




普通高等教育 **电气信息类** 应用型规划教材

# 传感器技术及应用

李林功 主编

 科学出版社



免费提供电子教案

普通高等教育电气信息类应用型规划教材

# 传感器技术及应用

李林功 主编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以应用为目标,以仿真为手段,以实例为载体,介绍传感器的工作原理、性能特点、应用方法等内容。全书按照传感器的应用形态,将传感器分为温度、力敏、光电、磁敏、气体、湿度、声音、智能等几类。每一类传感器都有具体的应用实例,全部例题都用 Proteus 仿真实现,既展示了传感器应用系统的设计、开发方法,又体现了传感器的技术性和应用性特点。每章设有精简、实用、开放的习题,习题也可作为实验教学内容,体现理论联系实际,“学中做、做中学”的工程教育理念。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、电气工程、自动化、计算机应用、机械工程、机电一体化等专业的“传感器技术及应用”及相关课程的教学用书,也可作为工程技术人员、传感器爱好者的技术参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器技术及应用/李林功主编. —北京: 科学出版社, 2015

(普通高等教育电气信息类应用型规划教材)

ISBN 978-7-03-042950-6

I. ①传… II. ①李… 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(2015)第 002502 号

责任编辑: 陈晓萍 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 2 月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 435 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新科〉)

销售电话 010-62142126 编辑部电话 010-62138978-2009

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

# 普通高等教育电气信息类应用型规划教材

## 编 委 会

主 任：刘向东

副主任：方志刚 张明君

成 员：万 旭 万林生 王泽兵 龙建忠 叶时平 代 燕

伍良富 刘加海 祁亨年 杜益虹 李联宁 张永炬

张永奎 张克军 杨起帆 周永恒 金小刚 洪 宁

秦洪军 凌惜勤 陶德元

秘书长：刘加海（兼）

秘 书：陈晓萍 周钗美

## 本书编写人员

主 编 李林功

副主编 应蓓华 杜鹏英 杜雪峰 张云翼

参 编 田安红 何 俊 徐小玲 范胜利

# 前 言

传感器 (transducer/sensor) 是能够感受被测量信息, 并能将其按一定规律转换成电信号, 以便实现信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求的器件或装置。传感技术同计算机技术、通信技术一起被称为信息技术的三大支柱。从仿生学观点看, 如果把计算机看成是识别和处理信息的“大脑”, 把通信系统看成传递信息的“神经系统”的话, 传感器就是信息系统的“感觉器官”。

早在 20 世纪 80 年代, 世界已进入传感器时代, 传感器产业被公认为是最具发展前景的高技术产业之一。它以技术含量高、经济效益好、渗透力强、市场前景广等特点为世人所瞩目。就以汽车为例, 一辆普通轿车要用几十个传感器, 豪华轿车要用几百个传感器。在不远的将来, 无人驾驶汽车将在公路上行驶, 可以想象, 它要用多少传感器。因此, 可以说, 传感器技术将改变人类生活。

本书是作者多年教学、科研经验和团队集体智慧的结晶, 具有以下鲜明特色。

1. 以应用为目标。以培养读者选择、使用传感器的方法和能力为目标, 重点介绍各类传感器的工作原理、性能指标、应用系统的设计方法、扩展方法。帮助读者学会选择传感器, 学会使用传感器。

2. 以仿真为手段。书中所有例题都用 Proteus 仿真实现, 教学过程中, 随时可以展示仿真过程和仿真结果。既培养读者的仿真能力, 加深读者对教学内容的理解和掌握程度, 又提高读者对传感器应用系统的分析、设计能力和工程实践能力。

3. 以实例为载体。书中所有例题都有一定的实际应用背景, 每一章都有一个综合应用实例。通过实例展示传感器应用系统的设计、开发方法, 从而加深读者对传感器的理解, 提高读者应用传感器的能力。

4. 易学易用。本书主要面向传感器初学者, 内容安排遵循由易到难、由简到繁、循序渐进、实用、有趣、易学、易懂、易用的原则, 重点讲述传感器的基础知识, 培养读者掌握传感器的应用方法和技能。书中图、表多, 应用实例多。图文并茂, 一看就懂; 实例引导, 一学就会。

5. 实用有趣。教学内容, 特别是例题、习题紧密结合读者生活实际和生产应用实际, 既有实用性, 又有趣味性。可以边讲、边学、边做, 充分体现“学中做、做中学”的工程教育理念。对学习有困难的读者可以完成例题、习题的基本要求; 普通读者可以在现有例题、习题基础上, 根据自己的需求实现自主扩展或扩充; 优秀读者可以自我设计, 创新应用, 实现超越。使教学内容适合所有读者的需求, 使教学过程有声有色有滋味, 使读者易学易懂易应用。每一章的练习题, 既可作为学生的练习作业, 也可作为实验内容, 一书两用, 方便实用。

6. 实例引导。每一种传感器都有具体的应用举例，每一章都有一个综合应用实例。一方面综合应用传感器技术的相关内容，另一方面综合应用多门课程的知识和技术，让读者通过应用实例复习、提高、掌握、应用专业知识和专业技能。读者可以根据自己的理解和爱好，在实例基础内容上进行优化和扩展。如从一个热敏电阻开始，逐步到温控开关、温度报警、温度控制等，步步升级。

7. 内容开放。所有教学内容，特别是例题、习题都是开放的，可以扩展的。读者可以从基础的内容开始，逐步过渡到深入的、复杂的内容。体现强化基础、强调应用，突出特色，适合不同读者不同需求的教学理念。将例题、习题设置成开放的形式，不设标准答案，目的有两个：一是鼓励读者的个性发展，每个读者都可以按照自己的理解、自己的需求、自己的能力完成一个独立的答案，培养读者的创新能力；二是培养良好的学习习惯，所有读者都可以根据自己的实际情况做出自己的答案，可多可少，可简单可复杂，可局部可整体，培养读者的独立思考能力，养成良好的学习习惯。

全书按照传感器的应用形态，将传感器分为温度、力敏、光电、磁敏、气体、湿度、声音、智能等几类，每一章介绍一类，方便读者学习、选择、应用。全书共分9章，第1章介绍传感器的分类、特点和应用领域；从第2章到第9章，分别介绍温度、力敏、光电、磁敏、气体、湿度、声音、智能传感器的原理与结构、性能特点、典型应用等内容。

本书由浙江大学宁波理工学院李林功统编、统写、统校，由参编者共同讨论、修改、编写完成。其中，第4章由郑州轻工业学院张云翼主持编写，其他章节由浙江大学城市学院杜鹏英，三门峡职业技术学院杜雪峰，曲靖师范学院田安红，广东石油化工学院何俊、徐小玲，浙江大学宁波理工学院应蓓华、范胜利、李林功等编写完成。

本书配有PPT课件、例题的Proteus仿真资料、习题参考答案、考试资料，欢迎广大读者向科学出版社(cxp666@yeah.net)索取。

在本书编写、出版过程中，编者参阅、借鉴了许多优秀教材和技术专家的宝贵经验、技术资料以及研究成果，并得到了科学出版社的大力支持，在此深表感谢。

由于作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正。

李林功

2014年11月

# 目 录

第 1 章 传感器基础知识	1
1.1 传感器的定义	1
1.2 传感器的组成	1
1.3 传感器的分类	2
1.4 传感器的基本特性	3
1.4.1 传感器的静态特性	3
1.4.2 传感器的动态特性	6
1.5 传感器的选择	9
1.6 传感器的应用	11
1.7 传感器的发展趋势	11
思考与练习	14
第 2 章 温度传感器	15
2.1 温标	15
2.2 温度传感器的分类	16
2.3 热电偶温度传感器	18
2.3.1 热电偶的工作原理	18
2.3.2 热电偶回路的性质	20
2.3.3 热电偶的常用材料	22
2.3.4 常用热电偶的结构	24
2.3.5 冷端处理及补偿	26
2.3.6 热电偶的选择与使用	28
2.3.7 热电偶的典型应用	30
2.4 热电阻温度传感器	32
2.4.1 热电阻的工作原理	32
2.4.2 热电阻的结构	34
2.4.3 热电阻测量电路	35
2.4.4 热电阻的典型应用	36
2.5 热敏电阻温度传感器	36
2.5.1 热敏电阻的分类	36



2.5.2	热敏电阻的结构	37
2.5.3	热敏电阻的特点	38
2.5.4	热敏电阻的基本参数	38
2.5.5	热敏电阻的特性	41
2.5.6	热敏电阻的典型应用	45
2.6	集成温度传感器	45
2.6.1	电压输出型集成温度传感器	45
2.6.2	电流输出型集成温度传感器	46
2.6.3	数字输出型集成温度传感器	48
2.7	温度监控系统设计	52
2.7.1	温度监控系统的体系结构	52
2.7.2	温度监控系统的硬件设计	53
2.7.3	温度监控系统的软件设计	57
2.7.4	温度监控系统的源程序	62
	思考与练习	69
<b>第3章</b>	<b>力敏传感器</b>	<b>70</b>
3.1	力敏传感器的分类	70
3.2	电阻应变式力敏传感器	71
3.2.1	电阻应变式力敏传感器的原理与结构	71
3.2.2	电阻应变式力敏传感器的接口电路	73
3.2.3	电阻应变式力敏传感器的典型应用	75
3.3	压阻式力敏传感器	77
3.3.1	压阻式力敏传感器的原理与结构	77
3.3.2	压阻式力敏传感器的接口电路	78
3.3.3	压阻式力敏传感器的典型应用	79
3.4	电感式力敏传感器	79
3.4.1	电感式力敏传感器的原理与结构	80
3.4.2	电感式力敏传感器的接口电路	83
3.4.3	电感式力敏传感器的典型应用	84
3.5	电容式力敏传感器	84
3.5.1	电容式力敏传感器的原理与结构	84
3.5.2	电容式力敏传感器的接口电路	86
3.5.3	电容式力敏传感器的典型应用	88
3.6	压电式力敏传感器	88
3.6.1	压电式力敏传感器的原理与结构	89
3.6.2	压电式力敏传感器的接口电路	90
3.6.3	压电式力敏传感器的典型应用	94

3.7 数字气压计的设计 .....	95
3.7.1 数字气压计的系统结构 .....	95
3.7.2 数字气压计的硬件设计 .....	95
3.7.3 数字气压计的软件设计 .....	99
3.7.4 数字气压计的源程序 .....	100
思考与练习 .....	103
<b>第4章 光电传感器 .....</b>	<b>104</b>
4.1 光及其表示 .....	104
4.2 光电管及光电倍增管 .....	106
4.2.1 光电管 .....	106
4.2.2 光电倍增管 .....	108
4.3 光敏电阻 .....	110
4.3.1 光敏电阻的原理与结构 .....	110
4.3.2 光敏电阻的特性 .....	111
4.3.3 光敏电阻的应用 .....	112
4.4 光敏二极管 .....	113
4.4.1 光敏二极管的原理与结构 .....	113
4.4.2 光敏二极管的应用 .....	114
4.5 光敏三极管 .....	115
4.5.1 光敏三极管的原理与结构 .....	115
4.5.2 光敏三极管的特性 .....	116
4.5.3 光敏三极管的应用 .....	118
4.6 光电池 .....	119
4.6.1 光电池的原理及结构 .....	119
4.6.2 光电池的特性 .....	120
4.6.3 光电池的应用 .....	122
4.7 光电耦合器 .....	122
4.7.1 光电耦合器的结构 .....	123
4.7.2 光电耦合器的组合形式 .....	123
4.7.3 光电耦合器的应用 .....	123
4.8 红外线传感器 .....	124
4.8.1 红外线传感器的分类 .....	126
4.8.2 红外线传感器的原理与结构 .....	127
4.8.3 红外线传感器的应用 .....	130
4.9 光照度测试仪 .....	135
4.9.1 光照度测试仪的系统结构 .....	135
4.9.2 光照度测试仪的硬件设计 .....	135

4.9.3	光照度测试仪的软件设计	136
4.9.4	光照度测试仪的数据处理	136
4.9.5	光照度测试仪的源程序	138
	思考与练习	143
<b>第5章</b>	<b>磁敏传感器</b>	<b>144</b>
5.1	磁敏传感器的分类	144
5.2	霍尔传感器	145
5.2.1	霍尔元件	145
5.2.2	线性霍尔集成传感器	148
5.2.3	开关型霍尔集成传感器	150
5.2.4	霍尔传感器的应用	151
5.3	磁敏电阻	154
5.3.1	磁敏电阻的原理与结构	154
5.3.2	磁阻元件的特性	156
5.3.3	磁敏电阻的应用	157
5.4	磁敏二极管	158
5.4.1	磁敏二极管的原理与结构	158
5.4.2	磁敏二极管的特性	159
5.4.3	磁敏二极管的应用	161
5.5	磁敏三极管	163
5.5.1	磁敏三极管的原理与结构	163
5.5.2	磁敏三极管的特性	164
5.5.3	磁敏三极管的应用	166
5.6	霍尔测速仪的设计	166
5.6.1	霍尔测速仪的系统结构	166
5.6.2	霍尔测速仪的硬件设计	167
5.6.3	霍尔测速仪的软件设计	168
5.6.4	霍尔测速仪的源程序	169
	思考与练习	173
<b>第6章</b>	<b>气体传感器</b>	<b>174</b>
6.1	气体传感器的分类	174
6.2	气体传感器的特性	176
6.3	气敏电阻	177
6.3.1	烧结型二氧化锡气敏元件	178
6.3.2	厚膜型二氧化锡气敏元件	179
6.3.3	薄膜型二氧化锡气敏元件	179

6.4	气敏二极管	180
6.4.1	结型气敏二极管	180
6.4.2	MOS 型气敏二极管	180
6.5	MOSFET 型气敏器件	181
6.5.1	MOSFET 型气敏器件的原理与结构	181
6.5.2	MOSFET 型气敏元件的特性	182
6.6	气体传感器的应用	183
6.7	气体检测仪的设计	185
6.7.1	气体检测仪的系统结构	185
6.7.2	气体检测仪的硬件设计	186
6.7.3	气体检测仪的软件设计	189
6.7.4	检测仪的源程序	191
	思考与练习	194
<b>第 7 章</b>	<b>湿度传感器</b>	<b>195</b>
7.1	湿度及其表示	195
7.2	湿度传感器的分类	196
7.3	湿敏电阻	197
7.3.1	电解质湿敏电阻	197
7.3.2	高分子湿敏电阻	198
7.3.3	陶瓷湿敏电阻	199
7.4	湿敏电容	199
7.4.1	陶瓷湿敏电容	200
7.4.2	高分子湿敏电容	200
7.5	其他湿度传感器简介	201
7.6	湿度传感器的特性	203
7.7	湿度传感器的选择	205
7.8	湿度传感器的使用注意事项	206
7.9	湿度传感器的应用	207
7.10	温湿度监控器的设计	209
7.10.1	温湿度监控器的系统结构	210
7.10.2	温湿度监控器的硬件设计	210
7.10.3	温湿度监控器的软件设计	213
7.10.4	温湿度监控器的源程序	215
	思考与练习	230
<b>第 8 章</b>	<b>声音传感器</b>	<b>231</b>
8.1	声音简介	231

8.2	话筒	232
8.2.1	阻抗变换型话筒	232
8.2.2	压电式话筒	232
8.2.3	电容式话筒	233
8.2.4	驻极体话筒	233
8.2.5	动圈式话筒	234
8.2.6	话筒的特性	234
8.3	扬声器	236
8.3.1	电动式扬声器	237
8.3.2	电磁式扬声器	237
8.3.3	静电式扬声器	237
8.3.4	压电式扬声器	238
8.3.5	扬声器的特性	239
8.4	超声波传感器	240
8.4.1	超声波传感器的原理与结构	241
8.4.2	超声波效应	242
8.4.3	超声波传感器的典型应用	244
8.5	超声测距仪的设计	248
8.5.1	超声波测距仪的系统结构	248
8.5.2	超声波测距仪的硬件设计	248
8.5.3	超声波测距仪的软件设计	250
8.5.4	超声波测距仪的源程序	252
	思考与习题	258
<b>第9章</b>	<b>智能传感器</b>	<b>259</b>
9.1	智能传感器的组成	259
9.2	智能传感器的特点	260
9.3	智能化的实现途径	262
9.3.1	集成化	263
9.3.2	软件化	266
9.3.3	网络化	267
9.3.4	多传感器的信息融合	270
9.4	典型智能传感器简介	276
	思考与练习	279
	参考文献	281

# 第1章 传感器基础知识

传感器技术是当今世界令人瞩目的高新技术之一，它与通信技术、计算机技术构成了信息产业的三大支柱。如果说计算机是人类大脑的升级，通信网络是人类神经的拓展，那么传感器就是人类五官的延伸。最近几十年，通信技术、计算机技术飞速发展，而传感器技术的发展则相对滞后，所以，有人大声疾呼：信息产业“大脑发达、五官不灵”。

传感器技术是测量技术、微电子学、物理学、化学、生物学、精密机械、材料科学等众多学科相互交叉的综合性高新技术，广泛应用于航天、航空、国防、科研、机械、电力、能源、交通、冶金、石油、建筑、通信、生物、医学、环保、材料、农林、渔业、食品、烟酒、机器人、家电等诸多领域，可以说传感器无处不在。

传感器技术是衡量一个国家综合实力和科学技术水平的重要标志。

## 1.1 传感器的定义

国际电工委员会（International Electrotechnical Committee, IEC）对传感器的定义为：“传感器是测量系统中的一种前置部件，它将输入变量转换成可供测量的信号。”

国家标准《传感器专用术语》GB 7665—2005 对传感器的定义是：传感器是能感受指定的被测量，并按照一定的规律将被测量转换成可用输出电信号的器件或装置。

这一定义包含了以下几方面的内容。

- (1) 传感器是检测装置，能完成指定的检测任务。
- (2) 传感器的输入可能是物理量或非物理量，如化学量、生物量等。
- (3) 传感器的输出量一般是便于传输、转换、显示的电信号。
- (4) 传感器的输出与输入有对应的关系，且有一定的精度要求。

在现代科技中，传感器往往能获取人类感官无法获得的大量信息。如利用传感器，可以观察到  $10^{-10}$  cm 的微粒，能测量  $10^{-24}$  s 的时间。一艘宇宙飞船就是一个高性能传感器的集合体，可以捕捉和收集宇宙中的各种信息。普通小客车上使用的传感器有几十个，高级轿车上的传感器有几百个。

## 1.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、换能元件、调节电路、辅助电路等组成，如图 1-1 所示。

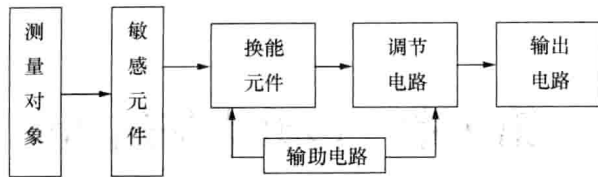


图 1-1 传感器的组成

**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量有确定关系的其他量。

**换能元件：**又称变换器。将敏感元件感受到的非电量转换成电量。

**调节电路：**把换能元件输出的电信号转换为便于显示、记录、处理、控制的电信号。

**辅助电路：**保证传感器安全、正确、稳定工作的电路。

**输出电路：**放大、输出电信号。

实际上，不同的传感器，结构差异很大。有些传感器很简单，如热电偶、热敏电阻等，它感受被测量时直接输出电量；有些传感器则较复杂，可能转换元件还不止一个，要经过多次转换才能输出有用信号。

### 1.3 传感器的分类

随着材料科学、制造工艺的不断发展，传感器的品种也如雨后春笋，层出不穷。

#### 1. 按被测对象形式分类

按被测对象形式划分，传感器可分为温度传感器、光敏传感器、力敏传感器、湿度传感器、磁敏传感器、声音传感器、气体传感器等。这种分类方法给使用者选择使用传感器提供了方便。

#### 2. 按输出量形式分类

按输出量形式划分，传感器可分为模拟传感器和数字传感器。模拟传感器是指传感器的输出信号为模拟量；数字传感器是指传感器的输出信号为数字量。数字量便于传输、存储、计算、转换、显示，因此数字传感器越来越多。

#### 3. 按基本效应分类

根据传感器所蕴涵的基本效应，可以将传感器分为物理型、化学型、生物型等。

**物理型传感器**是指传感器依靠敏感元件材料的物理特性随被测量变化而变化的特点来实现信号的变换，如水银温度计是利用水银的热胀冷缩现象把温度变化转变为水银柱的高低变化，从而实现对温度的测量。

**化学型传感器**是指传感器依靠敏感元件材料本身的电化学反应来实现信号的变换，

如恒电位电解式气体传感器。当改变电极电位时，气体的氧化与还原反应就会变化，测量电解电流就能反映气体的浓度。

生物型传感器是指传感器依靠敏感元件材料本身的生物效应来实现信号的变换。待测物质经扩散作用进入生物敏感膜层，经分子识别，发生生物学反应，产生的信息被相应的化学或物理换能器转换成可处理的电信号，如酶传感器、免疫传感器等。

#### 4. 按工作原理分类

按照工作原理传感器可划分为应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、热电式传感器等。这种分类方法通常在讨论传感器的工作原理时比较方便。

#### 5. 按能量变换关系分类

按能量变换关系，传感器可划分为能量变换型传感器和能量控制型传感器。

能量变换型传感器，又称为发电型或有源型传感器，其输出的能量是被测对象提供的，或是经转换而来的。它无须外加电源就能将被测的非电量转换成电量输出。它要求从被测对象获取的能量越小越好。这类传感器包括热电偶、光电池、压电式传感器、磁电感应式传感器、固体电解质气敏传感器等。

能量控制型传感器，又称为参量型或无源型传感器。这类传感器的输出电能量必须由外加电源供给。但被测对象的信号控制着由电源提供给传感器输出端的能量，并将电压（或电流）作为与被测量相对应的输出信号。由于能量控制型传感器的输出能量是由外加电源供给的，因此，传感器输出端的电能可能大于输入端的非电能量，所以这种传感器具有一定的能量放大作用，如电阻式、电感式、电容式、霍尔式、谐振式传感器等。

## 1.4 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划分为静态特性和动态特性两类。

### 1.4.1 传感器的静态特性

静态特性是指不随时间而变化的特性，它表示传感器在被测量处于稳定状态下时输入与输出的关系。

#### 1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度。输出与输入关系可分为线性特性和非线性特性。从传感器的性能看，希望具有线性关系，但实际遇到的传感器大多是非线性的。如果不考虑迟滞和蠕变等因素，传感器的输出与输入关系可用一个多项式表示：

$$Y=a_0+a_1X+a_2X^2+\cdots+a_nX^n \quad (1-1)$$

式中： $X$ ——传感器的输入量，即被测量；



$Y$ ——传感器的输出量，即测量值；

$a_0$ ——输入量  $X$  为零时的输出量；

$a_1$ ——传感器线性灵敏度；

$a_2, \dots, a_n$ ——非线性项系数。

静态特性曲线可通过实际测量获得。在实际使用中，为了标定和数据处理方便，希望得到线性关系，因此常常引入各种非线性补偿措施。如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理，从而使传感器的输出与输入关系变为线性或接近线性。但如果传感器非线性的方次不高，输入量变化范围不大时，可用一条直线（切线或割线）近似地代表实际曲线的一段，使传感器输出输入特性曲线线性化，如图 1-2 所示。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（或线性度），通常用相对误差  $r_L$  表示，即

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

式中： $\Delta L_{\max}$ ——最大非线性绝对误差；

$Y_{FS}$ ——满量程输出。

从图 1-2 中可见，即使是同类传感器，拟合直线不同，其线性度也是不同的。

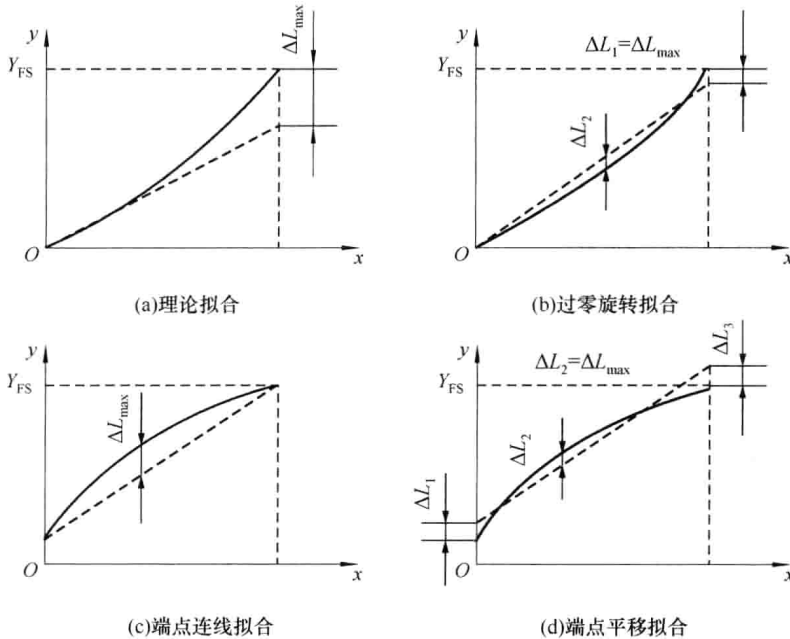


图 1-2 几种直线拟合方式

## 2. 灵敏度

传感器的灵敏度  $S_n$  是指传感器在稳态工作情况下输出量的变化  $dy$  对输入量变化  $dx$  的比值，如图 1-3 所示。

$$S_n = \frac{dy}{dx} \quad (1-3)$$