



全国高等院校测控技术与仪器专业**创新型**应用人才培养规划教材

传感器原理及应用

赠送电子课件

主 编 赵 燕



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书系统地介绍了几何量、机械量、热工量等非电物理量检测中常用的传感器,内容包括各种传感器的工作原理、组成结构、特性参数、设计和选用的基本知识,并列举了大量实例,对各类传感器在各种设备和检测过程中的典型应用作了系统的阐述,对其他现代新型传感器也作了简要介绍。本书按工作原理划分章节,条理清晰,每章后面还附有一定数量的习题,以帮助读者巩固所学的知识。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电子信息工程、机电一体化等专业的教材,也可作为其他相近专业高年级本科生和硕士研究生的学习参考书,还可作为从事电子仪器仪表及测控技术行业的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用/赵燕主编. —北京:北京大学出版社, 2010.2
(全国高等院校测控技术与仪器专业创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-16503-4

I. 传… II. 赵… 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 231007 号

书 名: 传感器原理及应用

著作责任者: 赵 燕 主编

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-16503-4/TH·0170

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.5 印张 522 千字

2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

传感器是科学仪器、自动控制系统中信息获取的首要环节和关键技术，是先进国家优先发展的重要基础性技术。掌握传感器原理与技术，合理应用传感器，这是相关工程技术人员必须具备的基本技能与素养。因此，在高等院校的仪器科学与技术、机电工程、电气工程、自动化等学科专业都开设了传感器类课程。

本书在编写过程中，着眼于传感器的原理及应用，根据理论与实践相结合的原则和由浅入深、循序渐进的认知规律，在论述传感器结构原理的基础上，充分结合传感器的工程应用来讨论传感器的共性技术以及传感器的选择与使用方法，培养读者的实践能力，为其日后从事测控及相关领域的科研工作奠定坚实的基础。同时，注重在内容上充分反映国内外传感器的最新发展和新型器件的应用。

在编写方法上，本书一改传统的平铺直叙的写作方式，每章均用引例开篇，并配相应的实物照片，图文并茂，形式活泼。同时，在文中用“小思考”、“特别提示”等方式提出关键问题或容易引起混淆的概念，供读者深入思考，以建立正确的概念。书中的每章都给出了大量例题和传感器应用实例，每章结尾一般都用“知识链接”单元来拓展各类传感器的发展趋势，使读者可以掌握传感器发展的全貌。本书共 12 章，每章都附有一定数量的习题。本书可适合研究型、应用型等不同层次的高等教育要求，对工程技术人员也具有使用和参考价值。

本书由武汉理工大学的赵燕担任主编并编写第 1 章和第 7 章，戴蓉编写第 2 章、第 10 章和第 12 章，陈国良编写第 3 章，陈霞编写第 4 章，刘传波编写第 5 章，黄安贻编写第 6 章和第 11 章，李威宣编写第 9 章，湖北工业大学的谭保华编写第 8 章。本书由赵燕和戴蓉统稿。

本书承蒙武汉理工大学博士生导师谭跃刚教授主审，谭教授提出了很多宝贵意见和建议，在此表示诚挚的谢意！

本书在编写过程中参考并引用了同行和传感器生产企业的一些文献资料，在此对文献资料作者表示衷心感谢！

传感器种类多，技术发展快，应用领域广。限于编者的学识水平，书中难免存在不当之处，恳切希望读者批评指正。

赵 燕

2009 年 10 月 25 日于武汉

目 录

第 1 章 传感器的基本知识 1	2.6 电阻应变片的温度误差及其补偿.....49
1.1 传感器的基本概念..... 2	2.7 电阻应变式传感器52
1.1.1 传感器的定义与组成..... 3	2.7.1 电阻应变式力传感器.....52
1.1.2 传感器的分类..... 4	2.7.2 电阻应变式压力传感器.....57
1.1.3 传感器的物理定律..... 5	2.7.3 电阻应变式加速度传感器.....58
1.2 传感器的基本特性..... 6	2.8 电阻应变仪59
1.2.1 传感器的静态特性..... 7	2.9 压阻式传感器61
1.2.2 传感器的动态数学模型..... 12	2.9.1 基本工作原理62
1.2.3 传感器系统实现动态测试 不失真的频率响应特性..... 16	2.9.2 半导体应变片63
1.2.4 典型传感器系统的动态特性 分析 17	2.9.3 压阻式传感器63
1.3 传感器的技术性能指标..... 24	2.9.4 压阻式传感器输出信号调理...64
1.3.1 传感器的主要性能指标..... 24	本章小结.....66
1.3.2 改善传感器性能的技术途径... 25	习题.....67
1.4 传感器技术的发展..... 27	第 3 章 电感式传感器70
1.4.1 传感器需求的新动向..... 27	3.1 自感式传感器工作原理及其特性 分析.....71
1.4.2 传感器技术的发展动向..... 28	3.1.1 工作原理71
1.5 传感器的选用原则..... 30	3.1.2 电感计算与输出特性分析.....72
本章小结 32	3.1.3 传感器的信号调节电路.....76
习题 32	3.1.4 影响传感器精度的因素分析...78
第 2 章 电阻应变式传感器 34	3.2 差动变压器式传感器79
2.1 电阻应变片的工作原理..... 35	3.2.1 螺线管式差动变压器.....80
2.2 电阻应变片的结构、种类和材料..... 35	3.2.2 差动变压器的测量电路.....84
2.2.1 电阻应变片的基本结构..... 35	3.3 涡流式传感器86
2.2.2 电阻应变片的种类..... 36	3.4 电感式传感器应用举例90
2.2.3 电阻应变片的材料..... 37	3.4.1 自感式传感器的应用.....90
2.3 电阻应变片的主要参数..... 39	3.4.2 差动变压器的应用.....92
2.4 电阻应变片的应用..... 43	3.4.3 电涡流传感器的应用.....94
2.4.1 电阻应变片的选择..... 43	本章小结.....96
2.4.2 电阻应变片的使用..... 44	习题.....96
2.5 转换电路 45	第 4 章 电容式传感器98
2.5.1 直流电桥..... 45	4.1 电容式传感器的工作原理和特性.....99
2.5.2 恒流源电桥..... 48	4.1.1 工作原理及类型99
2.5.3 交流电桥..... 48	4.1.2 电容传感器特性分析.....99

4.2 电容式传感器的特点及设计要点.....	107	6.1.3 磁电感应式传感器的应用.....	158
4.2.1 电容传感器的特点.....	107	6.2 霍尔式传感器.....	160
4.2.2 电容传感器设计要点.....	108	6.2.1 霍尔传感器的工作原理.....	160
4.3 电容式传感器的等效电路.....	110	6.2.2 霍尔元件的误差及补偿.....	164
4.4 电容式传感器的测量电路.....	111	6.2.3 霍尔传感器的应用.....	168
4.4.1 调频测量电路.....	111	6.3 磁栅式传感器.....	175
4.4.2 交流电桥测量电路.....	112	6.3.1 磁栅式传感器的工作原理和	175
4.4.3 运算放大器式测量电路.....	113	结构.....	175
4.4.4 二极管双 T 型交流电桥.....	114	6.3.2 磁栅式传感器的信号处理	178
4.4.5 差动脉冲调宽电路.....	115	方法.....	178
4.5 电容式传感器的应用.....	116	6.3.3 磁栅式传感器的应用.....	179
4.6 容栅式传感器.....	119	本章小结.....	179
本章小结.....	121	习题.....	180
习题.....	121	第 7 章 热电式传感器.....	181
第 5 章 压电式传感器.....	125	7.1 概论.....	182
5.1 压电效应.....	126	7.2 热电偶.....	183
5.2 压电材料及其主要特性.....	127	7.2.1 热电偶的工作原理.....	183
5.2.1 石英晶体.....	127	7.2.2 热电偶的常用类型和结构.....	186
5.2.2 压电陶瓷.....	130	7.2.3 热电偶的冷端温度补偿.....	190
5.2.3 压电材料的主要特性.....	132	7.2.4 热电偶的测量电路及应用.....	194
5.3 压电元件的常用结构形式.....	135	7.3 热电阻.....	195
5.3.1 压电元件的基本变形方式.....	135	7.3.1 热电阻的工作原理.....	195
5.3.2 压电元件的结构形式.....	135	7.3.2 常用热电阻(RTD).....	196
5.4 等效电路与测量电路.....	136	7.3.3 热电阻的测量电路.....	197
5.4.1 压电式传感器的等效电路.....	136	7.4 热敏电阻.....	198
5.4.2 压电式传感器的信号调理	138	7.4.1 热敏电阻的结构.....	198
电路.....	138	7.4.2 热敏电阻的类型和特性.....	199
5.5 压电式传感器的应用.....	143	7.4.3 热敏电阻的测量电路及	201
5.5.1 压电式加速度传感器.....	143	应用.....	201
5.5.2 压电式测力传感器.....	151	7.5 新型温度传感器.....	202
5.5.3 压电式压力传感器.....	152	7.5.1 PN 结温度传感器及应用.....	202
本章小结.....	153	7.5.2 集成温度传感器及应用.....	203
习题.....	153	本章小结.....	216
第 6 章 磁电式传感器.....	155	习题.....	216
6.1 磁电感应式传感器.....	156	第 8 章 光电式传感器.....	217
6.1.1 恒磁通式磁电感应传感器	156	8.1 光电效应.....	218
结构与工作原理.....	156	8.1.1 外光电效应.....	218
6.1.2 变磁通式磁电感应传感器	157		
结构与工作原理.....	157		

8.1.2 内光电效应.....	218	本章小结	277
8.2 常用光电转换器件.....	220	习题	277
8.2.1 外光电效应器件.....	220	第 10 章 红外传感器	278
8.2.2 内光电效应器件.....	223	10.1 红外辐射的基本知识	278
8.2.3 半导体光电器件的应用		10.1.1 红外辐射	278
选择	231	10.1.2 红外辐射的重要参数.....	279
8.3 位置敏感器件(PSD).....	232	10.1.3 黑体、白体和透明体.....	280
8.3.1 PSD 的工作原理	232	10.1.4 红外辐射的基本定律.....	281
8.3.2 PSD 的特性	233	10.2 红外传感器	283
8.4 固态图像传感器.....	235	10.2.1 红外光子传感器	284
8.4.1 CCD 的结构和基本原理.....	235	10.2.2 红外热传感器	285
8.4.2 线阵 CCD 图像传感器.....	237	10.3 红外传感器的主要性能参数.....	288
8.4.3 面阵 CCD 图像传感器.....	237	10.4 红外传感器应用举例	291
8.5 光电传感器的应用.....	238	10.4.1 红外测温	291
8.5.1 模拟式光电传感器的应用	238	10.4.2 热释电红外探测器警戒	
8.5.2 数字式光电传感器的应用	242	系统	295
8.6 光栅传感器	243	10.4.3 红外气体浓度检测系统.....	296
8.6.1 计量光栅的种类.....	244	本章小结	298
8.6.2 莫尔条纹.....	244	习题	298
8.6.3 光栅式传感器.....	247	第 11 章 其他传感器	299
8.7 光学编码器	250	11.1 气敏传感器	300
8.7.1 绝对编码器.....	250	11.1.1 气敏传感器概述	300
8.7.2 增量编码器.....	252	11.1.2 半导体气体传感器.....	300
本章小结	254	11.1.3 主要特性及其改善.....	303
习题	254	11.1.4 气敏传感器的应用.....	306
第 9 章 光纤传感器	256	11.2 湿敏传感器	307
9.1 光纤传感器的基本知识.....	257	11.2.1 绝对湿度与相对湿度.....	307
9.1.1 光纤的结构.....	257	11.2.2 湿敏传感器	308
9.1.2 光纤的传光原理.....	257	11.2.3 湿敏传感器的应用.....	311
9.1.3 光纤的种类.....	259	11.3 超声波传感器	312
9.1.4 光纤传感器的基本组成	260	11.3.1 超声波的传输特性.....	312
9.2 光纤传感器的分类及其工作原理	262	11.3.2 超声波换能器	312
9.2.1 光纤传感器分类.....	263	11.3.3 超声波传感器的应用.....	313
9.2.2 光调制技术.....	265	11.4 微波传感器	316
9.3 光纤传感器的应用.....	269	11.4.1 微波的性质与特点.....	316
9.3.1 光纤位移传感器.....	269	11.4.2 微波传感器的组成及其	
9.3.2 光纤液体浓度传感器.....	271	分类	316
9.3.3 光纤陀螺仪.....	271	11.4.3 微波传感器的应用.....	317
9.3.4 光纤高温测量系统.....	273	11.5 光纤光栅传感器	319
9.3.5 光纤气体传感器.....	275	11.5.1 光纤光栅的形成及其分类.....	319

11.5.2 光纤布拉格光栅传感器的 工作原理.....	320	习题.....	333
11.5.3 光纤光栅传感器系统的 构成.....	321	第 12 章 传感器的标定	334
11.5.4 光纤光栅传感器应用.....	322	12.1 传感器静态特性的标定.....	334
11.6 智能传感器.....	323	12.2 传感器动态特性的标定.....	336
11.6.1 概述.....	323	12.3 常用的标定设备.....	338
11.6.2 智能传感器的结构和功能...	324	12.3.1 静态标定设备.....	338
11.6.3 智能传感器数据预处理 方法.....	325	12.3.2 动态标定设备.....	342
11.6.4 智能传感器的实现途径.....	327	12.4 传感器标定举例.....	344
11.6.5 几种智能传感器示例.....	329	本章小结.....	348
本章小结.....	332	习题.....	348
		参考文献	350

第1章 传感器的基本知识



教学目标

通过本章学习，掌握传感器的基本概念、基本特性、技术指标和选用原则等知识，了解传感器的发展动向及其实际应用。



教学要求

掌握传感器的定义、组成和分类；

掌握构建传感器的工作机理及物理定律；

掌握传感器的静态和动态特性，能了解正确选用传感器的方法；

了解传感器的技术性能指标，了解改善传感器性能的技术途径；

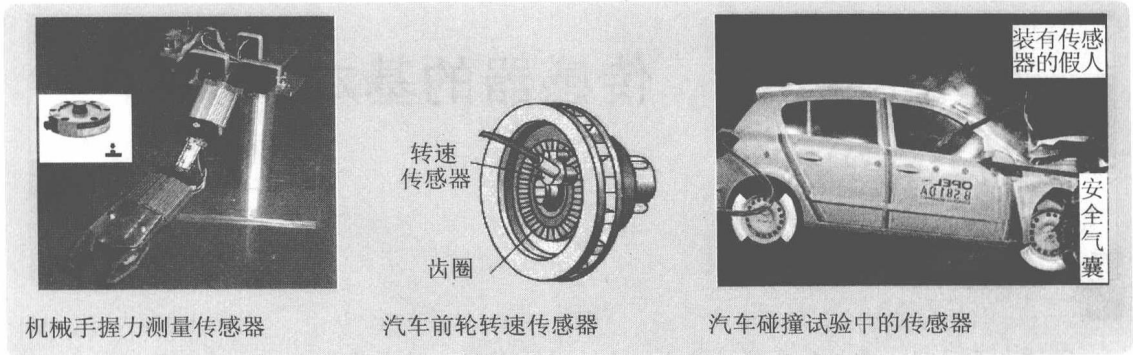
了解传感器技术的发展动向。



导入案例

人们为了对被测对象所包含的信息进行定性的了解和定量的掌握，必须采取一系列技术措施，有关这些措施的理论称为检测原理，其技术的物理实现就是检测装置或检测系统。一个完整的检测系统或检测装置通常由传感器、测量电路和显示记录装置等几部分组成，分别完成信息获取、转换、显示和处理等功能。而传感器是自动检测系统的第一级装置，也是其核心部件。在人们熟悉的汽车中就装有许多传感器，如曲轴转速传感器[检测发动机转速和判定一(四)缸上止点]，凸轮轴位置传感器[区分一(四)缸压缩上止点]，节气门位置传感器(检测发动机的节气门位置)，爆燃传感器(检测发动机是否发生爆燃)，水温传感器(检测发动机冷却液温度，提供发动机温度信号)，进气温度传感器(检测进气温度)，进气管绝对压力传感器(检测进气管内的进气压力)，空气流量计(检测进气空气的质量)，加速踏板位置传感器(检测加速踏板位置)，轮速传感器(检测轮速)，车速传感器(检测车速)，此外还有风速传感器、雨量传感器、光照强度传感器、车身高度传感器、燃油液位传感器、燃油温度传感器、机油压力传感器、喷油器升程传感器等。可见，传感器在汽车的现代电子化系统中扮演重要的角色，没有汽车的电子控制系统，今天的汽车连最起码的操纵都进行不了。同样，没有传感器，就没有今天的自动化测量及控制系统。

下面的图示就是我们在日常生活与科学研究中常见的传感器。本书的目的就是为了让你对各种传感器及其工作原理与制造技术有一个总体了解和掌握，并能在该领域中发现感兴趣的東西。



1.1 传感器的基本概念

什么是传感器(Transducer/Sensor)? 其实最原始、最天然的一种传感器就是生物体的感官。在人体这个目前世界上最完美的自动控制系统中, 其“五官”——眼、耳、鼻、舌和皮肤分别具有视、听、嗅、味、触等感觉。人的大脑神经中枢通过五官的神经末梢(感受器)接受外界的信息, 经过大脑的思维(信息处理)再做出相应的动作或行为。人类要想获得更为丰富的信息, 进一步研究大自然和制造劳动工具, 人的五官感知外界信息的能力就显得非常有限了(如眼睛就不是“千里目”)。

将人的行为动作的控制与计算机自动控制过程可作一比较, 如图 1.1 所示。计算机相当于人的大脑, 而传感器则相当于人的五官部分(“电五官”)。因此, 传感器成为获取自然领域中信息的主要途径与手段, 是摄取信息的关键器件, 它与通信技术和计算机技术构成了信息技术的三大支柱。

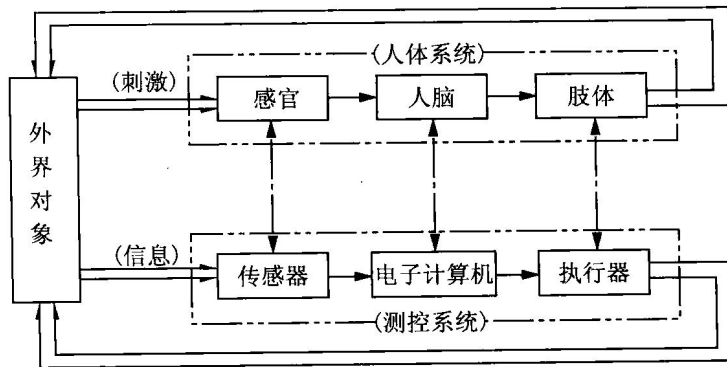


图 1.1 人体与自动化测控系统的对应关系

图 1.2 所示为大型桥梁的安全状况实时监测系统。通过光纤光栅传感器可以将温度、称重、斜拉索的张力、应变、线型、位移等多种反映桥梁安全状态的信号检测出来, 通过数据层、信息层分析处理, 可得到有巨大商业价值的应用。显然, 没有传感器, 就无法获取这些数据和信息, 也就无法掌握桥梁安全状态。

作为一种代替人的感官的工具, 传感器的历史比近代科学的出现要古老。古埃及人在 7000 多年以前, 就使用一种悬挂式的双盘秤作为测重的工具来称量麦子, 一直沿用到现在。利用

液体膨胀特性的温度测量在 16 世纪就已经出现。以电学的基本原理为基础的传感器是在近代电磁学发展的基础上产生的，这种类型的传感器在电子技术、计算机技术和自动控制技术的推动下得到了飞速发展。

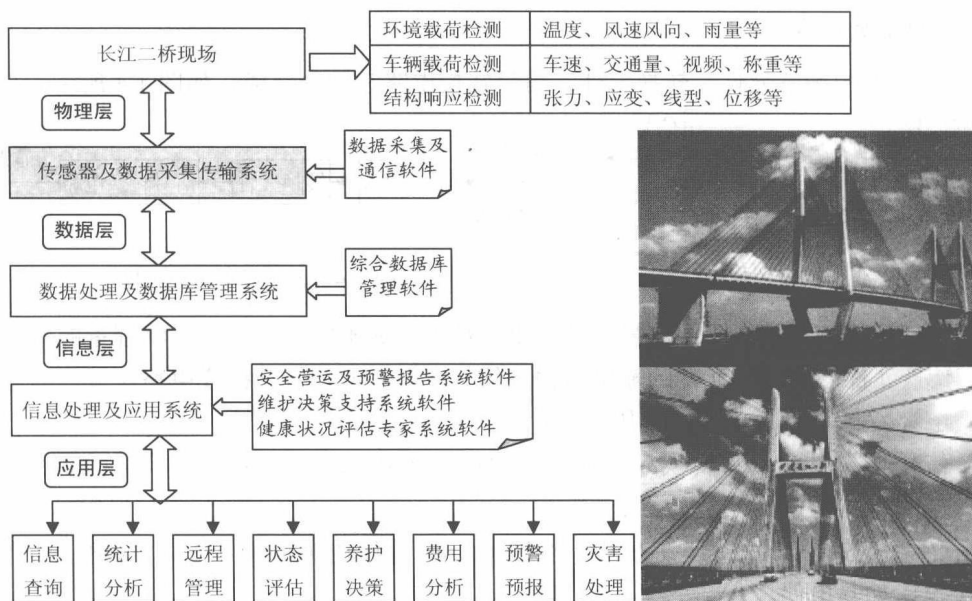


图 1.2 武汉长江二桥安全检测系统

传感器除了广泛应用在航空航天、军事国防、海洋开发以及工业自动化等尖端科学与工程领域之外，也向着与人们生活密切相关的方面渗透，如汽车、家用电器、生物工程、医疗卫生、环境保护、安全防范、网络家居等方面的传感器就层出不穷，并在日新月异地发展。

1.1.1 传感器的定义与组成

1. 传感器的定义

根据中华人民共和国国家标准 GB/T 7665—2005《传感器通用术语》，传感器(Transducer/Sensor)的定义是：“能感受规定的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”，其包含以下几个方面的意思：

- (1) 传感器是测量装置，能完成检测任务；
- (2) 它的输入量是某一被测量，可能是物理量，也可能是化学量、生物量等；
- (3) 它的输出量是某种物理量，这种量要便于传输、转换、处理、显示等，这种量可以是气、光、电量，但主要是电量(原因在下面论述)；
- (4) 输入输出有对应关系，并且应有一定的精确度。

需要说明的是，由于各行各业的现代测控系统中的信号种类极其繁多，为了对各种各样的信号进行检测、控制，传感器就必须尽量将被测信号转变为简单的、易于处理与传输的二次信号，这样的要求只有电信号能够满足。因为电信号能较容易地利用电子仪器和计算机进行放大、反馈、滤波、微分、存储、远距离操作等处理。因此传感器作为一种功能模块又可狭义地定义为：“将外界的输入信号变换为电信号的一类元件”，如图 1.3 所示。

需要指出的是，传感器的定义和内涵是随着科技的发展而演绎的。目前，信息领域处在

由电信息时代向光信息时代迈进的进程中，由于光信号比电信号具有更快的传输速度和更大的传输容量及更好的抗干扰性，因此，在光信息时代，传感器的定义可能就会发展为：“将外界的输入信号变换为光信号的一类元件”。

2. 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、信号转换电路三部分组成，如图 1.4 所示。

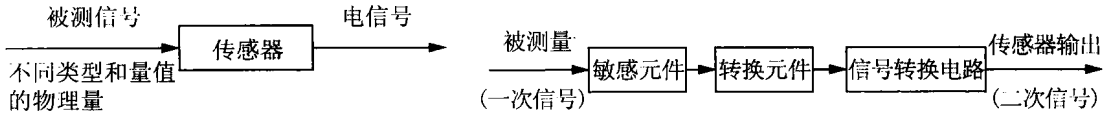


图 1.3 传感器的作用

图 1.4 传感器的组成框图

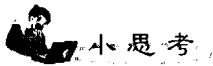
- (1) 敏感元件：直接感受被测量，并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。
- (2) 转换元件：以敏感元件的输出为输入信号，把输入信号转换成电路参数，如电阻 R 、电感 L 、电容 C 或转换成电流、电压等电量。
- (3) 信号转换电路：将转换元件输出的电路参数接入信号转换电路并将其转换成电量输出。

实际上，有些传感器很简单，仅由一个敏感元件(兼作转换元件)组成，它感受被测量时直接输出电量，如热电偶。

有些传感器由敏感元件和转换元件组成，没有信号转换电路。

有些传感器，转换元件不止一个，要经过若干次转换。

包含有信号转换电路的传感器一般称为变换器。因此，在不同的技术领域，传感器又被称为检测器、变换器、换能器等。



分析一下普通的水银温度计的敏感元件和转换元件是什么。

1.1.2 传感器的分类

传感器种类繁多，目前常用的分类方法有两种：

- (1) 面向使用的分类方法，即按被测量来分，如表 1-1 所列；
- (2) 面向研发的分类方法，以传感器的工作机理、构成原理或能量关系来分。

表 1-1 按被测量来分类

被测量类别	被 测 量
热工量	温度、热量、比热；压力、压差、真空度；流量、流速、风速
机械量	位移(线位移、角位移)，尺寸、形状；力、力矩、应力；重量、质量；转速、线速度；振动幅度、频率、加速度、噪声
物性和成分量	气体化学成分、液体化学成分；酸碱度(pH 值)、盐度、浓度、黏度；密度、比重
状态量	颜色、透明度、磨损量、材料内部裂缝或缺陷、气体泄漏、表面质量

1. 按传感器的工作机理分类

按传感器的工作机理分类，传感器可分为物理型、化学型、生物型等。本书讲解范围主要是物理型传感器。作为传感器工作物理基础的基本定律有场的定律、物质定律、守恒定律和统计定律等。物理学中的定律一般以方程式的形式给出，这些方程式也就是传感器在工作时的数学模型。这类传感器的特点是传感器的工作原理是以传感器中元件相对位置变化引起物理场的某些参数的变化为基础，而不是以材料特性变化为基础。

2. 按构成特点分类

按构成特点分类，传感器可分为结构型、物性型与能量转换型 3 类。结构型传感器是利用物理学中场的定律构成的，包括动力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。

物性型传感器是利用物质定律构成的，如胡克定律、欧姆定律等。物质定律是表示物质某种客观性质的法则。这种法则，大多数是以物质本身的常数形式给出。这些常数的大小，决定了传感器的主要性能。因此，物性型传感器的性能随材料的不同而异。例如，光电管就是物性型传感器，它利用了物质法则中的外光电效应，显然，其特性与涂覆在电极上的材料有着密切的关系。又如，所有半导体传感器，以及所有利用各种环境变化而引起金属、半导体、陶瓷、合金等性能参数变化的传感器，都属于物性型传感器。

按能量转换特点分类，传感器可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。能量控制型传感器，在信息变化过程中，其能量需要外电源供给。如电阻传感器、电感传感器、电容传感器等电路参数型传感器都属于这一类传感器，基于应变电阻效应、磁阻效应、热阻效应、光电导效应、霍尔效应等的传感器也属于此类传感器。能量转换型传感器，主要由能量变换元件构成，它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电动势效应等的传感器都属于此类传感器。

本课程以按传感器的工作原理分类的方法为主线介绍传感器，如表 1-2 所列。

表 1-2 按传感器的工作原理来分类

序 号	工作原理	序 号	工作原理
1	电阻式	7	光电式
2	电感式	8	光导纤维式
3	电容式	9	红外式
4	压电式	10	超声式
5	磁电式	11	微波式
6	热电式	12	光纤光栅式

1.1.3 传感器的物理定律

传感器之所以具有信息转换的机能，在于它的工作机理是基于各种物理的、化学的和生物的效应，并受相应的定律和法则所支配。了解这些定律和法则，有助于对传感器本质的理解和对新效应传感器的开发。本课程主要论述物理型传感器，其依据的基本定律和法则有以下 4 种类型：

1. 守恒定律(能量、动量、电荷量等守恒定律)

守恒定律是探索、研制新型传感器时，或在分析、综合现有传感器时，都必须严格遵守的基本法则。

2. 场的定律(运动场的运动定律，电磁场的感应定律等)

利用场的定律构成的传感器，其形状、尺寸(结构)决定了传感器的量程、灵敏度等主要性能，故此类传感器又可统称为“结构型传感器”。例如，利用静电场定律研制的电容传感器，利用电磁感应定律研制的自感、互感、电涡流式传感器，利用运动定律与电磁感应定律研制的磁电式传感器等。

3. 物质定律(如胡克定律、欧姆定律等)

物质定律是表示各种物质本身内在性质的定律，通常以这种物质所固有的物理常数加以描述。因此，这些常数的大小决定着传感器的主要性能。如利用半导体物质法则——压阻、热阻、磁阻、光阻、湿阻等效应，可分别做成压阻式传感器、热敏电阻、磁敏电阻、光磁敏电阻等。这种基于物质定律的传感器，可统称为“物性型传感器”。这是当代传感器技术领域中具有广阔发展前景的传感器。

4. 统计法则

它是把微观系统与宏观系统联系起来的物理法则。这些法则，常常与传感器的工作状态有关，它是分析某些传感器的理论基础。但这方面的研究目前还处于初级阶段。

1.2 传感器的基本特性

传感器的基本特性是指其对输入信号进行敏感反应和转换的特征，通常由传感器的输出与输入的关系来反映。由于输出与输入通常是可供观测的量，因此传感器的基本特性是传感器的外部特性。

【例 1-1】 求出玻璃液体柱式温度计(图 1.5)的基本特性表达式。

解：如以 T_i 表示温度计的输入信号即被测温度，以 T_o 表示温度计的输出信号即示值温度，根据热力学原理和能量守恒定律，可得到热平衡方程为

$$\frac{T_i(t) - T_o(t)}{R} = C \frac{dT_o(t)}{dt} \quad (1-1)$$

即

$$RC \frac{dT_o}{dt} + T_o = T_i \quad (1-2)$$

式中： R 为传导介质的热阻； C 为温度计的热容量。

式(1-2)表明，温度计的输出与输入关系是一阶微分关系。这是液体柱式温度计的基本特性的一种数学表达，也称为温度计的数学模型。

可以将各种传感器的输入、输出与传感器特性三者的关系表达为如图 1.6 所示的关系。它表明，传感器的不同外部特性是由其内部物理结构的不同决定的。例如液体柱式温度计以液体(水银、酒精等)作为测温介质的物理结构决定了它的基本特性与红外式温度计有完全不同的基本特性。

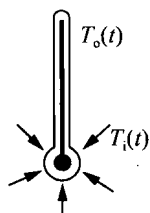


图 1.5 柱式温度计

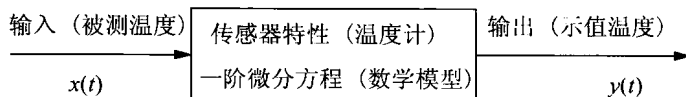


图 1.6 传感器的输入/输出与传感器特性的关系

传感器的基本特性反映的是输出与输入是否为具有唯一性的对应规律的关系。要考虑对应关系是否有差异及差异的大小，这种差异就是测量误差。而产生测量误差的原因主要取决于传感器的内部物理结构和外部使用环境。事实上，传感器的输入与输出关系或多或少地都存在着非线性问题，同时存在着外部的迟滞、蠕变、摩擦、间隙和松动等因数的影响，使输出输入对应关系的唯一性并不能实现。全面考虑了这些情况之后，传感器的输出/输入如图 1.7 所示。

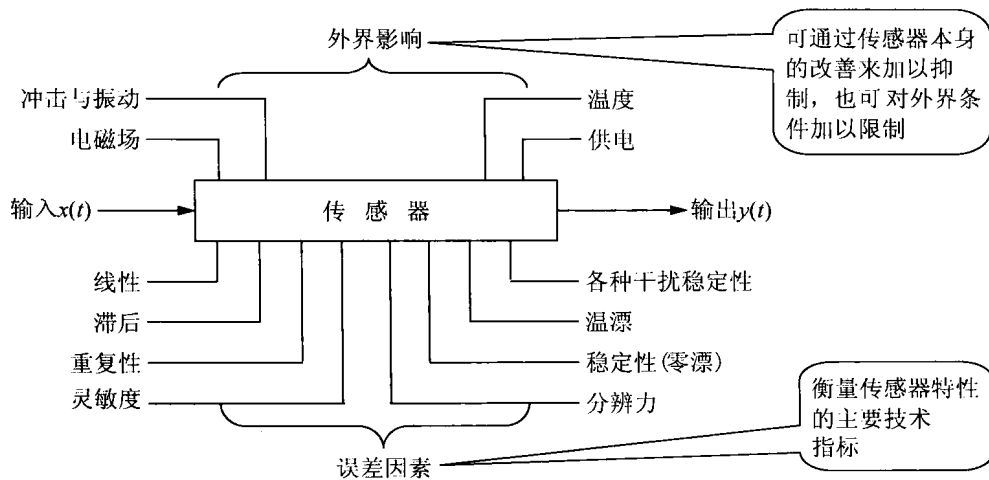


图 1.7 传感器输入/输出作用

从图 1.7 可知，外界的干扰一般是随机干扰，与 $y(t)$ 没有必然的逻辑关系，而由传感器自身的物理结构所决定的基本特性对输入 $x(t)$ 的影响以及造成的 $x(t)$ 的失真则是可以认知的，因而是可以掌控的。传感器基本特性的研究目的就是从小传感器“外部”特性着手，从测量误差的角度来分析传感器输入量 x 与输出量 y 之间的量能关系，得出传感器基本特性的指标作为评判传感器产生误差的内因(传感器物理结构参数)的依据，提出改善的意见并指导传感器的设计、制造、校准与使用。

由于传感器所检测的信号主要有稳态信号(静态)和动态信号(周期与瞬态变化)两种形式，传感器对于这两种不同状态的输入信号，其基本特性也不相同。因此，传感器的基本特性又有静态特性与动态特性之分。不同内部结构的传感器有不同的静态特性与动态特性，对测量结果的影响也不同。只有具有良好的静态与动态特性的传感器，才能进行信号的不失真转换。

1.2.1 传感器的静态特性

传感器的数学模型就是其输出与输入关系的数学描述。由于传感器所检测的信号既有静

态信号又有动态信号,其数学模型应以带随机变量的非线性微分方程才具有普遍意义。理论上,将微分方程中的一阶及一阶以上的微分项取为零(只有静态信号输入)时,可得到静态特性。因此,传感器的静态特性只是动态特性的一个特例。事实上传感器的静态输入输出特性要包括非线性和随机性等因素,如果把这些因素都引入微分方程,将使问题复杂化。为避免这种情况,总是把静态特性和动态特性分开考虑。因此可以分别建立传感器的静态模型和动态模型。

1. 静态模型

在输入量(被测量)处于稳定状态(常量或变化极慢的量)时传感器的输出/输入关系就称为静态特性。静态特性的数学描述就是传感器的静态模型。

【例 1-2】 求出拉力式弹簧秤(图 1.8)的静态特性表达式。

解: 将被测物慢慢地挂在秤钩上,不引起弹簧抖动,这就实现了输入量 x (物体质量)的静态模拟。弹簧被平稳地拉长,这就得到了静态响应 y (弹簧秤的示值)。根据弹簧的胡克定律得到弹簧秤的静态模型为

$$y = Kx \quad (1-3)$$

式中: K 为弹簧的刚度。式(1-3)表明,弹簧秤的静态特性是线性关系。

特别提示

将被测物慢慢地挂在秤钩上,是为了获得静态输入。如果快速地将物体挂上去,弹簧会上下抖动,这样输入的不仅是物体质量引起的弹簧位移 x ,还有货物上下运动产生的加速度 d^2x/dt^2 导致的惯性力。

从不失真测量和减小误差的角度考虑,传感器理想的输出输入关系应是一一对应的单值函数关系,最好是单值线性关系,如弹簧秤的静态特性式(1-3),即输出与输入有相同的时间函数。其优点是:

(1) 消除了非线性误差,无需在信号变换和处理中采用非线性补偿模块。

(2) 极大地简化传感器的设计分析工作。

(3) 极大地方便了测量数据处理。因为,只要知道输出输入特性直线上的两个点(一般为零点和满量程点),就可确定其余各点。

(4) 简化了标定的过程。因为,只要知道标定输出输入特性直线上的两个点,就可线性分度其余各点。

一般的传感器都存在非线性。因此,在不考虑迟滞、蠕变和摩擦等外部因素的情况下,传感器的输出与输入静特性可用多项式代数方程来表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (1-4)$$

式中: y 为输出量; x 为输入量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器的线性灵敏度,常用 K 或 S 表示; a_2, a_3, \dots, a_n 为非线性项的待定常数。

式(1-4)中的各项系数的不同决定了传感器特性曲线的具体形式。式(1-4)的曲线如图 1.9(d)所示。此外,多项式(1-4)还有 3 种特殊情况,分别讨论如下。

(1) 理想线性特性,如图 1.9(a)所示。当 $a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$ 时,得到

$$y = a_1x \quad (1-5)$$

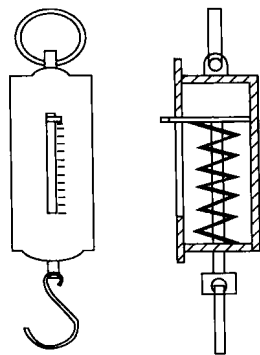


图 1.8 拉力式弹簧秤

(2) 仅有偶次非线性项, 如图 1.9(b)所示。其特性曲线为

$$y = a_1x + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots \quad (1-6)$$

这种特性曲线没有对称性, 线性范围窄, 一般传感器设计中不采用这种特性。

(3) 仅有奇次非线性项, 如图 1.9(c)所示。其特性曲线为

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots \quad (1-7)$$

这种特性在较宽的输入范围内有线性特征, 即接近理想线性。

当传感器具有图 1.9(b)、(c)、(d)所示的静特性时, 就必须在传感器中或后接电路中进行非线性化补偿。

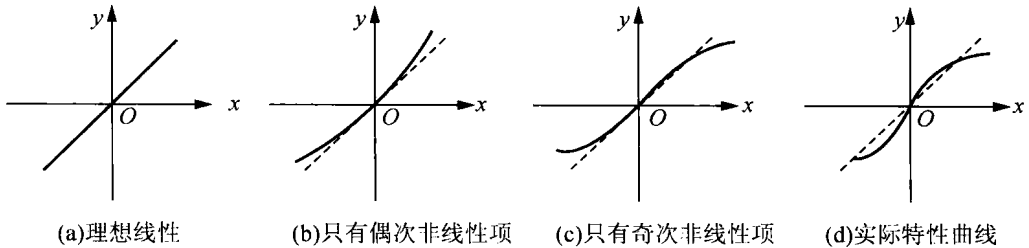


图 1.9 传感器的静态特性曲线

2. 静态特性指标

评价传感器的静态特性的重要指标有线性度、迟滞、重复性、灵敏度、分辨力和漂移等。

1) 线性度(Linearity)

传感器静态特性曲线(图 1.9)表明, 实际应用的传感器多少都存在一些非线性, 其静态特性多为曲线。但是为了标定和数据处理的方便, 也为了便于比较传感器的性能, 希望得到线性关系的特性曲线。这时, 可以用直线来近似地代表实际曲线。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。在采用直线拟合时, 实际输出输入的特性曲线与拟合直线之间的最大偏差, 就称为线性度或非线性误差, 通常用相对误差来表示如下:

$$e_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中: e_L 为线性度(非线性误差); Δ_{\max} 为输出平均值与拟合直线间的最大偏差; y_{FS} 为理论满量程输出值。

非线性误差的大小是以一定的拟合直线为基准直线而得出来的。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, 还应考虑使用是否方便, 计算是否简便。常用的拟合方法有: 理论拟合、端点连线拟合、端点连线平移法、最小二乘拟合法等, 如图 1.10 所示。其中, 最小二乘拟合法的拟合精度较高。

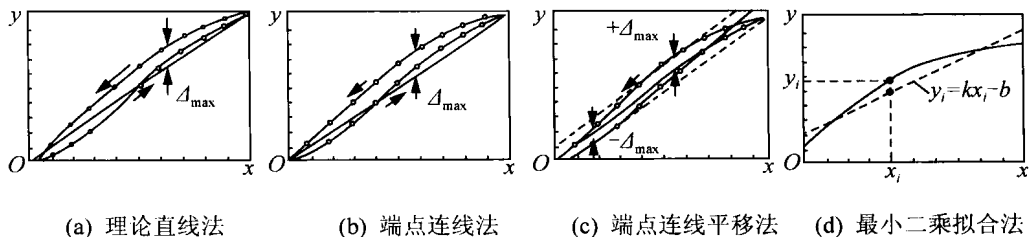


图 1.10 几种不同的拟合方法

采用最小二乘法拟合时，是按最小二乘原理求取拟合直线，该直线能保证传感器校准数据的残差平方和最小。如用下式表示最小二乘法拟合直线：

$$y = b + kx \quad (1-9)$$

式中： b 和 k 分别为拟合直线的截距和斜率。 b 和 k 可根据下述计算求得。

若实际校准测试点有 n 个，则第 i 个校准数据与拟合直线上相应值之间的残差为

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i) \quad (1-10)$$

最小二乘法的原理就是应使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小，即

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (kx_i + b)]^2 = \min \quad (1-11)$$

对式(1-11)求 k 和 b 的一阶偏导数并令其等于零，即可求得 k 和 b ：

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1-12)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1-13)$$

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (1-14)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^0 x_i^2 \sum_{i=1}^0 y_i - \sum_{i=1}^0 x_i \sum_{i=1}^0 x_i y_i}{n \sum_{i=1}^0 x_i^2 - (\sum_{i=1}^0 x_i)^2} \quad (1-15)$$

在获得 k 和 b 的值后代入式(1-9)即可得到拟合直线，然后按式(1-10)求出残差的最大值 Δ_{\max} 即可算出非线性误差。

2) 迟滞(Hysteresis)

传感器在正向(输入量增大)和反向(输出量减小)行程中输出输入曲线不重合的程度称为迟滞，如图 1.11 所示。迟滞现象说明对应于同一大小的输入信号，传感器的输出信号大小不相等，没有唯一性。造成迟滞现象的原因是传感器的机械部分和结构材料方面存在不可避免的弱点，如轴承摩擦、间隙、紧固件的松动等。

迟滞误差一般由试验室测得，并以满量程输出的百分数表示，即

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中： ΔH_{\max} 为正反向行程间输出的最大差值。其余参数含义同前。

3) 重复性

重复性表示传感器在相同的工作条件下，输入量按同一方向作全量程连续多次测试时，特性曲线的不一致性(图 1.12)。重复特性好的传感器，误差也小。重复性的产生与迟滞现象有相同的原因。