

高等职业教育优质校建设轨道交通通信信号技术专业群系列教材

# 传感检测与电子测量

主 编 付 涛  
副主编 付宗见  
参 编 朱彦龙 董心雨  
主 审 陈享成

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·



高等职业教育优质校建设轨道交通通信信号技术专业群系列教材

Chuangan Jiance yu Dianzi Celiang

传感检测与电子测量

主 编/付 涛

责任编辑/梁志敏

封面设计/吴 兵

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：四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸 185 mm×260 mm

印张 11.75 字数 292 千

版次 2019 年 8 月第 1 版 印次 2019 年 8 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7001-5

定价 36.00 元

课件咨询电话：028-87600533

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

# 前 言

本书是高等职业教育优质校建设轨道交通通信信号技术专业群系列教材之一，面向轨道交通相关高等职业教育领域，根据通信信号技术专业群平台课程教学改革的需要编写的，紧密结合高等职业教育特点，突出技术性与技能性，注重运用能力的培养。以信号的获取、转换与测量为主线，整合了自动检测技术（传感器技术）和电子测量仪器与仪表两大内容，并融入了智能仪器等新技术，涵盖了传感检测技术、典型的传感器与应用、测量误差与数据处理、常用的电子测量仪器与仪表及智能仪器等内容。每章都附有一定数量的思考与练习题，可以帮助学生进一步巩固课堂所学内容。本书紧密结合轨道交通领域相关技术应用情况，将传统的“传感器技术”“电子测量技术”与“智能仪器”等内容进行梳理整合，可作为职业院校轨道交通通信信号技术专业群课程教材使用，也可作为铁路局、地铁公司职工的岗位培训教材，还可作为成人教育、职业培训的教材和有关工程技术人员的学习参考用书。

本书由郑州铁路职业技术学院付涛担任主编并统稿；付宗见担任副主编，朱彦龙、董心雨参加了编写。陈享成担任主审并提出了很多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，编者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2019年3月

# 目 录

第一章 传感检测技术概要 .....	1
第一节 检测技术与检测系统 .....	1
第二节 传感技术与轨道交通 .....	7
思考与练习 .....	15
第二章 结构型传感器及其应用 .....	16
第一节 电阻应变式传感器 .....	16
第二节 电容式传感器 .....	25
第三节 电感式传感器 .....	32
第四节 磁电式传感器 .....	41
思考与练习 .....	45
第三章 物性型传感器及其应用 .....	47
第一节 霍尔式传感器 .....	47
第二节 压电式传感器 .....	55
第三节 热电式传感器 .....	61
第四节 光电式传感器 .....	72
第五节 光纤传感器 .....	83
第六节 激光传感器 .....	87
思考与练习 .....	91
第四章 电子测量技术概要 .....	93
第一节 测量技术与电子测量 .....	93
第二节 测量误差与数据处理 .....	98
第三节 电子测量仪器认知 .....	104
思考与练习 .....	110
第五章 常用电子测量仪器 .....	111
第一节 信号发生器 .....	111
第二节 电压测量 .....	121
第三节 波形测量 .....	137
第四节 时间频率测量 .....	147

思考与练习 .....	155
<b>第六章 智能仪器 .....</b>	<b>158</b>
第一节 智能仪器概述 .....	158
第二节 数据采集技术 .....	163
第三节 数据通信技术 .....	167
第四节 虚拟仪器 .....	176
思考与练习 .....	180
<b>参考文献 .....</b>	<b>181</b>

# 第一章 传感检测技术概要

当今社会科学技术发展日新月异，像“意识控制”、谷歌公司的“AlphaGo”、波士顿公司的“大狗机器人”等神话般的科技成果，以及“云物大智移”概念的横空出世，无不得益于信息科学的飞速发展。信息社会的三大支柱是信息的获取、信息的传输与信息的处理，与之相对应的控制技术、通信技术与计算机技术构成了信息技术的完整学科。传感检测技术正是实现信息化、自动化的基础与前提。它汇集和包含了多种学科的研究成果，是人类探索自然界、实现自动测量和自动控制的首要环节。

“没有传感器就没有现代科学技术”的观点已被全世界所公认。以传感器为核心的检测系统就像神经和感官一样，源源不断地向人类提供宏观与微观世界的各种信息，成为人们认识世界、改造世界的有力工具。

## 第一节 检测技术与检测系统

### 一、了解检测技术

在生产生活、科学研究的过程中，有时为了了解某个工作过程，需要对表征其特性的参量进行测量，如温度、压力、流量、浓度、成分、厚度、电压、电流等。而获取这些信息的过程就是检测，检测的目的即通过获得这些信息，对生产过程进行监督和控制，使其始终处于最佳状态，最终达到预期结果，图 1-1 所示为一个防火监控系统组成框图。

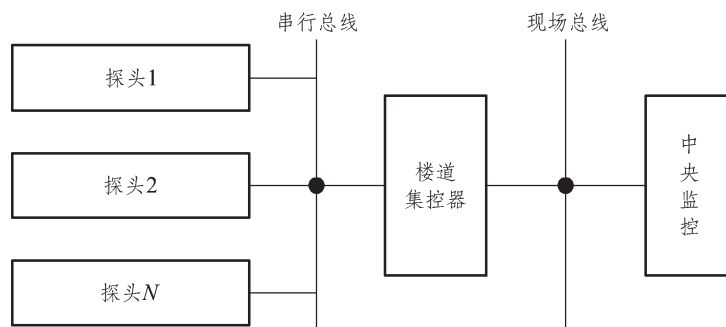


图 1-1 监控系统组成框图

探头：分别为感温、感烟探头，负责检测温度、烟雾浓度信号，输出的温度、烟雾浓度信号通过串行通信线送入集控器，具有超限报警功能。

楼道集控器：负责信号汇总，汇总各房间的温度和浓度信号，并监控各房间的温度、烟雾浓度是否异常，如有异常，进行声光报警并打开喷淋设备灭火，集控器应一层布置一台。

中央监控：各层集控器通过 CAN 总线、M-BUS 总线等现场总线将温度、烟雾浓度等信号进行中央监控。值班人员在计算机屏幕上直观监视各房间情况（温度、烟雾浓度）。

下面列举检测技术的几种应用。

### 1. 在工业生产过程中的测量与控制方面的应用

在工业生产过程中，必须对温度、压力、流量、液位和气体成分等参数进行检测，以实现对工作状态的监控，诊断生产设备的各种情况，使生产系统处于最佳状态，从而保证产品质量，提高效益。

### 2. 在汽车电控系统中的应用

汽车的安全舒适、低污染、高燃率越来越受到社会重视。而传感器相当于汽车的感官和触角，只有它才能准确地采集汽车的工作状态信息，提高自动化程度。汽车传感器主要分布在发动机控制系统、底盘控制系统和车身控制系统中。普通汽车上装有一二十个传感器，而在有些高级豪华车上传感器的使用多达三百个。因此，传感器作为汽车电控系统的关键部件，将直接影响汽车技术性能的发挥。

### 3. 在现代医学及生物科学研究领域的应用

在医学图像处理、临床化学检验、生命体征参数的监护监测、各种疾病的诊断与治疗等方面，传感检测仪器的使用十分普及。在生物科学研究领域中，对无机离子、有机物质、蛋白质、核酸，以及其他生化成分的检测，也离不开传感检测技术。

### 4. 在环境监测方面的应用

目前，已有相当一部分电化学、生物类传感器应用于城市整体环境监测、污染物排放点的监测及排放过程计量检测中，如对大气环境二氧化硫、有机物排放、粉尘颗粒浓度、水中有机污染物浓度等的监测，这个过程中也出现了多种新的检测方法和监测手段。

### 5. 在军事方面的应用

传感检测技术在军用电子系统方面的运用促进了武器、作战系统、控制、监视和通信方面的智能化。传感检测技术在远方战场监视系统、防空系统、雷达系统、导弹系统，以及航天技术发展方面都有广泛的应用，是提高军事战斗能力和航天军事水平的重要技术因素。

### 6. 在家用电器方面的应用

家用电器正向自动化、智能化、节能环保的方向发展。空调器中采用微型计算机控制配

合传感检测技术，可以实现压缩机的启动、停止、风机控制、换气等，从而对温度、湿度和空气浊度进行控制。随着人们对家用电器方便、舒适、安全、节能要求的提高，传感检测技术将得到越来越普遍的应用。

### 7. 在智能建筑领域中的应用

智能建筑是未来建筑的一种必然趋势，它涵盖智能自动化、信息化、生态化等多方面的内容，具有微型集成化、高精度、数字化和智能化特点的传感器将在智能建筑中占有重要的地位，今后的作用将更加突出。

除此之外，检测技术还应用于国防科技、生产生活等各个方面，此处不再一一列举。

## 二、检测的概念

所谓检测，就是人们借助于仪器设备，利用各种物理、化学、生物等效应，采用一定的方法，将客观世界的有关信息通过检查与测量获取定性或定量的认识过程。检测包含检查与测量两个方面，检查往往是获取定性信息，而测量则是获取定量信息。

所谓定性，是指通过测量能大致判断出被测量存在与否，或者在某一个数量范围内。比如机场、考场使用金属探测器进行的检查过程。还有一些定性测量是依靠经验进行判断的，比如用手触摸额头来判断是否发烧，人体对环境温度的判断等。

所谓定量，是指用一定精度等级的测量仪器、仪表确定出被测量比较精确的数值大小。比如温度计、磅秤等。

## 三、检测系统的组成

如图 1-2 所示为传感检测系统的组成框图。虚框内为传统的检测系统或检测装置的基本组成，主要由传感器、测量电路、仪器显示等组成。现代检测技术可以通过数据采集与接口技术将测量电路输出量输入给计算机，通过计算机的分析处理将结果反馈给控制单元实现自动控制，或是通过通信网实现结果共享、远程监测与控制、接入“物联网”等。

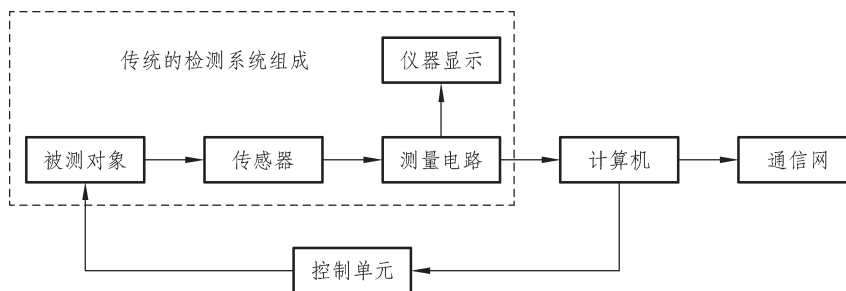


图 1-2 传感检测系统的组成框图

### 1. 被测对象

被测对象输出的可以直接是被测量，也可以是由被测对象的动作间接产生的被测量。被



传感检测与电子测量

测量可以是物理量、化学量、生物量等，但大多为非电量。

## 2. 传感器

传感器是一种能够感受被测量，并按一定的精度将被测量转换为与之有确定关系、便于处理的另一种测量量的装置。由于被测量大多为非电量，而传感器输出的大多为电量，也可以狭义地讲：传感器是完成将非电量转换为电量的装置。

## 3. 测量电路

测量电路的作用是将传感器的输出信号进行变换，使输出信号转变为满足后一级电路（显示电路、仪器仪表、采集系统等）要求的信号。也可以简单地说，就是将传感器输出的信号转换为后一级电路可以识别的信号。

## 4. 仪器显示

仪器显示包含仪器仪表与显示面板两种类型，有些是将测量结果通过显示器反映出来并由面板控制按钮进行控制操作，也有些是将一些特殊的测量量通过专用的仪器仪表进行测量显示。

## 5. 仪器接口

仪器接口包括数据采集、A/D 与 D/A 转换、人机接口、数据通信接口等，它将检测系统输出的信号送入计算机系统，从而实现自动检测与控制、远程监测与控制等。

# 四、检测装置的性能

检测装置就是确定被测量大小的仪器，它既可由许多单独的部件组成，也可以是一个不可分的整体。前者多用于复杂的仪器或实验装置中，后者多为工业用的简单仪表。无论是简单仪表还是复杂仪器，工程上使用的现代检测装置基本上都是由传感器、测量电路与显示面板等部分组成。

检测装置的基本性能是指仪器仪表的输出对输入的响应质量，包括静态特性和动态特性两大类。所谓静态特性是指被测量处于稳定状态下，仪器仪表输出与输入之间的关系；动态特性是指测量装置或系统的输出对于随时间快速变化的输入量的动态响应。当被测量是恒定量或是缓慢变化量时，可以通过一些静态指标衡量；当被测量变化较快时，必须研究输入量变化过程中输出响应的动态误差。下面就介绍几个衡量静态特性的指标。

## 1. 精度

检测装置的精度包括精密度、准确度和精确度 3 项内容。

### 1) 精密度

精密度是指在相同条件下，对同一个量进行重复测量时，这些测量值之间的相互接近程

度即分散程度，反映了随机误差的大小。

## 2) 准确度

准确度表示测量仪器指示值对真值的偏离程度，它反映了系统误差的大小。

## 3) 精确度

精确度是精密度和准确度的综合反映，它反映了系统综合误差的大小，并且用来表示测量误差的相对值。

如图 1-3 所示为打靶弹着点分布图，图 (a) 的弹着点很分散，它的精密度很低；图 (b) 的弹着点集中但偏向一方，相当于精密度高但准确度低；图 (c) 的弹着点集中靶心，相当于既精密又准确，精确度高。

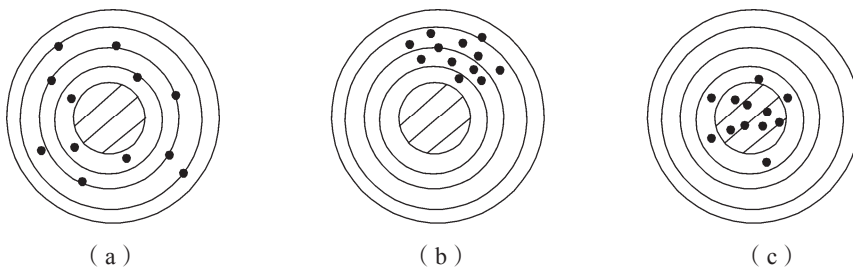


图 1-3 打靶弹着点分布图

精确度反映了测量中各类误差的综合。测量精确度越高，测量结果中包含的系统误差和随机误差越小，当然测量装置的价格就越昂贵。误差理论分析表明，由若干台不同精确度的测量仪器组成的测试系统，其测试结果的最终精确度主要取决于精确度最低的那台仪器。因此，应从被测对象的实际情况出发，选用同等精确度的测量仪器，以获得最佳的技术经济效益。

## 2. 灵敏度

灵敏度是指单位输入量所引起的输出量的大小。如水银温度计输入量是温度，输出量是水银柱高度，若温度每升高  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，水银柱高度升高  $1\text{ mm}$ ，则它的灵敏度可以表示为  $1\text{ mm}/^{\circ}\text{C}$ 。测量装置的静态灵敏度是由静态标定来确定的，即由实测该装置的输入、输出来确定。这种关系曲线叫标定曲线，而灵敏度可以定义为标定曲线的斜率：

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

式 (1-1) 中， $S_a$  表示测量装置的静态灵敏度， $\Delta y$  表示输出信号的变化量， $\Delta x$  表示被测参数的变化量。

原则上说，测量装置的灵敏度应尽可能高，这意味着它能检测到被测参量极微小的变化，即被测参量稍有变化，测量装置就有较大的输出，并显示出来。因此，在要求高灵敏度的同时，应特别注意与被测信号无关的外界噪声的侵入。为达到既能检测微小的被测参量，又能使噪声尽量降低的目的，要求测量装置的信噪比越大越好。一般来讲，灵敏度越高，测量范

围越窄，温度稳定性也越差。

### 3. 测量范围与量程

测量范围是指被测量按照规定精确度进行测量的范围。量程是指测量装置允许测量的输入量的上、下极限值。使用时，要求被测量应在量程范围内，如量程为 5 A 的电流表不允许测量 8 A 的电流。与量程有关的另一个指标是测量装置的过载能力，超过允许承受的最大输入量时，测量装置的各种性能指标得不到保证，这种情况称为过载。过载能力通常用一个允许的最大值或用满量程值的百分数表示。

### 4. 稳定性

稳定性表示测量装置在一个较长的时间内保持其性能参数的能力，也就是在规定的条件下，测量装置的输出特性随时间的推移而保持不变的能力。一般以室温条件下经过一个规定的时间后，测量装置的输出与起始标定时输出差异程度来表示其稳定性。影响稳定性的因素主要是时间、环境、干扰和测量装置的器件状况。因此，选用测量装置时应考虑其抗干扰能力和稳定性，特别是在复杂环境下工作时，应考虑各种干扰（如电磁辐射等）的影响。

## 五、检测技术的发展方向

检测技术是科技领域的重要组成部分，可以说科技发展的每一步都离不开检测技术的配合，尤其是极端条件下的检测技术，已成为认识自然的重要手段。近几十年来，随着电子技术的快速发展，检测方法大都通过各种传感器完成电量转换，使测量对象转换成电量。但由于信号本身的强弱、传感器及测量仪噪声等的影响，检测的灵敏度及准确性受到了很大的限制。

总体来说，检测技术的发展方向如下。

#### 1) 努力提高检测精度和检测可靠性

随着科学技术的发展，对检测仪器和检测系统的性能要求，尤其是精度、测量范围、可靠性指标的要求越来越高。例如，在卫星上安装的检测仪器，不仅要求体积小、质量轻，而且要既能耐高温，又能在极低温和强辐射的环境下长期稳定地工作。

#### 2) 努力拓宽检测范围

目前，除了超高温、超低温检测仍有待突破外，诸如混相流量检测、脉动流量检测、微差压（几十帕）、超高压检测、高温高压下物质成分检测、分子量检测、高精度、大吨位质量检测等都是需要尽早攻克检测难题。

#### 3) 传感器逐渐向集成化、组合式、数字化方向发展

目前已有不少传感器实现了敏感元件与信号调理电路的集成和一体化，对外直接输出标准的 4~20 mA 电流信号，成为名副其实的变送器。这对检测仪器整机研发与系统集成提供了很大的方便，亦使得这类传感器身价倍增。一些厂商把两种或两种以上的敏感元件集成于

一体，成为可实现多种功能的新型组合式传感器。例如，将热敏元件、湿敏元件和信号调理电路集成在一起，一个传感器可同时完成温度和湿度的测量。

#### 4) 非接触式检测技术的研究

在检测过程中，把传感器置于被测对象上，可灵敏地感知被测量的变化，这种接触式检测方法直接、可靠、测量精度较高，但在某些情况下，传感器的安装会影响测量精度或根本不能安装，这就要采用非接触式检测。

#### 5) 检测系统的智能化

智能化检测系统以计算机为中心，完成电量/非电量的多种测量、多输入通道的多点测量、在线动态实时测量、信号的分析处理、排除噪声干扰、消除偶然误差、修正系统误差等功能，以实现测量结果的高准确度和对被测信号的高分辨率。

## 第二节 传感技术与轨道交通

### 一、了解传感器

传感技术的应用在人们的生产生活中日趋广泛，可以说是无处不在。中国工程院院士丁荣军描绘了传感技术在轨道交通领域的六大应用场景：一是收集列车的运行状态信息；二是集成化的高速综合检测列车；三是列车综合性能全面检测；四是用于钢轨探伤；五是轨道状态远程监测；六是室内外环境综合传感。例如，仅以我国自主研发的高铁列车代表作和谐号380AL为例，一辆列车里的传感器数量多达1000多个，平均每40个零部件里就有一个是传感器。它们承担着状态监视、故障报警、车载设备控制等功能。这还只是车载传感器系统。

#### 1. 传感器定义和组成

国家标准 GB 7665—87 对传感器下的定义是：能感受规定的被测量件并按照一定的规律（数学函数法则）转换成可用信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成。

中国物联网校企联盟认为，传感器的存在和发展，让物体有了触觉、味觉和嗅觉等感官，让物体慢慢变得活了起来。在实际的应用中，传感器通常是将各种现实世界的非电量转化为可测量的电信号，它获得的信息正确与否，直接关系整个系统的精度。传感器又称为变换器，其应用范围很广泛，甚至可以感知人类感官无法觉察的环境变化，是人类五官的延长，通常又把传感器称为“电五官”。

传感器通常由敏感元件和转换元件组成，如图 1-4 所示。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适于传输或测量的电信号的部分。

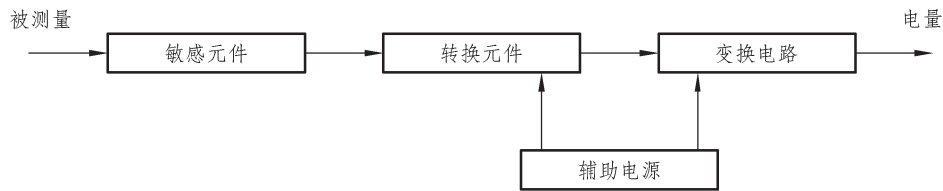


图 1-4 传感器组成方框图

需要说明的是，并不是所有的传感器都必须包括敏感元件和转换元件。如果敏感元件直接输出的是电量，它就兼作转化元件，如压电晶体、热电偶等；如果转换元件能直接感受被测量而输出与之成一定关系的电量，则传感器无敏感元件，如热敏电阻、光电元件等。

由于转换元件输出信号一般都很微弱，需要变换电路进行放大和调制，现在许多集成传感器都将变换电路及其工作辅助电源做成一体，集成在一个芯片中进行封装。

## 二、传感器的分类

传感器的分类方法很多，但常用的分类方法有两种：一种是按测量对象分类，如温度传感器、湿度传感器、力传感器、位移传感器、速度传感器等；另一种是按传感器的工作原理分类，如热电式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁电式传感器等。

除此之外，还有其他一些分类方式（见表 1-1）。

### 1. 按照工作机理分类

按照工作机理可分为结构性传感器和物性型传感器。

结构性传感器因被测参数的变化引起传感器的结构变化，导致输出电量的变化，它是利用物理学中的场定律和运动定律等构成，如电容式传感器、电感式传感器。

物性型传感器利用某些物质或某种性质随被测参数变化的原理构成，如湿敏传感器、霍尔传感器等。

### 2. 按照能量转换情况分类

按照能量转换情况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、电感、电容等电路参量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化元件构成，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。

### 3. 按照输出信号的形式分类

按照输出信号的形式可分为模拟式传感器和数字式传感器，其输出量分别是模拟量和数字量。

表 1-1 传感器的分类

分类法	型 式	说 明
按测量对象	位移、压力、温度、流量、加速度等	以被测量（即用途）分类
按工作原理	电阻式、热电式、光电式等	以传感器转换信号的工作原理命名
按基本效应	物理型、化学型、生物型	分别以转换中的物理效应、化学效应等命名
按工作机理	结构型	以转换元件结构参数变化实现信号的转换
	物性型	以转换元件物理特性变化实现信号的转换
按能量转换	能量转换型（自然型）	传感器输出量直接由被测量能量转换而得
	能量转换型（外源型）	传感器输出量能量由外源供给，但受被测输入量控制
按输出信号特性	模拟式	输出为模拟信号
	数字式	输出为数字信号
按电源	有源式	不需要外接电源即可工作
	无源式	需要外接电源才可工作

### 三、传感器的基本特性

传感器的特性主要是指输入与输出的关系，分为静态特性和动态特性。静态特性是指被测量为常量或变换极慢，即被测量的值处于稳定状态时输入与输出的关系。动态特性是指输入量随时间变化的特性。动态特性的研究方法与控制理论的研究方法相似，本章不再重复，这里仅介绍静态特性的一些指标。

传感器的静态特性可用一组性能指标来描述，如线性度、灵敏度、分辨力、迟滞、重复性、精度和漂移等。

#### 1. 线性度

线性度是指传感器的输出量和输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度，又称为非线性误差。

传感器的线性度常用在全程测量范围内实际特性曲线与拟合直线之间的最大偏差值  $\Delta L_{\max}$  与满量程输出值  $Y_{FS}$  之比表示，即

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

式中  $\Delta L_{\max}$  —— 最大非线性绝对误差；

$Y_{FS}$  —— 满量程输出值。

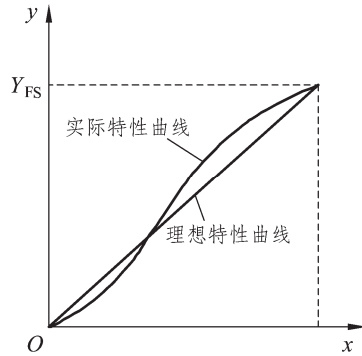


图 1-5 线性度

从传感器的性能看，希望输入输出特性曲线具有线性关系，但实际遇到的传感器大多为非线性，如图 1-5 所示。因此，常常选用拟合直线代替实际曲线。拟合直线的选取有多种方法，常用的拟合方法有：① 理论拟合；② 过零旋转拟合；③ 端点连线拟合；④ 端点平移拟合；⑤ 最小二乘法拟合等（见图 1-6）。选择拟合直线的出发点是获得最小的非线性误差，考虑是否使用方便、计算简便。通常用最小二乘法求取拟合直线，应用此方法拟合的直线与实际曲线的所有点的平方和最小，其线性误差较小。

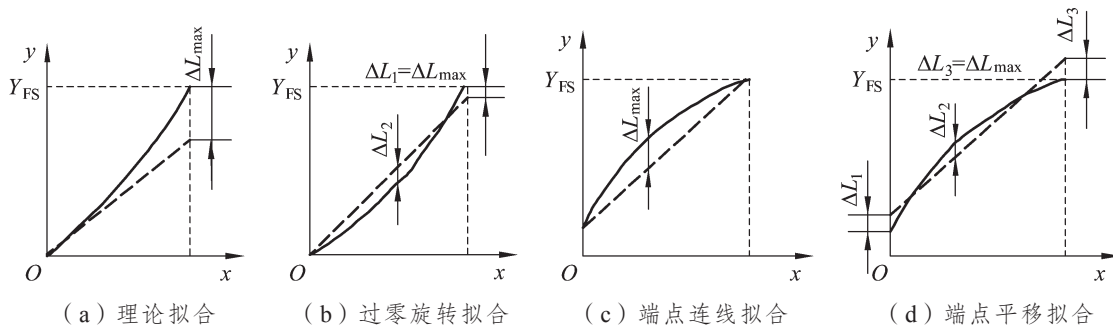


图 1-6 几种直线拟合方法

## 2. 灵敏度

灵敏度是指输出增量  $\Delta y$  与引起输出量增量  $\Delta y$  变化的输入增量  $\Delta x$  之比，它反映了测量仪表对被测参数变化的响应能力，常用  $S$  表示灵敏度，即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1-3}$$

灵敏度  $S$  值越大表示传感器越灵敏。

线性传感器的灵敏度就是它的静态特性的斜率，其灵敏度  $S$  在整个测量范围内为常量，如图 1-7 (a) 所示。而非线性传感器的灵敏度为一变量，用  $S=dy/dx$  表示，实际上就是输入输出特性曲线上某点的斜率，且灵敏度随输入量的变化而变化，如图 1-7 (b) 所示。