

安徽省教育厅推荐教材

# 传感器原理及应用

林春方 胡伟全 徐凤云 编著

安徽大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用 /林春方等编著 .—合肥 :安徽大学出版社,2004.8

安徽省高校电子信息类教材

ISBN 7-81052-912-9

I. 传... II. 林... III. 传感器—高等学校 :技术学校—教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 085290 号

---

## 传感器原理及应用

林春方 胡伟全 徐凤云 编著

出版发行 安徽大学出版社  
(合肥市肥西路3号 邮编 230039)  
联系电话 编辑部 0551-5108348  
发行部 0551-5107784  
责任编辑 ahdxchps@mail.hf.ah.cn  
责任编辑 钟 蕾  
封面设计 孟献辉

印 刷  
开 本 787×1092 1/16  
印 张 11.25  
字 数 274 千  
版 次 2004 年 8 月第 1 版  
印 次 2004 年 8 月第 1 次印刷

---

ISBN7-81052-912-9/T·107

定价 14.80 元

---

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

# 前 言

传感器技术在当代科技领域中占有十分重要的地位,随着计算机技术的飞速发展,信息处理技术也在不断发展完善,但作为提供信息的传感器,它的发展相对于计算机的信息处理技术来说就滞后了,这使得自动检测技术受到影响。基于上述原因,目前国内外已将传感器技术列为优先发展的科技领域之一,越来越多的科技工作者对传感器技术给予了高度的重视。

根据高职高专教育的特点,本书本着“淡化理论、够用为度、培养技能、重在实用”的原则,在内容处理上,通过精选内容,以有限的篇幅取得比现有教材更大的覆盖面,在不削弱传统的较为成熟传感器基本内容的前提下,充实了新型传感器的内容,拓宽了专业面,并紧跟高新技术的发展,以适应传感器开发、应用的需要。文字叙述上力求简明扼要,突出重点,突出应用性、针对性,加强对实践能力的培养。本书参考学时 60 学时,主要内容包括:传感器概述,电阻式传感器,电容式传感器,电感式传感器,压电式传感器,热电式传感器,光电式传感器,霍尔传感器以及几种新型传感器简介。

安徽电子信息职业技术学院林春方老师编写本书第一章至第三章,并负责全书的统稿工作,第四章至第六章由徐凤云老师编写,第七章至第九章及实训题由蚌埠学院胡伟全老师编写。由于编者水平有限,经验不足,书中错误之处难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 5 月



第一章 传感器概述.....	(1)
1.1 传感器的组成与分类 .....	(1)
1.1.1 传感器的定义 .....	(1)
1.1.2 传感器的组成 .....	(2)
1.1.3 传感器的分类 .....	(2)
1.2 传感器的一般特性 .....	(3)
1.2.1 传感器的静态特性 .....	(3)
1.2.2 传感器的动态特性 .....	(6)
1.3 传感器的标定 .....	(8)
1.3.1 传感器的静态特性标定 .....	(8)
1.3.2 传感器的动态特性标定 .....	(9)
1.4 传感器的发展动向.....	(10)
第一章小结 .....	(11)
思考和练习 .....	(12)
第二章 电阻式传感器 .....	(13)
2.1 电位器传感器.....	(13)
2.1.1 电位器传感器概述 .....	(13)
2.1.2 线性线绕电位器的空载特性 .....	(14)
2.1.3 电位器的负载特性 .....	(15)
2.1.4 非线性线绕电位器 .....	(15)
2.2 电阻应变式传感器.....	(16)
2.2.1 应变效应 .....	(16)
2.2.2 电阻应变片的结构和工作原理 .....	(16)
2.2.3 电阻应变片的种类 .....	(19)
2.2.4 电阻应变片的测量电路 .....	(21)
2.2.5 电阻应变式传感器的应用 .....	(27)
2.3 固态压阻式传感器.....	(31)
2.3.1 半导体压阻效应与扩散硅压阻器件 .....	(32)
2.3.2 固态压阻式传感器的应用 .....	(33)
2.4 气敏电阻传感器.....	(35)

2.4.1	气敏电阻的工作原理 .....	(35)
2.4.2	气敏电阻传感器的结构 .....	(35)
2.4.3	气敏电阻传感器的应用 .....	(37)
第二章	小结 .....	(38)
	思考和练习 .....	(39)
第三章	电容式传感器 .....	(41)
3.1	电容式传感器的原理与结构形式 .....	(41)
3.1.1	电容式传感器的工作原理 .....	(41)
3.1.2	电容式传感器的结构形式 .....	(41)
3.1.3	电容式传感器的特性 .....	(42)
3.2	电容式传感器的测量电路 .....	(46)
3.2.1	运算放大器式电路 .....	(46)
3.2.2	电桥电路 .....	(47)
3.2.3	调频电路 .....	(48)
3.2.4	谐振电路 .....	(48)
3.2.5	脉冲宽度调制电路 .....	(49)
3.3	电容式传感器的应用 .....	(51)
第三章	小结 .....	(54)
	思考和练习 .....	(54)
第四章	电感式传感器 .....	(55)
4.1	自感式传感器 .....	(55)
4.1.1	自感式传感器的结构与工作原理 .....	(55)
4.1.2	自感式传感器的应用 .....	(59)
4.2	差动变压器式传感器 .....	(61)
4.2.1	差动变压器的结构原理与测量电路 .....	(61)
4.2.2	差动变压器传感器的应用举例 .....	(64)
4.3	电涡流式传感器 .....	(65)
4.3.1	电涡流式传感器的原理 .....	(65)
4.3.2	电涡流式传感器的应用 .....	(68)
第四章	小结 .....	(70)
	思考和练习 .....	(70)
第五章	压电式传感器 .....	(72)
5.1	压电效应与压电材料 .....	(72)
5.1.1	压电效应 .....	(72)
5.1.2	压电材料 .....	(72)
5.2	压电式传感器的等效电路与测量电路 .....	(75)

5.2.1 压电式传感器的等效电路 .....	(75)
5.2.2 压电式传感器的测量电路 .....	(76)
5.3 压电式传感器的应用 .....	(76)
第五章小结 .....	(78)
思考和练习 .....	(79)
<b>第六章 热电式传感器 .....</b>	<b>(80)</b>
6.1 热电偶 .....	(80)
6.1.1 热电效应 .....	(80)
6.1.2 热电偶基本定律 .....	(82)
6.1.3 热电偶的结构和种类 .....	(83)
6.1.4 热电偶的测量电路 .....	(85)
6.1.5 热电偶冷端补偿方式 .....	(85)
6.2 热电阻 .....	(87)
6.2.1 金属热电阻 .....	(87)
6.2.2 热敏电阻 .....	(90)
6.3 集成温度传感器 .....	(91)
6.3.1 集成温度传感器的基本工作原理 .....	(92)
6.3.2 电压输出型集成温度传感器 .....	(92)
6.3.3 电流型集成温度传感器 .....	(93)
6.4 热电式传感器的应用 .....	(93)
第六章小结 .....	(96)
思考和练习 .....	(97)
<b>第七章 光电式传感器 .....</b>	<b>(98)</b>
7.1 光电效应 .....	(98)
7.1.1 外光电效应 .....	(98)
7.1.2 内光电效应 .....	(99)
7.2 光电元件 .....	(100)
7.2.1 光电管 .....	(100)
7.2.2 光电倍增管 .....	(101)
7.2.3 光敏电阻 .....	(104)
7.2.4 光电二极管和光电三极管 .....	(107)
7.2.5 光电池 .....	(109)
7.2.6 光电耦合器件 .....	(112)
7.3 光电传感器的应用 .....	(113)
7.3.1 灯光亮度自动控制器 .....	(113)
7.3.2 工件计数装置 .....	(113)
7.3.3 邮政信函过戳装置 .....	(114)

7.3.4 条形码扫描笔 .....	(114)
7.3.5 光电池测速装置 .....	(115)
7.3.6 主回路与控制回路的隔离电路 .....	(116)
第七章小结.....	(116)
思考和练习.....	(117)
<b>第八章 霍尔传感器.....</b>	<b>(118)</b>
8.1 霍尔效应及霍尔元件 .....	(118)
8.1.1 霍尔效应 .....	(118)
8.1.2 霍尔元件和测量电路 .....	(119)
8.1.3 霍尔元件的主要特性参数 .....	(120)
8.1.4 霍尔器件的材料选择 .....	(122)
8.2 霍尔集成传感器 .....	(122)
8.2.1 霍尔开关集成传感器 .....	(122)
8.2.2 霍尔线性集成传感器 .....	(125)
8.3 霍尔传感器的应用 .....	(126)
8.3.1 霍尔位移传感器 .....	(126)
8.3.2 霍尔电流变换器 .....	(127)
8.3.3 利用霍尔传感器实现无接触式仿型加工 .....	(127)
8.3.4 自动供水装置 .....	(128)
8.3.5 霍尔元件在磁性材料研究中的应用 .....	(129)
8.3.6 非接触式键盘开关 .....	(129)
第八章小结.....	(130)
思考和练习.....	(130)
<b>第九章 几种新型传感器简介.....</b>	<b>(131)</b>
9.1 光纤传感器 .....	(131)
9.1.1 光纤结构及导光原理 .....	(131)
9.1.2 光纤的主要特性参数 .....	(133)
9.1.3 光纤传感器的类型 .....	(133)
9.1.4 光纤传感器及其应用 .....	(134)
9.2 光栅传感器 .....	(136)
9.2.1 光栅测量的基本原理 .....	(136)
9.2.2 光栅传感器的结构 .....	(137)
9.2.3 光栅传感器的辨向原理与细分技术 .....	(138)
9.2.4 光栅传感器的应用 .....	(140)
9.3 生物传感器 .....	(141)
9.3.1 生物传感器概述 .....	(141)
9.3.2 生物传感器的工作原理 .....	(142)

9.3.3 生物传感器的应用 .....	(143)
9.4 超声波传感器 .....	(146)
9.4.1 超声波检测的物理基础 .....	(146)
9.4.2 超声波换能器(超声波传感器) .....	(148)
9.4.3 超声波传感器的应用 .....	(150)
9.5 电荷耦合器件(CCD) .....	(152)
9.5.1 CCD 的工作原理 .....	(152)
9.5.2 CCD 的应用 .....	(156)
第九章小结.....	(159)
思考和练习.....	(160)
附录 传感器原理与应用实训.....	(161)
实训一 温度检测与控制 .....	(161)
实训二 应变式传感器在衡器中的应用 .....	(164)

# 第一章 传感器概述

在现代科学技术发展过程中,非电量(例如压力、力矩、应变、位移、速度、加速度、温度、液位、浓度、重量等)测量技术(传感器技术)已经成为各个应用领域,特别是自动检测、自动控制系统中必不可少的部分,获取这些测量参数的传感器无疑掌握着这些系统的命脉。

例如,在各种航天器上,都利用多种传感器测定和控制航天器的飞行参数、姿态和发动机工作状态,将传感器获取的种种信号再输送到各种测量仪表和自动控制系统,进行自动调节,使航天器按人们预先设计的轨道正常运行。

又如家用电冰箱是由温控器来控制压缩机的开关从而达到温度控制的目的,如果温控器中的温度传感器损坏,则电冰箱就无法正常工作。

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。传感器好比人的五官和四肢,直接感观外部世界的一切信息,这些信息通过神经系统传递给大脑进行加工处理,控制器就好比是大脑。显然,没有传感器也就没有现代化的自动检测和控制系统,没有传感器更将没有现代科学技术的迅速发展。

## 1.1 传感器的组成与分类

### 1.1.1 传感器的定义

传感器又称为变换器、检测器或探测器等,它是指能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成电学量输出的测量装置,通常由敏感元件和转换元件组成。其中,敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的部分,例如应变式压力传感器的作用是将输入的压力信号转换成电压信号输出,它的敏感元件是一个弹性膜片,其作用是将压力转换成膜片的变形,转换元件指传感器中能将敏感元件输出转换为适于传输和测量的电信号部分,如应变式压力传感器的转换元件是一个应变片,它利用电阻应变效应(金属导体或半导体的电阻随着它产生机械变形的大小而发生变化的现象),将弹性膜片的变形转换为电阻值的变化。

应该说明,并不是所有的传感器都能明显分清敏感元件与转换元件,二者合为一体的也较常见,如半导体气体、湿度传感器等,它们一般都是将感受的被测量直接转换为电信号,没有中间转换环节。

传感器输出信号有很多形式,如电压、电流、频率、脉冲等,输出信号的具体形式由传感器的原理确定。

### 1.1.2 传感器的组成

一般来说,传感器由敏感元件和转换元件组成。但转换元件输出的电量常常难以直接进行显示、记录、处理和控制,这时需要将其进一步变换成可直接利用的电信号,而传感器中完成这一功能的部分称为测量电路。例如应变式压力传感器中的测量电路是一个电桥电路,它可以将应变片输出的电阻值变化转换为一个电压或电流的变化,经过放大后即可推动记录、显示仪表的工作。随着半导体器件与集成电路技术在传感器中的应用,传感器的测量电路可以安装在传感器的壳体里或与敏感元件一起集成在同一芯片上,因此,测量电路以及所需的电源都应作为传感器组成的一部分,如图 1-1 所示。测量电路的选择视转换元件的类型而定,经常采用的有电桥电路、脉宽调制电路、振荡电路、高输入阻抗电路等。



图 1-1 传感器的组成框图

综上所述,传感器一般由敏感元件、转换元件、测量电路和辅助电源四部分组成。但有的传感器可能将敏感元件与转换元件合二为一,而有的传感器可能不需要辅助电源。

### 1.1.3 传感器的分类

传感器一般都是利用物理、化学和生物等学科的某些效应、规律或原理,按照一定的制造工艺设计制造出来的。由某一原理设计制造的传感器可以同时测量多种非电参数,而有时一种非电量又可用几种不同的传感器测量,因此传感器的分类方法很多,一般可按如下几种方法分类。

#### 1. 按被测物理量分类

这种方法是根据被测物理量的性质进行分类的,如被测物理量为温度、压力、流量、位移、速度等,则相应的传感器分别称为温度传感器、压力传感器、流量传感器、位移传感器、速度传感器等。

常用的其他被测物理量还有:热量、比热容、压差、力、力矩、应力、质量、振幅、频率、转速、加速度、噪声、浓度、粘度、密度、相对密度、酸碱度(pH 值)、颜色、透明度等等,其相应的传感器一般以被测物理量命名。

这种分类方法是按被测物理量命名的。其优点是比较明确地表达了传感器的用途,便于使用者根据其用途选用。但是这种分类方法是将原理互不相同的传感器归为一类,很难找出每种传感器在转换机理上有何共性和差异,因此,对于掌握传感器的一些基本原理及分析方法是不利的。

## 2. 按工作原理分类

传感器的工作原理主要是基于物理、化学和生物等学科的原理、规律和效应。据此可将传感器分为电阻式、电感式、电容式、热电式、压电式、光电式等类别。这种分类法的优点是对于传感器的工作原理比较清楚,类别少,有利于传感器专业工作者对传感器进行深入研究分析。本书的传感器就是按工作原理分类进行编写的。

## 3. 按能量的关系分类

根据能量观点分类,可将传感器分为有源传感器和无源传感器两大类。前者将非电能量转换为电能量,称之为能量转换型传感器,也称为换能器(只转换能量本身,并不转换能量信号的装置),通常配合有电压测量电路和放大器,如压电式、热电式、磁电式等。无源传感器又称为能量控制型传感器,它本身不是一个换能器,被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调节作用,所以,它们必须具有辅助能源(电能),这类传感器有电阻式、电容式和电感式等。无源传感器常用电桥和谐振电路等电路测量。

## 4. 按输出信号的性质分类

根据传感器输出信号的性质,可将其分为模拟传感器和数字传感器两大类。前者输出模拟信号,后者输出数字信号,当然输出的模拟信号或数字信号都与被测非电量呈一定关系。数字传感器便于与计算机联用,且抗干扰性较强,例如盘式角度数字传感器、光栅传感器等。

# 1.2 传感器的一般特性

传感器的输出—输入关系特性是传感器的基本特性。输入—输出特性虽是传感器的外部特性,但与其内部参数有密切关系。这是因为传感器不同的内部结构参数决定了它不同的外部特性。

传感器所测量的非电量一般有两种形式:一种是稳态(静态或准静态)的,即不随时间变化或变化极其缓慢的,称为静态信号;另一种是随时间变化而变化的,称为动态信号。由于输入量的状态不同,传感器所呈现出来的输入—输出特性也不同,因此存在所谓的静态特性和动态特性。一个高精度的传感器,必须具有良好的静态特性和动态特性,才能完成信号(或能量)不失真的转换。

### 1.2.1 传感器的静态特性

传感器在稳态信号作用下,其输出—输入关系为静态特性。衡量传感器静态特性的主要性能指标是线性度、灵敏度、迟滞和重复性。

### 1. 线性度

传感器的线性度又称非线性误差,是指传感器输出与输入之间的线性程度。理想传感器的输出量  $y$  与输入量  $x$  之间应为线性关系,其静态特性可表示为

$$y = a_1 x \quad (1.1)$$

式中  $a_1$ ——静态特性的斜率(或线性灵敏度)。

实际上许多传感器的输出—输入特性都是非线性的,如图 1-2 所示。一般可用下列多项式来表示输出—输入特性

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (1.2)$$

式中  $a_0$ ——传感器的零位输出。

在使用非线性特性的传感器时,如果非线性项的方次不高,在输入量变化范围不大的条件下,可以用切线或割线等直线来近似地代表实际曲线的一段(见图 1-2),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。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,取其中最大值与输出满量程值之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,线性度可用下式表示

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_m} \times 100\% \quad (1.3)$$

式中  $\gamma_L$ ——线性度(非线性误差);

$\Delta_{\max}$ ——最大非线性绝对误差;

$y_m$ ——输出满量程值。

由此可见,非线性误差大小是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线算出来的,因此,基准直线不同,所得的线性度就不一样。一般并不要求拟合直线必须通过所有的检测点,而只要找到一条能反映静态特性曲线的一般趋势,同时又使误差绝对值为最小的直线就行。总之, $\gamma_L$  数值小则线性度高,这样的传感器在电路上处理较方便,测量精度也高;非线性误差大的传感器一般要采用线性化补偿电路或机械式的非线性补偿机构,因此将造成其电路及机构均较复杂,调试也较繁琐。近年来,智能化的传感器常采用软件进行线性化处理,因此比较方便。

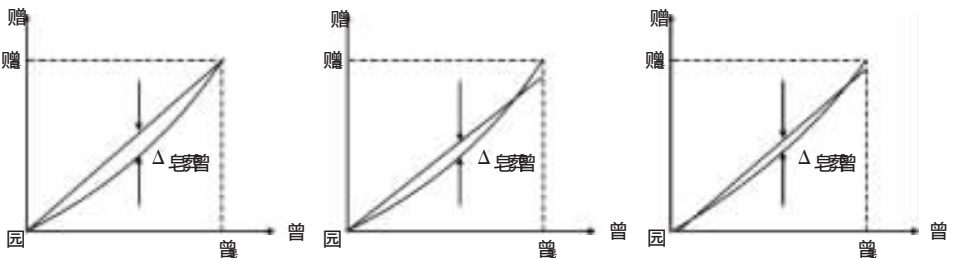


图 1-2 基准直线的不同拟合方法

## 2. 灵敏度

传感器的灵敏度是指在稳态下输出变化量  $dy$  与引起此变化的输入变化量  $dx$  之比值, 用  $K$  表示, 即

$$K = \frac{dy}{dx} \quad (1.4)$$

显然, 线性传感器的灵敏度就是它的静态特性的斜率, 而非线性传感器的灵敏度则是在静态特性曲线上工作点处切线的斜率, 它随输入量的变化而变化。一般希望传感器的灵敏度高, 在满量程范围内是恒定的, 即希望传感器的输出—输入特性曲线为一条直线。

## 3. 迟滞

迟滞(或称迟环)特性是用来说明传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程期间输出—输入特性曲线不重合的程度, 如图 1-3 所示。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会有不相等的情况, 这就是迟滞现象。产生这种现象的主要原因是传感器机械部分存在不可避免的缺陷, 如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料的内摩擦、积尘等。

迟滞大小一般要由试验方法确定, 其值用正反行程输出值间最大差值  $\Delta_{\max}$  对满量程输出  $y_m$  的百分比表示

$$\gamma_t = \frac{\Delta_{\max}}{y_m} \times 100\% \quad (1.5)$$

## 4. 重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程多次测试时所得特性曲线的不一致性程度, 如图 1-4 所示。产生不一致的原因与产生迟滞现象的原因相同。多次重复测试的曲线越重合, 说明该传感器重复性好, 使用时误差越小。

重复性误差是属于随机误差性质的, 因此, 应该根据标准偏差来计算重复性指标, 即重复性误差  $\gamma_z$  可按下式计算

$$\gamma_z = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_m} \times 100\% \quad (1.6)$$

标准偏差  $\sigma$  前的系数取 2 时, 误差完全依从正态分布, 置信概率为 95%; 取 3 时, 置信概率为 99.73%。根据均方根公式, 可以计算  $\sigma$ , 即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1.7)$$

式中  $y_i$ ——测量值;

$\bar{y}$ ——测量值的算术平均值;

$n$ ——测量次数。

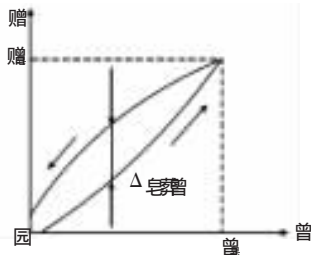


图 1-3 迟滞特性

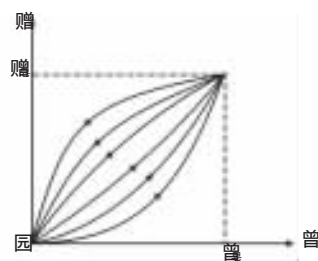


图 1-4 重复性

这种计算方法比较复杂,但精度较高。

### 1.2.2 传感器的动态特性

传感器的动态特性是指传感器对激励(输入)的响应(输出)特性。一个动态特性好的传感器,随时间变化的输出曲线能同时再现随时间变化的输入曲线,即输出—输入具有相同类型的时间函数。但对于实际的传感器,当输入信号随时间变化较快时,由于传感器内的各种运动惯性及能量传递均需要时间,因此传感器的输出无法瞬时地完全跟随输入量而同步变化。例如将温度计插入待测液槽时,就不能立即准确显示液体的温度值,而要经过一段时间达到平衡后才能准确地显示。这种输出与输入间的差异就是所谓的动态误差。研究传感器的动态特性主要就是从测量误差的角度分析产生动态误差的原因以及提出改善措施。

在研究传感器的动态特性时,为了避免复杂的数学问题,通常忽略传感器的非线性和随机变化等因素,将其看成一个集中参数系统。因此,其数学模型可以用常系数线性微分方程来描述,输出量  $y$  与输入量  $x$  之间的关系可以表示为

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  和  $b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$  均为与传感器结构参数有关的常数。

为了便于比较评价,或动态标定,最常用的输入信号一般为阶跃信号(见图 1-5)和正弦信号,因此,对应的分析方法有阶跃响应法和频率响应法。下面只讨论阶跃响应法。

传感器的种类和形式很多,但它们一般可以简化为一阶或二阶系统。这样,分析了一阶和二阶系统的动态特性后,就能对各种传感器的动态特性有所了解,而不必一个个分别研究了。

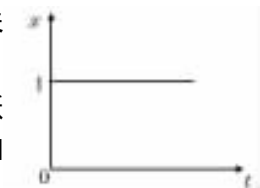


图 1-5 单位阶跃信号

#### 1. 一阶传感器

一阶传感器数学模型的一般形式为

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1.9)$$

假设初始条件为  $t=0, y=0$ , 解方程式(1.9), 即可得到当输入  $x$  从 0 跃变到 1 时, 输出响应为

$$y = K(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1.10)$$

式中  $K = b_0/a_0$ ——传感器的静态灵敏度;

$\tau = a_1/a_0$ ——传感器的时间常数。

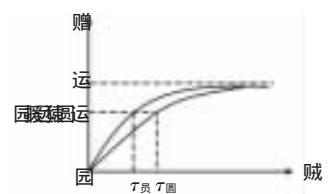


图 1-6 单位阶跃响应

单位阶跃响应如图 1-6 所示。由图可见,只有当  $t \rightarrow \infty$  时,  $y$  才能达到其稳态值  $K$ 。实际工作中,一般根据  $y$  达到其稳态值的 63.2% 所用的时间  $\tau$  来衡量一个传感器动态响应的速度。 $\tau$  值越大,动态响应越慢,动态误差越大,且存在时

间越长。因此,时间常数  $\tau$  是一阶传感器的主要动态性能指标,一般希望它越小越好。

## 2. 二阶传感器

二阶传感器数学模型的一般形式为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1.11)$$

假设初始条件为  $t=0, y=0$ , 解方程式(1.11), 即可得到当输入  $x$  从 0 跃变到 1 时的输出响应。二阶传感器的输出响应分为 3 种情况:

(1)  $0 < \zeta < 1$  (欠阻尼) 时

$$y = K \left[ 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \quad (1.12)$$

式中  $K = \frac{b_0}{a_0}$  ——传感器的静态灵敏度;

$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}$  ——传感器无阻尼时的固有频率;

$\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$  ——传感器的阻尼比。

(2)  $\zeta = 1$  (临界阻尼) 时

$$y = K [1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t}] \quad (1.13)$$

(3)  $\zeta > 1$  (过阻尼) 时

$$y = K \left[ 1 - \frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} \right] \quad (1.14)$$

以上 3 种情况下的单位阶跃响应如图 1-7 所示。可以看出, 响应曲线的形状决定于阻尼比  $\zeta$  的大小。 $\zeta > 1$  时,  $y/K$  值逐渐增加到接近于 1 而不会超过 1;  $\zeta < 1$  时,  $y/K$  值必超过 1, 成为振幅渐趋减小的衰减振动;  $\zeta = 1$  的情况介于上述两者之间, 但也不会产生振动, 可见,  $\zeta$  体现了衰减的程度。对于传感器而言,  $\zeta$  越大, 到达接近稳态的最终值的时间越长;  $\zeta$  过小, 则因振动的关系, 到达接近最终值的时间也很长。因此, 设计上一般取  $\zeta = 0.6 \sim 0.8$ , 即欠阻尼状态。下面就欠阻尼时的单位阶跃响应, 讨论二阶传感器的典型动态性能指标, 如图 1-8 所示。

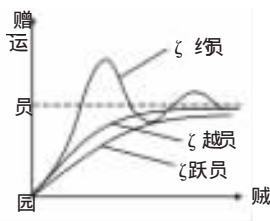


图 1-7 二阶传感器的单位阶跃响应

(1) 上升时间  $t_r$

输出从稳态值的 10% 到第一次达到其稳态值的 90% 所用的时间。

(2) 峰值时间  $t_p$

响应曲线到第一个峰值所用的时间。

(3) 响应时间  $t_s$

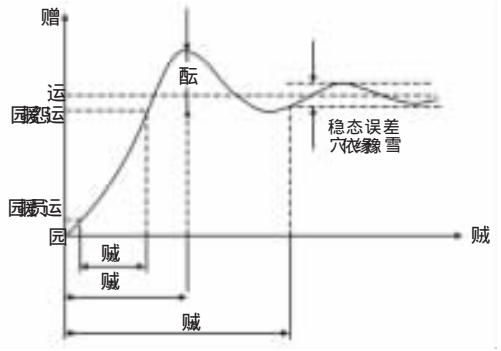
响应曲线衰减到与稳态值之差超过  $\pm 5\%$  或  $\pm 2\%$  时所需要的时间, 有时称过渡过程

时间。

(4)最大超调量  $M$

最大超调量就是响应曲线偏离稳态值的最大值。

显然  $t_r$ 、 $t_p$ 、 $t_s$  和  $M$  数值越小,则传感器的动态性能越好。



### 1.3 传感器的标定

传感器的标定分为静态标定和动态标定两种。静态标定的目的是确定传感器静态特性指标,如线性度、灵敏度、迟滞和重复性等;动态标定的目的是确定传感器的动态特性参数,如频率响应、时间常数、固有频率和阻尼比等。

图 1-8 欠阻尼时的单位阶跃响应

#### 1.3.1 传感器的静态特性标定

##### 1. 静态标准条件

传感器的静态特性是在静态标准条件下进行标定的。所谓静态标准是指没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测物理量),环境温度一般为室温( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ),相对湿度不大于 85%,大气压力为  $101 \pm 7\text{KPa}$  时的情况。

##### 2. 标定仪器设备的精度等级的确定

对传感器进行标定,是根据试验数据确定传感器的各项性能指标,实际上也是确定传感器的测量精度。所以在标定传感器时,所用的测量仪器的精度至少要比被标定的传感器的精度高一个等级。这样,通过标定确定的传感器的静态性能指标才是可靠的,所确定的精度才是可信的。

##### 3. 静态特性标定的方法

对传感器进行静态特性标定,首先要创造一个静态标准条件,其次是选择与被标定传感器的精度要求相适应的一定等级的标定用仪器设备,然后才能开始对传感器进行静态特性标定。

标定过程步骤如下:

- ① 将传感器全程(测量范围)分成若干等间距点。
- ② 根据传感器量程分点情况,由小到大逐渐一点一点地输入标准量值,并记录下与各输入值相对应的输出值。
- ③ 将输入值由大到小一点一点地减少下来,同时记录下与各输入值相对应的输出值。
- ④ 按②、③所述过程,对传感器进行正、反行程往复循环多次测试,将得到的一组输出—输入测试数据用表格列出或绘成曲线。

⑤对测试数据进行必要的处理,根据处理结果就可以确定传感器的线性度、灵敏度、迟滞和重复性等静态特性指标。

### 1.3.2 传感器的动态特性标定

传感器的动态标定主要是研究传感器的动态响应。与动态响应有关的参数,一阶传感器只有一个时间常数  $\tau$ ,二阶传感器则有固有频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\zeta$  两个。

一种较好的方法是通过测量传感器的阶跃响应,确定传感器的时间常数、固有频率和阻尼比。

对于一阶传感器,测得阶跃响应之后,取输出值达到最终值的 63.2% 所经过的时间作为时间常数  $\tau$ ,但这样确定的时间常数实际上没有涉及响应的全过程,测量结果的可靠性仅取决于某些个别的瞬时值。如果用下述方法来确定时间常数,可以获得较可靠的结果。一阶传感器的阶跃响应函数为

$$y(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

改写后得

$$1 - \frac{y(t)}{K} = e^{-\frac{t}{\tau}}$$

令

$$Z = \ln\left[1 - \frac{y(t)}{K}\right] \quad (1.15)$$

则

$$Z = -\frac{t}{\tau} \quad (1.16)$$

式(1.16)表明  $Z$  和时间  $t$  呈线性关系,并且有  $\tau = \Delta t / \Delta Z$  (见图 1-9)。因此可以根据测得的  $y(t)$  值作出  $Z-t$  曲线,并根据  $\Delta t / \Delta Z$  值获得时间常数  $\tau$ ,这种方法考虑了瞬态响应的全过程。

对于二阶传感器,当  $\zeta < 1$  时(欠阻尼),其阶跃响应函数表达式为

$$y(t) = K \left[ 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left( \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \quad (1.17)$$

其图形如图 1-10 所示。这一阶跃响应函数表明它的瞬态响应是以  $\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$  为角频率作衰减振荡。将此角频率记为  $\omega_d$ ,称为有阻尼固有角频率。对此响应函数求极值,即为各振荡峰值所对应的时间  $t_p = 0, \frac{\pi}{\omega_d}, \frac{2\pi}{\omega_d}, \dots$ 。将  $t = \frac{\pi}{\omega_d}$  代入(1.17)式,可求得最大超调量  $M$  (见图 1-10) 和阻尼比  $\zeta$  的关系

$$M = e^{-\left[ \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right]} \quad (1.18)$$

或

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\left[ \frac{\pi}{\ln M} \right]^2 + 1}} \quad (1.19)$$

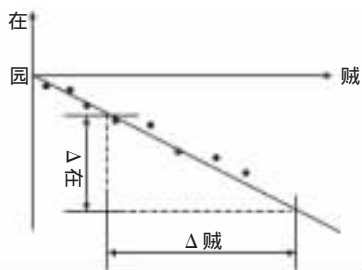


图 1-9 一阶传感器时间常数的求取

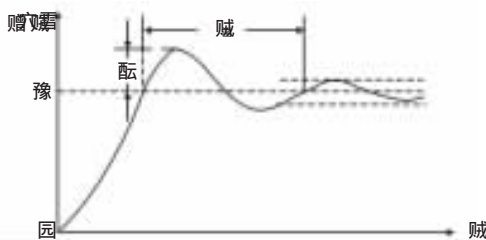


图 1-10 二阶传感器对阶跃输入的响应