

# 传感器原理与应用

## 课程设计指南

主 编 何金田 张 斌

哈尔滨工业大学出版社

# 传感器原理与应用 课程设计指南

主 编 何金田 张 斌  
编 者 刘晓旻 苏建坡  
李素晓 冯荣耀

哈尔滨工业大学出版社

## 内容简介

本书共分8章,第1章介绍传感器课程设计的目的、意义、要求和方法步骤;第2章是传感器设计的理论基础;第3章概述传感器的常用材料;第4章分析传感器系统的抗干扰技术;第5章列出改善传感器性能的技术措施;第6章介绍传感器设计的一般原则、方法、步骤;第7章介绍常用传感器的设计;第8章为传感器原理与应用课程设计提供的参考题目。

本书内容丰富,概念准确,深入浅出,便于阅读。既可以作为测控技术及仪器、工业自动化等专业或相近专业的传感器原理与应用课程设计的教材,也可供有关专业的本科生和研究生选用,还可作为有关工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器原理与应用课程设计指南/何金田,张斌主编.

哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.1

ISBN 978-7-5603-2541-5

I.传… II.①何… ②张… III.传感器-课程设计-高等学校 IV.TP212-41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 196940 号

策划编辑 张秀华

责任编辑 范业婷

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东市粮食印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16.5 字数 380 千字

版 次 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2541-5

定 价 24.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

传感器原理与应用是测控技术及仪器专业的一门主干课,很多理工科专业也作为专业基础开设了这门课。由于传感器属交叉学科,涉及到物理、化学、生物等知识,传感器技术的发展和电子技术、计算机技术、材料科学、MEMS 技术紧密相关。学生要学好这门课不仅要掌握基本理论,还要能灵活应用,所以比较困难。因此,加强传感器原理与应用课程的实践教学环节,搞好“传感器原理与应用”课程设计是当前传感器原理与应用教学中必须解决的问题。

课程设计是理工科教学计划中重要的实践性教学环节之一。通过传感器原理与应用课程设计可以使学生把学过的传感器原理知识综合运用到设计和应用中,起到巩固深化、扩展及融会贯通的作用。我们结合教学和科研实践,参考有关文献,编写了传感器原理与应用课程设计指南。

本书分 8 章,第 1 章介绍传感器课程设计的目的、意义、要求和方法步骤;第 2 章是传感器设计的理论基础;第 3 章概述传感器的常用材料;第 4 章分析传感器系统的抗干扰技术;第 5 章列出改善传感器性能的技术措施;第 6 章介绍传感器设计的一般原则、方法、步骤;第 7 章介绍常用传感器的设计;第 8 章为传感器原理与应用课程设计提供的参考题目。

本书内容丰富,概念准确,深入浅出,便于阅读。本书既可以作为测控技术及仪器、工业自动化等专业或相近专业的传感器原理与应用课程设计的教材,也可供有关专业的本科生和研究生选用,还可作为有关工程技术人员的参考书。

本书由郑州大学何金田(第 1、3、5、6、8 章,第 7 章第 4 节)、张斌(第 7 章第 1、2、7、9 节)、刘晓旻(第 4 章、第 7 章第 10、11 节)、苏建坡(第 7 章第 3、5、6 节)、李素晓(第 7 章第 8 节)、冯荣耀(第 2 章)等编著,全书由何金田教授负责统稿。

本书由郑州大学赵书俊教授主审,他提出了很多宝贵意见。为此本书作者对赵书俊教授和在编写本书过程中所参考的有关教材和文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限,书中存在的错误和不足之处,恳请广大读者批评指正。

何金田

2008 年 12 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器原理与应用课程设计的目的及意义	1
1.2 传感器原理与应用课程设计的要求	1
1.3 传感器原理与应用课程设计的方法与步骤	2
第 2 章 传感器设计的理论基础	5
2.1 传感器的静态特性的建模	5
2.2 传感器的静态特性	8
2.3 传感器的动态特性的建模	12
2.4 传感器的动态特性	14
2.5 传感器的标定	22
第 3 章 传感器材料	24
3.1 金属和合金	24
3.2 磁性材料	26
3.3 陶瓷传感器材料	27
3.4 有机敏感材料	30
3.5 半导体传感器材料	31
3.6 智能材料	33
第 4 章 传感器系统的抗干扰技术	36
4.1 干扰与噪声	36
4.2 电磁干扰	38
4.3 抑制电磁干扰的措施	42
第 5 章 改善传感器性能的技术措施	60
5.1 合理选择传感器的结构、材料与参数	60
5.2 差动技术	60
5.3 补偿技术	61
5.4 平均技术	62
5.5 闭环技术	63
5.6 线性化技术	65
5.7 基于神经网络的传感器静态误差综合修正法	74
5.8 信息融合	78
5.9 自诊断技术	83
第 6 章 传感器设计的原则、方案及步骤	85
6.1 设计任务确定的技术指标	85
6.2 传感器设计的方案及步骤	86

<b>第7章 常用传感器的设计</b> .....	90
7.1 电阻式传感器 .....	90
7.2 电感式传感器 .....	101
7.3 电容式传感器 .....	114
7.4 磁电式传感器 .....	130
7.5 光电式传感器 .....	144
7.6 压电式传感器 .....	156
7.7 热电式传感器 .....	170
7.8 数字式传感器 .....	184
7.9 波式和射线式传感器 .....	195
7.10 生物传感器和化学传感器 .....	212
7.11 智能传感器 .....	234
<b>第8章 传感器设计题目指南</b> .....	246
8.1 电阻应变式传感器设计题目 .....	246
8.2 电感式传感器设计题目 .....	246
8.3 电容式传感器设计题目 .....	247
8.4 磁电式传感器设计题目 .....	247
8.5 压电式传感器设计题目 .....	248
8.6 光学传感器设计题目 .....	248
8.7 光纤传感器设计题目 .....	249
8.8 谐振式传感器设计题目 .....	250
8.9 热电传感器设计题目 .....	250
8.10 射线和波传感器设计题目 .....	251
8.11 生物化学传感器设计题目 .....	251
8.12 气敏传感器设计题目 .....	252
8.13 湿敏传感器设计题目 .....	252
8.14 新型传感器设计题目 .....	252
<b>参考文献</b> .....	254



# 第1章 绪论

## 1.1 传感器原理与应用课程设计的目的及意义

传感器原理与应用是测控技术及仪器专业的一门主干课,很多理工科专业也将其作为专业基础课而开设。由于传感器属交叉学科,涉及物理、化学、生物等领域的知识,传感器技术的发展与电子技术、计算机技术、材料科学、MEMS 技术紧密相关。要想学好这门课程不仅要掌握与各学科有关的基本理论,还要能灵活应用,比较困难。目前,传感器原理与应用的教学像其他课程一样,多年来均采用课堂讲解辅以习题及实验的模式,已成定式,学生难以真正掌握传感器系统设计、调试传感器与测量电路的方法与技能。因此,加强传感器原理与应用课程的实践教学环节,搞好传感器原理与应用课程设计是当前传感器原理与应用教学中必须解决的问题。

课程设计是理工科教学计划中重要的实践性教学环节之一。通过传感器原理与应用课程设计可使学生进一步掌握所学的基本知识、基本理论,起到巩固深化、扩展及融会贯通的作用;通过课程设计可熟悉传感器应用和设计的方法、内容、步骤及工艺,可训练查阅相关的科技文献资料并进行处理与分析的基本技能,培养独立动手的能力与实验技能,使理论与实践紧密结合,提高发现、分析与解决问题的能力。因此保证课程设计的质量是实现专业培养目标,保证全面提高学生综合素质的重要措施之一。

## 1.2 传感器原理与应用课程设计的要求

课程设计应以自学为主,独立地完成设计任务。当然,这样并不是降低教师的作用,相反对教师的教学提出了更高的要求。教师要熟练掌握设计中的重点、难点,充分发挥教师的主导作用;树立“以学生为中心”的思想,为学生做好各种服务;在教学方法上既不能包办代替,又不能撒手不管,要注意根据学生基础和能力的差别提出不同的要求,做到因材施教。

传感器原理与应用课程设计不是让学生纸上谈兵地进行一些假想的理论设计与绘图,而是要他们对一些典型传感器的具体技术问题提出理论分析和解决方案,整个过程既有理论计算与设计,又要动手研制、调试与标定,是一个比较系统和完整的实践过程。

传感器原理与应用课程设计从课程设计的任务出发,完成设计工作的各个环节,课程设计应达到以下教学要求:

(1) 巩固和加深对本课程基本知识的理解,综合运用课程中所学到的理论知识独立地完成一个设计课题。

(2) 根据课题需要,学会查阅手册和文献资料,培养独立分析和解决实际问题的能力。

(3)通过测量原理的分析、论证和比较,掌握传感器的原理、选型、误差补偿、标定和设计计算。

(4)通过电路方案的分析、论证比较和设计计算,掌握电路的分析方法和设计方法。

(5)掌握电路调试、仿真和软件编程方法,掌握电路图、PCB图的设计方法,学会电路的制作与调试。

(6)掌握常用仪器、仪表的正确使用方法。

(7)学会正确撰写课程设计总结报告,能顺利地完成答辩。

(8)培养严肃认真的工作作风和严谨求实的科学态度,建立正确的生产观、经济观和全局观。

### 1.3 传感器原理与应用课程设计的方法与步骤

根据普通高等理工科院校的教学计划,传感器原理与应用课程设计一般安排2~3周的时间。可以在一个学期内完成,也可以在两个学期内完成,视具体条件而定。课程设计一般包括:选题、设计任务书的制定、设计与制作、撰写设计报告书和答辩等几个环节。

(1)确定课程设计题目。

课程设计的题目主要由教师选择,也可以由学生和教师协商确定。

课程设计的题目选择得是否合适,直接关系到完成情况和教学效果。教师考虑课程设计的题目时应注意:①能较全面、综合地反映传感器原理与应用课程所学的最基本、最重要的理论知识;②能体现知识的综合应用,即不仅要用到传感器原理方面的知识,也要用到信号调理电路及其他方面的有关知识,从而培养学生综合运用所学知识的能力;③选用与本专业生产实践相关的课题,所测参数应具有典型性、代表性,兼顾课题的实用性和先进性;④选题的深度和广度既能体现传感器的基本理论和应用技术的一定难度,又使学生经过努力能够完成。

(2)布置设计任务书。

(3)选择设计题目。学生根据自己的兴趣和实际情况,按照设计题目要求的指标,通过查阅有关资料确定方案。画出原理方框图,确定设计操作参数、仪器、设备等,通过实验验证、分析设计方案,完成设计制作。教师根据选题内容和实际情况,帮助学生明确任务,掌握工程设计方法。

(4)在完成设计制作的基础上,撰写课程设计报告。

(5)进行答辩。

(6)考核方式。

仅凭设计总结报告进行成绩评定,不利于课程设计全过程培养,无法了解每个学生对课程设计内容掌握的程度,有时会出现学生设计成绩与设计效果相背的现象。因此,将课程设计考核成绩分为三部分:参与课程设计过程的程度、课程设计总结报告、课程设计答辩。根据不同的情况,按照适当的比例确定最终成绩。

传感器原理与应用课程设计任务书见表1.1,传感器原理与应用课程设计成绩评定表见表1.2。



表 1.1 传感器原理与应用课程设计任务书

学号		学生姓名		专业(班级)	
设计题目					
设计技术参数					
主要技术指标和要求					
给定的条件和所用的仪器设备					
工作计划					
参考资料					
指导教师签字		教研室主任签字			

年 月 日

表 1.2 传感器原理与应用课程设计成绩评定表

学生姓名：\_\_\_\_\_ 学号：\_\_\_\_\_ 专业班级：\_\_\_\_\_

课程设计题目：\_\_\_\_\_

参与课程设计	课程设计报告	课程设计答辩	总成绩
指导教师评语			
备注	指导教师_____		

年 月 日

## 第2章 传感器设计的理论基础

在《传感器通用术语》(GB 7665—1987)中对传感器的定义是:“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,通常由敏感元件和转换元件组成”。显然,传感器的功能是把输入的被测量转换成可用信号输出,所以研究传感器的输出与输入的关系(即传感器的特性)是设计、研制和应用传感器的基础。

传感器的输入量可分为静态量和动态量,静态量是指常量或变化非常缓慢的量,动态量是指周期变化、瞬态变化或随机变化的量。输入量为静态量时,其输出输入的关系称为静态特性,输入量为动态量时,其输出输入的关系称为动态特性。静态特性和动态特性是传感器的基本特性,表征其性能的优劣。

然而,传感器的静态特性和动态特性并不能完全描述传感器的性能,在设计和选用传感器时,还应该考虑传感器的其他特性,如输入阻抗、输出阻抗、可靠性、功耗、尺寸、重量、价格等。在以后各章中将根据具体的传感器设计将对这些特性进行介绍。

### 2.1 传感器的静态特性的建模

正确、合理地建立所研究的传感器的数学模型无疑是设计、研制传感器的关键之一。建立传感器静态模型的方法通常有:解析建模方法、数值建模方法和计算机模拟方法。

(1)解析建模方法是根据传感器的工作原理,通过理论分析或实验数据,用一个或多个函数关系式来描述传感器的输入量、输出量与结构和参数之间的关系。解析建模方法的缺点是要对实际情况作较大的简化,或仅能分析一些特殊的情况。

(2)数值建模方法是当传感器的结构比较复杂,或要求分析得比较准确和细致时,可以采用数值分析方法。例如,有限差分法、有限元法和边界元法等。

(3)计算机模拟方法是根据传感器的转换原理及测试系统的测量和数据处理过程,借助计算机直接计算和模拟其工作过程,建立数学模型。

下面仅以解析建模方法为例,说明光吸收式光纤温度传感器的建模。

#### 1. 测温原理

半导体材料的光吸收和温度的关系曲线如图2.1所示。半导体材料的吸收边波长 $\lambda_g(t)$ 随温度增加而向较长波长方向移动。若能适当选择发光二极管,使其光谱范围正好落在吸收边的区域,利用透过半导体材料的光强随温度的增加而减少的关系,可以做成透射式光纤温度传感器。

图2.2是双光纤参考基准通道法半导体吸收式

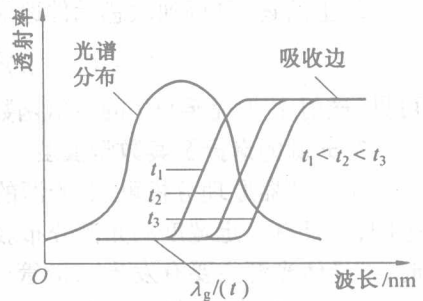


图2.1 半导体材料的光吸收和温度的关系曲线

光纤温度传感器的结构框图。测量光纤和参考光纤传输来自同一光源的光,不同的是测量光纤上多了敏感材料,其余条件相同。由于采用了参考光纤和除法器,消除了一定程度的外界干扰,提高了测量精度。这种温度计测温范围在 40 ~ 120℃ 之间,精度为 ± 1℃。



图 2.2 半导体吸收式光纤温度传感器的结构框图

## 2. 敏感元件透射率的数学模型

采用半导体 GaAs 作为敏感元件,它是典型的直接跃迁型材料,对能量为  $h\nu$  的光子的吸收系数由下式给出

$$\delta = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (h\nu \geq E_g) \quad (2.1)$$

式中  $A$ ——与电子和空穴有效质量有关的常数;

$E_g$ ——半导体 GaAs 的禁带宽度,随温度  $t$  变化而变化。有

$$E_g(t) = E_g(0) - \varphi t \quad (2.2)$$

式中  $\varphi$ ——与 GaAs 材料有关的常数,单位为 eV/K。

于是,吸收系数  $\delta(t)$  可表示为

$$\delta(t) = A[h\nu - E_g(0) + \varphi t]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

由于半导体的吸收系数  $\delta(t)$  随温度变化,所以其透射率  $T$  也随温度变化,即

$$T = \frac{(1 - R)^2 e^{-\delta x}}{1 - R^2 e^{-2\delta x}} \quad (2.4)$$

式中  $x$ ——GaAs 的厚度;

$R$ ——半导体材料的反射率。

本系统中  $R \approx 0.3$ ,所以,即使  $\delta(t) = 0$ ,也有

$$R^2 e^{-2\delta x} = 0.09 \ll 1 \quad (2.5)$$

因此,上式可近似为

$$T = (1 - R)^2 e^{-\delta x} \quad (2.6)$$

综上所述,可得到敏感元件透射率的数学模型

$$T = (1 - R)^2 \exp\{-A[h\nu - E_g(0) + \varphi t]^{\frac{1}{2}} x\} \quad (2.7)$$

可见,透射率  $T$  是温度  $t$  的单值函数。

## 3. 光源的选择及其数学模型

由传感器原理分析可知:光源的发光光谱必须覆盖半导体 GaAs 材料吸收波长的变化范围,并且有一定宽度的光谱分布。此外,为了便于实用还要求光源体积小、耗电少等。目前,半导体光源主要有发光二极管(LED)和二极管激光器两大类。LED 已具备了上述特点,并且由于后者谱线宽度太窄(要比 LED 小一个数量级),因此不适合做本传感器的光源。由敏感元件透射率的数学模型可计算出当被测温度在 0 ~ 200℃ 范围变化时,半导体材料本征吸收波长( $\lambda_g$ )从 850 nm 变到 915 nm,因此本系统中选用峰值波长为 880 nm,谱

线宽度为 100 nm 的 GaAs 发光二极管,其光谱分布近似于高斯分布。可用高斯分布函数推算其发光强度

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2\right] \quad (2.8)$$

式中  $\lambda_0$ ——峰值波长;  
 $\Delta\lambda$ ——谱线半宽度;  
 $I_0$ ——最大辐射强度。

#### 4. 光电探测器的选择及其数学模型

光电探测器的选择依据是要使其光谱响应度  $R(\lambda)$  与光源的峰值波长相对应,最好使其峰值响应度所在的位置与光源的峰值波长所在的位置相同,这样,可以使传感器获得最大的输出。为此,选择 Si - PIN 光电二极管作为光电探测器,原因是其性能稳定,价格便宜,使用方便,尤其是在 800 ~ 900 nm 这一波段光电转换效率最高,这恰巧与本传感器光源 LED 的工作波段一致,使用该探测器可以使系统达到最佳效果。其光谱响应函数可以表示为

$$R(\lambda) = \frac{R_t}{R_1} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\sigma_1}\right)^2\right] + \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_2}{\sigma_2}\right)^2\right] \right\} \quad (2.9)$$

式中  $R_t$ ——峰值响应度;  
 $\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2$ ——相关参数(本系统中  $\lambda_1 = 750 \text{ nm}, \lambda_2 = 850 \text{ nm}, \sigma_1 = 200 \text{ nm}, \sigma_2 = 100 \text{ nm}$ );  
 $R_1$ ——归一化常数。

由此,光电探测器输出电压信号  $U(t)$  为

$$U(t) = K \int_0^\infty I(t) T(\lambda, t) R(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

式中  $K$ ——系统衰减系数(包括光源,入射光纤, GaAs 晶片,出射光纤,光电探测器间的耦合效率及光在光纤中的衰减)。

#### 5. 传感器系统的数学模型

图 2.2 中 LED 发出中心波长为  $\lambda$  的光,然后由分光器分为两束,其中一束经过半导体 GaAs 晶片,其透射率  $T$  受到温度调制,作为测量光;而另一束不经过 GaAs 晶片但经过与测量光相同的环境,作为参考光。由于它们经过相同环境,因此受到的干扰相同,到达光电转换器后输出电压信号  $U_1$  和  $U_2$  分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1(t) &= K \int_0^\infty I_1(t) T(\lambda, t) R(\lambda) d\lambda \\ U_2(t) &= K \int_0^\infty I_2(t) R(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

$U_1$  和  $U_2$  经采样保持,除法器处理后,可以消除干扰,得到只与被测温度有关的电压信号

$$U(t) = \frac{U_1(t)}{U_2(t)} = \frac{\int_0^\infty I_1(t) T(\lambda, t) R(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty I_2(t) R(\lambda) d\lambda} \quad (2.12)$$

综合式(2.6) ~ (2.8) 及式(2.12) 可得到传感器系统总的数学模型为

$$U(t) = \frac{\int_0^{\infty} \Theta_1 T(\lambda, t) (\Theta_2 + \Theta_3) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Theta_1 (\Theta_2 + \Theta_3) d\lambda} \quad (2.13)$$

式中

$$\Theta_1 = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\Delta\lambda}\right)^2\right]$$

$$\Theta_2 = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\sigma_1}\right)^2\right]$$

$$\Theta_3 = \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_2}{\sigma_2}\right)^2\right]$$

式(2.13)表明,传感器的输出信号与 GaAs 材料的透射率、光源的光谱分布、光电探测器的响应度有关,而与光源的发光强度、探测器的响应强度无关。因此本方案在很大程度上可以消除光源发光强度波动及光探测器响应强度波动对测温系统的影响。

## 2.2 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指输入量为静态量时,其输出与输入的关系。

在静态条件下,若不考虑迟滞及蠕变,则传感器的输出量  $y$  与输入量  $x$  的关系可由一代数方程表示,称为传感器的静态数学模型,即

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (2.14)$$

式中  $a_0$ ——无输入时的输出,即零位输出;

$a_1$ ——传感器的线性灵敏度;

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项的待定常数。

通过理论分析可得到用数学表达式表示的传感器静态特性,进而可绘制成曲线或制成数据表格。但理论分析时一般需做一些近似,使得理论特性和实际特性差别较大。因此,往往采用实验方法获取传感器的静态特性。衡量传感器静态特性优劣的主要指标有:线性度、灵敏度、迟滞、重复性、阈值、分辨力、稳定性、漂移和静态误差等。

### 1. 线性度

在静态标准条件下,利用一定精度等级的校准设备,测得的特性曲线称为传感器的静态校准曲线。传感器的校准曲线与选定的拟合直线的偏离程度称为传感器的线性度,又称非线性误差。如图 2.3 所示,用  $\Delta y_{\max}$  表示校准曲线与拟合直线的最大偏差,用  $y_{F.S.}$  表示传感器的满量程输出值(F.S.是 full scale 的缩写)。则线性度  $e_L$  可表示为

$$e_L = \frac{\pm \Delta y_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (2.15)$$

显然,线性度的值与所选的拟合直线有关。选择拟合直线的原则是获得尽量小的非线性误差,同时还要方便使用和计算。下面介绍确定拟合直线的几种常用方法。

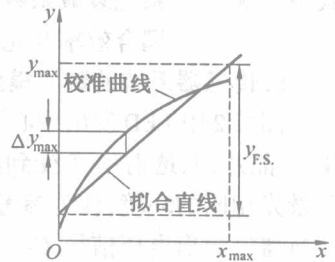


图 2.3 传感器的线性度



### (1) 端点直线法

端点是指与量程的上下极限值对应的点。通常取零点作为端点直线的起点,满量程输出作为终点,通过这两个端点的直线称为端点直线。以端点直线作为拟合直线得到的线性度称为端点线性度,如图 2.4 所示。这种拟合方法简单直观,但未考虑其他校准点的分布,拟合精度较低,一般用于特性曲线非线性较小的情况。

### (2) 端点平移直线法

作两条与端点直线平行的直线,使之恰好包围所有的校准点,然后在这一对平行直线之间作一条平分线,作为拟合直线。这条拟合直线即端点平移直线,由此得到的线性度称为独立线性度,如图 2.5 所示。

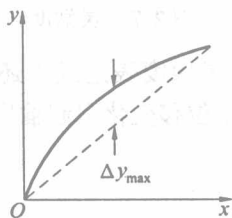


图 2.4 端点线性度

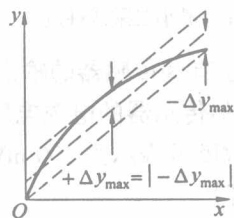


图 2.5 独立线性度

### (3) 最小二乘直线法

按最小二乘法原理求拟合直线,使传感器校准数据残差的平方和最小,所得拟合直线称为最小二乘直线。以最小二乘直线为拟合直线得到的线性度称为最小二乘线性度,如图 2.6 所示。设拟合直线方程为  $y = b + kx$ , 校准点有  $n$  个。任一个校准数据  $y_i$  与拟合直线上对应值之间的残差为  $\delta_i = y_i - (b + kx_i)$ , 按最小二乘法原理,应使  $\sum \delta_i^2$  最小。为此,将  $\sum \delta_i^2$  分别对  $k$  和  $b$  求一阶偏导数并令其等于零,即可求得

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.16)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.17)$$

有的传感器采用过零点的最小二乘直线,即  $y = kx$ , 这时

$$k = \frac{\sum x_i y_i}{\sum x_i^2} \quad (2.18)$$

虽然这种方法拟合精度很高,但校准曲线对拟合直线最大偏差的绝对值未必最小,最大正负偏差的绝对值也未必相等。

## 2. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态工作情况下输出改变量与引起此变化的输入改变量之比。常用  $S_n$  表示灵敏度,其表达式为

$$S_n = \frac{dy}{dx} \quad (2.19)$$

显然,非线性传感器的灵敏度各处不一样,如图 2.7(a) 所示。只有线性传感器的灵敏

度才为常数,如图 2.7(b) 所示,这时

$$S_n = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.20)$$

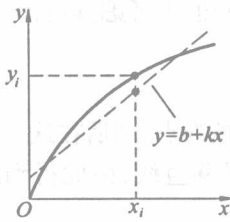


图 2.6 最小二乘线性度

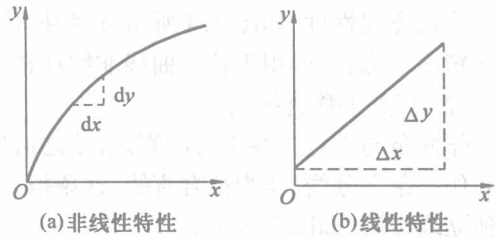


图 2.7 灵敏度定义

实际中,由于有些传感器的输出与电源有关,故其灵敏度表达式中还需考虑电源的影响。例如,某位移传感器的电源电压为 1 V 时,每 1 mm 位移变化引起输出电压的变化为 100 mV,则其灵敏度可表示为 100 mV/(mm · V)。

### 3. 迟滞(迟环)

在相同工作条件下做全量程范围校准时,正行程(输入量由小到大)和反行程(输入量由大到小)所得输出输入特性曲线往往不重合。也就是说,对应于同一大小的输入信号,传感器正反行程的输出信号大小不相等,此即迟滞现象。迟滞(或称迟环)正是用来描述传感器在正反行程期间特性曲线不重合程度的,如图 2.8 所示。迟滞的大小常用正反行程最大输出差值  $\Delta y_{\max}$  对满量程输出  $y_{F.S.}$  的百分比来表示,其表达式为

$$e_h = \pm \frac{\Delta y_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (2.21)$$

产生迟滞的主要原因是传感器的机械部分存在各种缺陷,如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等。

### 4. 重复性

重复性是指在相同工作条件下,输入量按同一方向作全量程多次测试时,所得传感器特性曲线不一致性的程度,如图 2.9 所示。重复性的计算方法有多种,比较简单的方法是先求出正行程的最大偏差  $\Delta y_{\max 1}$  和反行程的最大偏差  $\Delta y_{\max 2}$ ,再取这两个偏差中的较大者为  $\Delta y_{\max}$ ,然后用  $\Delta y_{\max}$  与满量程输出  $y_{F.S.}$  的百分比表示,即

$$e_r = \pm \frac{\Delta y_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (2.22)$$

因重复性误差属随机误差,故按标准偏差来计算重复性指标更合适,用  $\sigma_{\max}$  表示各校准点标准偏差中的最大值,则

$$e_r = \pm \frac{\alpha \sigma_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (2.23)$$

式中  $\alpha$ ——置信概率系数,通常取 2 ~ 3。取 2 时,置信概率为 95.4%;取 3 时,置信概率为 99.7%。

考虑到传感器具有迟滞现象,应在每个校准点上分别计算正行程和反行程的  $n$  次测量值的标准偏差  $\sigma$ ,并从  $2m$  ( $m$  为校准点数) 个  $\sigma$  中选取最大值作为  $\sigma_{\max}$ 。标准偏差可按贝

塞尔公式计算, 设正(反)行程时在第  $i$  个校准点上第  $j$  次测量值为  $y_{ij}$ , 测量值的算术平均

值为  $\bar{y}_i = \frac{\sum_j y_{ij}}{n}$ , 则在此校准点上正(反)行程标准偏差  $\sigma_i$  为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_j (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n - 1}} \quad (2.24)$$

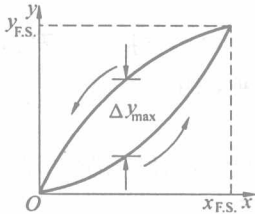


图 2.8 迟滞

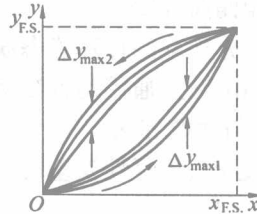


图 2.9 重复性

标准偏差也可用极差法计算, 即先计算各校准点正(反)行程测量值中最大值与最小值之差  $W_i$ , 并根据测量次数  $n$  在表 2.1 中选取极差系数  $\alpha_n$ , 然后按下式计算

$$\sigma_i = \frac{W_i}{\alpha_n} \quad (2.25)$$

表 2.1 极差系数与测量次数的关系

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\alpha_n$	1.41	1.91	2.24	2.48	2.67	2.83	2.96	3.08	3.18	3.26	3.33

### 5. 阈值和分辨力

当传感器的输入从零开始缓慢增加时, 只有在达到了某一值后, 输出才发生可观测的变化, 这个值是传感器可测出的最小输入量, 称为传感器的阈值。

当传感器的输入从非零的任意值缓慢增加时, 只有在超过某一输入增量后, 输出才发生可观测的变化, 这个输入增量称为传感器的分辨力。有时用该值相对于满量程输入值的百分数表示, 则称为分辨率。分辨力是传感器可测出的最小输入改变量。

对数字式传感器, 分辨力指能引起数字输出的末位数发生改变所对应的输入增量。

### 6. 稳定性

稳定性表示传感器在较长时间内保持其性能参数的能力, 故又称长期稳定性。一般以室温条件下经过一个规定的时间后, 传感器的输出与标定时输出的差异程度来表示其稳定性。稳定性可用相对误差或绝对误差表示。表示方式如: 个月不超过 % 满量程输出。有时也采用给出标定的有效期来表示其稳定性。

### 7. 漂移

漂移是指传感器的被测量不变, 而其输出量却发生了不希望有的改变。漂移包括零点漂移与灵敏度漂移。图 2.10 所示, 为特性曲线 2 相对于特性曲线 1 既发生了零点漂移又发生了灵敏度漂移。

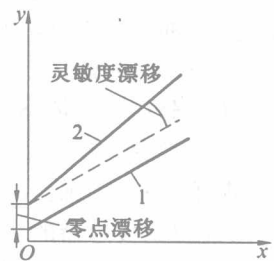


图 2.10 零点漂移与灵敏度漂移