

传 感 技 术

徐 前 徽 编

武汉测绘科技大学
一九九七年六月

前 言

随着科学技术水平的提高和生产的迅猛发展,需要对大量的非电量进行量测和控制,因而,传感器在测量仪器和控制系统中的应用就越来越广,传感技术也形成了一门系统的学科。本讲义主要介绍传感器的基本原理,常用传感器的特性和设计思想,传感器在测量仪器和控制系统中的典型应用方案,以及编者近年来在传感器应用方面的部分科研成果。

本讲义的编写在内容选择和安排上是一个尝试,可作为电子类专业的教材及有关专业的参考书。由于编者水平有限,缺点和错误之处在所难免。希读者批评、指正。

编者



目 录

第一章 概论	(1)
§ 1-1 传感技术概述	(1)
§ 1-2 传感器的分类	(2)
§ 1-3 传感器的静态特性	(3)
§ 1-4 传感器的动态特性	(11)
练习与思考题	(18)
第二章 光电传感器的光源	(20)
§ 2-1 半导体发光二极管	(20)
§ 2-2 激光概述	(25)
§ 2-3 固体激光器	(33)
§ 2-4 气体激光器	(39)
§ 2-5 半导体激光器	(44)
§ 2-6 光的调制	(51)
练习与思考题	(59)
第三章 光电探测器	(60)
§ 3-1 光电管	(60)
§ 3-2 光电倍增管	(62)
§ 3-3 半导体光电二极管	(65)
§ 3-4 光电池	(69)
§ 3-5 光敏电阻	(73)
§ 3-6 电荷耦合器件(CCD)	(75)
练习与思考题	(80)
第四章 光电传感器的应用	(82)
§ 4-1 光电测距仪	(82)
§ 4-2 激光干涉测长仪	(95)
§ 4-3 CCD 多光谱固体电视系统	(98)
练习与思考题	(105)
第五章 压电式传感器	(107)
§ 5-1 压电效应及压电材料	(107)
§ 5-2 压电传感器的原理及等效电路	(111)
§ 5-3 压电传感器测量电路	(113)
§ 5-4 压电传感器的应用	(118)
练习与思考题	(120)

第六章 超声波传感器	(121)
§ 6-1 超声波及其特性	(121)
§ 6-2 超声波换能器	(127)
§ 6-3 超声检测原理	(129)
§ 6-4 超声波传感器的应用	(132)
练习与思考题	(142)
第七章 电阻式传感器	(144)
§ 7-1 电位器传感器	(144)
§ 7-2 电阻应变式传感器	(153)
§ 7-3 热电阻式传感器	(160)
§ 7-4 气敏电阻传感器	(171)
练习与思考题	(175)
第八章 电容式传感器	(177)
§ 8-1 电容传感器的原理及特性	(177)
§ 8-2 电容式传感器的测量电路	(187)
§ 8-3 电容式传感器的应用	(196)
练习与思考题	(199)
第九章 电感式传感器	(201)
§ 9-1 自感式传感器	(201)
§ 9-2 差动变压器	(212)
§ 9-3 电涡流式传感器	(226)
练习与思考题	(238)
第十章 霍尔传感器	(240)
§ 10-1 霍尔效应与霍尔元件	(240)
§ 10-2 霍尔元件的特性参数	(242)
§ 10-3 霍尔元件的误差分析	(245)
§ 10-4 霍尔传感器的应用	(253)
练习与思考题	(257)
第十一章 热电式传感器	(258)
§ 11-1 热电偶的工作原理	(258)
§ 11-2 热电材料及常用热电偶	(263)
§ 11-3 热电偶的误差分析	(269)
§ 11-4 热电偶测量电路	(276)
练习与思考题	(280)

第一章 概论

§ 1—1 传感技术概述

科学技术和工业生产离不开各种测量仪器,而现代测量仪器又正是科学(特别是测量科学)的研究成果之一。因此,“离开了测量便无科学”的说法毫不夸张。测量仪器的种类很多,就电子测量仪器而言,大致可分为两类:一类是测量电信号和电子元件参数(如电压、电流、频率、场强、电阻、电容、电感之类)等电子量的仪器;一类是将非电量(如距离、压力、温度、湿度、物质成分等等)转换成电子量来进行测量的仪器。这后一类仪器的主要部分就是传感器。

传感器同计算机一样,作为信息社会的两大标志之一,已为人们所十分重视。

传感器是将被测非电量转换成与之有确定对应关系的电子量来进行测量这样一个完整的测量装置(或系统)。有了精确可靠的传感器去检测各种原始数据并提供信息,才能将各种信息进行准确的传输、处理、记录、显示和控制。例如,自然界各种变化着的物理量和化学量,可以用传感器进行监测;新设计试制的各种机器、仪器,要用传感器来测试各种技术指标;现代化生产也需要各种传感器来监视和控制流程中的各个参数,使设备正常运转以至处于最佳状态,从而使产品的产量最多,质量最好,成本最低。可以说,没有传感器,也就没有自动化生产,当然也就没有现代科学技术的发展。

传感器一般包括两大部分:检测元件和测量电路

检测元件的作用是将被测量(一般为非电量)转换为电子量(电信号)。因此,检测元件也称为转换元件。有时,检测元件包括敏感元件和传感元件两部分。其中,敏感元件的作用是直接感受被测量,并输出与被测量有确定关系的其它量;而传感元件的作用是感受敏感元件的输出量并输出与之有确定关系的电子量。例如,电阻应变式电子称重传感器中,弹性元件的作用是将重量转换成应变,它就是敏感元件;而贴在弹性元件上的电阻应变片的作用是将应变转换成电阻的变化,它就是传感元件。这二者的共同作用就是将重量转换成电子量,它们构成了检测元件。也有的检测元件就是一个元件,它直接感受被测量而输出与之有确定关系的电子量。例如,半导体温度计中的热敏电阻就能感受被测量(温度)而输出与被测量(温度)有确定关系的电子量(电阻),它同时兼有敏感元件和传感元件的作用。因此,这里的检测元件就只是热敏电阻。

测量电路的作用是把检测元件输出的电信号(电子量)进行各种处理,将其变成便于显示、记录、控制的电信号。测量电路因传感器的类型和作用不同而不同,有的很简单,有的则相当复杂。它通常是一些比较、变频、放大、整形电路,有时还包括受控振荡、模——数变换及其他逻辑电路等等。后者是为了便于将信号进行数字显示、打印或送入电子计算机进行各种处理。

由上述可知:在大多数情况下,传感器不是一个简单元件,而是一个完整的测量装置或系统。

传感技术,经典的理解仅仅是非电量与电量的转换,而现在已广义地理解为凡是获取信息的工具与方法都属于传感器及其应用的范畴。传感技术和计算机技术,作为当前新的技术革命的两大技术工具,已经进入工业国家的各个领域。

综上所述,传感技术就是研究传感器及其应用的科学。

§ 1—2 传感器的分类

传感器的内容非常丰富,分类方法也很多。本节介绍几种常见的分类方法。

一、按传感器的变换原理分类

(一) 光电传感器:光电传感器是把其它的被测量的变化转换为光量的变化,利用光电效应,再转换成电信号来进行测量。有的光电传感器则直接利用光电效应测量某些被测对象的光特性或与光特性有关的其他参数。例如:干涉测长仪、光电测距仪、激光通信机、某些遥控器、全息照相设备及光电自动控制系统等等。

(二) 电阻式传感器:电阻传感器是把被测量的变化(有时要借助于中间变量)转换成电阻的变化来进行测量。例如:电位器式传感器、应变式传感、压阻式传感器、热阻式传感器等等。

(三) 电容式传感器:电容传感器是把被测量的变化(有时也要借助于中间变量)转换成电容的变化来进行测量。它又分为面积变化型、极距变化型和介质变化型三类。

(四) 电感式传感器:电感传感器是把被测量的变化转换成自感系数 L 或互感系数 M 的变化,进而得到一个随 L 或 M 而变化(也即随被测量而变化)的电信号来进行测量。它又分为压磁式、可变磁阻式、涡流式、差动变压器式和谐振式等等。

(五) 压电式传感器:压电传感器是将被测量转换为力(或被测量就是力),根据压电效应将力转换为电信号来进行测量。它可以做成测力传感器、振动传感器等等。

(六) 磁电式传感器:磁电传感器是将被测量首先转换为位移的变化,再根据磁电转换原理转换成电信号来进行测量,或直接测量磁场的变化等等。

(七) 热电式传感:热电传感器是将温度的变化直接转换成电磁参数的变化来进行测量。如热电偶等。

二、按被测量分类

(一) 位移传感器:

1. 线位移传感器:它用以测量空间距离、物体长度、厚度、变形、振动、物体位置等。
2. 角位移传感器:它用以测量物体的偏转角、方位角等。

(二) 速度传感器:

1. 线速度传感器:它用以测量物体的振动、动量、流量等。
2. 角速度传感器:它用以测量物体的转速、角振动等。

(三) 加速度传感器:

1. 线加速度传感器:它用以测量物体的振动、冲击、质量、应力及各种外力等。
2. 角加速度传感器:它用以测量物体的角振动、角冲击、力矩等。

(四) 测力传感器:它用以测量物体的重量、密度、推力、力矩、应力等。

(五) 测温传感器:它既可以做成直接接触测温仪表,也可以做成遥测物温的系统。

(六) 测湿传感器:它用以测量固体中水份的含量或气体的湿度等。

(七) 物质成分传感器:它用以测量物质的化学成分或放射性射线等。

(八) 测振传感器:它用以测量物体振动的频率、振幅等。

(九) 能源传感器:光电池等能源转换式传感器。

几乎上述各类传感器都可以用于自动控制系统,对被测量进行控制。

三、按获取能量的方式分类

(一) 自源式传感器:这类传感器从被测对象中取得能量而直接产生电信号(电信号放大时的能源从何而来另当别论)。例如:压电传感器、光电池之类的光电传感器及某些遥感器等。电信号的能量属于转换式能量。

(二) 他源式传感器:这类传感器必须由外部供给能量才能检测被测量的变化,它是通过被量来控制外部能量,传感器输出的电信号的能量属于控制式的能量。例如:电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、大部分光电传感器及磁电式传感器等。

几种分类法的相互关系见表 1—1。

表 1—1 传感器的分类及应用情况

应用原理 被测情况	光电式	电阻式	电容式	电感式	压电式	磁式	热电式
位移	○	○	○	○		○	
速度	○	○		○		○	
加速度	○	○			⊕		
力	○	○	○	○	⊕	○	
温度	⊕	○					⊕
湿度	○	○					
物质成分	○	○		○			
振动	○	○	○	○	⊕	○	
能源	⊕						

注:有○或⊕者表示已较常用的形式,其中○表示他源式,⊕表示自源式。

§ 1—3 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指:在不随时间变化的被测量作用下,输出和输入之间的关系。

在没有迟滞和蠕变效应的情况下,传感器的静态特性可表示为:

$$Y = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + \dots + a_n X^n \quad (1-1)$$

式中: x ——输入量;

y ——输出量;

a_0 ——零位输出;

a_1 ——灵敏度;

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性系数。

传感器的静态特性是在静态标准条件下进行校准的。静态标准条件是指没有加速度、冲击(除非这些参数本身就是被测量),环境温度一般为 $20 \pm 5^\circ\text{C}$,相对湿度不大于 85%,大气压力

为 760 ± 60 毫米汞柱的状态,在这种标准工作状态下,利用一定等级的校准设备对传感器进行反复循环测试,得出的输出——输入数据一般用表格列出或画成曲线,称为校准曲线。

一、灵敏度

经过校准后静态特性曲线的斜率就是传感器的灵敏度。根据定义,灵敏度 K 可表示为

$$K = \frac{dy}{dx} \quad (1-2)$$

显然,线性传感器的灵敏度为一常数。非线性传感器的灵敏度随工作点不同而不同。

二、线性度

在(1-1)式中,如果 $a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$,此传感器就是线性传感器。这时 $K = dy/dx = a_1$ 。如果 a_n 也为零,则此传感器称为理想线性传感器。此时 $K = y/x = a_1$ 。严格说来,并不存在理想线性传感器。实际上,传感器的输出——输入校准曲线与其标准直线(理论直线或拟合直线)之间总是存在偏差的,这个偏差就叫做“非线性误差”或“线性度”,通常用相对误差来表示:

$$e_f = \pm \frac{\Delta_{\max}}{\bar{y}_{f.s}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: e_f ——非线性误差(线性度);

$\Delta_{\max}$ ——输出校准曲线与标准直线的最大偏差;

$\bar{y}_{f.s}$ ——传感器满量程输出平均值。

线性度的大小是以一定的拟合直线或理论直线作为基准计算出来的。因此,基准直线不同,计算出的线性度的大小和精度也不一样。分述如下:

(一) 端基线性度

把传感器校准数据的零点输出平均值和满量程输出平均值连成直线,作为传感器特性的拟合直线。如图 1-1 所示的某一传感器的输出——输入实测曲线,根据端基法作拟合直线。

拟合直线可用下式表示:

$$y = b + kx \quad (1-4)$$

式中: x ——输入量;

y ——输出量;

b ——直线在 y 轴上的截距;

k ——直线的斜率。

由图可知:

$$b = \bar{y}_0 \quad (1-5)$$

$$k = \frac{\bar{y}_{f.s} - \bar{y}_0}{x_s} \quad (1-6)$$

$$\text{所以 } y = \bar{y}_0 + \frac{\bar{y}_{f.s} - \bar{y}_0}{x_s} \times x \quad (1-7)$$

式中: x ——被测量;

x_s ——传感器的测量范围;

y ——传感器输出值;

$\bar{y}_0$ ——零点输出平均值;

$\bar{y}_{F.S.}$ ——满量程输出平均值。

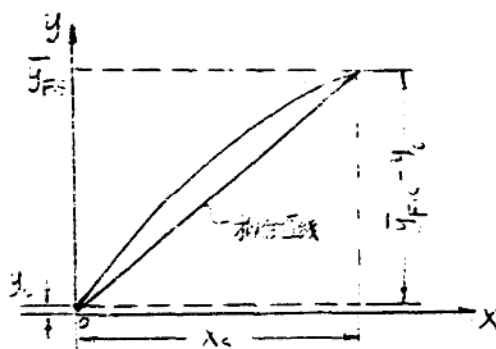


图 1-1 端基拟合直线

这种拟合方法简单,也比较直观。但是没有考虑所有校准数据的分布,拟合精度很低,尤其当传感器有比较明显的非线性时,拟合精度最差。

(二) 独立线性度

这种方法是在校准曲线循环中找出一条最佳平均直线作为拟合直线,它使得实际输出特性相对于所选择的拟合直线的最大正偏差等于最大负偏差,如图 1-2 所示。图中,独立线性度为 $\pm 1.0\% F \cdot S$ 。

在计算独立线性度时,线性度计算公式(1-3)应改写为

$$e_l = \pm \frac{|+ \Delta_{max}| + |- \Delta_{max}|}{2\bar{y}_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-8)$$

这种拟合法比端基拟合法的精度高一些。

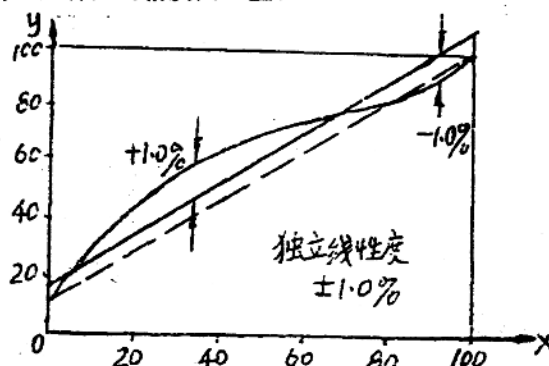


图 1-2 独立线性度拟合直线

(误差标尺比例 10:1)

(三) 平均选点线性度

为了获得较为理想的拟合直线,可将测得的几个试验点分成数目相等的两组:前半部 $n/2$ 个试验点各自具有“点系中心”。试验点都分布在各自的点系中心的周围。通过这两个“点系中心”的直线就是所求的拟合直线。其斜率和截距可以分别求得。因为前半部 $n/2$ 个试验的“点系中心”的坐标为

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_1 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} x_i \\ \bar{y}_1 &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} y_i \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

后半部 $n/2$ 个试验点的“点系中心”的坐标为

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_2 &= \frac{2}{n} \sum_{i=n/2+1}^n x_i \\ \bar{y}_2 &= \frac{2}{n} \sum_{i=n/2+1}^n y_i \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

因此,通过这两个点系中心 $(\bar{x}_1, \bar{y}_1)$ 和 $(\bar{x}_2, \bar{y}_2)$ 的直线的斜率为

$$k = \frac{\bar{y}_2 - \bar{y}_1}{\bar{x}_2 - \bar{x}_1} \quad (1-11)$$

直线在 y 轴上的截距为

$$\left. \begin{aligned} b &= \bar{y}_1 - k\bar{x}_1 \\ b &= \bar{y}_2 - k\bar{x}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

把斜率和截距代入直线方程式(1-4),即得平均选点法的拟合直线,再由此求出校准曲线的线性度。平均选点法求得的拟合直线示于图 1-3,两组试验点的点系中心也就是各组试验点的平均点。

这种拟合法的精度较高,试验点在拟合直线两侧合理分布,数据处理也不很复杂,但在理论上还不够严密。

(四) 最小二乘法线性度

设实际校准测试点有 n 个,其中第 i 个校准点数据与拟合直线上相应值之间的残差为

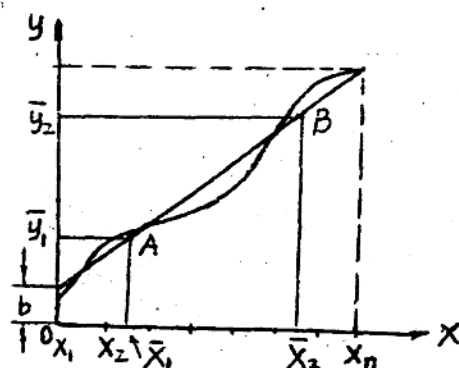


图 1-3 平均选点拟合直线

$$\Delta_i = y_i - (b + kx_i) \quad (1-13)$$

最小二乘法拟合直线的拟合原则就是使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 为最小值。也就是说,使 $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ 对 k 和 b 的一阶导数等于零。从而,可求出 b 和 k 的表达式:

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0$$

由上二式求得:

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

$$b = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-15)$$

式中:

$$\sum x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_n$$

$$\sum y_i = y_1 + y_2 + \dots + y_n$$

$$\sum x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n$$

$$\sum x_i^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2$$

n — 试验次数

将 k, b 代入(1-4)式就得到最佳拟合直线方程。再根据(1-3)式求出线性度。

例题:有一传感器的校准数据如下表。试根据这些数据求最小二乘法线性度。

表 1-2

数据名称	试验回数	Y _i X _i 行程	0	1	2	3	4	5
校准数据	1	正行程	1.0	100.8	200.3	300.0	399.8	500.0
		返行程	1.5	101.0	201.0	300.5	400.2	
	2	正行程	1.3	101.0	200.5	300.0	399.8	499.8
		返行程	1.4	101.5	200.7	300.7	400.2	

解:先求得拟合直线,再根据定义求线性度。根据所给数据知道,试验次数为 $n=22$ 。
式(1-14)和式(1-15)中各数值之和为:

$$\sum_{i=1}^{22} x_i = 50$$

$$\sum_{i=1}^{22} y_i = 5013.6$$

$$\sum_{i=1}^{22} x_i y_i = 17012.5$$

$$\sum_{i=1}^{22} x_i^2 = 170$$

将上列数据代入(1-14)式和(1-15)式,求得:

$$k=99.67$$

$$b=1.36$$

则最小二乘法的拟合直线方程为:

$$y_i = 1.36 + 99.67x_i$$

将拟合直线各点数值与各点输出平均值比较求出 Δ , 随后求出线性度, 并列于下表。

表 1-3

数据名称	数据 x _i	0	1	2	3	4	5
理论拟合值		1.4	101.0	200.7	300.4	400.0	499.7
输出平均值		1.3	101.1	200.6	300.3	400.0	499.9
Δ		-0.1	+0.1	-0.1	-0.1	0	+0.2
$\bar{y}_{F.S}$		499.9					
e_i		$\pm 0.04\% F \cdot S$					

于是,得出此校准曲线(即所给校准数据)的最小二乘法线性度为 $\pm 0.04\%$ 。

用最小二乘法拟合直线求线性度的精度最高,但计算较繁,可用电子计算机进行。

(五) 理论线性度

上面介绍的几种拟合直线是在实测校准曲线基础上求得的,而理论线性度(又称绝对线性度)却是表示实际输出校准曲线与理论直线之间的偏差程度。此处的理论直线与实测值无关。通常取零点的0%作为理论直线的起始点,满量程输出理论值的100%作为终止点。这两点的连线即为理论直线如图1-4所示图中理论线性

度为 $+1.3\%F \cdot S - 0.7\%F \cdot S$ 。确切地说,理论线性度主要反映实测数据与理论数据之间的偏差,而很难准确地反映实际校准曲线本身的线性度。

从上述几种不同线性度的定义和表示方法看出,由于采用的基准直线或理论直线不同,线性度的定义就有区别。这样,对于同一传感器,在相同条件下做校准试验时得出的非线性误差也就不一样。因而不能笼统地提出非线性误差或线性度,必须说明其所依据的基准直线。关于传感器的数据处理和精度计算,目前国内外都没有一个统一的方法,这集中表现为拟合直线的计算方法完全不同。

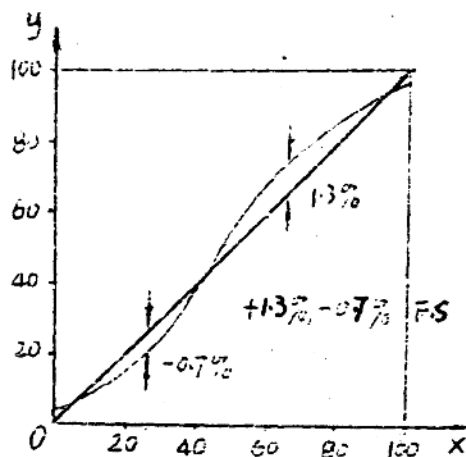


图1-4 理论线性度拟合直线(误差标尺比例10:1)

三、迟滞

迟滞特性表示传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程期间输出——输入曲线不重合的程度。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。迟滞产生的原因是由于传感器制造工艺上不可避免的缺陷、传感器内部应力的存在及惰性的影响等。迟滞大小一般由实验确定,其值以满量程输出 $\bar{y}_{r.s}$ 的百分数来表示(如图1-5):

$$e_i = \frac{\Delta_{max}}{\bar{y}_{r.s}} \times 100\% \quad (1-16)$$

或者

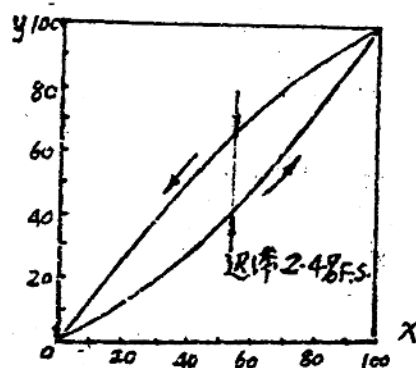


图1-5 迟滞特性(迟滞比例尺10:1)

$$e_i = \pm \frac{\Delta_{max}}{2\bar{y}_{r.s}} \times 100\%$$

式中 $\Delta_{\max}$ ——输出值在正反行程间的最大差值。

四、重复性

重复性表示传感器在输入量按同一方向作全程多次连续变动时所得输出——输入曲线不一致的程度,如图 1-6 所示。特性曲线越接近一致,重复性就好,误差也小。

其计算方法通常有两种:

(一) 平均值法

用校准数据与其相应行程输出平均值之间的最大偏差值对满量程输出的百分比表示重复性误差。这时,要先求出正行程多次测量的各个测试点输出值的最大偏差,以及反行程多次测量的各个测试点输出值的最大偏差,再取这两个最大偏差中较大者 $\Delta_{\max}$,从而根据 $\Delta_{\max}$ 与满量程输出 $y_{F.S.}$ 的百分比计算出重复性误差:

$$e_r = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{F.S.}} \times 100\%$$

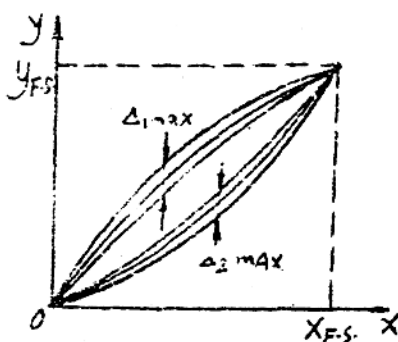


图 1-6 重复性

因为重复性误差是根据随机误差来描述校准数据离散程度的,按上述方法计算就不太合理。由于校准的循环次数不同,其最大偏差值也就不一样。因此,这样算出的数据不够可靠。

(二) 标准偏差法

根据标准偏差来计算重复性误差。这是比较合理的方法。分别求出全部校准数据与其相应行程的标准偏差 σ 的估值 $\hat{\sigma}$,然后按下式算出重复性误差 e_r :

$$e_r = \pm \frac{(2-3)\hat{\sigma}}{y_{F.S.}} \times 100\% \quad (1-17)$$

误差完全依从正态分布。 $\hat{\sigma}$ 前的系数取 1 时,置信概率为 58.3%;取 2 时,置信概率为 95.45%;取 3 时,置信概率为 99.73%。

标准偏差的具体估算方法有两种:

1、标准法

根据贝塞尔(Bessel)公式来计算:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1-18)$$

式中: y_i ——第 i 次测量值;

$\bar{y}$ ——测量值的算术平均值;

n——测量次数。

这种方法估算比较复杂,但精度较高。如用计算机计算,也很方便。

2. 极差法

所谓极差是指某一测量点校准数据的最大值 $y_{\max}$ 与最小值 $y_{\min}$ 之差。根据极差估算标准偏差的佩特斯(C. A. F. Peters)公式得:

$$\hat{\sigma} = \frac{Wn}{dn} = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{dn} \quad (1-19)$$

式中: Wn ——极差;

dn ——极差系数。

极差系数的大小与测量次数 n 有关,其对应关系如下:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dn	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97	3.08

由极差和极差系数求得标准偏差 $\hat{\sigma}$ 后即可计算出重复性误差 e_r , 这种方法的计算工作量较少。

五、量程和测量范围

量程是指传感器在保证其技术指标的前提下所及被测量上限 X_u 和下限 X_L 之间的代数差,即(1-4)式中的 X_u 。显然, $X_u = X_u - X_L$ 。

测量范围是指被测量下限和上限之间的区间,一般表示为 $X_L \sim X_u$ 。

六、分辨力

分辨力表示传感器可能检测出被测量的最小增量 Δx , 一般用 ω_x 表示。设传感器输出量 y 的测量分辨力为 ω_y , 根据谢泼德(W. F. Sheppard)改正式可以推出: 当 $\omega_y \leq \hat{\sigma}$ 或 $\omega_y \leq 2\hat{\sigma}$ 时, 用贝塞尔公式估算的 $\hat{\sigma}$ 与最佳估算的标准偏差 σ 之间的关系为 $\sigma \geq 0.95\hat{\sigma}$ 或 $\sigma \geq 0.32\hat{\sigma}$ 。此时对应的测量次数分别为 $n \geq 250$ 或 $n \geq 10$ 。所以, 取 ω_y 为 $\hat{\sigma} \sim 2\hat{\sigma}$ 在实际测量中是可能的。显然, $\omega_x = \omega_y/k$ 。其中, K 由(1-2)式定义。

七、过载能力

过载能力表示传感器在不引起规定性能指标永久改变条件下, 允许超过测量范围的能力。一般用允许超过测量上限或下限的被测量值 Δx_u 和 Δx_L 与量程 x_u 的百分比来表示, 上限过载能力

$$L_{r,u} = \frac{\Delta x_u}{x_u} \times 100\% \quad (1-20)$$

下限过载能力

$$L_{r,L} = \frac{\Delta x_L}{x_u} \times 100\% \quad (1-21)$$

§ 1-4 传感器的动态特性

在选择和使用传感器时, 动态特性是很有用的。所谓传感器的动态特性是表示传感器的输

出量随变化的被测量的响应特性。为了分析不同输入情况下传感器的动态特性，我们要首先建立传感器的数学模型，并导出传感器的传递函数。

对于任意线性系统，用高阶常系数微分方程来建立数学模型总是可以的，即：

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-22)$$

式中

y ——输出量；

x ——输入量；

t ——时间；

$a_0, a_1, \dots, a_n$ ——常数；

$b_0, b_1, \dots, b_m$ ——常数；

$\frac{d^n y}{dt^n}$ ——输出量对时间 t 的 n 阶导数；

$\frac{d^m x}{dt^m}$ ——输入量对时间 t 的 m 阶导数。

如果用算子 D 来代表 d/dt ，则(1-22)式可以写成

$$\begin{aligned} (a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0) y \\ = (b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0) x \end{aligned} \quad (1-23)$$

即

$$\frac{y}{x}(D) = \frac{b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots + b_1 D + b_0}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots + a_1 D + a_0} \quad (1-24)$$

这就是传感器的算子形式的传递函数。如果输入信号 x 是时间的函数，就能导出输出信号 y (仍表示为时间的函数) 来。

通常，输入信号并非任意形状，总是可以分解为若干标准输入信号的。下面分析在正弦输入和阶跃输入这两种标准输入情况下的动态响应。

一、正弦输入时的频率响应

(一) 频率响应的通式

输入信号为正弦波 $x(t) = A \sin \omega t$ 时 (见图 1-7)，输出信号 $y(t)$ 的模型是这样的：由于暂态响应的影响，开始并不是正弦波，随着时间的增长，暂态响应部分逐渐衰减以至消失。经过一定时间后，只剩下正弦波。输出量 $y(t)$ 与输入量的频率相同，但幅值不等，并有相位差，表示为 $y(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$ 。因此，输入信号振幅 A 即使一定，只要 ω 有所变化，输出信号的振幅和相位也会发生变化。所谓频率响应，就是在稳定状态下幅值比 B/A 和相位差 φ 随 ω 而变化的情况。

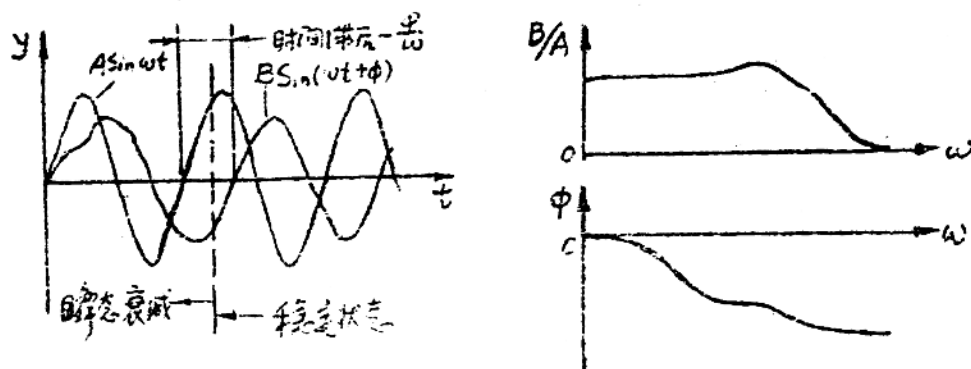


图 1-7 正弦输入时的频率响应

正弦输入情况下, 只要用 $j\omega$ 代替公式(1-24)中的算子 D , 即可得到传感器的频率传递函数:

$$\frac{y}{x}(j\omega) = \frac{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (1-25)$$

式中: $j = \sqrt{-1}$;

ω — 角频率。

对于任意给定的频率 ω , 方程式(1-25)具有复数形式。用复数来处理频率响应问题时, 数学表达式甚为简单。为此, 用 $Ae^{j\omega t}$ 代替图 1-7 中的输入信号 $A \sin \omega t$, 在稳定情况下, 输出信号就是 $Be^{j(\omega t + \varphi)}$ 。将其代入式(1-25), 使得频率响应的通式:

$$\frac{Be^{j(\omega t + \varphi)}}{Ae^{j\omega t}} = \frac{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (1-26)$$

因为

$$\frac{Be^{j(\omega t + \varphi)}}{Ae^{j\omega t}} = \frac{B}{A} e^{j\varphi} = \frac{B}{A} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

以及

$$\cos \varphi + j \sin \varphi = (\sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}) \angle \varphi = \angle \varphi$$

因此

$$\frac{y}{x}(j\omega) = \frac{B}{A} \angle \varphi \quad (1-27)$$