赖以存在和发展的物质与技术基础。

如果没有高度保真和性能可靠的传感器，没有先进的传感器技术，信息的准确获得与精密检测就成了一句空话，通信技术和计算机技术也就成了无源之水、无本之木，现代测量与自动化技术随之变成水中之月、镜中之花。

4）各国政府高度重视

日本科学技术厅把传感器技术列为六大核心技术（计算机、通信、激光、半导体、超导和传感器）之一。日本政府还在 21 世纪技术发展中将传感器列在前位。美国将“传感器及信

号处理”列为对国家安全和经济发展有重要影响的关键技术之一。欧洲各国把传感器技术作为优先发展的重点技术。我国政府在“863”计划及重点科技攻关项目中，均把传感器列在重要位置。

4. 传感器的发展方向

在人类全面进入信息化、数字化的时代，随着探知领域和探索空间的拓展，人们需要获得的信息种类日益增加，要求加快信息传递的速度和增强信息处理的能力，因而要求与此相对应的核心技术必须跟上人类信息化飞速发展的需要。因此，传感器领域的主要技术将在现有基础上延伸和提高，并加速新一代传感器的开发和产业化，主要表现在对新理论的探讨、新技术的应用、新材料和新工艺的研究。

1）努力实现传感器的新特性

努力研制出检测范围宽、灵敏度高、精度高、响应速度快、互换性好的传感器。

2）确保传感器的可靠性，延长其使用寿命

确保传感器可靠性的意义很直观，因为它直接关系到系统的误动作和抗干扰的问题。传感器的可靠性主要体现在：具有较长的使用寿命，且能在恶劣的环境下工作。

3）提高集成化和功能化程度

提高集成化与功能化程度就是要在同一芯片上集成传感器、各种电路（温度补偿电路、信号放大电路等），构成集成化传感器。更进一步，将执行机构和多种传感器也集成在单个芯片上，以实现传感器的多功能化以及信息处理一体化。

4）微型化

微机电系统（MEMS）是一种轮廓尺寸在毫米量级、元件尺寸在微米量级的可运动的微型机电装置。微机电系统技术借助集成电路的制造技术来制造机械装置，可制造出微型的执行机构，如齿轮、电机、泵、阀门、悬臂梁、光学镜片等。目前已开发出的微型集成传感器有力、压力、加速度、化学传感器等。微机电系统技术的出现是传统机械加工技术的巨大变革，采用微机电系统制作的微传感器和微系统，具有微体积、低成本、高可靠性等独特的优点。

5）新型功能材料的开发

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之中。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，从而研制和生产出一批新型的半导体传感器；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，使机器人触觉传感器更接近人的皮肤。

新型敏感材料将加速开发，纳米材料和技术的发展，微电子、光电子、生物化学、信息处理等各学科、各种新技术的相互渗透和综合利用，可望研制出一批新颖、先进的传感器，

如新一代光纤传感器、生物传感器、诊断传感器、超导传感器、焦平面阵列红外探测器、智能传感器以及模糊传感器等。

应该承认，人的感官在许多方面仍然优于传感器，如零维探测与多维感知、单功能与多功能、微分与积分、非智能与智能等。人与传感器之所以具有这些差别，主要是因为人脑的作用。人脑具有学习功能，不仅能学习新知识，还能把过去学到的知识加以组织利用。人脑的分析判断能力是过去无数经验的综合，人脑可以处理不完全的、模糊的信息。因此，传感器技术发展的总趋势是小型化、集成化、多功能化、智能化和系统化。传感器将从仅具有单纯判断功能发展到具有学习功能，最终发展到具有创造能力。其表现如下：

① 传感器的多功能化。传感器的多功能化经历了以下几个阶段：最初是孤立的传感器件，只能检测单一的量；后来把多个不同功能的传感器集成在一起，可以检测多种量；目前传感器的多功能化进展处于把电子线路与传感器集成在一起，能够实现信号处理，以及加上机械结构，使之具有执行功能，甚至把能源也集成在一起，实现有源、智能、多功能传感器系统的应用。

② 向模糊识别方向发展。从传感器的模式看，微观信息由人工智能完成，感觉信息由神经元完成，宏观信息由模糊识别完成。以往传感器的局限性在于它只见树木不见森林，只见微观不见宏观，未来的神经元加模糊识别传感器将既见树木又见森林。

③ 由经典型向量子型转化。以往的传感器由于尺寸大，可以用经典物理很好地描述。随着传感器尺寸的微型化，量子效应将日渐起到支配作用。从波动理论来看，当尺寸大的时候光波发挥作用，在量子效应起支配作用的范围内，电子波（德布罗意波）将发挥作用。在将来，把两种波统一在一起的统一波（Union Wave）将用以揭示传感器的工作规律。

④ 由数字传感器向模拟传感器发展。目前传感器的转换原理是数字方式的。数字方式的含义并不是说检测量与输出量是数字编码形式，而是指它的检测方式是检测时间轴上的一点（瞬间），空间轴上的一点（零维），是单一检测量。未来的传感器将在时间上实现广延，空间上实现扩张（多维），检测量实现多元，检测方式实现模糊识别。从这个意义上讲，传感器的识别方式将由数字方式向模拟方式发展。

习题及思考题

1. 传感器是物物相连的物联网 IoT 技术的基础环节，物联网技术的发展对传感器会提出哪些需求？

2. 传感器是机器系统的感觉器官，举例说明某一传感器优于人体感觉器官的性能，使机器系统可以更好地感知世界。

3. 汽车可以通过安装 GPS 定位，但当汽车行驶在隧道中、高架桥以及地下车库时，会失去 GPS 信号，这时候可以通过什么传感器给出汽车的具体位置？

4. 传感器向着智能化方向发展需要具备哪些功能特点？

5. 结合高端芯片制造，谈谈你对集成微型智能传感器发展中涉及的光刻技术的认识。

第 1 章

传感器技术基础

在学习各类具体的传感器之前，首先应掌握传感器技术的基础知识。这一章主要包括以下几方面的内容：

① 传感器的基本概念；

② 传感器的静态数学模型和基本特性指标；

③ 传感器的动态数学模型和基本特性指标；

④ 改善传感器性能的技术途径；

⑤ 传感器的标定与校准。

1.1 传感器的基本概念

微课：传感器的定义

1. 传感器的定义

何谓传感器？至今国内外尚无统一定义。由绪论中的介绍知道，人类的五官是天然的传感器，而在工程技术领域里，可将传感器看成是人体五官的工程模拟物。于是，可以将传感器定义为：把特定的被测量信息按一定规律转换成某种可用信号输出的器件或装置。

传感器首先是一种测量器件或装置，它的作用是测量。例如，发电机是不是传感器？我们知道，发电机是将机械能转换为电能的一种装置，它为人类提供电能，但不是用于测量的，所以发电机仅作为发电设备时，不是传感器。但是，当通过发电机发电量的大小来测定调速系统机械转速时，发电机可看作是一种用于测量的传感器，称之为测速发电机，或叫作发电机测速传感器。

传感器定义中所谓的“特定的被测量信息”，一般是指非电量，这种非电被测量主要包括物理量、化学量和生物量等。

表征物质特性或其运动形式的参数很多，总的可分为电量和非电量两大类。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、质量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度、酸碱度等。

人们在科学试验和生产活动中，需要对这些电量和非电量进行测量。采用一般电工仪表

和电子仪器可测量电信号，而在众多的实际测量中，大多数是对非电量的测量，传感器技术就是一种对非电量进行测量的技术。

传感器定义中提到的“可用信号”是指便于处理、传输的信号，就目前的科技发展水平而言，这种便于处理、传输的“可用信号”就是电信号。因此，有时也将传感器狭义地定义为“把外界非电量信息转换成与之有确定对应关系的电量输出的器件或装置”。当然，我们可以想象，随着光技术的不断发展，当人类跨入光子时代，光信号将成为最便于处理和传输的信号。那时，传感器的概念就将随之发展成为：“把外界信息按一定规律转换成光信号输出的器件。”所以，传感器的概念是一个发展的概念，它将随着科学技术的不断进步而发展。这也是传感器没有一个确定、统一定义的原因。

传感器起到的是一个“转换”作用，因此传感器也叫作变换器、换能器或探测器。一般情况下这些提法不会矛盾，可以等同，但在不同的技术领域中，有着不同的技术术语。在非电量电测技术中，传感器一词是和工业测量联系在一起的，即实现非电量转换成电量的器件称之为传感器。当传感器输出的电信号为标准输出信号时，也称为变送器。

在水声和超声波等技术中，强调的是能量的转换，如压电元件可以起到机-电或电-机能量的转换作用，所以把这种进行能量转换的器件称之为换能器；对于硅太阳能电池来说，也是一种换能器件，它将光能转换成电能输出，但在这类器件上强调的是转换效率，习惯上叫转换器。

2. 传感器的物理定律

这里所说的传感器的物理定律，是指在传感器的设计和使用过程中所必须遵循的物理定律，它们都是物理学的基本定律，可分为四大类：守恒定律、统计法则、场的定律和物质定律。

1）守恒定律

守恒定律表示物理量随着空间和时间的移动，其总量保持不变的定律，包括能量守恒、动量守恒和电荷守恒等定律。传感器与被测量之间能量转换时必须遵守守恒定律。

2）统计法则

统计法则是分子、原子、电子等运动的微观世界与能被直接观察的宏观世界相结合的定律，如热力学第二定律。这些统计法则常与传感器的工作状态有关。

3）场的定律

场的定律描述电场、磁场、物质场、重力场等在空间和时间上的变化规律。这些变化规律可由物理方程给出，这些物理方程可作为传感器工作的数学模型。例如，利用静电场定律研制的电容式传感器，利用电磁感应定律研制的电感式传感器等。利用场的定律构成的传感器称为结构型传感器。

4）物质定律

物质定律表示各种物质本身内在客观性质的定律，如胡克定律（$F=kx$）、欧姆定律

（$U=R\cdot I$）等。这些客观性质常用表示物质固有性质的物理常数加以描述，常数的大小决定着传感器的主要性能，如胡克定律中的弹性系数 k 和欧姆定律中的电阻 R。利用半导体物质法则——压阻、热阻、光阻、湿阻等效应，可分别做成压敏、热敏、光敏、湿敏等传感器件。基于物质定律构成的传感器称为物性型传感器。

【例 1.1】 举例说明结构型传感器和物性型传感器的区别。

结构型传感器是遵循场的定律构成的传感器，而物性型传感器是基于物质定律构成的传感器，如电容式传感器就是利用静电场定律研制的结构型传感器，而压敏传感器则是利用半导体材料的压阻效应制成的物性型传感器。下面对电容式传感器和压敏感器进行比较。

微课：结构型和物性型传感器的比较

电容式传感器由固定极板和活动极板组成，如图 1.1 所示。设极板间距为 d，极板的有效长度为 l，极板宽度为 b，则极板面积为 $l\cdot b$，这样一个电容器的电容为

$$C_0=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r lb}{d} \tag{1.1}$$

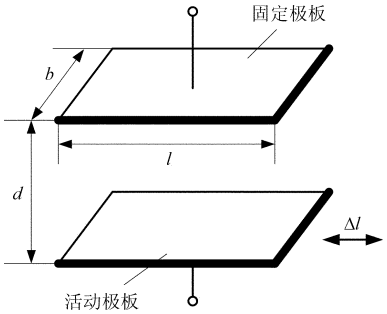


图 1.1 电容式传感器

当电容式传感器的活动极板发生位移Δl 时，电容器的极板有效面积将减小为 $(l-\Delta l)b$，这时，电容器的电容变为

$$C=C_0-\Delta C=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r(l-\Delta l)b}{d} \tag{1.2}$$

化简得

$$\frac{\Delta C}{C_0}=1-\frac{l-\Delta l}{l}=\frac{\Delta l}{l} \tag{1.3}$$

则输出灵敏度为

$$S=\frac{\Delta C}{\Delta l}=\frac{C_0}{l}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r b}{d} \tag{1.4}$$

由此我们看到，对于电容式传感器，它的输出灵敏度是由极板的尺寸 b、极板间距离 d、极板间介质的性质ε_r决定的，而与构成传感器的具体物质（极板材料）无关。

压敏传感器是利用半导体材料的压阻效应制成的。所谓的“压阻效应”，是指对半导体材料施加压应力时，材料除产生变形外，其电阻率ρ也要发生变化，如图 1.2 所示。这里，电阻率ρ的变化情况除与外加压应力的大小有关外，还与半导体材料的性质有关。例如，在构成压敏传感器的半导体硅片中，掺入不同种类的杂质（硼或磷），或者掺入杂质的浓度不同，都会使压敏传感器的特性受到决定性的影响。因此，对于压敏传感器这类物性型传感器来说，其特性与构成传感器的物质的性质有密切关系。

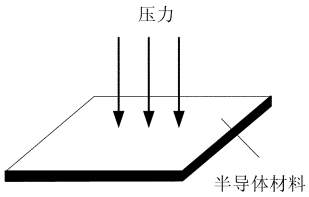


图 1.2 压阻效应

通过比较可以看出，结构型传感器的特性主要由其结构参数决定，与构成传感器的物质的性质无关，而物性型传感器的特性则主要由构成传感器的物质的性质决定。一般来说，结构型传感器的性能由于与物质的性质无关，因此性能稳定，不

易受环境温度的影响。目前，结构型传感器在工业测量等方面应用广泛，但制造性能良好的结构型传感器，需要很高的技术水平，成本较高。与此对照，物性型传感器却随着半导体技术和物性物理学的飞速发展正迅速地发展起来。这种物性型传感器与集成电路（IC）的生产一样，随着产量的增大，成本显著降低。物性型传感器是今后传感器的发展方向之一，所占的比例将不断增大。

3. 传感器的组成

传感器由敏感元件、传感元件和其他辅助部件组成，如图 1.3 所示。

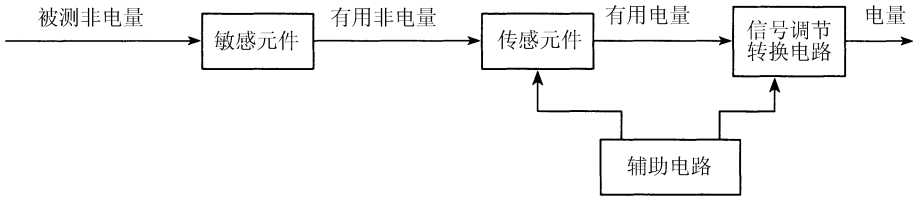


图 1.3　传感器的组成框图

- 敏感元件：直接感受被测非电量，并按一定规律转换成与被测非电量具有确定关系的有用非电量。
- 传感元件：又称变换器，将敏感元件输出的有用非电量直接转换成电量。
- 信号调节与转换电路：把传感元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理和控制的有用电信号。
- 辅助电路：包括电源等环节。

对于结构型和物性型传感器而言，其传感器的组成是不同的。对于物性型传感器，其组成环节比较简单，如图 1.4 所示。它没有敏感元件，传感元件能直接感受被测非电量而输出电量。例如，对于半导体压敏传感器，被测非电量“压力”作用在传感元件上时，传感元件直接将它转换为电阻（率）的变化，即直接转换成了有用电量输出。

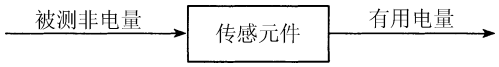


图 1.4　物性型传感器的组成框图

结构型传感器一般包括敏感元件和传感元件两个环节，即被测非电量通过敏感元件转换为有用非电量，再由传感元件转换为有用电量输出，如图 1.5 所示。

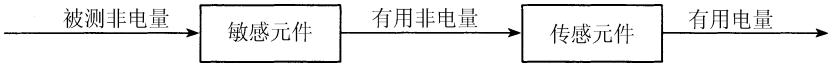


图 1.5　结构型传感器的组成框图

【例 1.2】　大吨位电容式称重传感器。

大吨位电容式称重传感器基于电容式传感器原理，结构如图 1.6 所示，它由定极板、动极板、弹性体、极板绝缘体等部分组成。设极板间距为 d，则传感器的初始电容为 $C_0=\dfrac{\varepsilon_0\varepsilon_r A}{d}$，

A 为极板有效面积。这种大吨位称重传感器一般埋于地下，当载重车辆在上面经过时，弹性体受压力作用而产生形变，反应为动极板的上下位移，导致极板间距离减小为 d'，电容量也发生相应的变化，变为 $C'=\dfrac{\varepsilon_0\varepsilon_r A}{d'}$。

这里，被测非电量为外界压力，弹性体则作为敏感元件，将外界压力转换为电容器极板间距离的变化，这是一个有用非电量，然后，再经电容传感器这个传感元件，将其转换为有用电量（电容量 C）输出。

扫描下图可浏览 AR 资源——大吨位电容称重传感器。

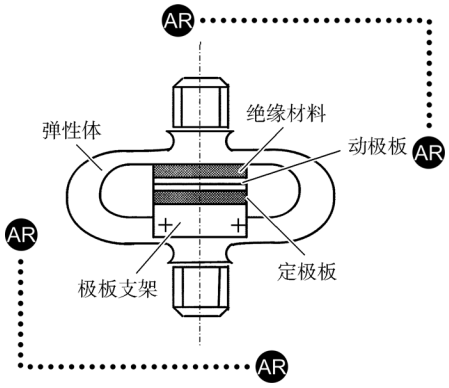


图 1.6　大吨位电容式称重传感器

实际上，传感器的具体构成方法，根据被测对象、转换原理、使用环境及性能要求等具体情况不同，有很大差异。从能量角度分析，典型的传感器构成方法有三种，即自源型、带激励源型和外源型。前两者属于能量转换型传感器，也称为有源型传感器；后者是能量控制型传感器，也称为无源型传感器。

1）自源型

自源型是最简单、最基本的传感器构成形式，如图 1.7 所示，只含有转换元件。自源型传感器的特点是不需要外能源，其转换元件能从被测对象直接吸取能量，并转换成电量输出，但输出电量较弱。例如，热电偶、压电器件等都属于自源型传感器。

【例 1.3】　热电偶传感器。

图 1.8 是热电偶传感器的原理示意图。热电偶是利用热电效应构成的传感器，即将两种不同性质的导体 A、B 组成回路，若节点（1）、（2）处于不同温度时，即 $T\neq T'$，两者间将产生热电势，回路中形成电流，电流的大小与两节点的温度差有关。

这里，被测量是节点温度，热电偶传感器将被测温度场的能量（热量）直接转换成电量的输出，并不需要其他外能源。因此，它是一种自源型传感器，属于能量转换型传感器。

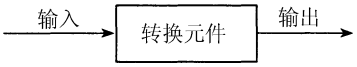


图 1.7　自源型传感器的构成

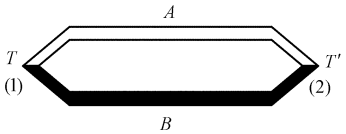


图 1.8　热电偶传感器的原理示意图

2）带激励源型

带激励源型传感器由转换元件和辅助能源两部分组成，如图 1.9 所示。这里的辅助能源起激励作用，可以是电源或磁源。它的特点是不需要变换电路即可有较大的电量输出。例如，磁电式传感器、霍尔电磁式传感器等都属于带激励源型传感器。

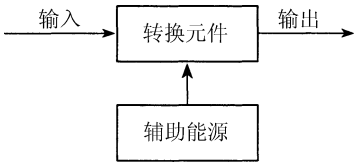


图 1.9　带激励源型传感器的构成

【例 1.4】　霍尔电磁感应式传感器。

图 1.10 所示霍尔电磁感应式传感器是依据霍尔效应制成的。所谓霍尔效应，是指将一载流导体放在磁场中，如磁场方向（z 方向）与电流方向（x 方向）正交，则在与磁场和电流两者都垂直的方向上（y 方向），将会出现横向电势，即霍尔电势，其大小为

$$U_{\mathrm{H}} = K_{\mathrm{H}} \cdot I \cdot B = \frac{R_{\mathrm{H}}}{d} \cdot I \cdot B \tag{1.5}$$

式中　K_{H}——霍尔灵敏度；

R_{H}——霍尔系数；

d——霍尔元件的厚度。

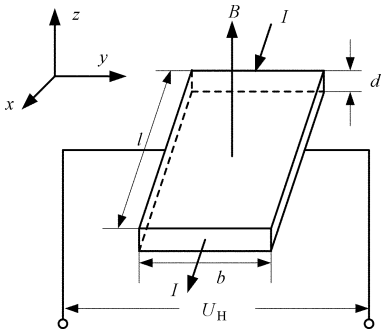


图 1.10　霍尔效应示意图

由此可见，对于霍尔电磁感应式传感器，假设被测量为外加磁场，则转换元件（霍尔传感器）需在辅助能源（激励电流）的作用下，将磁场的变化转换为电量（霍尔电势 U_{H}）的输出。它是一种带激励源型传感器，仍属于能量转换型传感器。

【例 1.5】　磁电式传感器。

图 1.11 所示磁电式传感器是根据电磁感应定律制成的。“电磁感应定律”是指，变化的磁场产生电场，即当 W 匝线圈在均恒磁场中运动时，设通过线圈的磁通为 Φ，则线圈内产生的感应电势 e 与磁通变化率 $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ 的关系为

$$e = -W\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{1.6}$$

根据电磁感应定律，可以制成磁电式传感器。

磁电式传感器由永久磁铁、线圈和动铁芯等部分组成。永久磁铁和线圈固定不动，当动铁芯上下移动时，使永久磁铁和动铁芯之间的气隙δ变化，同时，磁路磁阻也发生变化，引起线圈内磁通的变化，即$\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$变化，这样，在线圈中将产生感应电势。这里，被测量是动铁芯上下移动的距离，辅助能源是永久磁铁与动铁芯构成的磁源，磁电式传感器在辅助能源（磁源）的激励下，将被测量（气隙δ的变化）转换为线圈感应电势输出。因此，这种磁电式传感器属于带激励源型传感器，是一种能量转换型传感器。

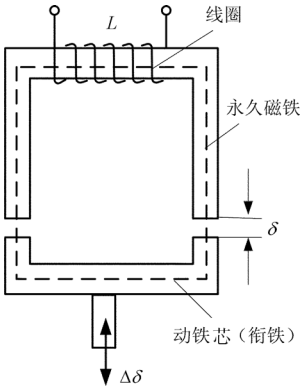


图 1.11　磁电式传感器原理示意图

3）外源型

外源型传感器由转换元件、变换电路和外加电源组成，如图 1.12 所示。这里的“变换电路”是指信号调理与转换电路，把转换元件输出的电信号，调理成便于显示、记录、处理和控制的可用信号，例如，电桥、放大器、振荡器、阻抗变换器及脉冲调宽电路等。可见，外源型传感器必须通过带外电源的变换电路，才能获得有用的电量输出，这与前面介绍的属于能量转换型的自源型、带激励源型传感器显然不同，外源型传感器是一种能量控制型传感器。

实际使用中的传感器，其特性会受到环境变化的影响。为消除环境干扰的影响，目前广泛采用的线路补偿法有三种构成形式，即相同传感器的补偿型、差动结构补偿型和不同传感器的补偿型。

相同传感器的补偿型如图 1.13 所示，采用两个完全相同的转换元件，并置于同一环境中。其中一个转换元件接收输入信号并接受环境影响，另一个只接受环境影响，然后，通过线路，使后者消除前者环境干扰的影响。这种方法在应变式传感器中常被采用。

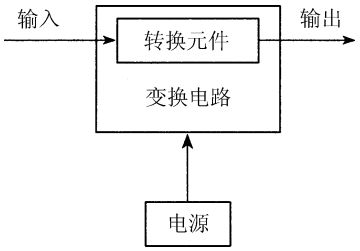


图 1.12　外源型传感器的构成

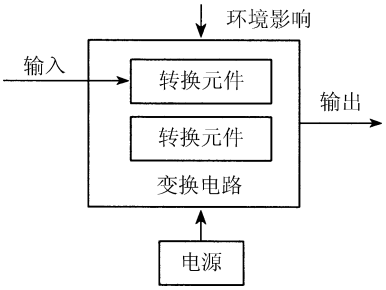


图 1.13　相同传感器补偿型的构成

差动结构的补偿型如图 1.14 所示，采用两个完全相同的转换元件，它们同时接收被测输入量，并置于同一环境中。但两个转换元件对被测输入量作反向转换，对环境干扰量作同向转换，这样，通过测量电路，使有用输出量增加，干扰量相互抵消。

不同传感器的补偿型如图 1.15 所示，转换元件 1 和 2 是两个性质不同的转换元件，转换元件 2 接收输入信号，并已知其受环境影响的特性，转换元件 1 接受环境影响，并通过电路向转换元件 2 提供等效的抵消环境影响的补偿信号。

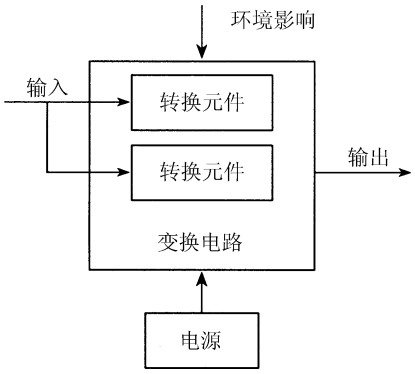


图 1.14　差动结构补偿型的构成

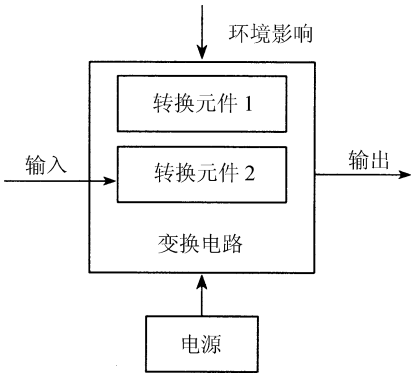


图 1.15　不同传感器补偿型的构成

4. 传感器的分类

传感器的种类很多，同一原理的传感器，可以同时测量多种非电量，而同一种被测量，又可以用几种不同的传感器来测量，因此，传感器的分类方法很多。了解传感器的分类，旨在加深理解，便于应用。

（1）按输入物理量的性质分类

根据输入量的性质进行分类，是以输入物理量命名的，比较明确地指出了传感器的用途，便于使用者选用，如位移传感器、速度传感器、温度传感器等。同时，这种分类方法将种类繁多的物理量分为两大类，即基本物理量和派生物理量。例如，将“力”视为基本物理量，可派生出压力、重量、应力、力矩等派生物理量，当我们需要测量这些派生物理量时，只要采用基本物理量传感器就可以了。所以，了解基本物理量和派生物理量的关系，对选用传感器是很有帮助的。表 1.1 给出的是常用的基本物理量和派生物理量。

表 1.1　常用的基本物理量和派生物理量

基本物理量		派生物理量
位　移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、不平度
	角位移	旋转角、偏转角、角振动
速　度	线速度	速度、振动、流量、动量
	角速度	转速、角振动
加速度	线加速度	振动、冲击、质量
	角加速度	角振动、扭矩、转动惯量
力	压　力	重量、应力、力矩
时　间	频　率	周期、计数、统计分布
温　度		热容量、气体速度、涡流
光		光通量与密度、光谱分布

按输入物理量进行传感器分类的方法，将原理不同的传感器归为一类，不易找出每种传感器在转换机理上的共性和差异，因此，不利于掌握传感器的一些基本原理和分析方法。

（2）按工作原理分类

按工作原理分类是以传感器对信号转换的作用原理命名的，如应变式传感器、电容式传感器、压电式传感器、热电式传感器等。这种分类方法较清楚地反映出了传感器的工作原理，有利于对传感器进行深入研究分析。本书就是采用这种分类方法，从而进行结构编排的。

（3）按能量关系分类

根据能量关系分类，可将传感器分为能量转换型和能量控制型。前面介绍的自源型和带激励源型传感器属于能量转换型传感器，其传感器的输出量直接由被测输入量的能量转换而得，又称为有源传感器。外源型传感器的输出量能量必须由外加电源供给，只是受被测输入量的调节和控制，是能量控制型传感器，又称为无源传感器。

（4）按输出信号的性质分类

根据输出信号为模拟信号或数字信号，可将传感器分为模拟式和数字式。数字式传感器便于与计算机联网，且抗干扰性较强，如光栅传感器等。

（5）按构成原理分类

按构成原理不同，可将传感器分为结构型传感器和物性型传感器。结构型传感器是以其转换元件结构参数的变化实现信号转换的，而物性型传感器是以其转换元件物理特性的变化而实现信号转换的。

（6）按构成传感器的功能材料分类

按构成传感器的功能材料不同，可将传感器分为半导体传感器、陶瓷传感器、光纤传感器、高分子薄膜传感器等。

（7）按某种高新技术命名的传感器分类

有些传感器是根据某种高新技术命名的，如集成传感器、智能传感器、机器人传感器、仿生传感器等。

1.2　传感器的静态数学模型及其基本特性指标

根据传感器的定义，传感器感受被测输入量，并将感受到的被测输入量，按一定的规律输出为有用信号。因此，我们有必要研究传感器的输入-输出关系，来指导传感器的设计、制造、校准及使用。

描述传感器输入-输出关系的方法有两种：一是传感器的数学模型，二是传感器的各种基本特性指标。两者都可用于描述传感器的输入-输出关系及其特性。在设计、研究传感器时，常常用到传感器的数学模型来准确完整地反映传感器的输入-输出特性；而在制造和使用传感器时，常根据传感器生产厂商给出的各种基本特性指标来选择适当的传感器。

根据被测输入量的性质，可对描述传感器输入-输出关系的数学模型和特性指标进行划分，被测输入量可分为静态量、准静态量和动态量，其中，静态量是指输入量对时间的各阶导数为零，即输入量不随时间的变化而变化；准静态量是指输入量在较长时间内基本不变化；而动态量是指输入量将随时间变化而变化。与之相应，我们将描述被测输入量为静态量和准静态量的数学模型称为传感器的静态数学模型，将描述被测输入量为动态量的数学模型称为传感器的动态数学模型。类似地，描述传感器输入-输出关系的基本特性指标也分为静态特性指标和动态特性指标，静态特性指标用以描述被测输入量为静态、准静态量时传感器的输入-输出特性，而动态特性指标用以描述被测输入量为动态量时传感器的输入-输出关系。

在这一节里，介绍传感器的静态数学模型及其静态基本特性指标。

1. 传感器的静态模型

传感器的静态模型是指在静态条件下得到的传感器的数学模型。所谓“静态条件”，是指被测输入量对时间 t 的各阶导数为零。当被测输入量为准静态量时，也可用静态数学模型来近似地描述。

传感器的静态模型可以用代数方程和特性曲线来描述。

1）代数方程

在不考虑传感器滞后及蠕变的情况下，传感器的静态数学模型可以用一个代数方程来表示，即

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+\cdots+a_nx^n \tag{1.7}$$

式中 x——输入量；

y——输出量；

a_0——零位输出（输入量 x 为零时的输出量）；

a_1——传感器的灵敏度，常用 K 或 S 表示；

a_2，…，a_n——非线性项的待定常数。

传感器的静态模型有三种特殊形式，其代数方程可表示为

$$y=a_1x \tag{1.8}$$

$$y=a_2x^2+a_4x^4+\cdots \tag{1.9}$$

$$y=a_1x+a_3x^3+a_5x^5+\cdots \tag{1.10}$$

式（1.8）表示传感器的输入-输出关系呈严格的线性关系，而式（1.9）、式（1.10）表示的输入-输出关系均为非线性关系，必须采取线性化补偿措施。

2）特性曲线

表示传感器输入-输出关系的曲线称为传感器的特性曲线。代数方程式（1.7）～（1.10）可分别用特性曲线描述为图 1.16 所示的（a）、（b）、（c）和（d）四种情况。

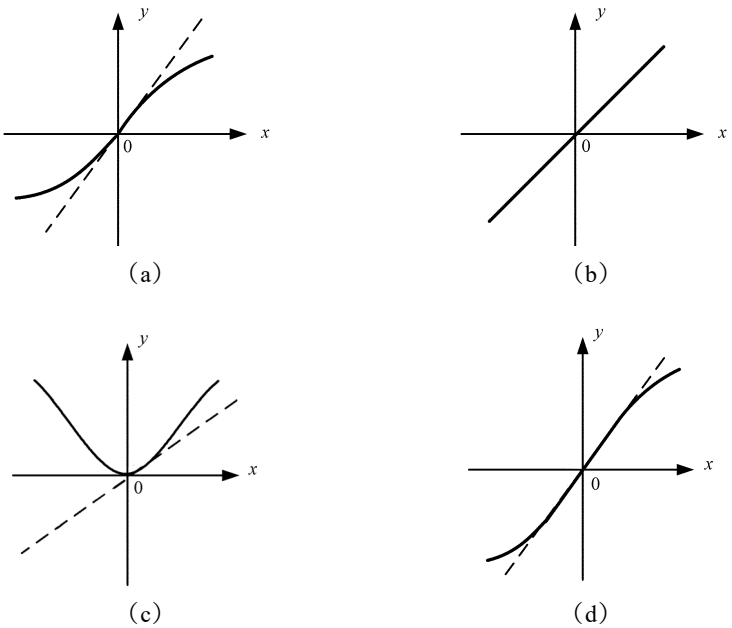


图 1.16　传感器的静态特性曲线

从图 1.16 中可以看出，图（b）为理想线性输出特性，图（a）、（c）、（d）都出现非线性的情况，且图（d）具有奇次方的代数方程，它在相当大的输入范围内有较宽的准线性。

2. 传感器的静态特性指标

传感器的静态特性指标主要有线性度、滞后、重复性、灵敏度、分辨力、阈值、稳定性、漂移、精度（静态误差）等。其中，线性度、滞后和重复性是三个较为重要的指标，传感器的静态误差就可以由这三个指标综合给出。

1）滞　后

滞后表示传感器在正、反行程期间，其输入-输出曲线不重合的程度。这里，传感器的正向行程是指输入量增大的行程，而传感器的反向行程是指输入量减小的行程。

如图 1.17 所示，对于同一大小的输入信号 x，在 x 连续增大的正向行程中，对应于某一输出量为 y_i，而在 x 连续减小的反向行程中，对应于另一输出量为 y_d，且 $|y_i - y_d| \neq 0$，这就是传感器的滞后现象。

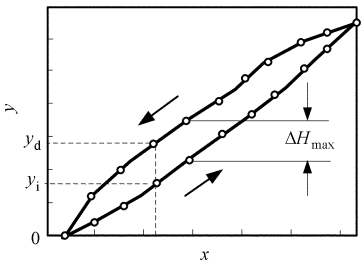


图 1.17　滞后现象

传感器的滞后现象表示为

$$e_H = \frac{\Delta H_{max}}{y_{F \cdot S}} \times 100\% \tag{1.11}$$

式中　ΔH_{max}——正、反行程输出的最大差值；

$y_{F \cdot S}$——满量程输出值。

2）线性度

传感器的线性度又称非线性，表示传感器实际的输入-输出曲线（校准曲线）与拟合直线之间的吻合（或偏离）程度。

这里的实际输入-输出曲线，又称为传感器的校准曲线，它是通过实际测量、标定得到的，如图 1.18 所示。当一个输入量作用于传感器，得到一个相应的输出量，从而可在平面坐标上确定一个点，将一系列这样的测量标定点连接在一起，就得到了传感器的实际输入-输出曲线，又称校准曲线。定义中的“拟合直线”是我们所选定的工作曲线，一般选取与校准曲线误差最小的直线作为拟合直线。

线性度通常采用相对误差表示，即

$$e_{\mathrm{L}} = \pm\frac{\Delta L_{\max}}{y_{\mathrm{F\cdot S}}}\times 100\% \tag{1.12}$$

式中 $\Delta L_{\max}$——输出量与输入量的实际曲线（校准曲线）与拟合直线之间的最大偏差；

$y_{\mathrm{F\cdot S}}$——满量程输出值。

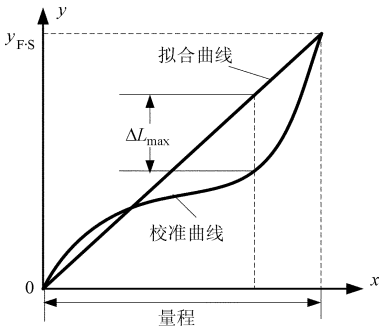


图 1.18　传感器线性度的表示

显然，选定的拟合直线不同，得到的传感器的线性度就不同，因此，拟合直线的选定非常重要。选定拟合直线的过程，就是传感器线性化的过程。拟合直线选定的原则是：保证尽量小的非线性误差，同时使计算与使用方便。选定拟合直线的方法，即传感器线性化的方法主要有理论直线法、端点线法、最佳直线法、最小二乘法以及计算程序法、硬件处理法等。

（1）理论直线法

理论直线法是以传感器的理论特性线作为拟合直线，与实际测量值无关。这种方法的优点是简单、方便，但通常非线性误差较大，如图 1.19（a）所示。

（2）端点线法

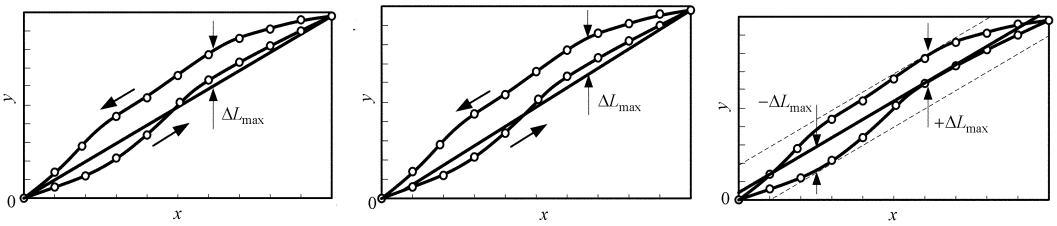
端点线法是以传感器校准曲线两端点间的连线作为拟合直线。这种方法也较简单，但非线性误差也很大，如图 1.19（b）所示。

（3）最佳直线法

最佳直线法选定的拟合直线，能保证传感器的正、反行程校准曲线对它的正、负偏差相等且最小。这种方法的拟合精度高，但通常需要用图解法或计算机计算来获得，如图 1.19（c）所示。

（4）最小二乘法

按最小二乘原理求取的拟合直线，能保证与校准曲线的残差平方和最小。最小二乘法的拟合精度很高，是一种普遍推荐使用的方法。



（a）理论直线法　　（b）端点线法　　（c）最佳直线法

图 1.19　几种不同的直线拟合方法

【例 1.6】　用最小二乘法求拟合直线。

设拟合直线为 $y=kx+b$，则拟合直线与校准数据的残差Δi 可表示为

$$\Delta i = y_i - (kx_i + b) \tag{1.13}$$

按最小二乘原理，应使 $\sum_{i=1}^{n}\Delta i^2$ 最小，即将其分别对 k 和 b 求一阶偏导数，并令其等于零，可求出 b 和 k，即

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\Delta i^2\right]' = 2\sum_{i=1}^{n}\Delta i(\Delta i)' \tag{1.14}$$

对 b 求一阶偏导数，并令其等于零，得

$$-2\sum_{i=1}^{n}\Delta i \overset{令}{=} 0$$

则

$$\sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} b - \sum_{i=1}^{n} kx_i = 0$$

$$b = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} y_i - \sum_{i=1}^{n} kx_i\right) \tag{1.15}$$

对 k 求一阶偏导数，并令其等于零，得

$$-2\sum_{i=1}^{n}\Delta i \cdot x_i \overset{令}{=} 0$$

则

$$\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n} bx_i - \sum_{i=1}^{n} kx_i^2 = 0$$

即

$$\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - b\sum_{i=1}^{n} x_i - k\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = 0 \tag{1.16}$$

将 $b=\frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n}y_i-k\sum_{i=1}^{n}x_i\right)$ 代入式（1.16）得

$$k=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i\cdot\sum_{i=1}^{n}y_i-n\sum_{i=1}^{n}x_iy_i}{\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2-n\sum_{i=1}^{n}x_i^2} \tag{1.17}$$

$$b=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i\cdot\sum_{i=1}^{n}x_iy_i-\sum_{i=1}^{n}x_i^2\cdot\sum_{i=1}^{n}y_i}{\left(\sum_{i=1}^{n}x_i\right)^2-n\sum_{i=1}^{n}x_i^2} \tag{1.18}$$

（5）硬件线性化方法

简单的线性化处理技术是以非线性矫正非线性，即“以畸制畸”。其典型措施是，将两只非线性传感器连接成差动形式，使它们的非线性误差大小相等而极性相反，以此来获得较为理想的线性输出特性。

图 1.20 中的曲线Ⅰ、Ⅱ分别为两只非线性传感器的输出特性曲线，两元件接成差动形式后，就可得到曲线Ⅲ所示的输出特性。

利用线性元件和非线性元件的串、并联，也可以达到线性化的目的，在热电式传感器一章中，将作详细介绍。

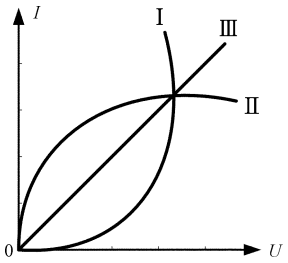


图 1.20 “以畸制畸”的硬件线性化方法

（6）软件线性化方法

软件线性化方法也是改善传感器特性的良好途径。采用软件对传感器特性进行补偿处理，可提高传感器的性能指标，省去复杂的硬件电路，简化装置，降低成本，而且，适当改变软件的内容，就可以对不同的传感器进行补偿。软件线性化方法具体包括计算法、查表法和插值法等。

3）重复性

重复性是反映传感器在同一工作条件下，输入量按同一方向作全量程连续多次测试时，所得特性曲线间一致程度的指标。如图 1.21 所示，各条曲线越靠近，重复性越好，误差也越小。重复性误差反映的是校准数据的离散程度，属于随机误差，因此，重复性误差应根据标准偏差计算，即

$$e_{\mathrm{R}}=\pm\frac{a\sigma_{\max}}{y_{\mathrm{F\cdot S}}}\times100\% \tag{1.19}$$

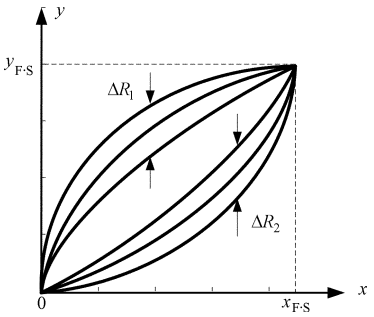


图 1.21 重复性特性

式中 $\sigma_{\max}$——各校准点正、反行程输出值的标准偏差的最大值；

a——置信系数，通常取 2 或 3。$a=2$ 时，置信概率为 95.4%；$a=3$ 时，置信概率为 99.73%。

如果误差服从高斯分布，标准偏差可按贝塞尔公式计算，即

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2}{n-1}} \tag{1.20}$$

式中　y_i——某校准点的输出值；

$\overline{y}$ ——各次测量值的平均值，$\overline{y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}y_i$ ；

n——测量次数。

4）灵敏度

传感器的灵敏度是其输出量增量Δy与输入量增量Δx的比值，常用 K 或 S_n 表示，即

$$K=\frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1.21}$$

对于线性传感器，如图 1.22（a）所示。灵敏度就是其拟合直线的斜率 $K=\frac{y-y_0}{x}$，是一个常数。对于非线性传感器，如图 1.22（b）所示，其灵敏度不是常数，而是一个变量，用 $\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}$ 表示传感器在某一工作点的灵敏度。

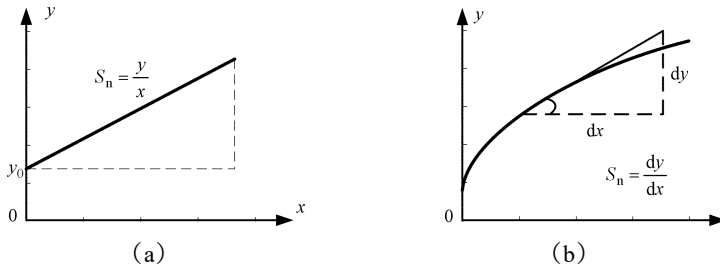


图 1.22　灵敏度的定义

实际使用中，由于外源型传感器的输出量与供给传感器的电源电压大小有关，因此，其灵敏度的表达中需要包含电源电压的因素。例如，某位移传感器，当电源电压为 1 V 时，每 1 mm 位移变化引起的输出电压变化为 100 mV，则其灵敏度可表示为 100 mV/（mm · V）。

5）分辨力（率）

分辨力是指传感器在规定测量范围内所能检测出的被测输入量的最小变化量。有时，也用分辨力值相对于满量程输入值的百分数表示，称为分辨率。

6）稳定性

稳定性有短期稳定性和长期稳定性之分。对于传感器，常用长期稳定性来描述其稳定性，即传感器在相当长的时间内仍保持其性能的能力。传感器的稳定性是指在室温条件下，经过规定的时间间隔后，传感器的输出与起始标定时的输出之间的差异。有时，也用标定的有效期来表示传感器的稳定性程度。

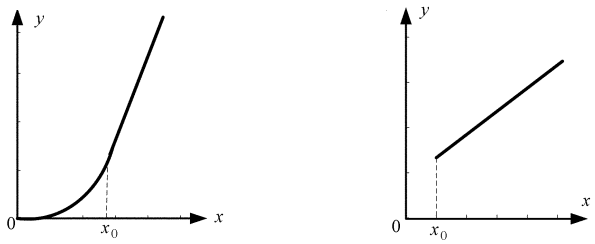
7）漂　移

传感器的漂移是指在外界的干扰下，传感器输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移。

零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移（时漂）和温度漂移（温漂）。时漂是指在规定条件下，零点或灵敏度随时间的缓慢变化；温漂是指由于温度变化而引起的零点或灵敏度漂移。

8）阈　值

阈值是指传感器产生可测输出变化量时的最小被测输入量值。有的传感器在零位附近存在严重的非线性，形成“死区”，将“死区”的大小作为阈值，如图 1.23（a）所示。更多情况下，阈值主要取决于传感器的噪声大小，因而只给出噪声电平，如图 1.23（b）所示。



（a）　　（b）

图 1.23　阈值的定义

9）静态误差（精度）

静态误差是评价传感器静态性能的综合性指标，即传感器在满量程内任一点的输出值相对于其理论值可能偏离（逼近）的程度。

静态误差的常用计算方法有：

① 将非线性、滞后、重复性误差按代数或几何法综合，即

$$e_s = \pm\sqrt{e_L^2 + e_H^2 + e_R^2} \tag{1.22}$$

或

$$e_s = \pm(e_L + e_H + e_R) \tag{1.23}$$

这样计算所得的静态误差偏大。

② 将全部校准数据相对于拟合直线的残差看成随机分布，求出标准偏差：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{p}(\Delta y_i)^2}{p-1}} \tag{1.24}$$

式中　Δy_i——各测试点的残差；

p——总的测试点数。

静态误差表示为

$$e_s = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{F \cdot S}} \times 100\% \tag{1.25}$$

这样计算所得的静态误差偏小。

③ 由于非线性、滞后可反映为系统误差，而重复性反映为随机误差，将系统误差和随机误差分开考虑更为合理，计算公式为

$$e_s = \pm \frac{|(\Delta y)_{max}| + a\sigma}{y_{F \cdot S}} \times 100\% \tag{1.26}$$

式中 $(\Delta y)_{max}$——系统误差的极限值；

σ——标准偏差；

a——根据置信概率确定的置信系数。