

# 绪 论

## 0.1 测试技术概述

测试是人们从客观事物中提取所需信息,借以认识客观事物,并掌握其客观规律的一种科学方法。在测试过程中,需要选用专门的仪器设备,设计合理的实验方法和进行必要的数据处理,从而获得被测对象的有关信息及其量值。从广义来看,测试属于信息科学的范畴。一般说来,信息的载体称为信号,信息则蕴含于信号之中。信息总是通过某些物理量的形式表现出来,这些物理量就是信号。例如,单自由度质量-弹簧系统的动态特性可以通过质量块的位移-时间关系来描述,质量块位移的时间历程就是信号,它包含了该系统的固有频率和阻尼比等特征参数,即所需要的信息,采集、分析这些信息,就可以掌握该系统的动态特性。

测试技术包含了测量(measurement)和试验(test)两方面的含义。机械工程测试的对象是机械系统(包括各种机械零件、机构和部件)及其组成部分(包括与机械系统有关的电路、电器等)。机械工程的测试过程包括测量、试验、计量、检验和故障诊断等过程。测量的基本任务有两个:一是提供被测对象(如产品)的质量依据,二是提供机械工程设计、制造、研究所需的信息。因此,设计、工艺和测试三者共同构成了机械工程的三大技术支柱,从设计、制造、运行、维修到最终报废,都与机械测试和测量密不可分。现代机械设备的动态分析设计、过程检测控制、产品质量检验、设备现代化管理、工况监测和故障诊断等都离不开机械测试,机械测试是实现这些过程的技术基础;同时,测试技术还是进行科学探索、科学发现和技术发明的技术手段。

从机械结构动力学分析的角度看,测试技术的任务又可归结为研究系统的输入[激励 $x(t)$ ]、输出[响应 $y(t)$ ]和系统本身的特性[系统传递函数 $h(t)$ ],以及它们三者之间的相互关系,如图0-1所示。

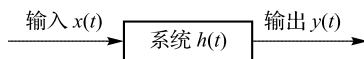


图0-1 测试系统及其输入和输出

(1)已知激励、响应,求系统的动态特性(传递函数),用以验证系统特性的数学模型。在工程模型试验方面,该数学模型可以进行产品的动态设计、结构参数设计和模型特征参数的研究等。

(2)已知系统的特性(传递函数)和响应(输出),求激励(输入),用以研究载荷或载荷谱。

某些工程系统(如火箭、车辆、井下钻具等)的载荷(如阻力、风浪等)很难直接测得,设计这些系统时往往凭经验和假设,因此误差较大。采用参数识别的方法能准确地求得载荷。为达到此目的而组成的测试系统称为载荷识别系统,它为产品的优化设计提供了依据。

(3)由已知的测量系统对被测系统的响应进行测量分析(数据采集分析系统)。被测量可以是电量,也可以是非电量。该系统的功用是测量响应的大小、频率结构和能量分布等,也可用于计量、系统监测及故障诊断等。

当系统响应超过其特定输出时,控制装置将调整被测系统的参数,使响应(输出)改变,从而使系统工作在最佳响应状态或使系统按规定的指令工作。这种响应控制系统常用于参数的自动测量与控制。

## 0.2 测试系统的组成

测试系统的概念是广义的,在测试信号的传输通道中,任意连接输入/输出并具有特定测试功能的部分,均可视为测试系统。测试系统的特性不可避免地会给流经系统的信号带来影响,进而影响测试结果的精度和可靠性。建立测试系统的概念并掌握系统的基本特性,对于正确选用测试系统、校准测试系统及提高测试的准确性等尤为重要。

系统是由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体。测试系统的特定功能是对研究对象进行具有试验性质的测量,以获取研究对象的有关信息。机械工程测试过程一般包含了被测对象拾取机械信号,再将非电性质的机械信号转换为电信号,经放大后输入后续信号处理设备进行分析处理的过程。信号分析处理可采用模拟系统或数字分析处理系统。由于数字分析处理系统具有很高的性能价格比、稳定性和精度,因而目前采用较多。

为了从被测对象中提取所需要的信息,通常需要采用适当的方式对被测对象进行激励,使其既能产生特征信息,又能产生便于检测的信号。例如,在测取机械系统的固有频率时,采用瞬态激振或稳态正弦扫描激振激发该系统的振动响应,拾取其响应信号,通过分析该信号求出系统的固有频率。图 0-2 所示为测试系统的基本构成。可见,一个测试系统一般由试验装置、测量装置、数据处理装置和记录装置等组成。

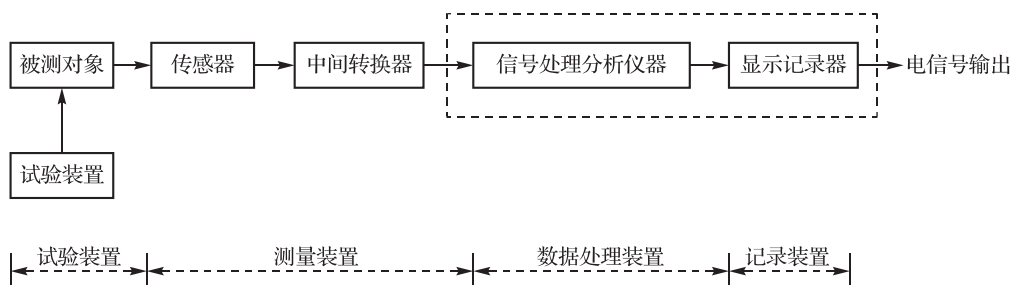


图 0-2 测试系统的基本构成

### 1. 试验装置

试验装置是使被测对象处于预定的状态下,并将其有关方面的内在联系充分显露出来,以便进行有效测量的一种专门装置。测定结构动力学参数所使用的激振系统就是一种试验装置。

## 2. 测量装置

测量装置是把被测量通过传感器转换成电信号,经过后接仪器的变换、放大和运算变成易于处理和记录的信号,所以,测量装置是根据不同的机械参数选用不同的传感器和相应的后接仪器所组成的测量环节。

## 3. 数据处理装置

数据处理装置是将测量装置输出的信号做进一步处理以排除干扰和消除噪声污染,并清楚地估计测量数据的可靠程度,获取有用的特征信息。有效地排除混杂在信号中的干扰信息(噪声),提高所获得信号(或数据)的置信度,是数据处理的前提。

## 4. 记录装置

记录装置是测试系统的输出环节,它可将对被测对象所测得的有用信号及其变化过程显示或记录(或存储)下来。数据显示可以用各种表盘、电子示波器和显示屏等来实现。数据记录则可采用模拟式的各种笔式记录仪、磁带记录仪或光线记录示波器等设备来实现;而在现代测试工作中,数据大多数是采用虚拟仪器被直接记录、存储在硬盘或软盘上。

## 0.3 测试技术的发展趋势

随着科学技术水平的不断提高和生产技术的高速发展,机械工程测试技术也随之向前迈进。在测试系统方面,卡式仪器、总线仪器、集成仪器、智能控件化虚拟仪器和网络仪器等不断地丰富和拓展着测试领域的测试手段。此外,测试系统的体系结构、测试软件和人工智能测试技术等也有很大的发展。仪器与计算机技术的深层次结合,加速了全新的测试仪器的概念和结构的产生。近年来,计算机技术在现代测试系统中的地位显得越来越重要,软件技术已成为现代测试系统的重要组成部分。当然,计算机软件不可能完全取代测试系统的硬件。因此,现代测试技术要求从事测试工作的人员不仅要具备良好的计算机技术基础,更要深入掌握测试技术的基本理论和方法。

在现代测试技术中,通用集成仪器平台的构成技术、数据采集技术和数字信号分析处理软件技术是决定现代测试仪器系统性能与功能的三大关键技术。以软件化的虚拟仪器和虚拟仪器库为代表的现代测试仪器系统与传统测试仪器相比,其最大特点在于用户可在集成仪器平台上按自己的要求开发相应的应用软件,构成自己所需要的实用仪器和实用测试系统。特别是在测试仪器系统进一步实现网络化以后,仪器资源将得到更大的延伸,其性能价格比将得到更大的提高,机械工程测试领域将呈现一个更加蓬勃发展的新局面。

## 0.4 本课程的主要内容和学习要求

本课程主要研究机械工程中常见物理量的测量与测试。例如,对机器及其零部件的长度、角度及其精度的测量,对机器设备的振动、噪声的测试,对机器设备的各种物理参数(如应力、应变、压力、扭矩、转速)的测量,分析测试技术在机械设备故障诊断和自动控制领域的应用情况。通过以上的测量与测试,对机器设备的质量进行评价和控制;同时,本课程还要研究测量测试的方法和系统特性,从而可以正确地设计测试方案、正确地使用仪器设备,以及正确地进行测量测试结果的分析处理。通过综合实例分析,力求使学生对测试系统有一个“一体化”的完整理解。

根据本学科的对象和任务,对高等学校机械类各有关专业来说,机械工程测试技术是一门主干技术基础课。通过对本课程的学习,使学生能够合理选用测试装置并初步掌握静、动态机械参数的测试方法,掌握常用工程试验所需的基本知识和技能,做到“选得准,用得好”,为在工程实际中完成对象测试任务打下必要的基础。

具体来说,在学完本门课程后应具备以下知识和技能:

(1)对机械工程测试工作的概貌和思路有一个比较完整的概念。对机械工程测试系统及其各环节有一个比较清楚的认识,并能初步运用机械工程中某些静、动态机械参数的测试和产品或结构的动态特性试验。

(2)了解常用传感器、中间转换放大器的工作原理和性能,并能依据测试工作的具体要求进行较为合理的选用。

(3)掌握测试装置静、动态特性的评价、测试方法及测试装置实现不失真测量的条件,并能正确地运用到测试装置的分析 and 选择中。

(4)掌握信号在基本变换域的描述方法,信号模拟分析、信号数字分析的一些基本概念;掌握信号频谱分析、相关分析的基本原理和方法,并对其延拓的其他分析方法有所了解。

(5)掌握虚拟仪器、虚拟测试系统和信号分析处理软件系统的基本原理与使用。

(6)应能对机械工程中某些静、动态参数的测试自行选择,设计测试仪器仪表,组建测试系统和确定测试方法,并能对测试结果进行必要的数据处理。

机械工程测试技术课程具有很强的实践性。在教与学的过程中应紧密联系实际,既要注意掌握基本理论、把握物理概念,又必须加强对动手能力的培养,必须通过教学实验和实践环节,使学生尽可能熟练掌握有关的测试技术和测试方法,达到具有初步处理实际测试工作能力的目标。

# 第 1 章

## 测试技术特性和测试技术基础

测试技术的特性是测试技术所有性质的总称,而测试技术的输入/输出特性是其基本特性,一般把测试技术作为二端网络研究时,输入/输出特性是二端网络的外部特性,即输入量与输出量的对应关系。测试技术输入量的状态可分为静态量和动态量两类:静态量是指不随时间变化的信号或变化极其缓慢的信号(准静态),动态量通常是指周期信号、瞬变信号或随机信号。根据输入量的状态(静态或动态)不同,测试技术所表现的输入/输出特性也不一样,分为静态特性和动态特性。测试技术的输入/输出特性决定了测试技术能否将被测的非电量信号的变化不失真地变换成相应的电量信号,该特性是与测试技术的内部结构参数有关的外部特性。

### 1.1 测试技术的静态特性

测试技术的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时,测试技术的输入与输出之间的关系。衡量测试技术静态特性的主要指标有线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨率、阈值、稳定性、漂移和静态误差。

#### 1.1.1 线性度

测试技术的线性度是指测试技术的输出与输入之间的线性程度。理想的输入/输出特性应该是线性的,但实际测试技术的特性大多是非线性的,如果不考虑迟滞和蠕变效应,测试技术的输入/输出特性一般可用下列多项式来表示。

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中, $y$  为输出量; $x$  为输入量(被测量); $a_0$  为零位输出; $a_1$  为测试技术的灵敏度; $a_2, a_3, \cdots, a_n$  为非线性项的待定常数。

各项系数不同,决定了特性曲线的具体形状各不相同。理想的特性方程为  $y = a_1x$ ,它是一条经过原点的直线,测试技术的灵敏度为一常数。当特性方程中仅含有奇次非线性项,即  $y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \cdots$  时,特性曲线关于坐标原点对称。具有这种特性的传感器,一般在输入量  $x$  相当大的范围内具有较宽的准线性。当非线性测试技术以差动方式工作时,可以消除电气元件中的偶次分量,显著改善线性范围,并使灵敏度提高一倍。

测试技术的静态特性曲线可通过实际测试技术获得。在实际应用中,为了得到线性关系,往往引入各种非线性补偿环节,如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理,或采用差动结构,使测试技术的输入/输出关系为线性或近似线性。但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,可以用一条直线(切线或割线)近似代表实际曲线的

一段,如图 1-1 所示,这种方法称为测试技术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测试技术的非线性误差,如图中的  $\Delta L$  值取其中最大值与输出满刻度值之比作为评价非线性误差(或线性度)的指标,即

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

式中,  $\gamma_L$  为线性度;  $\Delta L_{\max}$  为最大非线性绝对误差;  $y_{FS}$  为满量程输出。

由此可知,非线性误差是以一定的拟合直线或理想直线为基准直线计算得到的。因此,即便是同类测试技术,基准直线不同,所得到的线性度也不同,所以,选择拟合直线的主要出发点,应是获得最小的非线性误差。

目前,常用的拟合直线方法有理论拟合、过零旋转拟合、端点拟合、端点平移拟合和最小二乘法拟合等。其中,用最小二乘法求取的拟合直线的拟合精度最高。前四种方法如图 1-1 所示。图中,实线为实际输出的校正曲线,虚线为拟合直线。

如图 1-1(a)所示,拟合直线为测试技术的理论特性,与实际测试技术无关。理论拟合方法十分简便,但一般情况下  $\Delta L_{\max}$  很大。

图 1-1(b)所示的过零旋转拟合是常用于校正曲线过零的测试技术。拟合时,使  $\Delta L_1 = |\Delta L_2| = \Delta L_{\max}$ 。这种方法也比较简单,其非线性误差比理论拟合小很多。

如图 1-1(c)所示,把校正曲线的两端点的连线作为拟合直线。端点拟合方法比较简单,但  $\Delta L_{\max}$  较大。

图 1-1(d)在图 1-1(c)的基础上使直线平移,移动距离为图 1-1(c)中  $\Delta L_{\max}$  的 1/2。这条校正曲线分布于拟合直线的两侧,  $\Delta L_2 = |\Delta L_1| = |\Delta L_3| = \Delta L_{\max}$ 。与图 1-1(c)相比,图 1-1(d)的非线性误差减小了 1/2,提高了精度。

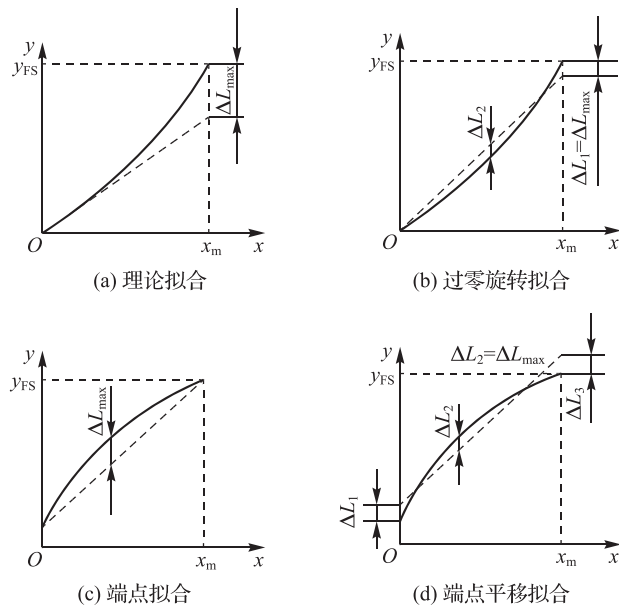


图 1-1 四种拟合直线方法

$x$ —测试技术的输入量;  $y$ —测试技术的输出量;  $x_m$ —输入最大值

最小二乘法在误差理论中的基本含义为:在具有等精度的多次测量中求最可靠值时,各测定值的残差平方和为最小时所求得的值。也就是说,把所有校准点数据都标在坐标图中,用最小二乘法拟合的直线,其校准点与对应的拟合直线上的点之间的残差平方和为最小。设拟合直线的方程式为

$$y=kx+b \quad (1-3)$$

若实际校准测试技术点有  $n$  个,则第  $i$  个校准数据  $y_i$  与拟合直线上相应值之间的残差为

$$\Delta_i=y_i-(kx_i+b) \quad (1-4)$$

最小二乘法拟合直线的原理就是使  $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$  为最小值,也就是使  $\sum_{i=1}^n \Delta_i^2$  对  $k$  和  $b$  的一阶偏导数等于零,即

$$\frac{\partial}{\partial k} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-x_i) = 0 \quad (1-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum (y_i - kx_i - b)(-1) = 0 \quad (1-6)$$

从而求出  $k$  和  $b$  的表达式分别为

$$k = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-7)$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-8)$$

将求得的  $k$  和  $b$  代入式(1-3)即可得到拟合直线,然后按式(1-4)求出残差的最大值即为非线性误差。

顺便指出,大多数测试技术的校正曲线是通过零点的,或者使用“零点调节”使它通过零点。对于某些量程下限不为零的测试技术,也应将其量程下限作为零点来处理。

### 1.1.2 灵敏度

灵敏度是指测试技术在稳态下的输出变化量  $\Delta y$  与引起此变化的输入变化量  $\Delta x$  之比,用  $k$  表示,即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-9)$$

灵敏度表征测试技术对输入量变化的反应能力。对于线性测试技术,灵敏度就是其静态特性的斜率,即  $k=y/x$  为常数[见图 1-2(a)];而非线性测试技术的灵敏度为一变量,用  $k=dy/dx$  表示[见图 1-2(b)]。

一般希望测试技术的灵敏度高,在满量程范围内是恒定的,即测试技术的输入/输出特性为直线。

各种原因均会引起测试技术灵敏度变化  $\Delta k$ ,产生灵敏度误差。灵敏度误差用相对误差  $\gamma_s$  表示,即

$$\gamma_s = \frac{\Delta k}{k} \times 100\% \quad (1-10)$$

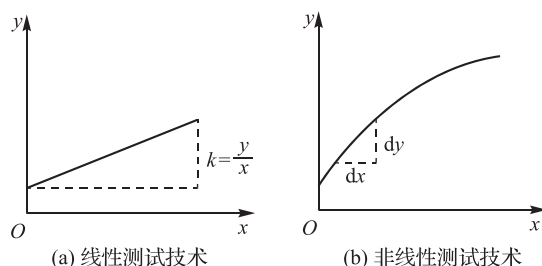


图 1-2 测试技术的灵敏度

### 1.1.3 迟滞

测试技术在正(输入量增大)反(输入量减小)行程中,其输入/输出特性曲线不重合的现象称为迟滞,如图 1-3 所示。也就是说,对于同一大小的输入信号,测试技术的正反行程输出信号大小不相等。产生这种现象的主要原因是测试技术敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷,如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件的摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

迟滞  $\gamma_H$  的大小一般要由实验方法确定,用正反行程输出值间的最大差值  $\Delta H_{\max}$  或其一半对满量程输出  $y_{FS}$  的百分比表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-11)$$

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2y_{FS}} \times 100\% \quad (1-12)$$

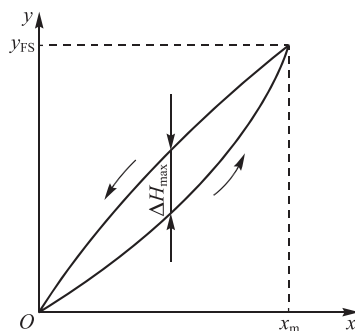


图 1-3 测试技术的迟滞

### 1.1.4 重复性

重复性是指在同一工作条件下,测试技术输入量按同一方向做量程连续多次变化时所得特性曲线不一致的程度,用  $\gamma_R$  表示。如果测试技术的特性曲线一致,则重复性就好,误差也小。

图 1-4 所示为实际输出的校正曲线的重复性。正行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 1}$ ,反行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性用这两个最大偏差中的较大者  $\Delta R_{\max}$  与满量程输出的百分数表示,即



$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-13)$$

重复性误差也可用绝对误差表示。

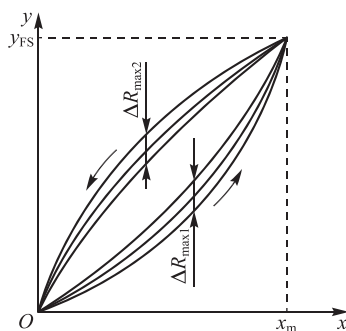


图 1-4 实际输出的校正曲线的重复性

### 1.1.5 分辨率与阈值

分辨率是指测试技术在规定测量范围内所能检测出的被测输入量的最小变化值。有时用相对满量程输入值的百分数来表示该值,称为分辨率。

阈值是能使测试技术的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值,即零点附近的分辨能力。有的测试技术在零点附近非线性严重,形成所谓“死区”,则将死区的大小作为阈值;更多情况下,阈值主要取决于测试技术噪声的大小,因而有的测试技术只给出噪声电平。

测试技术能检测出的被测量的最小变化值一般相当于噪声电平的若干倍,用公式表示为

$$M = \frac{cN}{k} \quad (1-14)$$

式中, $M$ 为被测量的最小变化值; $c$ 为系数,一般取 $1 \sim 5$ ;  $N$ 为噪声电平; $k$ 为测试技术的灵敏度。

### 1.1.6 稳定性与漂移

#### 1. 稳定性

稳定性又称长期稳定性,即测试技术在相当长的时间内保持其原性能的能力。稳定性一般用在室温条件下经过一规定时间间隔后,测试技术的输出与起始标定时的输出之间的差异来表示;有时也用标定的有效期来表示。

#### 2. 漂移

漂移是指在一定时间间隔内,测试技术的输出存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移。

零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移,又称时漂(或零漂)和温漂。时漂是指在规定的条件下,零点或灵敏度随时间的缓慢变化;温漂是指由周围温度变化所引起的零点或灵敏度的变化。

当测试技术无输入时,每隔一段时间进行读数,其输出的偏离零值即为零点漂移。测试

技术的零漂可表示为

$$\text{零漂} = \frac{\Delta y}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-15)$$

式中,  $\Delta y$  为最大零点偏差。

测试技术的温漂有时称为温度稳定性,它是指温度变化时,测试技术输出值的偏离程度。温漂一般以温度变化  $1^\circ\text{C}$ , 输出最大偏差与满量程的百分比来表示,即

$$\text{温漂} = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{FS} \Delta T} \times 100\% \quad (1-16)$$

式中,  $\Delta y_{\max}$  为输出最大偏差;  $\Delta T$  为温度变化范围。

### 1.1.7 静态误差

静态误差是指测试技术在其全量程内任意一点的输出值与其理论输出值的偏离程度,又称为精度。求静态误差时,把全部校准数据与拟合直线上对应值的残差看成是随机分布的,求出其标准偏差  $\sigma$ , 取  $2\sigma$  或  $3\sigma$  值即为测试技术的静态误差。

静态误差也可用相对误差表示,即

$$\gamma = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{y_{FS}} \times 100\% \quad (1-17)$$

静态误差是一项综合性指标,它基本上包含了前面叙述的非线性误差、迟滞误差、重复性误差等,所以也可以由这几个单项误差综合而得,即

$$\gamma = \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2 + \dots} \quad (1-18)$$

## 1.2 测试技术的动态特性

在实际测量中,大量的被测量是随时间变化而变化的动态信号,这就要求测试技术的输出不仅能精确地反映被测量的大小,还能正确地再现被测量随时间变化的规律。

测试技术的动态特性是指测试技术的输出对随时间变化的输入量的响应特性,它反映了输出值真实再现变化着的输入量的能力。

### 1.2.1 动态误差

在测量静态信号时,线性测试技术的输入/输出特性是一条直线,两者之间有一一对应的关系,而且被测信号不随时间变化,测量和记录过程均不受时间的限制;而在实际测量工作中,大量的被测信号是动态信号,测试技术对动态信号的测量不仅需要精确地测量信号幅值的大小,而且需要测量和记录动态信号变换过程的波形,这就要求测试技术能迅速准确地测出信号幅值的大小和无失真地再现被测信号随时间变化的波形。

动态特性好的测试技术,其输出量随时间变化的曲线与被测量随时间变化的曲线一致或者相近,即具有相同的时间函数;但实际上,除了具有理想的比例特性的环节外,输出信号将不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入之间的差异就是所谓的动态误差。例如,用一只热电偶测量热水的温度为  $T_1$ , 若环境的温度为  $T_0$  (设  $T_1 > T_0$ ), 测试技术曲线与温度从  $T_0$  跳变到  $T_1$  的阶跃波形存在一个差值,这个差值就称为动态误差,如图 1-5 所示。

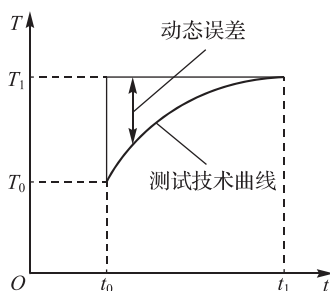


图 1-5 热电偶的测温过程(刘爱华图)

在用热电偶测量热水温度时,水温的热量需要通过热电偶的壳体传播到热接点上,由于热接点具有一定的热容量,它与水温的热平衡需要一个过程,因而,热电偶不能在被测温度变化时立即发生相应的反应。这种由热容量所决定的性能称为热惯性,这种热惯性是热电偶所固有的,热惯性决定了热电偶在测量快速温度变化时会产生动态误差。

这种影响动态特性的“固有因素”,任何测试技术都有,只不过它们的表现形式和作用程度不同。研究测试技术的动态特性主要是从测量误差的角度分析产生动态误差的原因及提出改进措施。

由于绝大多数的测试技术都可以简化为一阶或二阶系统,因而一阶测试技术和二阶测试技术是最基本的测试技术。测试技术的动态特性可以从时域和频域两个方面采用瞬态响应法及频率响应法来研究。由于输入信号的时间函数形式是多种多样的,因而在时域内研究测试技术的响应特性时,只能研究几种特定的输入时间函数(如阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等)的响应特性。在频域内研究动态特性时,一般是采用正弦函数得到频率响应特性。为了便于比较、评价或动态定标,常将阶跃信号和正弦信号作为输入信号,其对应的方法为阶跃响应法和频率响应法。

### 1.2.2 动态特性的数学模型

要精确建立测试技术的动态数学模型是很困难的,因此应像研究其他学科一样忽略一些影响不大的因素,如非线性和随机变量等复杂因素,将测试技术作为线性定常系统来考虑,因而其动态数学模型可以用线性常系数微分方程来表示,这种方程的通式为

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y \\ & = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \end{aligned} \quad (1-19)$$

式中, $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_0$  和  $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_0$  为与测试技术结构有关的常数; $y$  为输出量的时间函数; $x$  为输入量的时间函数。

系统的阶次由输出量的最高微分阶次决定。

所谓线性系统,就是指在方程式(1-19)中不包含变量及其各阶微分的非一次幂项(包括交叉相乘项)。如果线性系统方程中的各系数  $a_i (i=0, 1, 2, \cdots, n)$ 、 $b_j (j=0, 1, 2, \cdots, m)$  在工作过程中不随时间和输入量的变化而变化,那么该系统就称为线性定常系统。为了对线性定常系统建立一些感性认识,下面举例说明。

图 1-6 所示为一典型机械振动系统的力学模型。它具有质量为  $m$  的质量块、刚度为  $k$  的弹簧和阻尼系数为  $c$  的阻尼器。该系统在交变力  $F(t)$  的激励下产生位移响应  $x(t)$ 。根据力学理论中的动力学分析,其激励与响应间可以建立运动方程式,即

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t)$$

这是一个典型的二阶系统。如果该系统在振动过程中各参数( $m$ 、 $c$ 、 $k$ )没有变化,那么它还是一个定常系统。

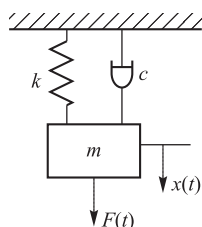


图 1-6 典型机械振动系统的力学模型

用线性常系数微分方程来表示测试技术的动态模型,其优点是通过解微分方程易于分清暂态响应和稳态响应,其缺点是求解微分方程很烦琐,尤其是通过增减环节来改善测试技术的特性时显得更不方便。

但是,线性定常系统有两个十分重要的性质,即叠加性和频率保持性。根据叠加性,当一个系统有  $n$  个激励  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  同时作用时,它的响应就等于这个激励单独作用时的响应  $y_i (i=1, 2, \dots, n)$  之和,即

$$\sum_{i=1}^n x_i(t) \rightarrow \sum_{i=1}^n y_i(t)$$

即各个输入量引起的输出是互不影响的。这样,在分析常系数线性系统时,总可以利用数学方法(傅里叶级数或傅里叶变换)将一个复杂的激励信号分解成若干个简单的激励信号(一系列简谐信号),然后求出这些分量激励响应之和。频率保持性表明,当线性系统的输入为某一频率时,系统的稳定状态响应也为同一频率的信号。

这两个重要性质为分析具有复杂输入的测试技术的动态特性带来了很大方便。这也是在用测试技术组成检测系统时经常需要将测试技术的特性进行线性化的原因之一。

理论上对式(1-19)可以求解,但是对于复杂系统和复杂的输入信号,求解该式是一件困难的事情。因此,在信息论和工程控制理论中,通常采用一些足以反映系统动态特性的函数将系统的输出与输入联系起来,这些函数有传递函数、频率响应函数和脉冲响应函数等。

在数学上,如果运用拉普拉斯变换将时域的数学模型(微分方程)转换成复频域( $s$  域)的数学模型(传递函数),求解微分方程就会变得比较容易。

### 1.2.3 传递函数

对式(1-19)取拉普拉斯变换,并令  $t=0$  时,输入量  $x(t)$  和输出量  $y(t)$  及它们的各阶时间导数的初始值均为零,则得

$$Y(s)(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) = X(s)(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1-20)$$

式(1-20)等号右边是一个与输入  $x(t)$  无关的表达式,它只与系统结构参数有关,因而等号右边是测试技术特性的一种表达式,它表征了输出与输入的关系,是一种描述测试技术特性的函数。当初始条件为零时(测试技术被激励之前,所有储能元件如质量块、弹性元件、电气元件均没有积存能量),输出  $y(t)$  的拉普拉斯变换  $Y(s)$  与输入  $x(t)$  的拉普拉斯变换  $X(s)$  之比称为传递函数,并记为  $H(s)$ ,即

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1-21)$$

对于由多环节串联或并联组成的测试技术或检测系统,如果各环节的阻抗匹配适当,则可略去其相互之间的影响,总的传递函数可按下列代数式求得:

由  $n$  个环节组成的串联系统,如图 1-7(a)所示。总的传递函数为

$$H(s) = \prod_{i=1}^n H_i(s) \quad (1-22)$$

由  $n$  个环节组成的并联系统,如图 1-7(b)所示。总的传递函数为

$$H(s) = \sum_{i=1}^n H_i(s) \quad (1-23)$$

引入传递函数后可用框图来描述系统。当组成系统的各个环节的传递函数为已知时,可用传递函数确定系统的总特性;对于复杂系统的求解,可化成简单系统解的组合。

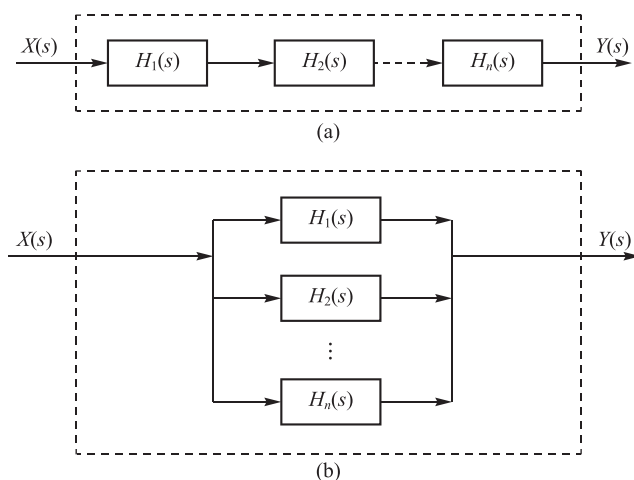


图 1-7 串联系统和并联系统

#### 1.2.4 测试技术的动态特性指标

测试技术的动态响应与输入信号的类型有关。测试技术进行系统响应时,常采用正弦和阶跃两种输入信号。这是由于任何周期函数都可以用傅里叶级数分解为各次谐波分量,并把它近似地表示为这些正弦量之和;而阶跃信号是最基本的瞬变信号。

##### 1. 阶跃响应

在时域内研究测试技术的动态特性时,常用的激励信号有阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数等。测试技术对所加激励信号的响应称为瞬态响应。一般认为,阶跃输入对于一个测试

技术来说是最严峻的工作状态。如果在阶跃函数的作用下,测试技术能满足动态性能指标,那么在其他函数的作用下,其动态性能指标也必定会令人满意。在理想情况下,阶跃输入信号的大小对过渡过程的曲线形状是没有影响的;但在实际做过渡过程实验时,应保持阶跃输入信号在测试技术特性曲线的线性范围内。下面以测试技术的单位阶跃响应来评价测试技术的动态性能。

1) 阶跃响应特性指标

当测试技术输入一个单位阶跃信号

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-24)$$

时,其输出信号称为阶跃响应。测试技术中常见的一阶阶跃响应曲线和二阶阶跃响应曲线如图 1-8 所示。

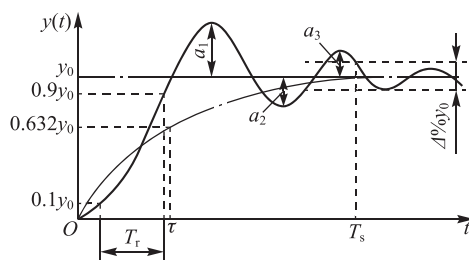


图 1-8 测试技术中常见的一阶阶跃响应曲线和二阶阶跃响应曲线

其主要的特性指标有以下几个:

(1) 时间常数  $\tau$ 。 $\tau$  为一阶测试技术输出值上升到稳态值  $y_0$  的 63.2% 所需的时间。它是描述一阶测试技术动态特性的重要参数,  $\tau$  越小, 响应速度越快。

(2) 上升时间  $T_r$ 。 $T_r$  为测试技术输出值由稳态值  $y_0$  的 10% 上升到  $y_0$  的 90% 所需的时间, 但有时也规定其他百分数。

(3) 响应时间  $T_s$ 。 $T_s$  为系统从阶跃输入开始到输出值进入稳态值所规定的范围内所需的时间。一般在稳态值  $y_0$  的上下规定一个  $\pm \Delta\%$  的公差带, 当响应曲线开始全部进入这个公差带的瞬间就是响应时间  $T_s$ , 为了明确起见, 往往说“百分之  $\Delta$  响应时间”。对于理想的一阶系统来讲, 5% 的响应时间为  $T_s = 3\tau$ 。对于理想的二阶系统来讲, 当阻尼比  $\xi = 0.6$  时, 10% 的响应时间为  $T_s = 0.38T_n$  ( $T_n$  为固有周期)。

(4) 超调量  $a_1$ 。超调量是指测试技术输出超过稳态值的最大值, 即  $a_1 = y_{\max} - y_0$ 。显然, 超调量  $a_1$  越小越好。有时  $a_1$  用相对误差  $\frac{y_{\max} - y_0}{y_0} \times 100\%$  来表示。

(5) 稳态误差  $e_{ss}$ 。 $e_{ss}$  为无限长时间后测试技术的稳态输出值与目标值之间的偏差  $\delta_{ss}$  的相对值, 即  $e_{ss} = \frac{\delta_{ss}}{y_0} \times 100\%$ 。

(6) 振荡次数  $\mu$ 。 $\mu$  为调节时间内输出量在稳态值附近上下波动的次数。

2) 一阶测试技术的单位阶跃响应

由式(1-19)可知, 一阶系统的微分方程为

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x$$

或

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{b_0}{a_0} x$$

即

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = kx \quad (1-25)$$

式中,  $\tau$  为一阶系统的时间常数,  $\tau = a_1/a_0$ ;  $k$  为一阶系统的静态灵敏度,  $k = b_0/a_0$ 。

对式(1-25)进行拉普拉斯变换, 得

$$(\tau s + 1)Y(s) = kX(s) \quad (1-26)$$

则传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (1-27)$$

由于在线性测试技术中灵敏度  $k$  为常数, 在动态特性分析中  $k$  只起使输出值增加  $k$  的作用, 因而为方便起见, 在讨论时采用  $k=1$ 。

对于初始状态为零的测试技术, 当输入为单位阶跃信号时, 即  $X(s) = 1/s$ , 测试技术输出的拉氏变换为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (1-28)$$

则一阶测试技术的单位阶跃响应为

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-29)$$

响应曲线如图 1-9 所示。由图可见, 测试技术存在惯性, 输出的初始上升斜率为  $1/\tau$ , 若测试技术保持初始响应速度, 则在  $\tau$  时刻输出将达到稳态值; 但实际的响应时间随时间的增加而变短。理论上, 测试技术的响应在  $t$  趋于无穷时才达到稳态值; 但实际上, 当  $t=4\tau$  时其输出已达到稳态值的 98.2%, 可以认为已达到稳态。  $\tau$  越小, 响应曲线越接近于输入阶跃曲线, 因此, 一阶测试技术的时间常数  $\tau$  越小越好。

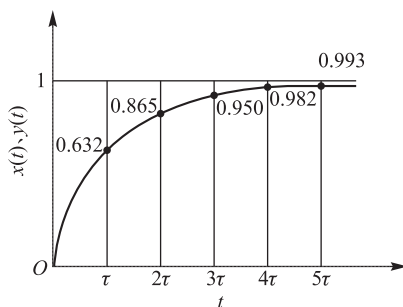


图 1-9 一阶测试技术的单位阶跃响应曲线

### 3) 二阶测试技术的单位阶跃响应

由式(1-19)可知, 二阶系统的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_0 x \quad (1-30)$$

或

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

两边取拉氏变换,将上式写成算符  $s$  的代数式,得

$$\left( \frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right) Y(s) = kX(s) \quad (1-31)$$

式中,  $\omega_n$  为无阻尼系统固有频率,  $\omega_n = \sqrt{a_0/a_2}$ ;  $\xi$  为阻尼比,  $\xi = a_1/2\sqrt{a_0 a_2}$ ; 其他参数含义同前。

上述三个量  $k$ 、 $\omega_n$ 、 $\xi$  为二阶测试技术动态特性的特征量。

由式(1-31)可得二阶测试技术的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-32)$$

在单位阶跃信号的作用下,测试技术输出的拉氏变换( $k=1$ )为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1-33)$$

对  $Y(s)$  进行拉氏变换,即可得到单位阶跃响应。图 1-10 所示为二阶测试技术的单位阶跃响应曲线。由图 1-10 可知,测试技术的响应在很大程度上取决于阻尼比  $\xi$  和固有频率  $\omega_n$ 。 $\omega_n$  又取决于测试技术的主要结构参数,固有频率  $\omega_n$  越高,响应曲线上升越快,即响应速度越快;反之,响应速度越慢。阻尼比直接影响超调量和振荡次数: $\xi=0$ ,为临界阻尼,超调量为 100%,产生等幅振荡,达不到稳态; $\xi>1$ ,为过阻尼,完全没有超调,也没有振荡,但反应迟钝,动作缓慢,达到稳态需要较长时间; $\xi<1$ ,为欠阻尼,衰减振荡,达到稳态值所需时间随  $\xi$  的减小而加长; $\xi=1$ ,响应时间最短。在实际使用时,为了兼顾短的上升时间和小的超调量,一般测试技术都设计成欠阻尼式的,阻尼比  $\xi$  一般取为 0.6~0.8。带保护套管的热电偶是一个典型的二阶测试技术。

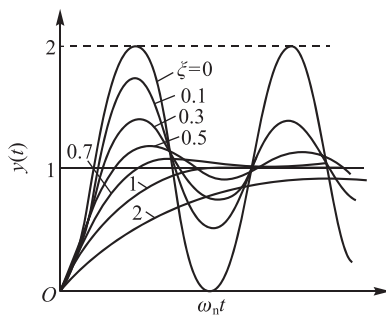


图 1-10 二阶测试技术的单位阶跃响应曲线

## 2. 频率响应

将各种频率不同而幅值相等的正弦信号输入测试技术,其输出正弦信号的幅值、相位与频率之间的关系称为频率响应特性,即输出的正弦信号的频率对应于输入信号的频率不变,而幅值与相位随着频率的不同而改变。一般情况下,输出幅值随频率的上升而下降,输出相位滞后于输入相位。



## 1) 频率响应特性指标

频率响应特性由频率响应函数表示,它由幅频特性和相频特性组成。通常在表示测试技术的动态特性时用幅频特性,图 1-11 所示为一个典型的对数幅频特性曲线。纵坐标增益采用分贝值,横坐标  $\omega$  虽然也是对数坐标,但直接标注  $\omega$ 。

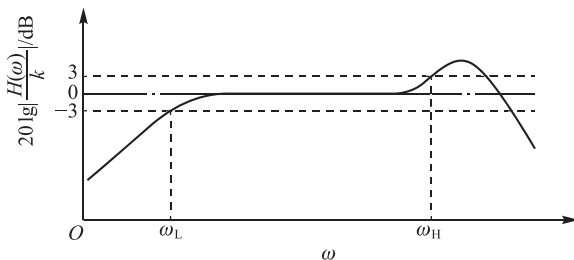


图 1-11 典型的对数幅频特性曲线

在图 1-11 中,0 dB 的水平线是理想的零阶(比例)系统的幅频特性。因为  $H(\omega) = k$ , 所以  $20\lg \left| \frac{H(\omega)}{k} \right| = 0$ 。如果某测试技术的幅频特性曲线偏离理想直线,但不超过某个允许的公差带,那么仍然认为是可用的范围。在声学仪器和电学仪器中往往规定  $\pm 3$  dB 的公差带,这相当于  $H(\omega)/k = 0.708 \sim 1.41$ 。而对测试技术来讲,要根据所需的测量精度来定公差带。幅频特性曲线越出公差带处所对应的频率分别叫作下截止频率  $\omega_L$  和上截止频率  $\omega_H$ 。而这个频率区间( $\omega_L \sim \omega_H$ )称为测试技术的频响范围或通频宽度,即带宽。

当采用正弦输入研究测试技术的频域时,常用幅频特性和相频特性来描述测试技术的动态特性,其重要指标是带宽。

设输入信号为  $x(t) = A \sin \omega t$ , 则输出量为  $y(t) = B \sin(\omega t + \varphi)$ 。式中,  $B$ 、 $\varphi$  分别为输出量的幅值和初始角。可见,输出量与输入量的频率相同,幅值不等,有相位差。因此,输入信号幅值  $A$  即使相等,只要  $\omega$  有所变化,输出信号的幅值和相位也会发生变化。频率响应是指在稳态下幅值比  $B/A$  和相位  $\varphi$  随  $\omega$  变化的情况。

在线性定常系统中,拉氏变换是广义的傅氏变换,取  $s = \sigma + j\omega$  中的  $\sigma = 0$ , 则  $s = j\omega$ , 即用  $j\omega$  代替式(1-20)中的  $s$ , 可得

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (1-34)$$

式(1-34)将测试技术的动态响应从时域转换到频域,  $H(j\omega)$  称为测试技术的频率响应函数,简称频率响应或频率特性。很显然,频率响应是传递函数的一个特例。不难看出,测试技术的频率响应  $H(j\omega)$  就是初始条件为零时输出的傅里叶变换与输入的傅里叶变换之比,是在频域对系统传递信息特性的描述。

通常,频率响应函数  $H(j\omega)$  是一个复函数,它可以用指数形式来表示,即

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{B}{A} e^{j\varphi} = A(\omega) e^{j\varphi} \quad (1-35)$$

其中,  $A(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{B}{A}$  称为测试技术的幅频特性,也称为测试技术的动态灵敏度(或增益)。

$A(\omega)$  表示测试技术的输出与输入的幅值比随输入信号频率  $\omega$  而变化的关系。

$\varphi(\omega)$ 表示测试技术的输出信号相位随频率变化的关系。对于测试技术, $\varphi$ 通常是负的,表示测试技术的输出滞后于输入的相位角度,而且 $\varphi$ 随 $\omega$ 而变,故称 $\varphi(\omega)$ 为测试技术的相频特性。

相位误差是指频响范围内的最大相移;振幅误差为 $\left| \frac{A(\omega)}{k} - 1 \right|$ ;测试技术不失真(正确响应)的条件是测试技术的输出与输入之间除了放大和滞后外,不发生任何畸变。

### 2) 零阶测试技术的频率特性

由式(1-19)可知,零阶系统的微分方程为

$$a_0 y = b_0 x \quad (1-36)$$

$$k = \frac{y}{x} = \frac{b_0}{a_0} \quad (1-37)$$

式中, $k$ 为静态灵敏度。

由式(1-37)可知,零阶测试技术的输出与输入成正比,并且与信号频率无关,因此,无幅值和相位失真问题。零阶测试技术具有理想的动态特性。

### 3) 一阶测试技术的频率特性

将式(1-27)中的 $s$ 用 $j\omega$ 代替,可得频率特性函数为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{k}{j\omega\tau + 1} \quad (1-38)$$

幅频特性为

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} \quad (1-39)$$

相频特性为

$$\varphi(\omega) = \arctan(-\omega\tau) \quad (1-40)$$

由图 1-12 可知,当 $\omega\tau \ll 1$ 时, $A(\omega) = 1$ ,说明测试技术的输出与输入成线性关系,即时间常数 $\tau$ 越小,频率特性越好;当 $\varphi(\omega)$ 很小时, $\tan \varphi = \tan(\arctan |H(j\omega)|) \approx \varphi$ , $\varphi(\omega) \approx \omega\tau$ ,所以相位差与频率 $\omega$ 成线性关系。所以,一阶系统的正确响应条件为 $\omega\tau \ll 1$ 。当 $\tau = 1$ 时,测试技术的灵敏度下降了 3 dB,此时的频率为工作频带的上限,则一阶系统的上截止频率为 $1/\tau$ 。所以,时间常数 $\tau$ 是反映一阶系统动态响应特性的关键参数。

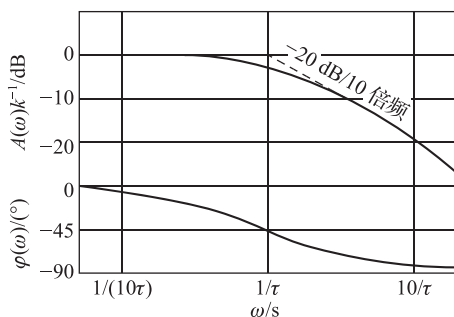


图 1-12 一阶系统的特性曲线

### 4) 二阶测试技术的频率特性

将式(1-32)中的 $s$ 用 $j\omega$ 代替,可得频率特性函数为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{k\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\xi j\omega_n\omega + \omega_n^2} \quad (1-41)$$

幅频特性为

$$A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1-42)$$

相频特性为

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left[ \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right] \quad (1-43)$$

从式(1-42)、式(1-43)及图 1-13 的曲线可以得到以下几个结论:

(1) 当  $\omega/\omega_n \ll 1$  ( $\omega \ll \omega_n$ ) 时,  $A(\omega) \approx k$ ,  $\varphi(\omega) \approx 0$ , 即近似于理想的系统(零阶系统)。要想使工作频带加宽, 最关键的是提高无阻尼固有频率  $\omega_n$ 。

(2) 当  $\omega/\omega_n \approx 1$  ( $\omega \rightarrow \omega_n$ ) 时, 幅频特性和相频特性都与阻尼比  $\xi$  有明显的关系, 主要有以下三种情况:

① 当  $\xi < 1$  (欠阻尼),  $\omega/\omega_n \approx 1$  ( $\omega \rightarrow \omega_n$ ) 时, 出现极大值, 即共振现象; 当  $\xi = 0$  时, 共振频率等于无阻尼固有频率  $\omega_n$ ; 当  $\xi > 0$  时, 有阻尼的共振频率  $\omega_d = \sqrt{1 - 2\xi^2} \omega_n$ 。

② 当  $\xi = 0.7$  (最佳阻尼) 时, 幅频特性  $A(\omega)$  曲线的平坦段最宽,  $\varphi(\omega)$  的曲线接近于一条斜直线。

③ 当  $\xi = 1$  (临界阻尼) 时, 幅频特性  $A(\omega)$  曲线永远小于 1, 且  $\omega_d = 0$ , 不会出现共振现象。但因为幅频特性曲线下降得太快, 平坦段反而变短了。

(3) 当  $\omega/\omega_n \geq 1$  ( $\omega \geq \omega_n$ ) 时, 幅频特性  $A(\omega)$  曲线趋于零, 几乎没有响应了。

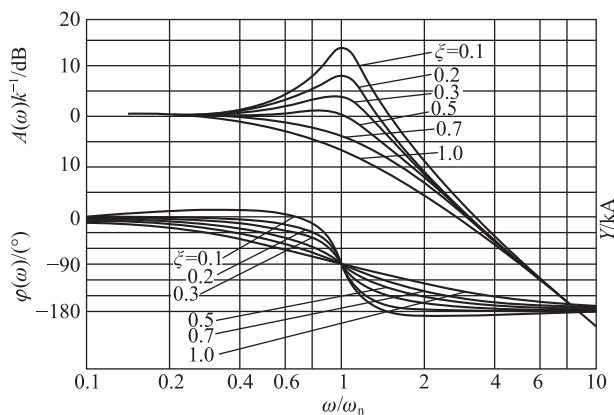


图 1-13 二阶系统的特性曲线

综上所述, 二阶系统的正确响应条件是  $\omega/\omega_n \ll 1$ 。用二阶系统描述的测试技术动态特性的好坏主要取决于固有频率  $\omega_n$  或共振频率  $\omega_d$ 。对于大部分测试技术来说, 因为  $\xi \ll 1$ , 所以  $\omega_n$  与  $\omega_d$  相差无几。

## 1.3 测试技术基础

任何实验都离不开测量,没有测量就没有科学。在一定条件下,任何物理量都必然具有某一客观真实的数据。所谓测量,就是指以测量出某一物理量的值为目的的一系列有意识的科学实践活动。

### 1.3.1 测量的分类

按测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量;按测量条件的不同,测量又可分为等精度测量和不等精度测量。

#### 1. 直接测量和间接测量

直接测量是把一个量与同类量直接进行比较以确定待测量的量值。一般基本量的测量都属于此类,如用米尺测量物体的长度,用天平称铜块的质量,用秒表测量单摆的周期,等等。仪表上所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值,都是直接测量的量值。

实际上,只有少数的量能够通过物理实验测量出来,大多数的量是将直接测量所得的数据代入一定的公式,通过运算得出的。例如,将直接测得的单摆长度  $l$  和单摆周期  $T$  代入公式  $T=2\pi\sqrt{l/g}$ , 求出重力加速度  $g$  的测量称为间接测量。

#### 2. 等精度测量和不等精度测量

对某个量  $N$  进行  $k$  次测量,得到  $k$  个值  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ , 如果每次测量都是在相同的条件下进行的,则没有理由认为测得的  $k$  个值中某一个值比另一个值准确。在这种情况下所进行的一系列测量称为等精度测量。所谓相同条件,就是指同一个人,用同一台仪器,每次测量的周围条件都相同(如测量时的环境、气温、照明情况等未变动)。在这种情况下,就可以认为各测量值的精确程度是相同的;同样的,对某个量  $N$  进行  $k$  次测量,得到  $k$  个值  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ , 如果每次测量的条件不同,那么这些值的精确程度就不能认为是相同的。在这种情况下所进行的一系列测量称为不等精度测量。例如,同一实验者用精度不同的三种天平称量同一物体的质量  $m$ , 得到三个值  $m_1, m_2, m_3$ , 或者用三种不同的方法测量同一物质的密度  $\rho$ , 得到三个值  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ , 这都是不等精度测量。

### 1.3.2 误差及其分类

用实验方法去研究事物的客观规律,总是在一定的环境(温度、湿度等)和仪器条件下进行的。由于测量条件(环境、温度、湿度等)的变化及仪器精度的不同,在任何测量中,测量值  $N$  与待测量客观存在的真值  $N'$  之间总存在着一定的差异。测量值  $N$  与真值  $N'$  的差值叫作测量误差  $\Delta N$ , 简称误差,即

$$\Delta N = N - N' \quad (1-44)$$

任何测量都不可避免地存在误差,所以,一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两个部分。真值是理想的概念,一般说来是不可能确切知道的。既然测量不能得到真值,那么怎样才能最大限度地减小测量误差,并估算出误差的范围呢?要回答这些问题,首先要了解误差产生的原因及其性质。误差主要来源于仪器误差、环境误差、人员误差和方法误差。为了便于分析,根据误差的性质把误差分为系统误差和随机误差两大类。

## 1. 系统误差

系统误差的特征是:在同一条件下多次测量同一量值时,绝对值和符号保持不变;或当条件改变时,按一定规律变化。系统误差在某些情况下对测量结果的影响还比较大,因此,研究系统误差产生的原因,发现、减小或消除系统误差,使测量结果更加趋于正确和可靠,是误差理论的重要课题之一,是数据处理中的一个重要的内容。

### 1) 系统误差产生的原因

系统误差是由固定不变的或按确定规律变化的因素所造成的。这些误差一般是可以掌握的。

(1)测量装置方面的因素。仪器设计制造方面的缺陷(如尺子刻度偏大、表盘刻度不均匀等),仪器安装、调整不当等因素所引起的误差。

(2)测量方法方面的因素。测量所依据的理论和公式的近似性引起的误差,如单摆实验中所用的测重力加速度公式  $g=4\pi^2/T^2$  就是近似公式;测量条件或测量方法不能满足理论公式所要求的条件等引起的误差,如在实验中一般忽略了摩擦、散热、电表的内阻等引起的误差。

(3)环境方面的因素。测量时的实际温度与所要求的温度有偏差,测量过程中温度、湿度、气压等按一定规律变化的因素所引起的误差。

(4)测量人员方面的因素。测量者本身的生理特点或固有习惯所引起的误差,如某些人在动态测量记录某一信号时有滞后的倾向。

### 2) 系统误差遵循的规律

根据系统误差产生的原因可以确信它不具有抵偿性,它是固定的或遵循一定规律的。

(1)不变系统误差。在整个测量过程中,误差的符号和大小都固定不变的系统误差称为不变系统误差。例如,某尺子的公称尺寸为 100 mm,实际尺寸为 100.001 mm,误差为 -0.001 mm,若按公称尺子使用,则始终会存在 -0.001 mm 的系统误差。

(2)线性变化系统误差。在测量过程中,误差值随某些因素做线性变化的系统误差,称为线性变化系统误差。例如,刻度值为 1 mm 的标准刻度尺,因为存在刻画误差  $\Delta l$  mm,故每个刻度间距实际为  $(1+\Delta l)$  mm,若用它测量某物体的长度值为  $k$ ,则被测物体的实际长度值  $L=k(1+\Delta l)$  mm,这样就产生了随测量值  $k$  的大小而变化的线性系统误差  $-k\Delta l$ 。

(3)周期性变化系统误差。测量值随某些因素按周期性变化的误差,称为周期性变化系统误差。典型的例子是当仪表指针的回转中心与刻度盘中心有一个偏心值  $e$  时,指针在任意一个转角  $\varphi$  下由于偏心所引起的读数误差  $\Delta L$  即为周期性变化系统误差  $\Delta L=e\sin\varphi$ ;  $\Delta L$  的变化规律符合正弦曲线规律,即当指针在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时的误差为零,而在  $90^\circ$  和  $270^\circ$  时的误差最大,为  $\pm e$ 。

(4)复杂规律变化系统误差。在整个测量过程中,若误差是按确定的且复杂规律变化的,则称其为复杂规律变化系统误差。例如,微安表的指针偏转角与偏转力矩不能严格保持线性关系,而表盘仍采用均匀刻度所产生的误差。变化规律不太复杂的系统误差可用多项式来表示,如电阻与温度的关系可表示为

$$R=R_{20}+\alpha(t-20)+\beta(t-20)^2$$

式中, $R$  为温度等于  $t$  时的电阻; $R_{20}$  为温度等于  $20^\circ\text{C}$  时的电阻; $\alpha$  和  $\beta$  分别为电阻的一次温度系数和二次温度系数。

### 3) 系统误差的发现

提高测量精度的首要问题是发现系统误差,然而在测量过程中形成系统误差的因素是复杂的,目前还没有适合发现各种系统误差的普遍方法,只有根据具体的测量过程和测量仪器进行全面、仔细的分析,针对具体情况合理选择一种或几种方法加以校验,才能最终确定有无系统误差。下面简单介绍几种适用于发现某些系统误差的常用方法。

(1)实验对比法。实验对比法主要适用于发现固定系统误差,其基本思想是改变产生系统误差的条件,进行不同条件的测量。例如,采用不同方法测量同一物理量,若其结果不一致,则表明至少有一种方法存在系统误差。此外,还可根据具体实验情况采用仪器对比法、参数改变对比法、改变实验条件对比法、改变实验操作人员对比法等进行测量。

(2)理论分析法。理论分析法主要适用于通过定性分析来判断是否存在系统误差,如分析仪器所要求的工作条件是否满足,实验所依据的理论公式所要求的条件在测量过程中是否被满足,如果这些要求没有被满足,则实验必有系统误差。

(3)数据分析法。数据分析法主要适用于通过定量分析来判断是否存在系统误差,一般可采用残余误差观察法、残余误差校验法、不同公式计算标准差比较法、计算数据比较法、 $t$  检验法、秩和检验法等方法,有关误差理论方面的专著对这些方法有详尽的介绍,此处不再赘述。

### 4) 系统误差的减小或消除

在实际测量中,如果判断出有系统误差存在,就必须进一步分析可能产生系统误差的因素,想方设法地减小或消除这些误差。由于测量方法、测量对象、测量环境及测量人员不尽相同,因而没有一个普遍适用的方法来减小或消除系统误差。下面简单介绍几种减小或消除系统误差的方法及途径。

(1)从产生系统误差的根源上消除。从产生系统误差的根源上消除误差是最根本的方法,通过对实验过程中各个环节的认真分析来发现产生系统误差的各种因素。一般可以采取以下措施从根源上消除或减小误差:采用近似性较好又比较切合实际的理论公式,尽可能满足理论公式所要求的实验条件;选用能满足测量误差所要求的实验仪器装置,严格保证仪器设备所要求的测量条件;采用多人合作、重复实验的方法。

(2)引入修正项。通过预先对仪器设备将要产生的系统误差进行分析计算,找出误差规律,从而找出修正公式或修正值,对测量结果进行修正。

(3)采用能消除系统误差的方法进行测量。对于某种固定的或有规律变化的系统误差,可以采用交换法、抵消法、补偿法、对称测量法、半周期偶数次测量法等特殊方法进行清除,具体采用什么方法要根据具体的实验情况及实验者的经验来确定。

无论采用哪种方法都不可能完全将系统误差消除,只要将系统误差减小到测量误差要求允许的范围内,或者系统误差对测量结果的影响小到可以忽略不计,就可以认为系统误差已被消除。

## 2. 随机误差

随机误差是由于感官灵敏度和仪器精密程度的限制、周围环境的干扰及伴随着测量而来的不可预料的随机因素的影响而造成的。它的特点是大小无定值,一切都是随机发生的,因而又把它称为偶然误差。多次测量时,随机误差服从以下统计规律:

(1)单峰性。测量值与真值相差越小,在测量中出现的可能性越大;测量值与真值相差

越大,在测量中出现的可能性越小。

(2)对称性。测量值与真值相比,大于或小于某量的可能性是相等的。

(3)有界性。在一定的测量条件下,误差的绝对值不会超过一定的限度。

(4)抵偿性。随机误差的算术平均值随测量次数的增加越来越小。

根据上述统计规律,通过多次测量求平均值的方法可以使随机误差相互抵消。算术平均值与真值较为接近,一般被作为测量的结果。

随机误差用误差范围来表示,它可由误差理论估算出来,其表示方法有标准误差、平均误差和极限误差等。它们的区别仅在于概率大小的不同。对于初学者来说,首先需要建立误差概念,以及学会用对实验结果进行评价的简单误差进行误差估算。有些函数袖珍计算器有标准误差的计算程序,可以直接进行标准误差的计算,具体的用法可参阅计算器的使用说明书。

在测量中还可能出现错误,如读数错误、记录错误、操作错误和计算错误等。错误不属于正常的测量工作范畴,应当尽量避免。避免错误的方法,除端正工作态度,保证操作方法无误外,还应用与另一次测量结果相比较的办法发现并纠正。

### 1.3.3 误差的表示形式

误差的表示形式有绝对误差和相对误差两种。

绝对误差 $\pm\Delta N$ 表示测量值 $N$ 与真值 $N'$ 间的相差范围,正负号“ $\pm$ ”表示 $N$ 可能比 $N'$ 大或小。由测量值 $N$ 及其绝对误差 $\Delta N$ 可以看出真值所在的可能范围为 $N-\Delta N\leq N'\leq N+\Delta N$ ,或简写为 $N'=N\pm\Delta N$ 。

仅仅根据绝对误差的大小难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要看测定值本身的大小,为此引入相对误差的概念。相对误差 $E=\frac{\Delta N}{N'}=\frac{\Delta N}{N'}\times 100\%$ ,表示绝对误差在所测物理量中所占的比重,一般用百分比表示。例如,测量一长度时得1 000 m,而绝对误差为1 m,测另一长度时得100 cm,其绝对误差为1 cm,后者的相对误差为1%,而前者的相对误差为0.1%,所以,我们认为前者较后者更可靠。

由于误差的存在,任何测量值 $N$ 都只能在一定近似程度上表示真值 $N'$ 的大小,而误差范围大致说明这种近似程度。完整的测量结果不仅要说明所得数值 $N$ 及其单位,还必须说明相应的误差,可用以下的标准形式来表示:

$$N'=(N\pm\Delta N)(\text{单位}) \quad (1-45)$$

$$E=\frac{\Delta N}{N'}\times 100\% \quad (1-46)$$

不标明误差的测量结果,在科学上是没有价值的。

如果待测量有理论值或公认值,也可用百分差来表示测量的好坏,即

$$\text{百分差 } E_0=\frac{\text{测量值 } N-\text{公认值 } N''}{\text{公认值 } N''}\times 100\% \quad (1-47)$$

绝对误差、相对误差和百分差通常只取1~2位数字来表示。

### 1.3.4 有效数字及简算方法

#### 1. 有效数字的概念

一般来说,实验所处理的数值有两种:一种是没有误差的准确值(如测量的次数、公式中

的纯数等),另一种是测量值。测量值总含有一定的误差,因此,它的数据就不应无止境地写下去。例如,测量值  $\rho=(1.394\ 23\pm 0.002)\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,由误差可知,其第三位小数可能是2~6的数字,因此,第三位小数“4”是不可靠的,在它以下的数字就没有表示出来的必要了。所以,上述的实验结果应写成  $\rho=(1.394\pm 0.002)\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,其中,“1”“3”和“9”是可靠数字,最后一位“4”是可疑数字。一般规定,数值中的可靠数字与所保留的1位(或2位)可疑数字统称为有效数字。

测量结果用有效数字表示,可以反映测量的准确度。如用米尺测得一物体的长度为  $L=(26.3\pm 0.2)\text{mm}$ ,最后一位数“3”是估读出来的,是可疑数字,测量值  $L$  为3位有效数字。如果同样是这个物体,用游标卡尺测量其长度,得  $L=(26.30\pm 0.02)\text{mm}$ , $L$  是4位有效数字,测量准确度要高些。

一个物理量的测量值与数字的一个数有着不同的意义,在数学上  $26.3=26.30$ ,但对测量值来说, $26.3\neq 26.30$ ,因为它们有着不同的误差,测量的准确度不同。 $26.3$  为3位有效数字,而  $26.30$  为4位有效数字。在记录实验数据的时候,要切记有效数字的位数是从第一个不为零的数字算起的,当然并不是说零不算有效数字。例如,数字  $10.30$  中的两个零,虽然其中一个处在中间,另一个处在末尾,但因为它们都反映了被测量的大小,所以都属于有效数字。

对于十进制单位变换,只允许改变小数点的位置,不允许改变有效位数。例如, $1.3\text{ m}$  为两位有效数字,当换算成以  $\text{km}$  或  $\text{mm}$  做单位时,应写为

$$1.3\text{ m}=1.3\times 10^{-3}\text{ km}=1.3\times 10^3\text{ mm}$$

而  $1.3\text{ m}=1\ 300\text{ mm}$  的写法是错误的。

实验结果的最后一位数字应与绝对误差对齐,绝对误差最多写两位,相对误差也是如此。

## 2. 有效数字的简算

为了获得实验结果,往往需要对测得的数据进行运算。在数据运算中,首先应保证测量的准确程度,在此前提下,尽可能节省运算时间,提高运算效率。运算时应使结果具有足够的有效数字,不要少算,也不要多算。少算会带来附加误差,降低结果的精确程度;多算是毫无意义的,虽然算的位数很多,但绝不可能减小误差。下面分别介绍有效数字的运算规则。

### 1) 加减运算

几个数相加减时,最后结果的可疑数字与各数值中最先出现的可疑数字对齐。

**例 1-1** 已知  $Y=A+B-C$ ,式中  $A=(103.3\pm 0.5)\text{cm}$ , $B=(13.561\pm 0.012)\text{cm}$ , $C=(1.652\pm 0.005)\text{cm}$ ,试问计算结果应保留几位数字?

**解** 先观察一下具体的运算过程。

$$\begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ + 13.\underline{561} \\ \hline 116.\underline{861} \end{array} \xrightarrow{\text{可简化为}} \begin{array}{r} 103.\underline{3} \\ + 13.\underline{6} \\ \hline 116.\underline{9} \end{array} \quad \begin{array}{r} 116.\underline{9} \\ - 1.\underline{652} \\ \hline 115.\underline{248} \end{array} \xrightarrow{\text{可简化为}} \begin{array}{r} 116.\underline{9} \\ - 1.\underline{7} \\ \hline 115.\underline{2} \end{array}$$

一个数字与一个可疑数字相加或相减,其结果必然是可疑数字。例 1-1 中带下划线的数字为可疑数字。本例中各数值最先出现可疑数字的位置在小数点后第一位( $103.\underline{3}$ ),按照运算结果保留一位可疑数字的原则,例 1-1 的简算方法为

$$Y=103.3+13.6-1.7=115.2(\text{cm})$$



结果表示为

$$Y=(115.2\pm 0.5)\text{cm}, \frac{\Delta Y}{Y}=0.43\%$$

## 2) 乘除运算

几个数相乘除,计算结果中有效数字的位数与各数值中有效数字位数最少的一个相同(或最多再多保留一位)。

**例 1-2**  $1.111\bar{1}\times 1.1\bar{1}=?$  试问计算结果应保留几位数字?

**解** 用计算器计算可得  $1.111\bar{1}\times 1.1\bar{1}=1.233\ 321$ ,但是,此结果究竟应取几位数字才合理。我们来看一下具体的运算过程便一目了然了。因为一个数字与一个可疑数字相乘,其结果必然是可疑数字,所以,由上面的运算过程可知,小数点后面第二位的“3”及其以后的数字都是可疑数字。按照保留 1 位可疑数字的原则,计算结果应写成 1.23,为 3 位有效数字。这与上面叙述的加减简算法则是一致的,即在此例中,5 位有效数字与 3 位有效数字相乘,计算结果为 3 位有效数字。

$$\begin{array}{r} 1.111\bar{1} \\ \times 1.1\bar{1} \\ \hline 1111\bar{1} \\ 1111\bar{1} \\ \hline 1.233321 \end{array}$$

除法是乘法的逆运算,这里不再详细论述。

在进行乘除运算时,误差传递公式为

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$$

可见计算结果的相对误差比算式中最大的一个相对误差( $\Delta A/A$  或  $\Delta B/B$ )还要大。相对误差越大,有效数字的位数越少。对于一个间接的测量值,如果它是由几个直接测量值相乘而计算得到的,那么,在进行测量时应使各个直接测量值的有效数字位数基本相仿,或者说,它们的相对误差要比较接近。如果相差悬殊,那么精度过高的测量就失去了意义。

**例 1-3** 在长度测量实验中,用米尺、游标卡尺和螺旋测微器分别测量一个长方体的三个边长为  $A=(13.79\pm 0.02)\text{cm}$ 、 $B=(3.635\pm 0.005)\text{cm}$ 、 $C=(0.491\ 5\pm 0.000\ 5)\text{cm}$ ,试计算长方体的体积  $V$ 。

**解** 根据简算方法,长方体的体积为

$$V=ABC=13.79\times 3.635\times 0.491\ 5=24.64(\text{cm}^3)$$

由误差传递公式算得相对误差为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V} &= \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C} \\ &= \frac{0.02}{14} + \frac{0.005}{3.6} + \frac{0.000\ 5}{0.5} \\ &= 0.14\% + 0.14\% + 0.10\% \\ &= 0.38\% \end{aligned}$$

绝对误差为

$$\Delta V=25\times 0.38\%=0.1(\text{cm}^3)$$

结果用标准形式表示,长方体的体积为

$$V=(24.6\pm 0.1)\text{cm}^3, \frac{\Delta V}{V}=0.4\%$$

从例 1-3 可见,用简算方法计算得到的测量结果表示与利用误差传递公式计算得到的测量结果表示是一致的。实验中测量三个边长分别采用了不同精度的量具,其目的是使三

个边的测量值有相同的有效数字位数,相对误差接近。

### 3) 乘方运算

乘方运算的有效数字位数与其底数相同。

### 4) 对数、三角函数和 $n$ 次方运算

对数、三角函数和  $n$  次方运算的计算结果必须按照误差传递公式来确定有效数字的位数,而不可以用前面所述的简算方法。

**例 1-4** 已知  $A=3\ 000\pm 2$ , 计算  $y=\ln A$  和  $z=\sqrt[3]{A}$ 。

**解** (1)  $y=\ln A=\ln 3\ 000=8.006\ 367\ 6$ , 此值由计算器算得。

按照  $\Delta y=\frac{1}{A}\Delta A=\frac{2}{3\ 000}=0.000\ 7$ , 结果为

$$y=\ln A=8.006\ 4\pm 0.000\ 7$$

$$\frac{\Delta y}{y}=0.009\%$$

(2)  $z=\sqrt[3]{A}=14.422\ 496$ , 此值由计算器算得。

绝对误差为

$$\Delta z=\frac{1}{3}A^{-\frac{2}{3}}\Delta A=\frac{1}{3}\frac{1}{\sqrt[3]{3\ 000^2}}\times 2=0.003$$

结果为

$$z=14.422\pm 0.003$$

$$\frac{\Delta V}{V}=0.02\%$$

### 5) 数字的截尾运算

在处理数据时,经常要截去多余的尾数,一般截尾时以“尾数大于五进,小于五舍,等于五时取偶”来定。这个原则比过去习惯规定的四舍五入的截尾规则更合理,这可由下面的分析看出:如按四舍五入来截尾时,数字 2 可能是由下面这列数 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 截尾而得到的。撇开 1.5 这个数不计,其他几个数的平均值正好为 2,加上 1.5 后,其平均数就比 2 偏小。如果按前述规定,则 2 是由 1.5, 1.6, 1.7, ..., 2.0, ..., 2.4, 2.5 截尾得到的,平均正好是 2。截尾时,尾数的进与舍机会均等,这就更合理了。

“逢五取偶”是为了避免重复进位而设的。例如,对 2.444 45 这个数来讲,若按“逢五取奇”来舍取,则第一次要取 5 位有效数字,截尾时就应写作 2.444 5;第二次再进一步截尾成 4 位有效数字时,将为 2.445;等等。这就与直接截尾成 4 位数时所得的 2.444 相矛盾,故规定当所需截去的尾数正好等于 5 时,截尾后的最后 1 位应取偶数。

根据以上截尾原则,将下列数截去尾数成 4 位有效数字时,应有

$$2.345\ 26 \rightarrow 2.345$$

$$2.345\ 50 \rightarrow 2.346$$

$$2.346\ 50 \rightarrow 2.346$$

$$2.347\ 50 \rightarrow 2.348$$

### 6) 数字的科学记数法

在乘除和开方等运算中,对数字采用科学记数常常是比较方便的。所谓数字的科学记

数法,就是指将数字分成两部分,第一部分表示有效数字,书写时只在小数点前保留1位数,如3.46、5.894等;第二部分表示单位,以10的几次幂来表示,如 $10^{-8}$ 、 $10^4$ 等。从下面的例子不难看出这种表示法的优点。

$$0.000\ 345 \div 139 \rightarrow 3.45 \times 10^{-4} \div 1.39 \times 10^2 = (3.45 \div 1.39) \times 10^{-6}$$

$$0.001\ 73 \times 0.000\ 013\ 4 \rightarrow 1.73 \times 10^{-3} \times 1.34 \times 10^{-5} = (1.73 \times 1.34) \times 10^{-8}$$

$$\sqrt{0.000\ 846} \rightarrow \sqrt{8.46 \times 10^{-4}} = \sqrt{8.46} \times 10^{-2}$$

## 习 题

1. 测试技术的静态特性是什么? 其用哪些性能指标来描述? 它们一般用哪些公式表示?
2. 测试技术的动态特性是什么? 其分析方法有几种?
3. 测试技术数学模型的一般描述方法有哪些?
4. 测试技术系统有哪些典型环节? 写出不同环节的微分方程。
5. 为什么说零阶测试技术的动态特性是最理想的?
6. 简述系统误差和随机误差出现的原因及特点。
7. 标准误差的意义是什么?
8. 有效数字的运算原则和规则是什么? 有效数字的确定方法是什么?

## 第 2 章

# 传感器基础知识

用机械代替体力劳动是第一次产业革命,在这次产业革命中,火车、汽车取代了人力车,各种动力机械取代了繁重的体力劳动;而用机械和电子装置来代替部分脑力劳动,可以说是第二次或第三次产业革命,这也是当前科学技术发展的重要课题之一。在这一课题中,传感器的研究是一个不可忽视的内容。人通过感官来接收外界的信号,并将所接收的信号送入大脑,进行分析、处理后获取有用的信息。对现有的或者正在发展中的机械电子装置来说,电子计算机相当于人的大脑(常称电脑),而相应于人的感官部分的装置就是传感器。所以说,传感器是人类感官的扩展和延伸,借助传感器,人类可以去探测那些无法直接用感官获取的信息。例如,用超声波探测器可以探测海水的深度,用红外遥感器可以从高空探测地球上的植被和地面形貌、河流状态,等等;而在自动控制领域,自动化程度越高,控制系统对传感器的依赖性就越大。因此,传感器对控制系统功能的正常发挥也起着决定性的作用。

### 2.1 传感器的定义

广义地说,传感器(transducer 或 sensor)是一种能把物理量或化学量转变成便于利用的电信号的器件或装置,在有些国家或科学领域,也将传感器称为变换器、检测器或探测器等。

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。”《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005)对传感器的定义为:能感受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。定义中的“可用输出信号”是指便于加工处理和传输利用的信号。当今,电信号是最容易被处理和传输的信号,因此可以把传感器狭义地定义为:将非电信号转换为电信号的器件。

总而言之,传感器是一种以一定的精确度把被测量(非电量)转换为与之有确定对应关系的、便于应用的另一种量(一般为电量)的测量装置。传感器的定义包括了以下四个方面的内容:

- (1)传感器是测量装置,能完成检测任务。
- (2)它的输入量是某一被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等。
- (3)它的输出是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,这种量可以是气、光、电量,目前主要是电量。
- (4)输出与输入有对应关系,且具有一定的精确度。

## 2.2 传感器的组成

传感器的种类繁多,其工作原理、性能特点和应用领域各不相同,所以在结构和组成上差异很大。但总的来说,传感器通常由敏感元件、转换元件及转换电路组成,有时还加上辅助电源,如图 2-1 所示。

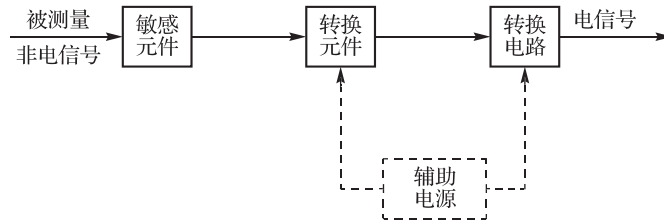


图 2-1 传感器的组成

### 1. 敏感元件

敏感元件是直接感受被测量并输出与被测量成确定关系的某一种量的元件。图 2-2 所示为一种气体压力传感器。膜盒的下半部与壳体固定连接,上半部通过连杆与磁心相连,磁心置于两个电感线圈中,电感线圈接入转换电路。这里的膜盒就是敏感元件,其外部与大气压力  $p_a$  相通,内部与被测量压力  $p$  相通。当  $p$  变化时,引起膜盒的上半部移动,即输出相应的位移量。

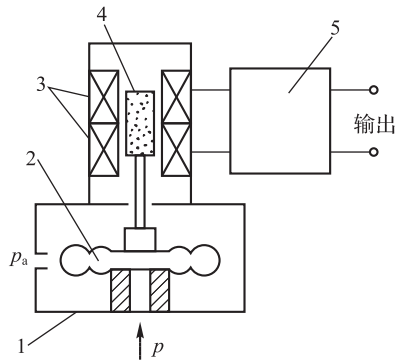


图 2-2 气体压力传感器

1—壳体；2—膜盒；3—电感线圈；4—磁心；5—转换电路

### 2. 转换元件

敏感元件的输出量就是转换元件的输入量,转换元件把输入量转换成电路参数。在图 2-2 中,转换元件是电感线圈,它把输入的位移量转换成电感的变化。

### 3. 转换电路

将转换元件输出的电量变成便于显示、记录、控制和处理的有用电信号的电路称为转换电路,上述电路参数接入转换电路后,便可转换成电量输出。

最简单的传感器由一个敏感元件(兼转换元件)组成,它感受被测量时直接输出电量,如热电偶。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,没有转换电路,如压电式加速度传感器,其中的质量块是敏感元件,压电片(块)是转换元件。有些传感器的转换元件不止一个,要经

过若干次的转换。

敏感元件与转换元件在结构上常是装在一起的。为了减少外界的影响,也希望将转换电路和敏感元件与转换元件装在一起,不过由于空间的限制或者其他原因,转换电路常被置于传感器的外部。尽管如此,因为不少传感器要在通过转换电路之后才能输出电量信号,所以决定了转换电路是传感器的组成环节之一。这里需要说明的是,一般情况下,转换电路后面的后续电路(如信号放大、处理、显示等电路)不再包括在传感器范围之内。

## 2.3 传感器的分类

传感器是测量装置与被测量之间的接口,处于测试系统的输入端,完成被测量的感知和能量的转换,其性能直接影响着整个测试系统,对测量精确度起着主要的作用。由于被测机械量种类繁多,加之同种物理量可以用多种不同转换原理的传感器来检测,同一转换原理也可以用于不同测量对象的传感器中,如加速度计按其敏感元件不同,就有压电式、应变式和压阻式等多种,因此,传感器具有多样性。表 2-1 汇总了机械工程测试常用的传感器。

表 2-1 机械工程测试常用的传感器

类 型	传感器名称	转换原理	被 测 量
机械类	测力杆	力—位移	力、力矩
	测力环	力—位移	力
	纹波管	压力—位移	压力
	波登管	压力—位移	压力
	纹波薄皮	压力—位移	压力
	双金属片	温度—位移	温度
	微型开关	力—位移	物体尺寸、位置、有无
	液柱	压力—位移	压力
	热电偶	热—电位	温度
电阻类	电位计	位移—电阻	位移
	电阻应变片	变形—电阻	力、位移、应变、加速度
	热敏电阻	温度—电阻	温度
	气敏电阻	气体浓度—电阻	可燃气体浓度
	光敏电阻	光—电阻	开关量
电感类	可变磁阻电感	位移—自感	力、位移
	电涡流	位移—自感	厚度、位移
	差动变压器	位移—互感	力、位移
电容类	变气隙、变面积型电容	位移—电容	位移、力、声
	变介电常数型电容	位移—电容	位移、力
压电类	压电元件	力—电荷,电压—位移	力、加速度

续表

类 型	传感器名称	转换原理	被 测 量
光电类	光电池 光敏晶体管 光敏电阻	光—电压 光—电流 光—电阻	光强等 转速、位移 开关量
磁电类	压磁元件 动圈 动磁铁	力—磁导率 速度—电压 速度—电压	力、扭矩 速度、角速度 速度
霍尔效应类	霍尔元件	位移—电势	位移、转速
辐射类	红外 X射线 $\gamma$ 射线 $\beta$ 射线 激光 超声	热—电 散射、干涉 射线穿透 射线穿透 光波干涉 超声波反射、穿透	温度、物体有无 厚度、应力 厚度、探伤 厚度、成分分析 长度、位移、角度 厚度、探伤
流体类	气动 流量	尺寸、间隙—压力 流量—压力差、转子位置	尺寸、距离、物体大小 流量

## 2.4 传感器的基本要求

无论何种类型的传感器作为测量与控制系统的首要环节,都应达到快速、准确、可靠且经济地实现信息采集和转换的基本要求。

- (1) 传感器要有足够的容量:传感器的工作范围或量程足够大,具有一定的过载能力。
- (2) 传感器要与系统匹配性好:灵敏度高。输出量与被测量之间具有确定的线性关系。
- (3) 传感器的实用性和适应性强:对被测对象影响小,内部噪声小且不受干扰。
- (4) 传感器的反应速度快,工作可靠性好。
- (5) 传感器的精度适当,稳定性好:静态响应和动态响应要满足要求。

工程中要综合考虑上述要求,使用时应尽量满足上述要求。

## 2.5 传感器的发展现状

科技越发达,自动化程度越高,对传感器的依赖也就越强。测量科学已成为现代化生产的五大支柱之一,也是整个科学技术和国民经济的一项重要技术基础,它对促进生产力发展和社会进步起到举足轻重的作用。

传感器技术是测量技术、半导体技术、计算机技术、信息处理技术、微电子学、光学、声学、精密机械、仿生学和材料科学等众多学科相互交叉的综合性和高新技术密集型前沿技术之一,是现代新技术革命和信息社会的重要基础,是自动检测和自动控制技术不可缺少的重要组成部分。目前,传感器技术已成为我国国民经济不可或缺的支柱产业的一部分。传感

器在工业部门的应用普及率已被国际社会作为衡量一个国家智能化、数字化、网络化的重要标志。

20世纪80年代起,在世界范围内掀起了一股“传感器热”。美国早在20世纪80年代就声称世界已进入传感器时代,日本则把传感器技术列为十大技术之首。日本工商界人士声称“支配了传感器技术就能够支配新时代”。世界上技术发达的国家都对开发传感器技术十分重视。美、日、英、法、德等国和独联体国家都把传感器技术列为国家重点开发关键技术之一。有关美国国家长期安全和经济繁荣的至关重要的22项技术中有6项与传感器信息处理技术直接相关。有关保护美国武器系统质量优势至关重要的关键技术中有8项为无源传感器。在美国空军2000年提出的15项有助于提高21世纪空军能力的关键技术中传感器技术名列第二。日本对开发和利用传感器技术相当重视并将其列为国家重点发展六大核心技术之一。在日本科学技术厅制定的20世纪90年代重点科研项目中,70个重点课题中有18个重点课题是与传感器技术密切相关的。美国早在20世纪80年代初就成立了国家技术小组,帮助政府组织和领导各大公司及国家企事业单位的传感器技术的开发工作。

正是由于世界各国普遍重视和投入开发,传感器的发展十分迅速,近十几年来其产量及市场需求年增长率均在10%以上。据不完全统计,世界上从事传感器研制生产的单位已增到5000多家,美国、欧洲、俄罗斯各自从事传感器研究和生产的厂家有1000多家,日本有800多家。

虽然我国早在20世纪60年代就开始涉足传感器制造业,那时在上海、四川、重庆等地成立的一些企业至今仍然存在,但是现在活跃在国际市场上的仍然是德国、日本、美国、俄罗斯等国。在这些国家里,传感器的应用范围很广,许多厂家的生产都实现了规模化,有些企业的年生产能力能达到几千万只甚至几亿只。相比之下,中国传感器的应用范围较窄,更多的仍然停留在航天航空及工业测量与控制上。据有关资料显示,我国最大的传感器公司的年产量也仅有约55000只;而且,高、精、尖传感器和新型传感器的市场几乎都被国外品牌或合资企业垄断。

国内传感器的发展水平与国外相差甚远的原因主要是技术基础薄弱,研究水平不高,缺乏自主知识产权。我国从事敏感元件与传感器研制生产的企业、单位有1700多家,但研制、生产综合实力较强的骨干企业较少。目前,我国的很多企业都是引用国外的芯片加工,自主研发的产品少之又少,自主创新能力非常薄弱;甚至许多企业仅停留在代理国外产品的水平上,发展空间捉襟见肘。国产传感器企业按照长期依赖国外技术的惯性发展至今,在技术上形成了“外强中干”的局面,不仅失去了中高档产品市场,而且也直接导致自己能生产的产品品种单一,同质化十分严重。

## 2.6 传感器的发展趋势

当前的信息时代不仅对传感器的需求越来越多,而且对其性能要求也越来越高。随着计算机辅助设计(computer aided design, CAD)技术、微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)技术、光纤技术、信息理论及数据分析算法不断迈上新台阶,传感器系统也朝着微型化、智能化、多功能化和网络化的方向发展。

### 1. 微型传感器

为了能够与信息时代信息量激增、要求捕获和处理信息的能力日益增强的技术发展趋



势保持一致,对于传感器性能指标(包括精确性、可靠性、灵敏性等)的要求越来越严格;同时还要求传感器必须配有标准的输出模式;而传统的大体积、弱功能传感器往往很难满足上述要求,所以它们已逐步被各种不同类型的高性能微型传感器(micro sensor)取代。微型传感器是以 MEMS 技术为基础的,目前的制作技术可达到光的波长级( $0.5 \mu\text{m}$ )。微型传感器具有体积小、重量轻、反应快、灵敏度高及成本低等优点。比较成熟的微型传感器有压力传感器、加速度传感器等。

## 2. 智能化传感器

智能化传感器(smart sensor)是一种涉及多学科的新型传感器系统。此类传感器系统在 20 世纪 80 年代末一经问世即受到科研界的普遍重视,尤其在探测应用领域(如分布式实时探测、网络探测和多信号探测)颇受欢迎。

## 3. 多功能传感器

传统的传感器只能用来探测一种物理量,但在很多应用领域中,为了能够完美而准确地反映客观事物和环境,往往需要同时测量大量的参变量,因此,由若干种敏感元件组成的多功能传感器(multifunction sensor)应运而生,它是一种体积小巧、兼备多种功能的新一代探测系统,它可以借助敏感元件中不同的物理结构或化学物质及其各不相同的表征方式,将多种功能集成于一个传感器系统中。

随着传感器技术和微机技术的飞速发展,目前已经有基于同一种材料或集成在一块芯片上的一体化多功能传感器。超微粒热敏、湿敏、气敏多功能敏感器件及集成温度传感器、集成压力传感器、集成磁阻传感器等就是综合多种物理、化学、生物效应并结合相应的测量电路的产物。传感器的多功能化不仅限于传统意义上的检测功能,还兼有信号处理、执行等其他功能。传感检测单元与制动器单元等复合产生新的功能,是当前多功能化的一种重要趋势。从高科技发展的趋势来看,各种类型的仿生传感器将是最热门的发展动向,特别是在机器人技术向智能化高级机器人发展的今天,仿生传感器就是模拟人的感觉器官的传感器,即视觉传感器、听觉传感器、嗅觉传感器、味觉传感器和触觉传感器等。

## 4. 网络化传感器

早在 20 世纪 70 年代,就出现了将传统传感器采用点对点传输、连接传感控制器而构成的传感器网络雏形,人们把它归为第一代传感器网络。随着相关学科的不断发展和进步,传感器网络同时还具有了获取多种信息信号的综合处理能力,并通过与传感控制器的连接,组成了有信息综合和处理能力的传感器网络,这是第二代传感器网络;而从 20 世纪末开始,现场总线技术开始应用于传感器网络,人们用其组建智能化传感器网络,大量多功能传感器被运用,并使用无线技术连接,无线传感器网络逐渐形成。无线传感器网络是新一代的传感器网络,具有非常广泛的应用前景,其发展和应用将给人类的生活及生产带来深远影响。发达国家(如美国)非常重视无线传感器网络的发展,美国电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)正在努力推进无线传感器网络的应用和发展,美国波士顿大学(Boston University)还创办了传感器网络协会(Sensor Network Consortium),期望能促进传感器联网技术的开发。美国《技术评论》杂志在论述未来新兴十大技术时,更是将无线传感器网络列为第一项未来新兴技术,美国《商业周刊》在预测未来四大新技术时也将无线传感器网络列入其中。可以预计,无线传感器网络的广泛应用是一种必然趋势,它的出现将给人类社会带来极大的变革。

## 2.7 传感器的技术性能

### 1. 差动技术

差动技术是传感器中普遍采用的技术。它的应用可显著减小温度变化、电源波动、外界干扰等对传感器精度的影响,抵消共模误差,减小非线性误差,等等。不少传感器由于采用了差动技术,而提高了灵敏度。

### 2. 平均技术

在传感器中普遍采用平均技术产生平均效应。常用的平均技术有误差平均效应和数据平均处理。误差平均效应的原理是利用  $n$  个传感单元同时感受被测量,因而其输出将是这些单元输出的平均值。若将每个单元可能带来的误差均看作随机误差且服从正态分布,则根据误差理论,总的误差将减小。因此,在传感器中利用平均技术不仅可使传感器误差减小,而且可以增大信号量,即提高传感器的灵敏度。

光栅、磁栅、容栅、感应同步器等传感器,由于其本身的工作原理决定了有多个传感单元参与工作,因而可取得明显的误差平均效应的效果,这也是这一类传感器固有的优点。另外,误差平均效应对某些工艺性缺陷造成的误差同样能起到弥补作用。因此,在结构允许的情况下,设计时应适当增加传感单元数。例如,圆光栅传感器,若让全部栅线同时参与工作,设计成“全接收”形式,则误差平均效应就可以得到比较充分的发挥。

### 3. 补偿与修正技术

补偿与修正技术在传感器中的应用比较广泛。这种技术的运用大致是针对下列两种情况:一种是针对传感器本身特性的,另一种是针对传感器的工作条件或外界环境的。

对于传感器特性,可以找出误差的变化规律,或者测出其大小和方向,采用适当的方法加以补偿或修正。

针对传感器工作条件或外界环境进行误差补偿,也是提高传感器精度的有力技术措施。不少传感器对温度敏感,由于温度变化引起的误差十分可观。为了解决这个问题,必要时可以控制温度,采用恒温装置,但往往费用太高,或使用现场条件不允许;而在传感器内引入温度误差补偿又常常是可行的。所以,这时应先找出温度对测量值影响的规律,然后引入温度补偿措施。

在激光式传感器中,常常把激光波长作为标准尺度,而波长受温度、气压、湿度的影响,在精度要求较高的情况下,就需要根据这些外界环境情况进行误差修正。补偿与修正可以利用电子线路(硬件)来解决,也可以采用微型计算机通过软件来实现。

### 4. 屏蔽、隔离与干扰抑制

传感器大都要在现场工作,现场的条件往往是难以充分预料的,有时是极其恶劣的。各种外界因素都会影响传感器的精度及有关性能。为了减小测量误差,保证传感器的原有性能,应设法削弱或消除外界因素对传感器的影响。其方法归纳起来有两种:一种是降低传感器对影响因素的灵敏度,另一种是降低外界因素对传感器实际作用的烈度。

对于电磁干扰,既可以采取屏蔽、隔离措施,也可以采用滤波等方法抑制。对于温度、湿度、机械振动、气压、声压、辐射甚至气流等,可以采取相应的隔离措施,如隔热、密封、隔振等,或者在变换成为电量后对干扰信号进行分离或抑制,减小其影响。

### 5. 稳定性处理

传感器作为长期测量或反复使用的器件,其稳定性显得特别重要,其重要性甚至胜过精度指标,尤其是对那些很难或无法定期鉴定的场合。

在使用传感器时,若测量要求较高,必要时也应对附加的调整元件、后续电路的关键元器件进行老化处理。

## 2.8 传感器的选用原则

现代传感器在原理和结构上千差万别,如何根据具体的测量目的、测量对象及测量环境合理地选用传感器,是测量某个量时首先要解决的问题。当传感器被确定之后,与之相配套的测量方法和测量设备也就可以确定了。测量结果的成败,很大程度上取决于传感器的选用是否合理。

要进行一项具体的测量工作,首先要考虑采用何种原理的传感器,这需要分析多方面的因素之后才能确定。

### 1. 测量对象与测量环境

即使是测量同一物理量,也有多种原理的传感器可供选用,哪一种原理的传感器更为合适,则需要根据被测量的特点和传感器的使用条件考虑以下一些具体问题:量程的大小;被测位置对传感器体积的要求;测量方式为接触式还是非接触式;信号的引出方法,有线或是非接触测量;传感器的来源,国产还是进口,价格能否承受,还是自行研制。

在考虑上述问题之后就能确定选用何种类型的传感器,然后再考虑传感器的具体性能指标。

### 2. 灵敏度

通常,在传感器的线性范围内,希望传感器的灵敏度越高越好。因为只有灵敏度高时,与被测量变化对应的输出信号的值才比较大,有利于信号处理;但要注意的是,传感器的灵敏度高,与被测量无关的外界噪声也容易混入,也会被系统放大,影响测量精度。因此,要求传感器本身应具有较高的信噪比,尽量减少从外界引入的干扰信号。

传感器的灵敏度是有方向性的。若被测量是单向量且对其方向性要求较高,则应选择其他方向灵敏度小的传感器;若被测量是多维向量,则要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

### 3. 频率响应特性

传感器的频率响应特性决定了被测量的频率范围,必须在允许频率范围内保持不失真的测量条件。实际上,传感器的响应总有一定延迟,希望延迟时间越短越好。

传感器的频率响应高,可测的信号频率范围就宽,而由于受到结构特性的影响,机械系统的惯性较大,因而频率低的传感器可测信号的频率较低。

在动态测量中,应根据信号的特点(稳态、瞬态、随机等)响应特性,以免产生过大的误差。

### 4. 线性范围

传感器的线性范围是指输出与输入成正比的范围。从理论上讲,在此范围内,灵敏度保持定值。传感器的线性范围越宽,其量程越大,并且能保证一定的测量精度。在选择传感器时,当传感器的种类确定以后,首先要看其量程是否满足要求。

但实际上,任何传感器都不能保证绝对的线性,其线性度也是相对的。当所要求的测量

精度比较低时,在一定的范围内,可将非线性误差较小的传感器近似看作线性的,这会给测量带来极大的方便。

### 5. 稳定性

传感器在使用一段时间后,其性能保持不变的能力称为稳定性。影响传感器长期稳定性的因素除传感器本身的结构外,主要是传感器的使用环境,因此,要使传感器具有良好的稳定性,就必须使其具有较强的环境适应能力。

为了提高传感器性能的稳定性,应该对材料、元器件或传感器整体进行必要的稳定性处理,如结构材料的时效处理、冰冷处理,永磁材料的时间老化、温度老化、机械老化及交流稳磁处理,电气元件的老化筛选,等等。

在选择传感器之前,应对其使用环境进行调查,并根据具体的使用环境选择合适的传感器,或采取适当的措施减小环境的影响。

传感器的稳定性有定量指标,在超过使用期后,在使用前应重新进行标定,以确定传感器的性能是否发生变化。

在某些要求传感器能长期使用而又不能轻易更换或标定的场合,对所选用的传感器的稳定性的要求更严格,要能够经受住长时间的考验。

### 6. 精度

精度是传感器的一个重要的性能指标,它是关系到整个测量系统测量精度的一个重要环节。传感器的精度越高,其价格越高,因此,传感器的精度只要满足整个测量系统的精度要求即可,不必选得过高。这样就可以在满足同一测量目的的诸多传感器中选择比较便宜和简单的传感器。

如果测量的目的是进行定性分析,选用重复精度高的传感器即可,不宜选用绝对量值精度高的传感器;如果测量的目的是进行定量分析,则必须获得精确的测量值,此时就需要选用精度等级能满足要求的传感器。

对某些特殊使用场合,若无法选到合适的传感器,则需自行设计制造传感器。自制传感器的性能应满足使用要求。

## 习 题

1. 简述传感器的定义及主要分类。
2. 试绘出典型传感器的构成框图。
3. 应从哪些方面评价或选用传感器?
4. 在选用传感器时应该遵循什么原则?
5. 传感器的技术性能包括哪些?

## 第 3 章

# 常规传感器原理与测量电路

### 3.1 电阻式传感器

电阻式传感器的种类繁多,应用广泛,其基本原理是将被测物理量的变化转换成电阻值的变化,再经相应的测量电路,最终显示被测值的变化。

电阻式传感器与相应的测量电阻组成测力、测压、测重、测位移、测加速度、测扭矩、测温度等测试系统。这些测试系统目前已成为生产过程检测及实现生产自动化不可缺少的手段之一。

#### 3.1.1 电位器式电阻传感器

电位器是一种常用的机电元件,它被广泛应用于各种电器和电子设备中,它是一种把机械的线位移或角位移输入量转换为与它成一定函数关系的电阻或电压输出的传感元件。电位器式电阻传感器的电位器主要用于测量压力、加速度和航面角等参数。

电位器式电阻传感器具有一系列优点,如结构简单、尺寸小、重量轻、输出信号大、性能稳定并容易实现任意函数。电位器式电阻传感器的缺点是要求输入能量大,电刷与电阻元件之间容易磨损。

电位器的种类有很多,按其结构形式不同,可分为线绕式电位器、薄膜式电位器和光电式电位器等;按特性不同,可分为线性电位器和非线性电位器。下面主要介绍线性电位器和非线性电位器。

##### 1. 线性电位器

###### 1) 工作原理与空载特性

图 3-1 所示为电位器式位移传感器的工作原理。如果把电位器式位移传感器作为电阻器使用,且假定全长为  $x_{\max}$  的电位器的总阻值为  $R_{\max}$ ,电阻沿长度的分布是均匀的,则当滑臂由 A 向 B 移动  $x$  后,A 到滑臂间的阻值为

$$R_x = \frac{x}{x_{\max}} R_{\max} \quad (3-1)$$

如果把电位器式位移传感器作为分压器使用,且假定加在电位器 A、B 之间的电压为  $U_{\max}$ ,则输出电压为

$$U_x = \frac{x}{x_{\max}} U_{\max} \quad (3-2)$$

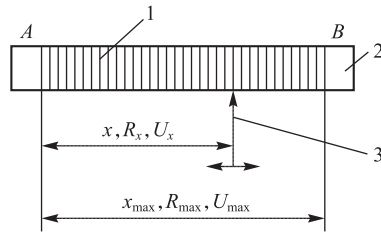


图 3-1 电位器式位移传感器的工作原理  
1—电阻丝；2—骨架；3—滑臂

图 3-2 所示为电位器式角度传感器的工作原理。若把电位器式角度传感器作为变阻器使用,则电阻值与角度的关系为

$$R_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} R_{\max} \quad (3-3)$$

若把电位器式角度传感器作为分压器使用,则有

$$U_\alpha = \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} U_{\max} \quad (3-4)$$

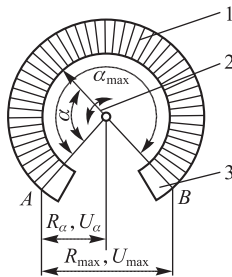


图 3-2 电位器式角度传感器的工作原理  
1—电阻丝；2—滑臂；3—骨架

线性线绕电位器的特性稳定,制造精度容易保证,其骨架截面处处相等,并且由材料均匀的导线按相等的节距绕成,如图 3-3 所示。

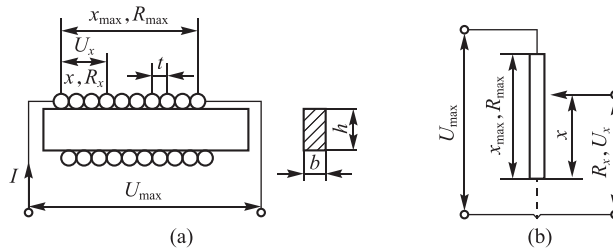


图 3-3 线性线绕电位器

线性线绕电位器理想的输入/输出关系应遵循式(3-1)~式(3-4)。因此,对于图 3-3 所示的位移传感器来说,其灵敏度应为

$$k_R = \frac{R_{\max}}{x_{\max}} = \frac{2(b+h)\rho}{St} \quad (3-5)$$

$$k_U = \frac{U_{\max}}{x_{\max}} = I \frac{2(b+h)\rho}{St} \quad (3-6)$$

式中,  $k_R$ 、 $k_U$  分别为电阻灵敏度、电压灵敏度;  $\rho$  为导线电阻率;  $S$  为导线横截面积。

由式(3-5)和式(3-6)可以看出, 线性线绕电位器的电阻灵敏度和电压灵敏度除与电阻率  $\rho$  有关外, 还与骨架尺寸  $h$  和  $b$ 、导线横截面积  $A$  (导线直径为  $d$ )、绕线节距  $t$  等结构参数有关; 电压灵敏度还与通过电位器的电流  $I$  的大小有关。

## 2) 阶梯特性、阶梯误差和分辨率

图 3-4 所示为绕  $n$  匝电阻丝的线性电位器的阶梯特性曲线。电刷在与一匝导线接触的过程中, 虽有微小位移, 但电阻值并无变化, 因而输出电压也不改变, 在输出特性曲线上对应地出现平直段; 当电刷离开这一匝而与下一匝接触时, 电阻突然增加一匝阻值, 因此特性曲线相应出现阶跃段, 即视在分辨脉冲  $\Delta U$  为

$$\Delta U = \frac{U_{\max}}{n} \quad (3-7)$$

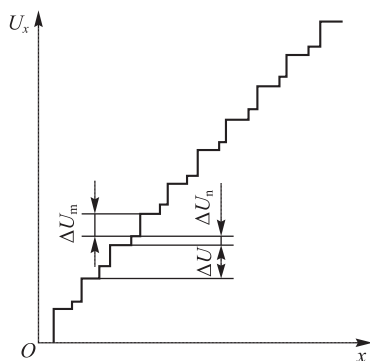


图 3-4 线性电位器的阶梯特性曲线

实际上, 当电刷从  $j$  匝移到  $j+1$  匝的过程中, 必定会使这两匝短路, 于是电位器的总匝数从  $n$  匝减少到  $n-1$  匝, 这样总阻值的变化就使得在每个电压阶跃中还产生一个小阶跃。这样的小阶跃应有  $n-2$  次, 这是因为在绕线的始端和终端的两次短路中, 将不会因总匝数降低  $n-1$  匝而影响输出电压, 所以, 特性曲线将有  $n+n-2$  个阶梯。在这  $n+n-2$  个阶梯中, 大的阶梯一般可看作主要分辨脉冲  $\Delta U_m$ , 小的阶梯可看作次要脉冲  $\Delta U_n$ , 而视在分辨脉冲是两者之和, 即

$$\Delta U = \Delta U_m + \Delta U_n \quad (3-8)$$

$$\Delta U_n = U_{\max} \left( \frac{1}{n-1} - \frac{1}{n} \right) j \quad (3-9)$$

主要分辨脉冲和次要分辨脉冲的延时时间比, 取决于电刷直径与导线直径的比。若电刷直径太小, 尤其是使用软合金时, 会促使形成磨损平台; 若电刷直径过大, 则只要有很小的磨损就将使电位器有更多的匝短路, 因此, 一般取电刷直径与导线直径的比值为 10, 可获得较好的效果。

工程上常把图 3-4 所示的实际阶梯曲线简化为理想阶梯特性曲线, 如图 3-5 所示。

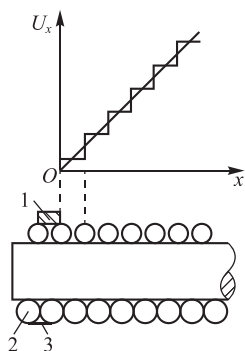


图 3-5 理想阶梯特性曲线

1—电刷；2—电阻线；3—短路线

这时,电位器的电压分辨率定义为:在电刷行程内,电位器输出电压阶梯的最大值与最大输出电压  $U_{\max}$  的百分比,即

$$e_{ba} = \frac{U_{\max}/n}{U_{\max}} \times 100\% = \frac{1}{n} \times 100\% \quad (3-10)$$

除了电压分辨率外,还有行程分辨率,其定义为:在电刷行程内,能使电位器产生一个可测出变化的电刷最大行程与整个工作行程的百分比,即

$$e_{by} = \frac{x_{\max}/n}{x_{\max}} \times 100\% = \frac{1}{n} \times 100\% \quad (3-11)$$

由图 3-5 可知,在理想情况下,特性曲线每个阶梯的大小完全相同,则通过每个阶梯中点的直线即是理论直线,阶梯曲线围绕它上下跳动,从而带来一定的误差,这就是阶梯误差。

电位器的阶梯误差  $\gamma_j$  通常用理想阶梯特性曲线对理论直线的最大偏差值与最大输出电压值的百分比表示,即

$$\gamma_j = \frac{\pm \left( \frac{1}{2} \frac{U_{\max}}{n} \right)}{U_{\max}} = \pm \frac{1}{2n} \times 100\% \quad (3-12)$$

阶梯误差和分辨率的大小都是由线绕电位器本身的工作原理所决定的,是一种原理性误差。它决定了电位器可能达到的最高精度。在实际设计中,为减小阶梯误差和提高分辨率,需增加匝数,即减小导线的直径(小型电位器通常选配 0.5 mm 或更细的导线),或增加骨架长度(如采用多圈螺旋电位器)。

## 2. 非线性电位器

非线性电位器是指空载时电位器的输出电压(或电阻)与电刷行程之间具有非线性的函数关系的一种电位器,也称函数电位器。它可以实现指数函数、对数函数、三角函数及其他函数,因此可以满足控制系统的特殊要求,也可以满足传感系统和检测系统最终获得线性输出的要求。常用的非线性线绕电位器有变骨架式电位器、变节距式电位器、分路电阻式电位器和电位给定式电位器四种。

现以变骨架式电位器为例说明非线性线绕电位器的空载特性。变骨架式电位器如图 3-6 所示,其骨架高度  $h$  呈曲线变化,输出电阻  $R_x = f(x)$ 。当电刷移动微小位移  $dx$  时,引起电阻变化  $dR_x$ ,则

$$\frac{dR_x}{dx} = \frac{2(b+h)\rho}{St} \quad (3-13)$$



式中,  $b$ 、 $h$  分别为骨架的宽度和高度;  $S$  为导线横截面积;  $t$  为导线节距, 即相邻两导线间的距离;  $\rho$  为导线电阻率。

由式(3-13)可求出骨架高度  $h$  的变化规律为

$$h = \frac{St}{2\rho} \left( \frac{dR_x}{dx} \right) - b \quad (3-14)$$

由于  $A$ 、 $t$ 、 $\rho$ 、 $b$  均为常数, 而  $dR_x/dx$  是  $x$  的函数, 所以  $h$  是电刷位移  $x$  的函数, 且与特性曲线的导数  $dR_x/dx$  有关。  $dR_x/dx$  越大, 骨架高度越高, 但  $h$  太大了, 绕线容易打滑。但  $dR_x/dx$  也不宜太小, 更不能为零。因此, 为了保证足够的强度及工艺性, 骨架的最小高度应大于 3~4 mm。

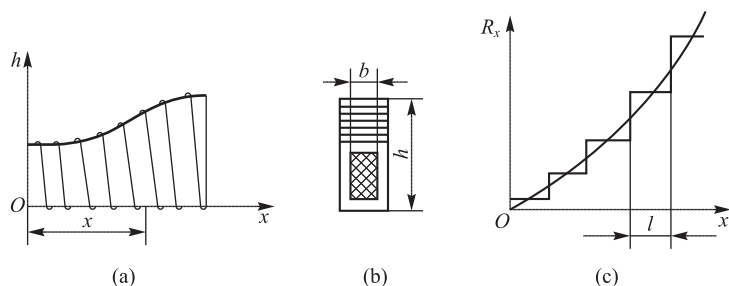


图 3-6 变骨架式电位器

设非线性电位器输出空载电压为  $U_x$ , 流过电位器的电流为  $I = U/R$ ,  $U$  为电源电压,  $R$  为电位器总电阻。则式(3-14)还可以表示为  $h$  与输出电压  $U_x$  之间的关系, 即

$$h = \frac{St}{2I\rho} \left( \frac{dU_x}{dx} \right) - b \quad (3-15)$$

非线性电位器输出电阻(或电压)与电刷行程之间是非线性的函数关系, 因此空载特性是一条曲线, 其灵敏度与电刷位置有关, 是变量。

电阻灵敏度为

$$k_R = \frac{dR_x}{dx} \quad (3-16)$$

电压灵敏度为

$$k_U = \frac{dU_x}{dx} \quad (3-17)$$

### 3. 负载特性与负载误差

电位器输出端接有负电阻时, 其特性称为负载特性。负载特性相对于空载特性的偏差称为负载误差。接有负载电阻  $R_L$  的电位器电路如图 3-7 所示。

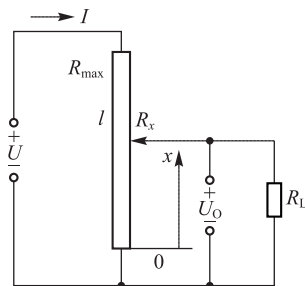


图 3-7 接有负载电阻  $R_L$  的电位器电路

电位器输出电压  $U_L$  为

$$U_L = U \frac{R_x R_L}{R_L R_{\max} + R_x R_{\max} - R_x^2} \quad (3-18)$$

设电阻相对变化为  $r = \frac{R_x}{R_{\max}}$ , 并设  $m = \frac{R_{\max}}{R_L}$ ,  $m$  称为负载系数, 则式(3-18)可改写为

$$Y = \frac{U_L}{U} = \frac{r}{1 + rm(1-r)} \quad (3-19)$$

而理想空载特性为

$$Y_0 = \frac{U_0}{U} = \frac{R_x}{R_{\max}} = r \quad (3-20)$$

比较式(3-19)和式(3-20)可以看出, 由于  $m \neq 0$ , 即  $R_L$  不是无限大, 从而使负载特性 ( $U_L/U$ ) 与空载特性 ( $U_0/U$ ) 之间产生偏差。以上各式对于线性电位器和非线性电位器均适用。

对于线性电位器, 有

$$r = \frac{R_x}{R_{\max}} = \frac{x}{x_{\max}} = X \quad (3-21)$$

所以, 对于线性电位器, 式(3-19)可改写为

$$Y = \frac{U_L}{U} = \frac{X}{1 + Xm(1-X)} \quad (3-22)$$

式(3-19)可绘成曲线, 如图 3-8 所示。由图 3-8 可知, 除  $m=0$  的直线(空载特性)外, 凡  $m \neq 0$  的曲线均为下垂的曲线, 说明负载输出电压比空载输出电压低, 这种偏差与  $m, r$  有关。

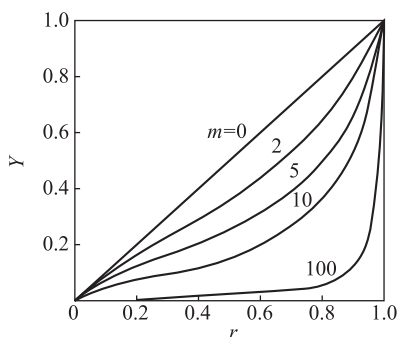


图 3-8 电位器的负载特性曲线

现计算负载误差的大小与  $m, r$  之间的关系。设负载误差为  $\delta_L$ , 即

$$\delta_L = \frac{U_0 - U_L}{U_0} \times 100\% = \left[ 1 - \frac{1}{1 + mr(1-r)} \right] \times 100\% \quad (3-23)$$

图 3-9 所示为  $\delta_L$  与  $m, r$  的关系曲线。由该图可知, 无论  $m$  为何值, 电刷在起始位置 ( $X=0$ ) 和最终位置 ( $X=1.0$ ) 时, 负载误差都为零。随着电刷位置的改变, 负载误差也随之增加, 当电刷处于行程中心位置 ( $X=0.5$ ) 时, 负载误差最大, 且增大负载系数  $m$  (减小负载电阻) 时, 负载误差也随之增大。为了减小负载误差, 首先要尽量减小负载系数  $m$ , 通常希望  $m < 0.1$ 。为此, 可采用高输入阻抗放大器, 或者将电位器空载特性设计成某种上凸特性, 即设计出非线性电位器, 以消除负载误差, 如图 3-10 所示。由图 3-10 可以看出, 非线性电位器的空载特性曲线和线性电位器的负载特性曲线是以特性直线互为镜像的, 其负载特性正好

是所要求的线性特性。

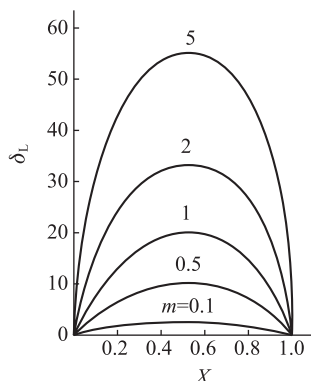


图 3-9 电位器负载误差曲线

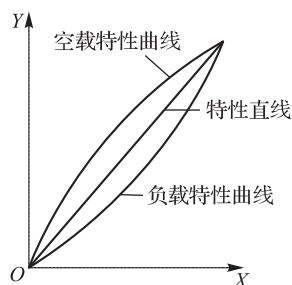


图 3-10 非线性电位器的空载特性与线性电位器的镜像关系

#### 4. 电位器的结构与材料

由于测量领域的不同,电位器结构及材料选择有所不同;但是其基本结构是相近的。电位器通常都是由电阻元件、活动电刷和骨架组成。常用的线绕式电位器的电阻元件由金属电阻丝绕成。

(1)金属电阻丝。金属电阻丝要求电阻系数高、电阻温度系数小、强度高、延展性好、对铜的热电势小、耐磨、耐腐蚀、焊接性好等。金属电阻丝常用的材料有康铜丝、铂铱合金丝及卡玛丝等。

(2)活动电刷。活动电刷由电刷触头、电刷臂、导引和轴承装置构成。其质量好坏将影响噪声电平及工作可靠性。电刷触头的材料常用银、铂铱、铂铑等金属。电刷臂用磷青铜等弹性较好的材料。活动电刷上通常要保持一定的接触压力(50~100 mN),接触压力过大会使仪器产生误差,并且加速磨损;接触压力过小,则不能形成可靠的电气接触。某些活动电刷的结构如图 3-11 所示。

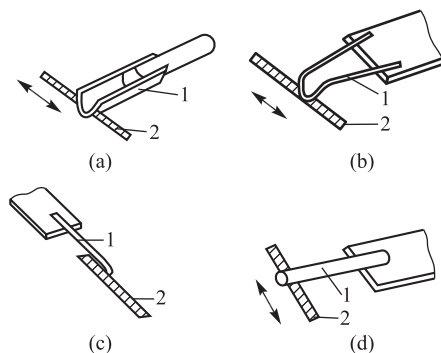


图 3-11 某些活动电刷的结构

1—电刷; 2—电阻元件

活动电刷的材料与电路导线材料要配合选择,以提高电位器的工作可靠性,减少噪声并延长工作寿命。通常要求活动电刷材料的硬度与电阻材料的硬度接近或稍高些。

(3)骨架。骨架材料要与电阻丝材料具有相同的膨胀系数,要有较好的电气绝缘性,足够的强度和刚度,较好的散热性,耐潮湿,易加工。骨架的常用材料有陶瓷、酚醛树脂及工程塑料等绝缘材料。精密电位器广泛采用经绝缘处理的金属骨架。金属骨架的导热性好,可提高电位器的允许电流,强度大,易加工,尺寸精度高。

骨架的截面形式有很多,如矩形、环形、柱形、棒形等。常用的骨架截面形式多为矩形,其厚度应大于导线直径的4倍,圆角半径不应小于2倍的导线直径。

电位器绕制完成后,要用电木漆或其他绝缘漆浸渍,以提高其机械强度。与电刷接触的工作面的绝缘漆要刮掉,并进行机械抛光。

### 5. 电位器式传感器的应用举例

电位器式压力传感器是利用弹性元件(如弹簧管、膜片或膜盒)把被测的压力变换为弹性元件的位移,并使此位移变为电刷触点的移动,从而引起输出电压或电流发生相应的变化。图3-12所示为YCO-150型远程压力表的工作原理。它是由一个弹簧管和线绕电位器组成的压力传感器。电位器固定在壳体上,而电刷与弹簧管的传动机构相连。当被测压力 $p$ 变化时,弹簧管的自由端产生位移,通过传动机构,一面带动压力表指针转动,一面带动电刷在线绕电位器上滑动,从而将被测压力值转换为电阻变化,输出一个与被测压力成正比的电压信号。

图3-13所示为膜盒电位器式压力传感器的结构。弹性敏感元件膜盒的内腔通入被测流体,在流体的压力作用下,膜盒中心产生弹性位移,推动连杆上移,使曲柄轴带动电刷在电位器的电阻丝上滑动,输出一个与被测压力成正比的电压信号。

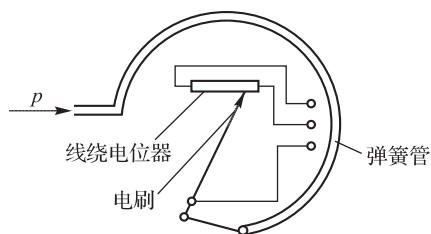


图 3-12 YCO-150 型远程压力表的工作原理

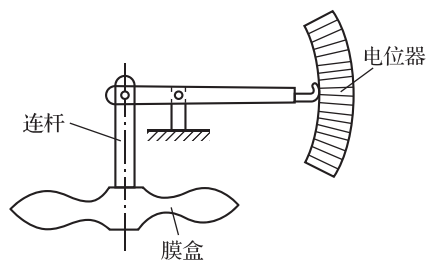


图 3-13 膜盒电位器式压力传感器的结构

图3-14所示为电位器式位移传感器的结构。电阻丝以均匀的间隔绕在用绝缘材料制成的骨架上,触点沿着电阻丝的裸露部分滑动,并由导电片输出电阻。

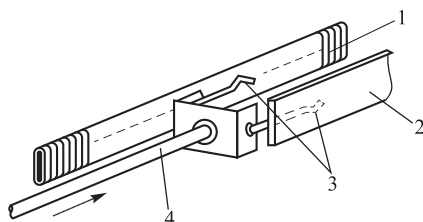


图 3-14 电位器式位移传感器的结构

1—电阻丝; 2—导电片; 3—触点; 4—输入轴

### 3.1.2 应变片式电阻传感器

在几何量和机械量的测量中,最常用的传感器是由某些金属和半导体材料做成的应变片式电阻传感器。应变片式电阻传感器是以应变片为传感元件的传感器。

#### 1. 应变片式电阻传感器的特点

1) 应变片式电阻传感器的优点

- (1) 精度高,测量范围广。
- (2) 使用寿命长,性能稳定可靠。
- (3) 结构简单、尺寸小、重量轻。
- (4) 频率响应特性较好。应变片的响应时间约为  $10^{-7}$  s。
- (5) 环境适应性强,可在高低温、高速、高压、强烈振动、强磁场、核辐射和化学腐蚀等恶劣环境中工作。

(6) 应变片种类繁多,性能价格比高。

2) 应变片式电阻传感器的缺点

- (1) 在大应变状态下存在较大的非线性。
- (2) 输出信号微弱。
- (3) 不适用于温度超过  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  的高温环境。
- (4) 应变片实际测出的只是某一面积上的平均应变,不能完全适应力场中的瞬时应力变化情况。

#### 2. 电阻应变片的工作原理

电阻应变片的敏感量是应变。如图 3-15 所示,金属受到拉伸作用时,在长度方向发生伸长变形的同时会在径向发生收缩变形。金属的伸长量与原来长度之比称为应变。利用金属应变量与其电阻变化量成正比的原理制成的器件称为金属应变片(strain gage)。金属导体或半导体在外力作用下产生机械变形而引起导体或半导体的电阻值发生变化的物理现象称为应变效应。

应变片变形时,从引线上测出的电阻值也会发生相应的变化。只要应变片的材料选择得当,就可以使应变片因变形而产生的应变(应变片的输入)与它的电阻的变化值

(应变片的输出)成线性关系。如果将应变片贴在弹性结构体上,当弹性结构体受外力作用而成比例地变形(在弹性范围内)时,应变片也随之变形,所以可通过应变片电阻的大小来检测外力的大小。

1) 金属导体的电阻值

金属导体的电阻值可用式(3-24)表示。

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi r^2} \quad (3-24)$$

式中, $\rho$  为金属导体的电阻率; $S$  为导体的横截面积; $l$  为导体的长度; $r$  为导体的半径。

当导体受力作用时,其长度  $l$ 、横截面积  $S$ 、电阻率  $\rho$  相应变化为  $dL$ 、 $dS$ 、 $d\rho$ ,因而引起电

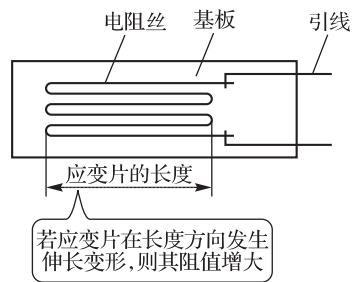


图 3-15 电阻丝式应变片的应变效应

阻变化  $dR$ 。对式(3-24)进行全微分,则

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-25)$$

式中,  $\frac{dl}{l}$  为电阻丝的轴向应变,  $\frac{dl}{l} = \epsilon_x$ ;  $\frac{dr}{r}$  为电阻丝的径向应变,  $\frac{dr}{r} = \epsilon_y$ 。

根据材料力学原理,在弹性限度范围内,电阻丝的轴向应变与径向应变的关系为

$$\epsilon_y = -\mu\epsilon_x \quad (3-26)$$

式中,  $\mu$  为材料的泊松系数,  $\mu = 0 \sim 0.5$ ; 负号表示两者变化方向相反。

将式(3-26)代入式(3-25)得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-27)$$

2) 金属材料的应变电阻效应

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (3-28)$$

式中,  $C$  为由一定的材料和加工方式决定的常数;  $V$  为金属材料的体积。

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{d(\pi r^2)}{r} = (1 - 2\mu)\epsilon_x \quad (3-29)$$

将式(3-29)代入式(3-27)得

$$\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]\epsilon_x = K_m\epsilon_x \quad (3-30)$$

式中,  $K_m = (1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)$  为金属材料的应变灵敏系数(简称灵敏系数)。

式(3-30)表明,金属材料的电阻相对变化与其轴向应变成正比,称为金属材料的应变电阻效应。对于金属材料的  $K_m$ ,前半部分是受力后金属丝几何尺寸改变所致,后半部分则是材料的电阻率变化所致。金属材料的应变电阻效应以结构尺寸变化为主。

3) 半导体材料的应变电阻效应

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma = \pi E\epsilon_x \quad (3-31)$$

式中,  $\sigma$  为作用于材料的轴向应力;  $\pi$  为半导体材料在受力方向上的压阻系数;  $E$  为半导体材料的弹性模量。

将式(3-31)代入式(3-27)得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon_x + \pi E\epsilon_x = [(1 + 2\mu) + \pi E]\epsilon_x = K_s\epsilon_x \quad (3-32)$$

式中,  $K_s = (1 + 2\mu) + \pi E$  为半导体材料的应变电阻系数,称为半导体材料的应变电阻效应。对于半导体材料的  $K_s$ ,前半部分同样是由半导体材料几何尺寸变化引起的,而后半部分是由半导体材料的压阻效应引起的。半导体材料的应变电阻效应主要基于压阻效应。使用半导体材料应变片时,应采取温度补偿和非线性补偿措施。

一般常用的应变片灵敏系数是:金属材料应变片约为 2,但不会超过 5;半导体材料应变片为 100~200。可见,半导体材料应变片的灵敏系数比金属材料应变片的灵敏系数大几十倍。此外,根据所选用的材料或掺杂多少的不同,半导体应变片的灵敏系数可以为正值或负值,即拉伸时应变片的电阻值可以增加或降低。

### 3. 电阻应变片的结构与材料

根据应变片的质地,应变片主要分为金属电阻应变片和半导体应变片两类。下面重点介绍金属电阻应变片。常用的金属电阻应变片有丝式应变片、箔式应变片和薄膜式应变片三种,前两种为粘接式应变片。金属薄膜式应变片是采用真空镀膜(如蒸发或沉积等)方式将金属材料在基底材料(如表面有绝缘层的金属、有机绝缘材料或玻璃、石英、云母等无机材料)上制成一层很薄的敏感电阻膜(膜厚在  $0.1 \mu\text{m}$  以下)而构成的一种应变片。

#### 1) 金属电阻应变片的结构

金属电阻应变片由绝缘的基底、盖片、具有高电阻系数的金属敏感栅、引线及黏结剂组成,如图 3-16 所示。

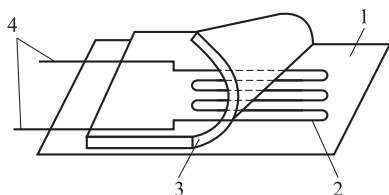


图 3-16 金属电阻应变片的基本结构

1—基底; 2—敏感栅; 3—盖片; 4—引线

(1) 基底和盖片。基底用于保护敏感栅、引线的几何形状和相对位置,盖片既可保持敏感栅和引线的形状与相对位置,还可保护敏感栅。

(2) 敏感栅。它是实现应变—电阻转换的敏感元件,由直径为  $0.015 \sim 0.05 \text{ mm}$  的金属细丝绕成栅状或用金属箔腐蚀成栅状。敏感栅的电阻值一般为  $60 \Omega$ 、 $120 \Omega$ 、 $200 \Omega$  等。应变片的敏感栅具有多种结构,不同的结构,用途不同。双斜栅主要用于扭矩、剪切力测量,圆膜片主要用于压力测量,多栅(按角度排列或等矩阵排列)主要用于应力分析等。

各式箔式应变片的敏感栅(见图 3-17)由很薄的金属箔片制成,箔厚仅为  $0.004 \sim 0.10 \text{ mm}$ ,用光刻技术制作。它与金属丝式应变片相比有如下优点:用光刻技术能制成各种复杂形状的应变花,如图 3-17 所示;横向应变小;允许电流大,散热性好,允许通过较大电流,可提高相匹配的电桥电压,从而提高输出灵敏度;疲劳寿命长,蠕变小;生产效率高。但是,制造箔式应变片的电阻值的分散性比丝式的大,有的能相差几十欧姆,根据需要可以自行调整。由于箔式应变片的一系列优点,它将逐渐取代丝式应变片而占主要地位。

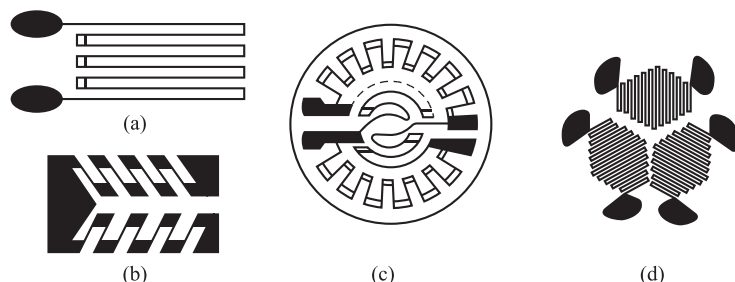


图 3-17 各式箔式应变片

敏感栅较长的应变片有许多优点,如易于粘贴和接线、散热性好、单位面积上的功耗小。这对于在塑料和其他热传递性能不佳的试件上使用的应变片来说是十分重要的。散热不良,将造成敏感栅、基底、黏结剂和试件表面的局部高温,从而严重影响应变片的性能和精度。此外,对于非均匀材料,如混凝土、铸铁、铸钢等,只有当敏感栅的长度大于材料的不均匀尺寸时,才能比较真实地反映结构内的平均应变。然而,敏感栅的长度并不是越长越好。敏感栅长度过长的应变片的性能改善并不多,粘贴质量不易保证,而且敏感栅的长度过短或过长的应变片成本较高。综上所述,应用于金属材料上的测量,一般都选择敏感栅的长度为4~6 mm的应变片。

(3)引线。引线起敏感栅与测量电路之间的过渡连接和引导作用。引线通常采用直径为0.10~0.15 mm的低阻镀锡铜线,并采用钎焊方式与敏感栅端连接。

(4)黏结剂。黏结剂用来将盖片和敏感栅固定于基底上。使用金属应变片时,也需用黏结剂将应变片基底黏结在试件表面某个方向和位置上,以便将构件受力后的表面应变传递给应变片的基底和敏感栅。常用的黏结剂分为有机和无机两大类。有机黏结剂常用的有丙烯酸酯、酚醛树脂、有机硅树脂、聚酰亚胺等;无机黏结剂常用的有磷酸盐、硅酸盐、硼酸盐等适合在高温条件下使用。

### 2)金属电阻应变片的材料

一般情况下,对电阻丝材料有如下要求:灵敏系数大,并在较大应变范围内保持常数;电阻率大,即在同样长度、同样横截面积的电阻丝中具有较大的电阻值;电阻温度系数小,否则会因环境温度的变化而改变其阻值;与铜线的焊接性能好,与其他金属的接触电势比较小;机械强度高,具有优良的机械加工性能。

康铜是目前应用最广泛的应变丝材料,因为它具有很多优点,如灵敏系数稳定,不但能在弹性形变范围内保持为常数,而且在进入塑性变形范围后也基本能保持为常数;电阻温度系数较小且稳定,当采用合适的热处理工艺时,可使电阻温度系数限制在 $\pm 50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的范围内;加工性能好,易于焊接。

表 3-1 列出了常用电阻丝的材料及性能。

表 3-1 常用电阻丝的材料及性能

材 料	成分及含量		灵 敏 度	电 阻 率 / $(\mu\Omega \cdot \text{mm})$ ( $20^\circ\text{C}$ )	电 阻 温 度 系 数 / $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	最 高 使 用 温 度 / $^\circ\text{C}$	对 铜 的 热 电 势 / $(\mu\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	线 膨 胀 系 数 / $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
	成 分	含 量 / $\%$						
康铜	Ni Cu	45 45	1.9~2.1	0.45~0.25	20	400	44	15
铜镍合金	Ni Cr	80 20	2.1~2.4	0.9~1.1	50~140	800	4.8	14
卡玛合金 (6J22)	Ni Cr Al Fe	74 20 4 4	2.4~2.6	1.24~1.42	20	800	4	14.4



续表

材 料	成分及含量		灵 敏 度	电 阻 率 / $(\mu\Omega \cdot \text{mm})$ (20 °C)	电 阻 温 度 系 数 / $10^{-6} \cdot \text{°C}^{-1}$	最 高 使 用 温 度 / $\text{°C}$	对 铜 的 热 电 势 / $(\mu\text{V} \cdot \text{°C}^{-1})$	线 膨 胀 系 数 / $10^{-6} \text{°C}$
	成 分	含 量 / $\%$						
镍 铬 铝 合 金 (6J24)	Ni	74	2.4~2.6	1.24~1.42	20	800	4	14.4
	Cr	20						
	Al	4						
	Cu	2						
铁 镍 铝 合 金	Fe	75	2.8	1.4~1.5	40~40	700	2~4	14
	Cr	20						
	Al	5						
铂	Pt	100	4~6	0.09~0.5	4 900	1 000	7.6	8.9
铂 钨 合 金	Pt	92	4.5	0.68	227	1 000	6.1	8.4~9.2
	W	8						

#### 4. 电阻应变片的性能参数

##### 1) 应变片的灵敏系数

应变片的灵敏系数  $K$  是指在应变片灵敏轴线方向的单一应力作用下,应变片的电阻相对变化  $dR/R$  与应变片试件表面上的轴向应变  $\epsilon_x$  的比值,即

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{dR/R}{\epsilon_x}$$

应变片的灵敏系数  $K$  主要取决于敏感栅材料的灵敏系数  $K_m$ 。由于传递变形的失真、横向效应及结构形式和几何尺寸的不同等因素,应变片的灵敏系数  $K$  一般均低于敏感栅材料的灵敏系数  $K_m$ ,因此,应变片的灵敏系数  $K$  必须重新通过实验标定。由于粘贴式应变片一经粘贴测试就无法取下重用,因而一批产品只能采取抽样(如 5%)的方法标定。实验证明,在相当大的应变范围内,应变片的灵敏系数  $K$  是常数。

##### 2) 横向效应

沿应变片轴向的应变  $\epsilon_x$  必然引起应变片电阻的相对变化,而垂直于应变片轴向的应变  $\epsilon_y$ ,也会引起应变片电阻的相对变化,这种现象称为横向效应。横向效应的结果是降低了电阻应变片的灵敏度。这种现象的产生与应变片敏感栅的结构有关。若敏感栅的纵向栅越窄、越长,横向栅越宽、越短,则横向效应的影响越小。为了满足测量精度的要求,应做必要的修正。为了减小横向效应产生的测量误差,一般多采用箔式应变片。

##### 3) 机械滞后

应变片安装在试件上后,在一定温度下做出应变片电阻相对变化  $\epsilon_i$ (指示应变)与试件机械应变  $\epsilon_g$  之间加载的特性曲线,如图 3-18 所示。经实验发现,这两条特性曲线并不重合,在同一机械应变下,卸载时的  $\epsilon_i$  高于加载时的  $\epsilon_g$ ,这种现象称为应变片的机械滞后。加载特性曲线与卸载特性曲线之间最大的差值  $\Delta\epsilon_m$ ,称为应变片的机械滞后值。

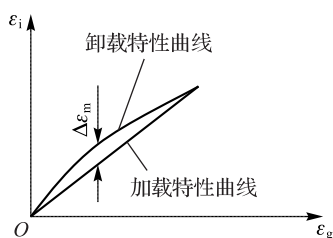


图 3-18 机械滞后

造成机械滞后的原因主要是敏感栅、基底和黏结剂在承受机械应变后留下残余变形。敏感栅受到不适当的变形,或黏结剂固化不充分,或应变片在较高的温度下工作,都会使机械滞后增加。为减小机械滞后,除了选用合适的黏结剂外,新安装的应变片最好在经过反复几次(三次以上)加-卸载循环后再正式用来测量,以提高测量精度。

#### 4) 零漂和蠕变

在温度保持恒定、试件上没有应变的情况下,应变片的指示值会随时间的增长而逐渐变化,此变化就是应变片的零点漂移,简称零漂。

已粘贴的应变片在温度保持恒定、长时间承受某一恒定的机械应变的作用下,应变片的指示值会随时间的增长而逐渐变化,此种变化称为蠕变。

零漂和蠕变这两项指标用来衡量应变片对时间的稳定性,在长时间的测量中,其意义更为突出。

#### 5) 应变极限

应变片的应变极限是指在一定的温度下,应变片的指示应变  $\epsilon_i$  与试件的真实应变  $\epsilon_g$  的相对误差达到规定值(一般为 10%)时的真实应变  $\epsilon_j$ 。

#### 6) 疲劳寿命

已安装好的应变片在恒定幅值的交变压力下,可以连续工作而不产生疲劳损坏的循环次数  $N$  称为应变片的疲劳寿命。疲劳寿命反映了应变片对动态应变测试的适应性。

### 5. 电阻应变片传感器的典型应用

在机电一体化工程中,力、压力和扭矩是很常用的机械参数。近年来,各种高精度力、压力和扭矩传感器更以其惯性小、响应快、易于记录、便于遥控等优点得到广泛的应用。按传感器工作原理,电阻应变片传感器可分为弹性式传感器、电阻应变式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器和磁电式传感器等,其中,电阻应变式传感器的应用较为广泛。

#### 1) 电阻应变式测力传感器

电阻应变式测力传感器的工作原理是电阻应变效应。粘贴有应变片的弹性元件受力后产生变形,应变片将弹性元件的应变转换为电阻值的变化,经过转换电路输出电压信号或电流信号。

测力传感器按其量程大小和测量精度不同而有很多种,它们的主要差别是弹性元件的结构形式不同,应变片在弹性元件上的粘贴位置不同。通常测力传感器的弹性元件有柱式弹性元件、悬臂梁式弹性元件等。

(1) 柱式弹性元件。柱式弹性元件有圆柱形弹性元件和圆筒形弹性元件等,如图 3-19 所示。这种弹性元件结构简单、承载能力大,主要用于中等载荷和大载荷(可达数兆牛顿)的

拉(压)力传感器。其受力后,产生的应变为

$$\epsilon = \frac{p}{AE} \quad (3-33)$$

用电阻应变仪测出的指示应变为

$$\epsilon_i = 2(1 + \mu)\epsilon \quad (3-34)$$

式中, $p$ 为作用力; $A$ 为弹性体的横截面积; $E$ 为弹性材料的弹性模量; $\mu$ 为弹性材料的泊松比。

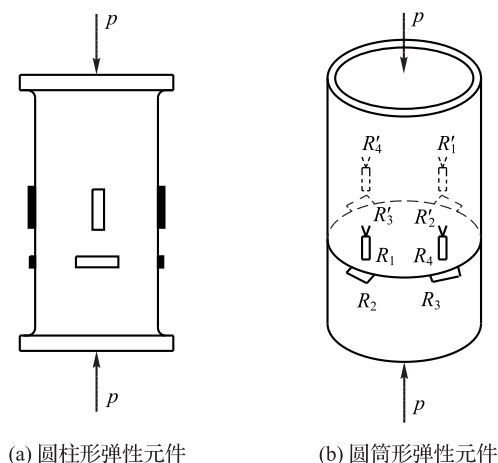


图 3-19 柱式弹性元件

(2)悬臂梁式弹性元件。悬臂梁式传感器是一种结构简单、高精度、应变片容易粘贴、抗偏抗侧性能优越的称重测力传感器。该传感器可以测量几十克到几十千克的质量,精度可达到 0.02%FS。

悬臂梁式传感器采用弹性梁及电阻应变片作为敏感转换元器件,组成全桥电路。当垂直正压力或拉力作用在弹性梁上时,应变片随弹性梁一起变形,其应变使应变片的阻值发生变化,应变电桥输出与拉力或压力成正比的电压信号。如果悬臂梁式传感器配以相应的应变仪、数字电压表或其他二次仪表,即可显示或记录质量或力。

弹性梁有多种形式。图 3-20(a)所示为等截面梁。等截面梁就是悬臂梁的横截面处处相等的梁。当外力  $p$  作用在梁的自由端时,梁的固定端产生的应变最大,即

$$\epsilon = \frac{6pl_0}{bh^2E} \quad (3-35)$$

在距固定端较近的表面顺着梁的长度方向分别贴上  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ 、 $R_4$  ( $R_2$ 、 $R_4$  在底部,图中未画出)4 个电阻应变片。若  $R_1$ 、 $R_3$  受拉力,则  $R_2$ 、 $R_4$  受压力,两者应变相等,极性相反,将它们组成差动全桥,则电桥的灵敏度为单臂工作时的四倍。

图 3-20(b)所示为等强度梁。等强度梁是一种具有特殊形式的悬臂梁。其特点是:沿梁长度方向的截面按一定规律变化,当外力  $p$  作用在梁的自由端时,在梁表面整个长度  $l$  方向上产生的应变大小相等。其应变的大小为

$$\epsilon = \frac{6pl}{bh^2E} \quad (3-36)$$

这种梁的特点是结构简单、加工方便、应变片粘贴容易、灵敏度较高,主要用于小载荷、高精度的拉(压)力传感器中,可测量 0.01 N 到几千牛顿的拉力和压力。应变片应粘贴在同一截面的正反两面上。

图 3-20(c)所示为双孔梁,该梁多用于小量程工业电子秤和商业电子秤。图 3-20(d)所示为 S 形弹性元件,其适用于测量较小的载荷。

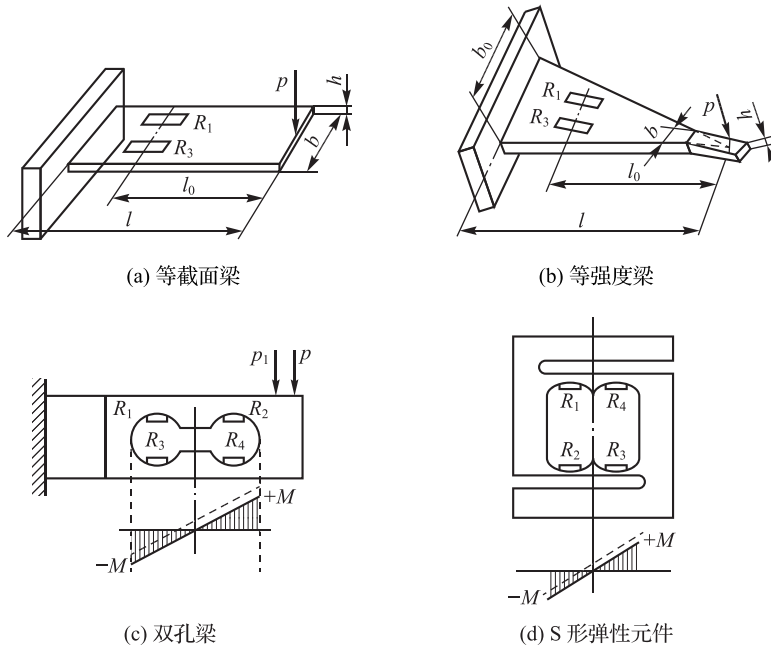


图 3-20 弹性梁

## 2) 电阻应变式压力传感器

电阻应变式压力传感器主要用于测量流体压力,有时也用于测量土壤压力。电阻应变式压力传感器按传感器所用弹性元件可分为膜式压力传感器、筒式压力传感器和压阻式压力传感器等。

(1) 膜式压力传感器。膜式压力传感器的弹性元件为四周固定的等截面圆形薄板,又称为平膜板或膜片,其一侧表面承受被测分布压力,另一侧表面粘有应变片或专用的箔式应变花,并组成电桥。如图 3-21 所示,膜片在被测压力  $p$  的作用下发生弹性变形,应变片在任意半径的径向应变  $\epsilon_r$  和切向应变  $\epsilon_t$  分别为

$$\epsilon_r = \frac{3p}{8h^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - 3r^2) \quad (3-37)$$

$$\epsilon_t = \frac{3p}{8h^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - r^2) \quad (3-38)$$

式中,  $p$  为被测压力;  $\mu$  为膜片材料的泊松比;  $r_0$  为膜片有效工作半径;  $r$  为膜片任意半径;  $h$  为膜片厚度;  $E$  为膜片材料的弹性模量。

由分布曲线可知,电阻  $R_1$  和  $R_3$  的阻值增大(受正的切向应变  $\epsilon_t$ ),而电阻  $R_2$  和  $R_4$  的阻值减小(受负的径向应变  $\epsilon_r$ )。因此,电桥有电压输出,且输出电压与压力成比例。

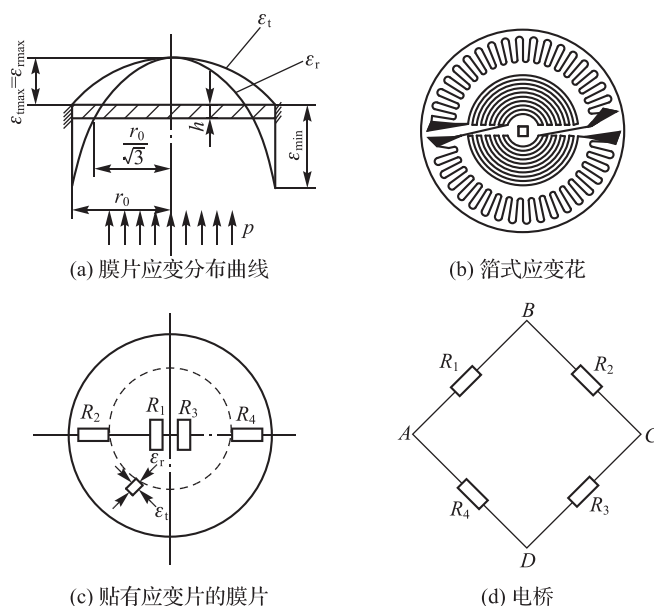


图 3-21 膜式压力传感器

(2)筒式压力传感器。筒式压力传感器的弹性元件为薄壁圆筒,筒的底部较厚。这种弹性元件的特点是,圆筒受到被测压力后表面各处的应变是相同的。因此,应变片的粘贴位置不会对所测应变产生影响。如图 3-22 所示,工作应变片  $R_1$ 、 $R_3$  沿圆周方向粘贴在筒壁上,温度补偿片  $R_2$ 、 $R_4$  贴在筒底外壁上,并连接成全桥线路,这种传感器适用于测量较大的压力。

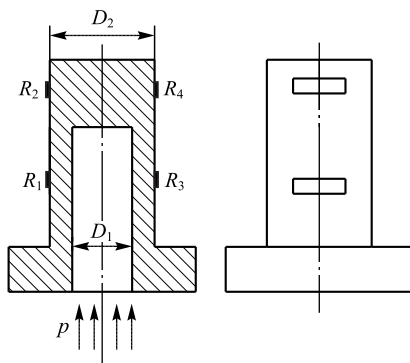


图 3-22 筒式压力传感器

对于薄壁圆筒(壁厚与壁的中面曲率半径之比不大于  $1/20$ ),筒壁上工作应变片的切向应变  $\epsilon_t$  与被测压力  $p$  的关系为

$$\epsilon_t = \frac{(2-\mu)D_1}{2(D_2-D_1)}p \quad (3-39)$$

对于厚壁圆筒(壁厚与壁的中面曲率半径之比大于  $1/20$ )则有

$$\epsilon_t = \frac{(2-\mu)D_1^2}{2(D_2^2-D_1^2)}p \quad (3-40)$$

式中,  $D_1$  为圆筒内孔直径;  $D_2$  为圆筒外壁直径;  $E$  为圆筒材料的弹性模量;  $\mu$  为圆筒材料的泊松比。

(3) 压阻式压力传感器。压阻式压力传感器的结构如图 3-23 所示。其核心部分是一个圆形的硅膜片。在沿某晶向切割的 N 型硅膜片上扩散四个阻值相等的 P 型电阻, 构成平衡电桥。硅膜片周边用硅杯固定, 其下部是与被测系统相连的高压腔, 上部为低压腔, 通常与大气相通。在被测压力作用下, 膜片产生应力和应变, P 型电阻产生压阻效应, 其电阻发生相对变化。

压阻式压力传感器适用于中压力、低压力、微压和压差测量。由于其弹性敏感元件与变换元件一体化, 尺寸小且可微型化, 因而固有频率很高。

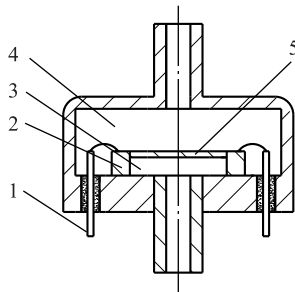


图 3-23 压阻式压力传感器的结构

1—引线; 2—硅杯; 3—高压腔; 4—低压腔; 5—硅膜片

### 3) 力矩传感器

图 3-24 所示为机器人手腕用力矩传感器的原理, 它是检测机器人终端环节(如小臂)与手爪之间力矩的传感器。目前国内外研制的腕用力矩传感器的种类较多, 且敏感元件几乎全都使用应变片, 只是在弹性结构上有差异。由图 3-24 可知, 驱动轴 B 通过装有应变片 A 的腕部与手部 C 连接, 当驱动轴回转并带动手部回转而拧紧螺丝钉 D 时, 手部所受力矩的大小可通过应变片电压的输出测得。

图 3-25 所示为无触点力矩测量原理, 在传动轴的两端均安装上磁分度圆盘 A, 分别用磁头 B 检测两圆盘之间的转角差, 利用转角差与负荷  $M$  成比例的关系测量出负荷力矩的大小。

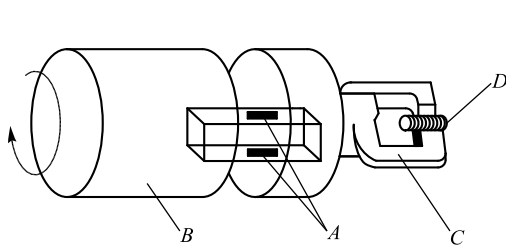


图 3-24 机器人手腕用力矩传感器的原理

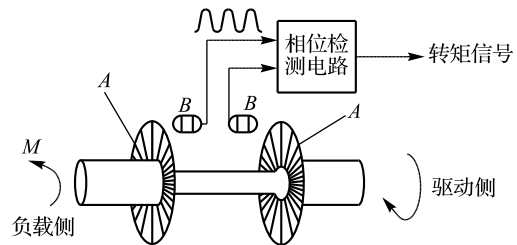


图 3-25 无触点力矩测量原理

## 6. 应变式电阻传感器的其他应用

如图 3-26 所示, 电阻应变片在使用时通常被接入测量电桥, 以便将电阻的变化转换成电压量输出。

由金属应变片构成的这种电桥称为惠斯登电桥。当利用金属应变片的惠斯登电桥构成力学量传感器时, 可以采用电桥的一个桥臂为一片金属应变片、其他桥臂为固定电阻的方法

[见图 3-26(a)],也可以采用电桥的 2 片或 4 片金属应变片组成的桥路结构,以此来提高传感器的测量精度[见图 3-26(b)].当采用 2 片金属应变片组成检测电路时,由于有 2 片金属应变片产生应变,因而可以得到单片应变片电路的 2 倍输出电压。当采用 4 片金属应变片组成检测电路时,可以得到 4 倍于单片应变片电路的输出电压。此外,有的检测还采用具有温度补偿功能的金属应变片替代固定电阻,以提高电路的测量精度。

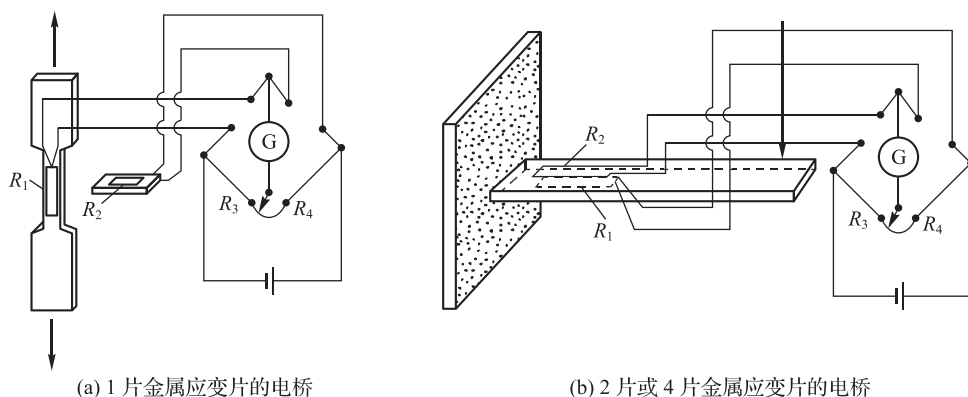


图 3-26 应变片的测量电桥

应变式电阻传感器的应用主要有以下两个方面:

1) 直接测定结构的应力或应变

为了研究机械、建筑、桥梁等结构的某些部位或所有部位在工作状态下的受力变形情况,往往将不同形状的应变片贴在结构的预定部位上,直接测得这些部位的拉应力、压应力和弯矩等,为结构设计、应力校核或构件破坏及机器设备的故障诊断提供实验数据或诊断信息。图 3-27 给出了两个构件应力测定的例子。

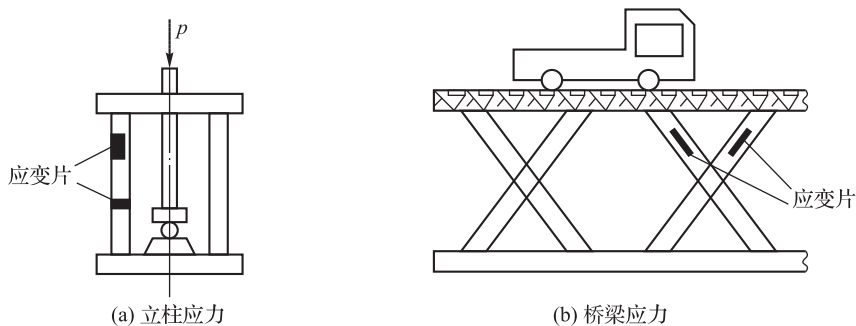


图 3-27 两个构件应力测定的例子

2) 将应变片贴于弹性元件上制成多种用途的应变传感器

将应变片贴于弹性元件上制成的传感器可以测量各种能使弹性元件产生应变的物理量,如压力、流量、位移和加速度等。因为这时被测的物理量使弹性元件产生与之成正比的应变,这个应变再由应变片转换成其自身电阻的变化。根据应变效应可知,应变片电阻的相对变化与应变片所感受的应变成比例,从而通过电阻与应变、应变与被测量的关系即可测得被测物理量的大小。图 3-28 给出了几个典型的应变式电阻传感器的例子。

图 3-28(a)所示为位移传感器。位移  $x$  使板簧产生与之成比例的弹性变形,板上的应变片感受板的应变并将其转换成电阻的变化量。

图 3-28(b)所示为加速度传感器。它由质量块  $M$ 、悬臂梁和基座组成。当外壳与被测振动体一起振动时,质量块  $M$  的惯性力作用在悬臂梁上,悬臂梁的应变与振动体(外壳)的加速度在一定频率范围内成正比,贴在梁上的应变片把应变转换成为电阻的变化。

图 3-28(c)所示为压力传感器。压力使膜片变形,金属应变片也相应发生变形,使其电阻发生变化。

图 3-28(d)所示为转矩传感器。扭矩使膜片变形,应变片也相应变形,使其电阻发生变化。

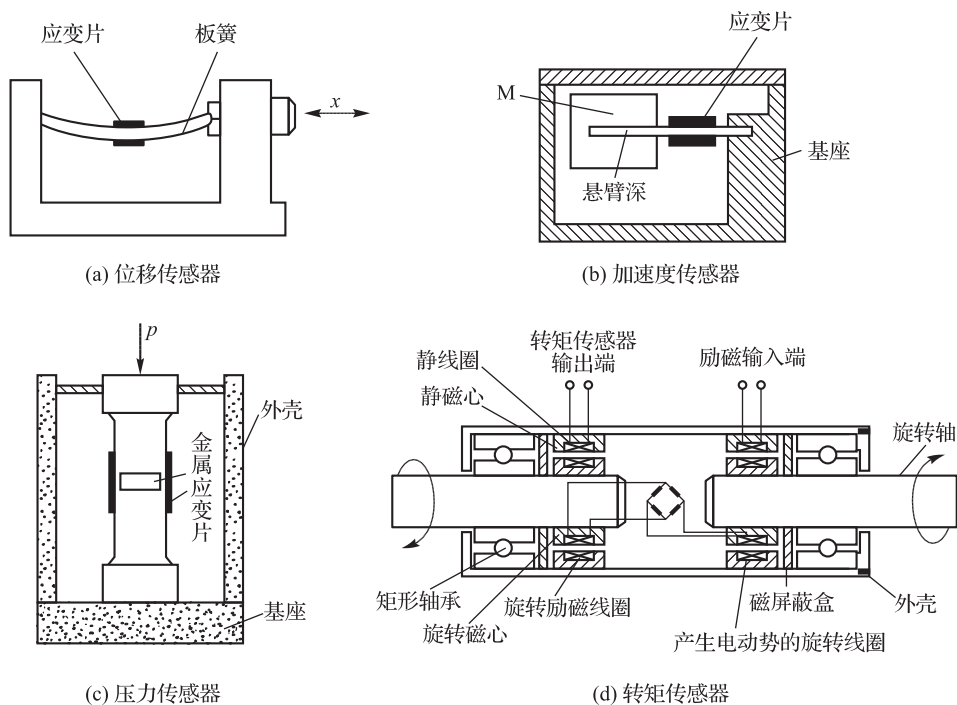


图 3-28 几个典型的应变式电阻传感器的例子

### 3.2 电感式传感器

电感式传感器是利用线圈自感或互感的变化来实现测量的一种装置,其可以用来测量位移、振动、压力、流量、重量、力矩、应变等多种物理量。电感式传感器的核心部分是可变自感或可变互感,在被测量转换成线圈自感或互感的变化过程中,一般要利用磁场作为媒介或铁磁体。这类传感器的主要特征是具有线圈绕组。电感式传感器的优点是:结构简单可靠,输出功率大,抗干扰能力强,对工作环境要求高,分辨率高(如测量长度时可达  $0.1 \mu\text{m}$ ),稳定性好;其缺点是频率响应慢,不宜用于快速测量。

电感式传感器的种类很多,有利用自感原理的自感式传感器,有利用互感原理的差动变压器式传感器,有利用涡流原理的电涡流式传感器和利用电磁感应原理的感应同步器等。