

第1章 绪论

本章简要介绍自动检测技术和传感器的基本知识,重点介绍误差分析和数据处理、传感器静/动态特性和标定方法。

1.1 自动检测技术概述

1.1.1 自动检测技术的重要性

在科学研究过程中,一些研究成果必须要通过实验证实,这就需要一定的测试手段来完成;在工农业生产中,为了保证能正常、高效地生产,就要有一定的测试手段进行生产过程的检查和监视。这些测试手段就是仪器仪表。

关于仪器仪表,最早得到广泛应用的是机械式仪器仪表,以后发展到光学的、电学的仪器仪表等。仪器仪表也是随着科学技术的发展而发展的,每当科学技术前进一步,就要求能够提供新的测试手段,从而促进了仪器仪表的发展,而科学技术的成果也为发展新型的仪器仪表提供了条件。

由于微电子技术、计算机技术、通信技术及网络技术的迅速发展,对电量的测量技术相应地得到提高,如准确度高、灵敏度高、反应速度快、能够连续进行测量、自动记录、远距离传输和组成测控网络等。可是,在工程中所要测量的参数大多数为非电量,如机械量(位移、尺寸、力、振动、速度等)、热工量(温度、压力、流量、物位等)、成分量(化学成分、浓度等)和状态量(颜色、透明度、磨损量等),因而促使人们用电测的方法研究非电量,即研究用电测的方法测量非电量的仪器仪表,研究如何能正确和快速地测得非电量的技术。

非电量电测量技术具有测量精度高、反应速度快、能自动连续地进行测量、可进行遥测、便于自动记录、可与计算机连接进行数据处理、可采用微处理器做成智能仪表、能实现自动检测与转换等优点,在国民经济各部门得到广泛应用。

在机械制造行业,需要测量位移、尺寸、力、振动、速度、加速度等机械量参数,利用非电量电测仪器,监视刀具的磨损和工件表面质量的变化,防止机床过载,控制加工过程的稳定性。此外,还可利用非电量电测单元部件作为自动控制系统中测量反馈量的敏感元件(如光栅尺、容栅尺等)控制机床的行程、启动、停止和换向。在化工行业,需要在线检测生产过程的温度、压力、流量、物位等热工量参数,实现对工艺过程的有效控制,确保生产过程能正常高效地进行,确保生产安全,防止事故发生。在烟草行业,如卷烟包装等自动化生产线,利用非电量电测技术监控产品质量,剔除废品,并在线统计产品的产量、合格率等信息,为生产自动化、管理现代化提供可靠的技术保障。在环境保护行业,需要检测物质的化学成分、浓度等成分量。在现代物流行业,如在控制搬运机器人作业过程中,需要实时检测工件安放的位置参数,以便准确地控制执行机构工作,可靠地安放货物。在科学研究和产品开发中,将非电量电测技术应用于逆向设计和逆向加工,可缩短产品设计和开发的周期。甚至在文物保护领域,研究人员已开始用非电量电测技术进行文物的保护和修复。

综上所述,自动检测技术与人们的生产、生活密切相关,它是自动化领域的重要组成部分,尤其在自动控制中,如果对控制参数不能有效准确地检测,控制就成为无源之水、无本之木。

1.1.2 自动检测系统的组成

在自动检测系统中,各组成部分常以信息流的过程来划分,一般可分为:信息的获取、转换、处理和输出等。自动检测系统首先获取被检测的信息,把它转换成电量,然后把已转换成电量的信号进行放大、整形等处理,再通过输出单元(如指示仪和记录仪)把信号显示出来,或者通过输出单元把已处理的信息送到系统其他单元使用,成为系统的一部分等。自动检测系统的组成如图 1.1.1 所示。

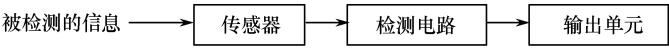


图 1.1.1 自动检测系统的组成

在自动检测系统中,传感器是把被测非电量转换成为与之有确定对应关系,且便于应用的某些物理量(通常为电量)的检测装置。传感器获得信息的正确与否,关系到整个系统的精度。如果传感器的误差很大,即使后续检测电路等环节的精度很高,也难以提高系统的精度。

检测电路的作用是把传感器输出的变量转换成电压或电流信号,使之能在输出单元的指示仪上指示或记录仪上记录;或者能够作为系统的检测或反馈信号。检测电路的种类通常由传感器的类型而定,如电阻式传感器需用一个电桥把电阻值转换成电流或电压输出。由于电桥的输出信号一般比较微弱,常常要将电桥的输出信号加以放大,因此在测量电路中一般还带有放大器。

输出单元可以是指示仪、记录仪、累加器、报警器、数据处理电路等。若输出单元是指示仪或记录仪,则系统为自动检测系统;若输出单元是计数器或累加器,则系统为自动计量系统;若输出单元是报警器,则系统为自动保护系统或自动诊断系统;若输出单元是数据处理电路,则系统为部分数据分析系统,或部分自动管理系统或部分自动控制系统。

1.1.3 自动检测技术的发展趋势

随着微电子技术、通信技术和计算机网络技术的发展,对自动检测技术也提出了越来越高的要求,并进一步推动了自动检测技术的发展,其发展趋势主要有以下几个方面。

① 不断提高仪器的性能、可靠性,扩大应用范围。随着科学技术的发展,对仪器的性能要求也相应地提高,如提高其分辨率、测量精度,提高系统的线性度、增大测量范围等,使其技术性能指标不断提高,应用领域不断扩大。

② 开发新型传感器。主要包括:利用新的物理效应、化学反应和生物功能研发新型传感器,采用新技术、新工艺填补传感器空白,开发微型传感器,仿照生物的感觉功能研究仿生传感器等。

③ 开发传感器的新型敏感元件材料和采用新的加工工艺。新型敏感元件材料的开发和应用是非电量电测技术中的一项重要任务,其发展趋势为:从单晶体到多晶体、非晶体,从单一型材料到复合型材料、原子(分子)型材料的人工合成。其中,半导体敏感材料在传感器技术中具有较大的技术优势,陶瓷敏感材料具有较大的技术潜力,磁性材料向非晶体化、薄膜化方向发展,智能材料的探索在不断地深入。智能材料指具备对环境的判断和自适应功能、自诊断功能、自修复功能和自增强功能的材料,如形状记忆合金、形状记忆陶瓷等。

在开发新型传感器时,离不开新工艺的采用。如把集成电路制造工艺技术应用于微机电系统中微型传感器的制造。

④ 微电子技术、微型计算机技术、现场总线技术和传感器的结合,构成新一代智能化测试系统,使测量精度、自动化水平进一步提高。

⑤ 研究集成化、多功能和智能化传感器或测试系统。传感器集成化主要有两层含义:一是同一功能的多元件并列化,即将同一类型的单个传感元件在同一平面上排列起来,排成一维构成线型传感器,排成二维构成面型传感器(如 CCD);另一层含义是功能一体化,即将传感器与放大、运算及误差补偿、信号输出等环节一体化,组装成一个器件(如容栅传感器的动栅数显单元)。

传感器多功能化是指一器多能,即用一个传感器可以检测两个或两个以上的参数。多功能化不仅可以降低生产成本、减小体积,而且可以有效地提高传感器的稳定性、可靠性等。

传感器的智能化就是把传感器与微处理器相结合,使之不仅具有检测功能,还具有信息处理、逻辑判断、自动诊断等功能。

1.2 传感器概述

1.2.1 传感器的定义

传感器是一种以一定精确度把被测量(主要是非电量)转换为与之有确定关系、便于应用的某种物理量(主要是电量)的测量装置。这一定义包含以下几个方面的含义: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,如物理量、化学量、生物量等;③ 它的输出量是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,可以是气、光、电量,但主要是电量;④ 输出与输入间有对应关系,且有一定的精确度。

在有些学科领域,传感器又称为敏感元件、检测器、转换器、发讯器等。这些不同叫法,反映了在不同的技术领域中,只是根据器件的用途,对同一类型的器件使用不同的术语而已,但它们的内涵是相同或相似的。

1.2.2 传感器的组成

传感器一般由敏感元件、转换元件、转换电路组成,组成框图如图 1.2.1 所示。

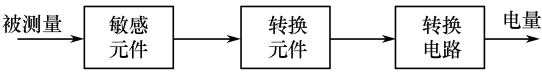


图 1.2.1 传感器的组成框图

- ① 敏感元件,它是直接感受被测量,并输出与被测量成确定关系的某一物理量的元件。
- ② 转换元件,敏感元件的输出就是它的输入,它把输入转换成电路参数。
- ③ 转换电路,将上述电路参数接入转换电路,便可转换成电量输出。

实际上,有些传感器很简单,有些则较为复杂,但大多数是开环系统,也有些是带反馈的闭环系统。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,如热电偶传感器。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。有些传感器的转换元件不止一个,需要经过若干次转换。

1.2.3 传感器的分类

传感器的原理各种各样,它与许多学科有关,种类繁多,分类方法也很多,目前广泛采用的分类方法有以下几种。

① 按照传感器的工作机理,可分为物理型传感器、化学型传感器、生物型传感器等。

② 按构成原理,可分为结构型传感器和物性型传感器两大类。

结构型传感器是利用物理学中场的定律构成的,包括力场的运动定律、电磁场的电磁定律等。这类传感器的特点是传感器的性能与它的结构材料没有多大关系,如差动变压器。

物性型传感器是利用物质定律构成的,如欧姆定律等。物性型传感器的性能随材料的不同而异,如光电管、半导体传感器等。

③ 按传感器的能量转换情况,可分为能量控制型传感器和能量转换型传感器。

在信息变换过程中,能量控制型传感器的能量需外电源供给。如电阻、电感、电容等电路参量传感器都属于这一类传感器。

能量转换型传感器主要由能量转换元件构成,它不需要外电源。如基于压电效应、热电效应、光电效应、霍尔效应等原理构成的传感器就属于此类传感器。

④ 按照物理原理分类,可分为电参量式传感器(包括电阻式、电感式、电容式等基本形式)、磁电式传感器(包括磁电感应式、霍尔式、磁栅式等)、压电式传感器、光电式传感器、气电式传感器、波式传感器(包括超声波式、微波式等)、射线式传感器、半导体传感器、其他原理的传感器(如振弦式和振筒式传感器等)。

⑤ 按照传感器的使用分类,可分为位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器等。

1.3 测量误差与数据处理

1.3.1 测量误差的概念和分类

1. 有关测量技术中的部分名词

① 等精度测量,在同一条件下所进行的一系列重复测量称为等精度测量。

② 非等精度测量,在多次测量中,如对测量结果的精确度有影响的一切条件不能完全维持不变的测量称为非等精度测量。

③ 真值,被测量本身所具有的真正值称为真值。真值是一个理想的概念,一般是未知的,但在某些特定情况下,真值又是可知的,如一个整圆的圆周角为 360° 等。

④ 实际值,误差理论指出,在排除系统误差的前提下,对于精密测量,当测量次数无限多时,测量结果的算术平均值极接近于真值,因而可将它视为被测量的真值。但是测量次数是有限的,故按有限测量次数得到的算术平均值,只是统计平均值的近似值,而且由于系统误差不可能完全被排除,因此通常只能把精度高一级的标准器具所测得的值作为真值。为了强调它并非是真的真值,故把它称为实际值。

⑤ 标称值,测量器具上所标出来的数值。

⑥ 示值,由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

⑦ 测量误差,用测量器具进行测量时,所测量出来的数值与被测量的实际值(或真值)之间的差值。

2. 误差的分类

按照误差出现的规律,可把误差分为系统误差、随机误差(也称为偶然误差)和粗大误差3类。

(1) 系统误差

在同一条件下,多次测量同一量值时,其绝对值和符号保持不变,或在条件改变时按一定规律变化的误差称为系统误差,简称系差。

引起系统误差的主要因素有:材料、零部件及工艺的缺陷,标准量值、仪器刻度的不准确,环境温度、压力的变化,其他外界干扰。

(2) 随机误差

在同一测量条件下,多次测量同一量值时,其绝对值和符号以不可预定的方式变化的误差称为随机误差。

随机误差是由很多复杂因素的微小变化的总和引起的,如仪表中传动部件的间隙和摩擦、连接件的弹性变形、电子元器件的老化等。随机误差具有随机变量的一切特点,在一定条件下服从统计规律,可以用统计规律描述,从理论上估计它对测量结果的影响。

(3) 粗大误差

超出规定条件下预期的误差称为粗大误差,简称粗差,或称寄生误差。

粗大误差明显歪曲测量结果。在测量或数据处理中,当发现某次测量结果所对应的误差特别大或特别小时,应判断是否属于粗大误差;如属粗大误差,此值应舍去不用。

1.3.2 精度

反映测量结果与真值接近程度的量,称为精度。精度可分为:

① 准确度,反映测量结果中系统误差的影响程度;

② 精密度,反映测量结果中随机误差的影响程度;

③ 精确度,反映测量结果中系统误差和随机误差综合的影响程度,其定量特征可用测量的不确定度(或极限误差)表示。

对于具体的测量,精密度高的准确度不一定高,准确度高的精密度不一定高,但精确度高,则精密度和准确度都高。

1.3.3 测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有以下几种。

1. 绝对误差

绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 A_0 ,测量器具的标称值或示值为 x ,则绝对误差为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.3.1)$$

由于一般无法求得真值 A_0 ,在实际应用时,常用精度高一级的标准器具的示值,即实际值 A 代替真值 A_0 。 x 与 A 之差称为测量器具的示值误差,记为

$$\Delta x = x - A \quad (1.3.2)$$

通常用此值代表绝对误差。

在实际工作中,经常使用修正值。为了消除系统误差,用代数法加到测量示值上的值称为修正值,常用 C 表示。将测得的示值加上修正值后可得到真值的近似值,即

$$A_0 = x + C \quad (1.3.3)$$

由此得

$$C = A_0 - x \quad (1.3.4)$$

在实际工作中,可以用实际值 A 近似真值 A_0 ,则式(1.3.4)变为

$$C = A - x = -\Delta x \quad (1.3.5)$$

修正值与绝对误差大小相等、符号相反,测量示值加修正值可以消除绝对误差的影响。但必须注意,一般情况下难以得到真值,而用实际值 A 近似真值 A_0 ,因此,修正值本身也有误差,修正后只能得到较测量示值更为准确的结果。

修正值给出的方式不一定是具体的数值,也可以是曲线、公式或表格。

2. 相对误差

相对误差是绝对误差 Δx 与被测量的约定值之比。相对误差有以下几种表现形式。

(1) 实际相对误差

实际相对误差 γ_A 是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的百分比表示的相对误差。记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.3.6)$$

(2) 示值相对误差

示值相对误差 γ_x 是用绝对误差 Δx 与被测量的示值 x 的百分比表示的相对误差。记为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.3.7)$$

(3) 满度(引用)相对误差

相对误差可用以说明测量的准确度,但不能评价指示仪表的准确度。对一个指示仪表的某一量限来说,因为标尺上各点的绝对误差相近,指针指在不同刻度上的读数不同,所以各指示值的示值相对误差差异很大,无法用示值相对误差评价该仪表。为了划分指示仪表的准确度级别,选择仪表的测量上限,即满度值作为基准,由满度相对误差评价指示仪表的准确度。

满度相对误差 γ_n 又称满度误差或引用误差,是用绝对误差 Δx 与测量器具的满度值 x_n 的百分比表示的相对误差。记为

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_n} \times 100\% \quad (1.3.8)$$

由于仪表各指示值的绝对误差大小不等,其值有正有负,因此,国家标准规定仪表的准确度等级 a 是用最大允许误差确定的。指示仪表的最大满度误差不准超过该仪表准确度等级的百分数,即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_n} \times 100\% \leq a\% \quad (1.3.9)$$

式中, γ_{nm} 为仪表的最大满度误差(最大引用误差); Δx_m 为仪表示值中的最大绝对误差的绝对值; x_n 为仪表的测量上限; a 为准确度等级。式(1.3.9)是判别指示仪表是否超差及应属于哪个准确度等级的主要依据。

从使用仪表的角度出发,只有示值恰好为仪表上限时,测量结果的准确度才等于该仪表准确度等级的百分数。在其他示值时,测量结果的准确度均低于仪表准确度等级的百分数,因为

$$\Delta x_m \leq a\% x_n \quad (1.3.10)$$

当示值为 x 时,可能产生的最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \leq a\% \frac{x_n}{x} \quad (1.3.11)$$

式(1.3.11)表明,用仪表测量示值为 x 的被测量时,比值 x_n/x 越大,测量结果的相对误差越大。由此可见,选用仪表时要考虑被测量的大小越接近仪表上限越好。为了充分利用仪表的准确度,选用仪表前要对被测量有所了解,其被测量的值应大于其测量上限的 $2/3$ 。

1.3.4 随机误差

1. 正态分布

随机误差是以不可预定的方式变化着的误差,但在一定条件下服从统计规律,可以用统计规律描述。对随机误差做概率统计处理,是在完全排除系统误差的前提下进行的。在实际工作中,随机误差大部分是按正态分布的,其正态分布的概率密度函数 $f(\delta)$ 曲线如图 1.3.1 所示,其数学表达式为

$$y = f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1.3.12)$$

式中, y 为概率密度, δ 为随机误差, σ 为标准差(均方根误差), e 为自然对数的底。

其累积分布函数 $F(\delta)$ 为

$$F(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1.3.13)$$

数学期望为

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta f(\delta) d\delta = 0 \quad (1.3.14)$$

方差为

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta \quad (1.3.15)$$

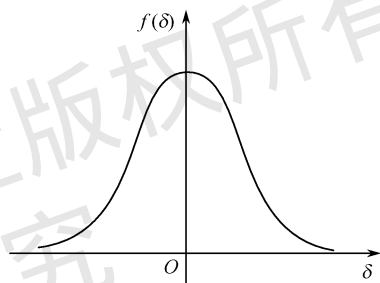


图 1.3.1 正态分布概率密度曲线

分析图 1.3.1 所示的曲线,可以发现正态分布的随机误差分布规律具有以下特点:

- ① 对称性,绝对值相等的正误差和负误差出现的次数相等;
- ② 单峰性,绝对值小的误差比绝对值大的误差出现的次数多;
- ③ 有界性,在一定的测量条件下,随机误差的绝对值不会超过一定界限;
- ④ 抵偿性,随着测量次数的增加,随机误差的算术平均值趋于零。

2. 随机误差的评价指标

由于随机误差大部分是按正态分布规律出现的,具有统计意义,故通常以正态分布曲线的两个参数算术平均值 $\bar{x}$ 和均方根误差 σ 作为评价指标。

(1) 算术平均值 $\bar{x}$

对某一量进行一系列等精度测量,由于存在随机误差,其测量值皆不相同,应以全部测得值的算术平均值作为最后的测量结果。

设对某一量做一系列等精度测量,得到一系列不同的测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 这些测量值的算术平均值 $\bar{x}$ 定义为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1.3.16)$$

并设各测量值与真值的随机误差为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$, 则

$$\delta_1 = x_1 - A_0, \delta_2 = x_2 - A_0, \dots, \delta_n = x_n - A_0$$

即

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - nA_0$$

由随机误差的对称性可以推出, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

所以

$$\sum_{i=1}^n x_i = nA_0$$

即

$$A_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{x} \tag{1.3.17}$$

式(1.3.17)表明, 当测量次数为无限次时, 所有测量值的算术平均值即等于真值, 事实上不可能达到无限次测量, 即真值难以达到。但是, 随着测量次数的增加, 算术平均值也就越接近真值。因此, 以算术平均值作为真值是既可靠又合理的。

(2) 标准差 σ

① 测量列中单次测量的标准差。由于随机误差的存在, 等精度测量列中各个测量值一般不相同, 它们围绕着该测量列的算术平均值有一定的分散, 此分散度说明了测量列中单次测量值的不可靠性, 因此必须用一个数值作为其不可靠性的评定标准。

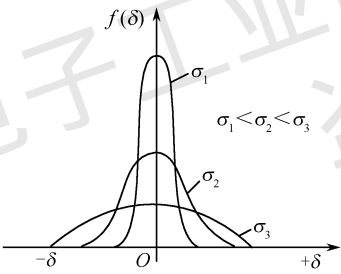


图 1.3.2 3 种不同 σ 的正态分布曲线

由式(1.3.12)可知, 正态分布的概率密度函数是一个指数方程式, 其值随着随机误差 δ 和标准差 σ 的变化而变化。图 1.3.2 表示不同标准差的正态分布曲线。从图中可以明显看出 σ 与正态分布曲线的形状和分散度有关。 σ 越小, 曲线形状越陡, 随机误差的分布越集中, 测量精密度越高; 反之, σ 越大, 曲线形状越平坦, 随机误差分布越分散, 测量精密度越低。因此, 单次测量的标准差 σ 是表征同一被测量的 n 次测量的测量值分散性的参数, 可作为测量列中单次测量不可靠性的评定标准。

在等精度测量列中, 单次测量的标准差可按下式计算

$$\sigma = \sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}} \tag{1.3.18}$$

式中, n 为测量次数; δ_i 为每次测量中相应各测量值的随机误差, 且

$$\delta_i = x_i - A_0$$

式中, x_i 为每次的测量值; A_0 为被测量真值。

在实际工作中, 一般被测量的真值未知, 这时可用被测量的算术平均值代替被测量的真值进行计算, 则有

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

式中, x_i 为第 i 个测量值; $\bar{x}$ 为测量列的算术平均值; v_i 为 x_i 的残余误差(简称残差), 即用残差来近似代替随机误差求标准差的估计值, 则式(1.3.18) 变为

$$\sigma = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (1.3.19)$$

式(1.3.19) 称为贝塞尔(Bessel) 公式, 根据此式可由残差求得单次测量列标准差的估计值。

② 测量列算术平均值的标准差。在多次测量的测量列中, 通常以算术平均值作为测量结果, 因此, 必须研究算术平均值不可靠性的评定标准。而算术平均值的标准差 $\sigma_{\bar{x}}$ 可作为算术平均值不可靠性的评定标准, 即

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.3.20)$$

式中, $\sigma_{\bar{x}}$ 为算术平均值的标准差(均方根误差); σ 为测量列中单次测量的标准差; n 为测量次数。

由式(1.3.20) 可知, 在 n 次等精度测量中, 算术平均值的标准差为单次测量的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 。当测量次数 n 越大时, 算术平均值越接近被测量的真值, 测量精度也越高。

3. 测量的极限误差

测量的极限误差是极端误差, 误差超过极端误差的被测量的测量结果可以忽略。

(1) 单次测量的极限误差

测量列的测量次数足够多和单次测量误差为正态分布时, 随机误差正态分布曲线下的全部面积相当于全部误差出现的概率, 即

$$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 1 \quad (1.3.21)$$

而随机误差在 $-\delta$ 至 δ 范围内的概率为

$$P(\pm\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\delta}^{\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = \frac{2}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\delta} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (1.3.22)$$

引入新的变量 t

$$t = \frac{\delta}{\sigma}, \text{ 即 } \delta = t\sigma$$

经变换, 式(1.3.22) 变为

$$\begin{aligned} P(\pm t\sigma) &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t\sigma} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 2\Phi(t) \\ \Phi(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t\sigma} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \end{aligned} \quad (1.3.23)$$

函数 $\Phi(t)$ 称为概率积分。

若某随机误差在 $\pm t\sigma$ 范围内出现的概率为 $2\Phi(t)$, 则超出该误差范围的概率为

$\alpha = 1 - 2\Phi(t)$

表 1.3.1 给出了几个典型的 t 值及其相应的超出或不超出 $|\delta|$ 的概率(见图 1.3.3)。

表 1.3.1 几个典型 t 值的概率情况分析

t	$ \delta = t\sigma$	不超出 $ \delta $ 的概率 $2\Phi(t)$	超出 $ \delta $ 的概率 $1 - 2\Phi(t)$
0.67	0.67σ	0.4972	0.5028
1	1σ	0.6826	0.3174
2	2σ	0.9544	0.0456
3	3σ	0.9973	0.0027
4	4σ	0.9999	0.0001

由表 1.3.1 可见,随着 t 的增大,误差超出 $|\delta|$ 的概率减小得很快。当 $t = 2$,即 $|\delta| = 2\sigma$ 时,误差不超出 $|\delta|$ 的概率为 95.44%。当 $t = 3$,即 $|\delta| = 3\sigma$ 时,误差不超过 $|\delta|$ 的概率为 99.73%,通常把这个误差称为单次测量的极限误差 $\delta_{\lim x}$,即

$$\delta_{\lim x} = \pm 3\sigma \tag{1.3.24}$$

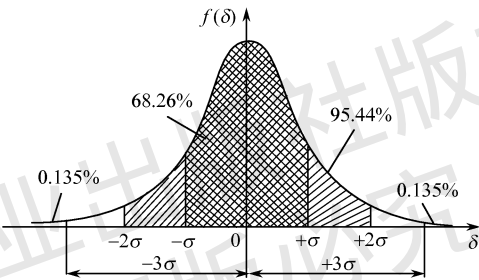


图 1.3.3 单次测量极限误差

(2) 算术平均值的极限误差

测量列的算术平均值与被测量的真值之差称为算术平均值误差 $\delta_{\bar{x}}$,即

$$\delta_{\bar{x}} = \bar{x} - A_0 \tag{1.3.25}$$

当多个测量列算术平均值误差 $\delta_{\bar{x}} (i = 1, 2, \cdots, n)$ 为正态分布时,根据概率论知识,同样得到测量列算术平均值的极限误差表达式为

$$\delta_{\lim \bar{x}} = \pm t\sigma_{\bar{x}} \tag{1.3.26}$$

式中, t 为置信系数; $\sigma_{\bar{x}}$ 为算术平均值的标准差。

通常取 $t = 3$,则

$$\delta_{\lim \bar{x}} = \pm 3\sigma_{\bar{x}} \tag{1.3.27}$$

可采用数字滤波的方法减小随机误差,具体请详见本书 10.1.2 节。

1.3.5 系统误差

1. 系统误差的发现

(1) 理论分析及计算

因测量原理或使用方法不当引入系统误差时,可以通过理论分析和计算的方法加以修正。

(2) 实验对比法

实验对比法是改变产生系统误差的条件进行不同条件的测量,以发现系统误差,这种方法适用于发现恒定系统误差。在实际工作中,生产现场使用的量块等计量器具需要定期送法定的计量部门进行检定,即可发现恒定系统误差,并给出校准后的修正值(数值、曲线、表格或公式等),利用修正值在相当程度上消除恒定系统误差的影响。

(3) 残差观察法

残差观察法是根据测量列的各个残差的大小和符号变化规律,直接由误差数据或误差曲线判断有无系统误差,这种方法主要适用于发现有规律变化的系统误差。

(4) 残差校核法

① 用于发现累进性系统误差。当累进性系统误差不比随机误差大很多时,可用马利科夫(М. Ф. МАЛИКОВ)准则进行判断。

马利科夫准则:设对某一被测量进行 n 次等精度测量,按测量先后顺序得到测量值 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 相应的残差为 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 。把前面一半和后面一半数据的残差分别求和,然后取其差值

$$M = \sum_{i=1}^k v_i - \sum_{i=k+1}^n v_i \quad (1.3.28)$$

式中,当 n 为偶数时,取 $k = n/2$; 当 n 为奇数时,取 $k = (n+1)/2$ 。

如果 M 近似为零,则说明测量列中不含累进性系统误差;如果 M 与 v_i 相当或更大,则说明测量列中存在累进性系统误差。

② 用于发现周期性系统误差。如果随机误差很显著,误差的周期性规律不易被发现,可用阿贝-赫尔默特(Abbe-Helmert)准则进行判断。

阿贝-赫尔默特准则:设

$$A = \left| \sum_{i=1}^{n-1} v_i v_{i+1} \right| \quad (1.3.29)$$

当存在

$$A > \sqrt{n+1} \sigma^2 \quad (1.3.30)$$

则认为测量列中含有周期性系统误差。

(5) 计算数据比较法

若对同一量独立测得 m 组结果,并知它们的算术平均值和标准差为

$$\bar{x}_1, \sigma_1; \bar{x}_2, \sigma_2; \dots; \bar{x}_m, \sigma_m$$

而任意两组结果之差为

$$\Delta = \bar{x}_i - \bar{x}_j$$

其标准差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2}$$

则任意两组结果 $\bar{x}_i$ 与 $\bar{x}_j$ 间不存在系统误差的标志是

$$|\bar{x}_i - \bar{x}_j| < 2 \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2} \quad (1.3.31)$$

2. 系统误差的削弱和消除

(1) 从产生误差源上消除系统误差

从产生误差源上消除误差是最根本的方法,它要求在产品阶段从硬件和软件方面采取必要的补偿和修正措施,或者采取合适的使用方法将误差从产生根源上加以消除。

(2) 引入修正值法

这种方法预先将被测量器具的系统误差检定或计算出来,作出误差表或误差曲线,然后取

与误差数据大小相同而符号相反的值作为修正值,将实际测量值加上相应的修正值,即可得到不包含该系统误差的测量结果。

(3) 零位式测量法

零位式测量法是标准量与被测量相比较的测量方法,其优点是测量误差主要取决于参加比较的标准器具的误差,而标准器具的误差可以做得很小。零位式测量要求检测系统有足够的灵敏度,在自动检测系统中广泛使用的自动平衡显示仪表就属零位式测量。

(4) 补偿法

下面结合实例说明补偿法原理。图 1.3.4 为用补偿法测量高频小电容的电路图。图中, E 为恒压源, L 为电感线圈, C_s 为标准可变电容, V 为高内阻电压表。图中 C'_0 是电感线圈自身分布电容,可以把它等效看作与电容 C_s 并联,这时为 C_0 。测量时,先不接入待测电容 C_x ,调节标准可变电容,通过电压表来观察电路谐振点,此时标准可变电容为 C_{s1} ;然后,把 C_x 接入 A、B 端,此时电路将失谐,调节标准可变电容,使电路仍处于谐振状态,此时标准可变电容为 C_{s2} 。显然,两次谐振回路的电容应相等,即

$$C_{s1} + C_0 = C_{s2} + C_0 + C_x \tag{1.3.32}$$

于是可得

$$C_x = C_{s1} - C_{s2} \tag{1.3.33}$$

由此可见,消除了恒定系统误差 C_0 的影响。

(5) 对照法

在一个检测系统中,改变测量安排,测出两个结果。将这两个测量结果互相对照,并通过适当的数据处理,可对测量结果进行改正,这种方法称为对照法,也称交换法。

下面以电桥为例说明如何采用对照法消除系统误差。如图 1.3.5 所示,用一个比较电桥和一个可调标准电阻 R_3 测量电阻 R_x ,设该电桥为等臂电桥,即 $R_1/R_2 = 1$ 。先按图 1.3.5(a) 安排,当电桥平衡时,有

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 \tag{1.3.34}$$

然后按图 1.3.5(b) 安排,设此时电桥不平衡,重新调节 R_3 ,使其值为 R'_3 ,使电桥又重新平衡,此时有

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R'_3 \tag{1.3.35}$$

将式(1.3.34)与式(1.3.35)相乘再开方,可得

$$R_x = \sqrt{R_3 R'_3}$$

由此可见,采用对照法可以消除 R_1 与 R_2 的系统误差而仅含有标准器具的误差。

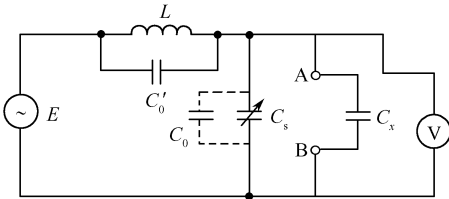


图 1.3.4 补偿法测量高频小电容的电路

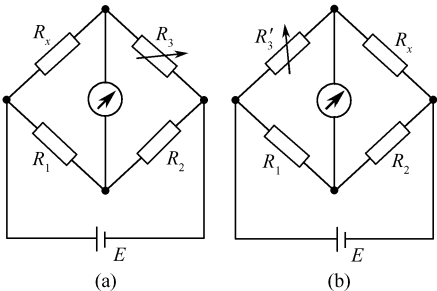


图 1.3.5 对照法消除系统误差

1.3.6 粗大误差

判别粗大误差最常用的统计判别法是 3σ 准则:如果对某被测量进行多次重复等精度测量的测量数据为

$$x_1, x_2, \dots, x_d, \dots, x_n$$

其标准差为 σ ,若其中某一项残差 v_d 大于 3 倍标准差,即

$$|v_d| > 3\sigma \quad (1.3.36)$$

则认为 v_d 是粗大误差,与其对应的测量数据 x_d 是坏值,应从测量列的测量数据中剔除。

需要指出的是,剔除坏值后,还要对剩下的测量数据重新计算算术平均值和标准差,再按式(1.3.36)判别是否还存在粗大误差。若存在粗大误差,剔除相应的坏值,再重新计算,直到产生粗大误差的坏值全部剔除为止。

1.3.7 测量不确定度

由于测量误差的存在,被测量的真值难以确定,从而测量结果带有不确定性。长期以来,人们不断追求以最佳方式估计被测量的值,以最科学的方法评估测量结果的质量高低。测量不确定度就是评定测量结果质量高低的一个重要指标。

1. 测量不确定度的定义与分类

(1) 测量不确定度的定义

测量不确定度表示测量结果(测量值)不能肯定的程度,是可定量地用于表达被测量测量结果分散程度的参数。这个参数可以用标准偏差表示,也可以用标准偏差的倍数或置信区间的半宽度来表示。

(2) 测量不确定度的分类

测量不确定度可以分为标准不确定度 u 、合成标准不确定度 u_c 和扩展不确定度 U 或 U_p 。

2. 测量不确定度与误差

测量不确定度和误差是误差理论中的两个重要概念,它们具有相同点,都是评价测量结果质量高低的重要指标,都可以作为测量结果的精度评定参数,但它们又有明显的区别。

误差是测量结果与真值之差,它以真值或约定真值为中心;而测量不确定度是以被测量的估计值为中心。因此误差是一个理想的概念,一般不能准确知道,难以定量;而测量不确定度是反映人们对测量认识不足的程度,是可以定量评定的。

在分类上,误差按自身特征和性质分为系统误差、随机误差和粗大误差,并可采取不同措施来减小或消除各类误差对测量的影响。但是由于各类误差之间并不存在绝对界限,故在分类判别和误差计算时不易准确掌握。测量不确定度不按误差性质分类,而是按评定方法分为 A 类评定和 B 类评定,按实际情况的可能性加以选用,从而简化了分类,便于评定与计算。

测量不确定度与误差既有区别,也有联系。误差是测量不确定度的基础,研究测量不确定度首先需要研究误差,只有对误差的性质、分布规律、互相联系及对测量结果的误差传递关系等有充分的认识 and 了解,才能更好地估计各测量不确定度分量,正确地得到测量结果的不确定度。用测量不确定度代替误差表示测量结果,易于理解,便于评定,具有合理性和实用性。

3. 标准不确定度的定义与评定

(1) 标准不确定度 u

以标准差表示的不确定度称为标准不确定度,用符号 u 表示。测量结果通常由多个测量数

据组成,对表示各个测量数据不确定度的偏差称为标准不确定度分量,用 u_i 表述。标准不确定度有 A 类和 B 类两类评定方法。

A 类标准不确定度是指用统计方法得到的不确定度,用符号 u_A 表示。

B 类标准不确定度是指用非统计方法得到的不确定度,即根据资料或假定的概率分布的标准差表示的不确定度,用符号 u_B 表示。

(2) A 类标准不确定度的评定方法

A 类标准不确定度的评定通常可以采用下述统计与计算方法。在同一条件下,对被测量 x 进行 n 次等精度测量,测量值为 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。该测量到的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 进而

可以算出算术平均值的标准差 $S(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$, 取 $u_A = S(\bar{x})$ 。

(3) B 类标准不确定度的评定方法

B 类标准不确定度评定方法是根据有关的信息来评定的,即通过一个假定的概率密度函数得到的。它通常不是利用直接测量获得数据,而是依次查证已有的信息获得,如仪器校准报告等。

B 类标准不确定度的评定:

$$u_B(x_i) = U(x_i)/k$$

式中, $u_B(x_i)$ 为 x_i 分量 B 类标准不确定度; $U(x_i)$ 为第 x_i 分量技术文件给出的不确定度; k 为技术文件给出的不确定度与标准差的倍数或指明的包含因子,其值与测量值 x_i 的统计分布有关,详见有关参考文献。

4. 合成标准不确定度的定义与评定

(1) 合成标准不确定度定义

由各不确定分量合成的标准不确定度,称为合成标准不确定度。当间接测量时,即测量结果是由若干其他量求得的情况下,测量结果的标准不确定度等于其他各量的方差和协方差相应和的平方根,用符号 u_c 表示。

(2) 合成标准不确定度的评定方法

设测量模型方程为: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_i)$, 它是一个多变量函数。若每个自变量彼此独立,且互不相关,则

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (1.3.37)$$

式(1.3.37) 称为合成标准不确定度。合成标准不确定度仍然是标准差,表示测量结果的分散性。

5. 扩展不确定度 U 或 U_p 的定义与评定

(1) 扩展不确定度 U 或 U_p 的定义

扩展不确定度是确定测量区间的量,被测量的值大部分可包含在此区间内。

(2) 扩展不确定度 U 或 U_p 的评定

① 采用乘以给定包含因子 k 的评定。在合成标准不确定度 $u_c(y)$ 确定以后,乘以一个包含因子 k ,即得扩展不确定度 U 为

$$U = ku_c(y) \quad (1.3.38)$$

式中, U 为扩展不确定度; $u_c(y)$ 为合成标准不确定度; k 为包含因子, $k = 2 \sim 3$ 。

② 乘以给定概率 p 的包含因子 k_p 的评定。在合成标准不确定度 $u_c(y)$ 确定之后, 乘以给定概率 p 的包含因子 k_p , 即得扩展不确定度 U_p 为

$$U_p = k_p u_c(y) \quad (1.3.39)$$

式中, U_p 是概率为 p 时的扩展不确定度, 一般用 U_{95} 或 U_{99} 表示; k_p 为给定概率 p 的包含因子。

6. 测量结果与测量不确定度的表示

测量结果仅是被测量的估计值。在等精度测量的情况下得到一组测量值, 首先修正系统误差, 然后计算出算术平均值 $\bar{x}$, 如果测量仪器的检定证书上提供了修正值 b , 则完整的测量结果应为算术平均值经过修正后的值, 即 $\bar{x} + b$ 。

当给出完整的测量结果时, 一般应报告其不确定度。报告应尽可能详细, 以便使用者能正确地利用测量结果。测量不确定度的表示形式有合成标准不确定度 $u_c(y)$ 、扩展不确定度 $U = ku_c(y)$ 或 $U_p = k_p u_c(y)$ 。因为涉及的内容较多, 限于篇幅, 在实际应用时可参阅有关文献。

1.3.8 数据处理的基本方法

所谓数据处理, 是指从获得数据起到得出结论为止的整个数据加工过程。常用的数据处理方法有列表法、作图法和最小二乘法拟合, 本节主要讨论最小二乘法拟合。

在科学实验和统计研究中, 常常要从一组测量数据求得变量间的最佳函数关系, 如从 n 组测量值 (x_i, y_i) 去求得变量 x 和 y 之间的最佳函数关系式 $y = f(x)$ 。从图形上来看, 这个问题就是在平面直角坐标系中, 从给定的 n 个点 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 求一条最接近这一组数据点的曲线, 以显示这些点的总趋向, 这一过程称为曲线拟合, 该曲线的方程称为拟合方程(回归方程)。

所谓最小二乘法原理, 是指测量结果的最可信赖值应在残差平方和为最小的条件下求出。在自动检测系统中, 两个变量间的线性关系是一种最简单也是最理想的函数关系。

设有 n 组实测数据 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$), 其最佳拟合方程为

$$Y = A + Bx \quad (1.3.40)$$

式中, A 为直线的截距, B 为直线的斜率。令

$$\varphi = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - A - Bx_i)^2 \quad (1.3.41)$$

根据最小二乘法原理, 要使 $\varphi = \sum_{i=1}^n v_i^2$ 为最小, 对 A 和 B 分别求偏导数, 并令其为零, 可得两个方程, 联立两个方程可求出 A 和 B 的唯一解。即

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial A} = \sum_{i=1}^n [-2(y_i - A - Bx_i)] = 0 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial B} = \sum_{i=1}^n [-2x_i(y_i - A - Bx_i)] = 0 \end{cases} \quad (1.3.42)$$

则得到下列正则方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i = nA + B \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i = A \sum_{i=1}^n x_i + B \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{cases} \quad (1.3.43)$$

解得

$$\begin{cases} A = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ B = \frac{n(\sum_{i=1}^n x_i y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \end{cases} \quad (1.3.44)$$

1.4 传感器的一般特性

在科学实验和生产过程中,需要对各种各样的参数进行检测和控制,这就要求传感器能感受被测非电量的变化,并将其转换成与被测量成一定函数关系的电量。传感器所测量的非电量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。传感器能否将被测非电量的变化不失真地变换成相应的电量,取决于传感器的基本特性,即输出-输入特性,它是与传感器的内部结构参数有关的外部特性。传感器的一般特性可用静态特性和动态特性描述。

1.4.1 传感器的静态特性

传感器的静态特性是指输入被测量不随时间变化,或随时间变化很缓慢时传感器的输出与输入的关系。如果不考虑传感器的迟滞和蠕变等因素,其静态特性可用以下多项式表示

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (1.4.1)$$

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

衡量传感器静态特性的重要指标是线性度、灵敏度、迟滞、重复性和精度等。

1. 线性度

传感器的线性度(又称非线性误差)是指传感器的输出与输入之间的线性程度。通常,为了方便标定和数据处理,理想的输出-输入关系应该是线性的。但实际传感器的特性大多是非线性的,如式(1.4.1)所示。各项系数不同,决定了特性曲线的具体形状各不相同。理想特性方程为 $y = a_1 x$, 是一条经过原点的直线,传感器的灵敏度为一常数。当特性方程中仅含有奇次非线性项,即 $y = a_1 x + a_3 x^3 + a_5 x^5 + \cdots$ 时,特性曲线关于坐标原点对称,且在输入量 x 相当大的范围内具有较宽的准线性。当非线性传感器以差动方式工作时,可以消除电气元件中的偶次分量,显著地改善线性范围,并可使灵敏度提高一倍。

传感器的静态特性曲线可通过实际测试获得。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,使传感器的输出-输入关系为线性或接近线性。但如果非线性项的幂次不高,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 1.4.1 所示,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,如图中的 ΔL ,取其中最大值与输出满量程值之比作为评价线性度的指标,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \tag{1.4.2}$$

式中, γ_L 为线性度; $\Delta L_{\max}$ 为最大非线性误差; $Y_{FS} = y_{\max} - y_{\min}$,为满量程输出。

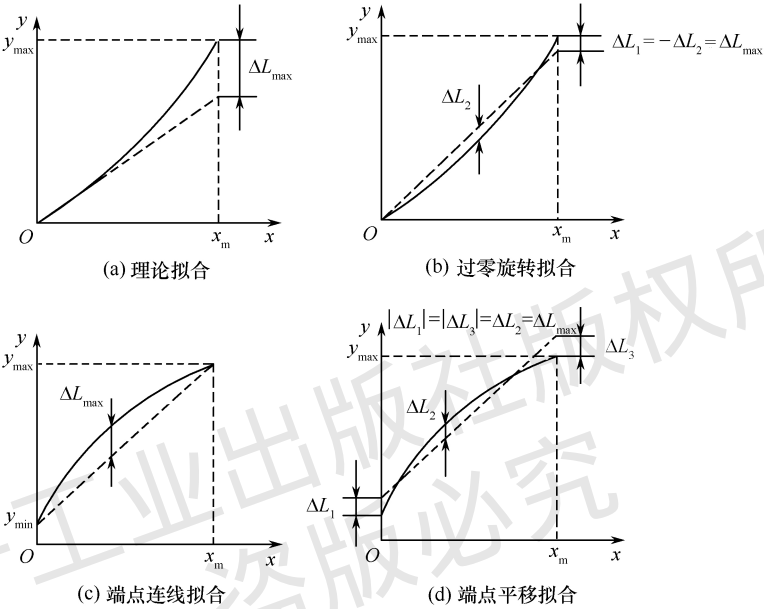


图 1.4.1 几种直线拟合方法

x — 传感器的输入量 y — 传感器的输出量 x_m — 输入最大值

由图 1.4.1 可见,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出的。因而,即使是同类传感器,基准直线不同,所得线性度也不同。选取拟合直线的方法很多,用最小二乘法求取的拟合直线的拟合精度最高。

可采用数字修正方法减小传感器的非线性误差,具体请详见本书 10.1.1 节。

2. 灵敏度

灵敏度是指传感器在稳态下的输出变化量 Δy 与引起此变化的输入变化量 Δx 之比,用 k 表示,即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{1.4.3}$$

它表征传感器对输入量变化的反应能力。对于线性传感器,灵敏度就是其静态特性的斜率,即 $k = y/x$ 为常数,而非线性传感器的灵敏度为一变量,用 $k = dy / dx$ 表示。传感器的灵敏度如图 1.4.2 所示。一般希望传感器的灵敏度高,在满量程范围内是恒定的,即传感器的输出-输入特性为直线。

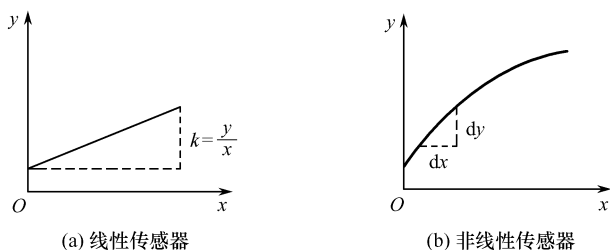


图 1.4.2 传感器的灵敏度

3. 迟滞

传感器在正(输入量增大)反(输入量减小)行程期间,其输出-输入特性曲线不重合的现象称为迟滞,如图 1.4.3 所示。也就是说,对于同一大小的输入信号,传感器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传感器敏感元件材料的物理性质和机械零部件的缺陷,例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 γ_H 的大小一般要由实验方法确定,用正反行程最大输出差值 $\Delta H_{\max}$ 或其一半对满量程输出 Y_{FS} 的百分比表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4.4)$$

或

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4.5)$$

式中, $\Delta H_{\max}$ 为正反行程输出值之间的最大差值。

4. 重复性

重复性 γ_R 指在同一工作条件下,输入量按同一方向做全量程连续多次变化时所得特性曲线不一致的程度,如图 1.4.4 所示。重复性误差属于随机误差,常用标准偏差表示,也可用正反行程中的最大偏差表示,即

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4.6)$$

或

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (1.4.7)$$

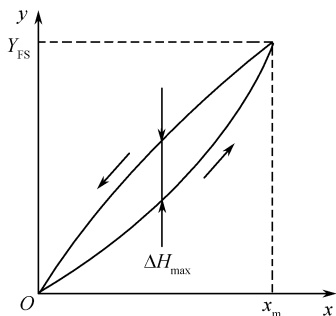


图 1.4.3 迟滞特性

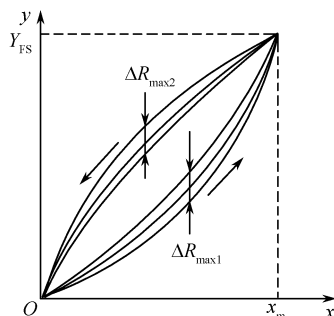


图 1.4.4 重复性

5. 精度

精度是反映系统误差和随机误差的综合误差指标,一般用方和根法或代数和法计算。用线性度、重复性和迟滞三项的方和根或简单代数和表示为

$$\gamma = \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_R^2 + \gamma_H^2} \quad (1.4.8)$$

或

$$\gamma = \gamma_L + \gamma_R + \gamma_H \quad (1.4.9)$$

其中,方和根法用得较多。

6. 零点漂移

传感器无输入时,每隔一段时间进行读数,其输出偏离零值,即为零点漂移,其值为

$$\frac{\Delta Y_0}{Y_{FS}} \times 100\%$$

式中, ΔY_0 为最大零点偏差; Y_{FS} 为满量程输出。 (1.4.10)

7. 温度漂移

温度漂移表示温度变化时,传感器输出值的偏离程度。一般以温度变化 1°C ,输出最大偏差与满量程的百分比表示,即

$$\frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS} \cdot \Delta T} \times 100\% \quad (1.4.11)$$

式中, $\Delta_{\max}$ 为输出最大偏差; ΔT 为温度变化值; Y_{FS} 为满量程输出。

1.4.2 传感器的动态特性

在实际测量中,大量的被测量是随时间变化的动态信号,这就要求传感器的输出不仅能精确地反映被测量的大小,还要正确地再现被测量随时间变化的规律。

传感器的动态特性是指传感器的输出对随时间变化的输入量的响应特性,反映输出值真实再现变化着的输入量的能力。对于线性系统,其数学模型可用常系数线性微分方程表示,即

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1.4.12)$$

式中, x 为传感器的输入量, y 为输出量, $a_i (i = 1, 2, \cdots, n), b_j (j = 1, 2, \cdots, m)$ 为常数。

相应的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.4.13)$$

一个动态特性好的传感器,其输出将再现输入量的变化规律,即具有相同的时间函数。实际上除具有理想的比例特性的环节外,由于传感器固有因素的影响,输出信号将不会与输入信号具有相同的时间函数,这种输出与输入之间的差异就是所谓的动态误差。研究传感器的动态特性主要是从测量误差角度分析产生动态误差的原因及改善措施。

由于绝大多数传感器都可以简化为一阶或二阶系统,因此一阶和二阶传感器是最基本的。研究传感器的动态特性可以从时域和频域两个方面,采用瞬态响应法和频率响应法进行分析。

1. 瞬态响应特性

在时域内研究传感器的动态特性时,常用的激励信号有阶跃函数、脉冲函数和斜坡函数

等。传感器对所加激励信号的响应称为瞬态响应。一般认为,阶跃输入信号对传感器来说是最严峻的工作状态。如果在阶跃函数的作用下,传感器能满足动态性能指标,那么在其他函数作用下,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传感器特性曲线的线性范围内。下面以传感器的单位阶跃响应评价传感器的动态性能。

(1) 一阶传感器的单位阶跃响应

设 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别为传感器的输入量和输出量,均是时间的函数,则一阶传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (1.4.14)$$

式中, τ 为时间常数; k 为静态灵敏度。

由于在线性传感器中灵敏度 k 为常数,在动态特性分析中, k 只起使输出量增加 k 倍的作用。因此,为方便起见,在讨论时采用 $k = 1$ 。

对于初始状态为零的传感器,当输入为单位阶跃信号时, $X(s) = 1/s$, 传感器输出的拉氏变换为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (1.4.15)$$

则一阶传感器的单位阶跃响应为

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.4.16)$$

响应曲线如图 1.4.5 所示。由图可见,传感器存在惯性,输出的初始上升斜率为 $1/\tau$,若传感器保持初始响应速度不变,则在 τ 时刻输出将达到稳态值。但实际的响应速度随时间的增加而减慢。理论上传感器的响应在 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。 τ 越小,响应曲线越接近于输入阶跃曲线,因此,一阶传感器的时间常数 τ 越小越好。不带保护套管的热电偶是典型的一阶传感器。

(2) 二阶传感器的单位阶跃响应

二阶传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.4.17)$$

式中, ω_n 为传感器的固有频率; ζ 为传感器的阻尼比。

在单位阶跃信号作用下,传感器输出的拉氏变换为

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (1.4.18)$$

对 $Y(s)$ 进行拉氏反变换,即可得到单位阶跃响应。图 1.4.6 为二阶传感器的单位阶跃响应曲线。由图可知,传感器的响应在很大程度上取决于阻尼比 ζ 和固有频率 ω_n 。 ω_n 取决于传感器的主要结构参数, ω_n 越高,传感器的响应越快。阻尼比直接影响超调量和振荡次数。 $\zeta = 0$, 为临界阻尼,超调量为 100%,产生等幅振荡,达不到稳态; $\zeta > 1$, 为过阻尼,无超调也无振荡,但反应迟钝,动作缓慢,达到稳态所需时间较长; $\zeta < 1$, 为欠阻尼,衰减振荡,达到稳态所需时间随 ζ 的减小而加长。 $\zeta = 1$ 时,响应时间最短。在实际使用中,为了兼顾短的上升时间和小的超调量,一般传感器都设计成欠阻尼式的,阻尼比 ζ 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传感器。

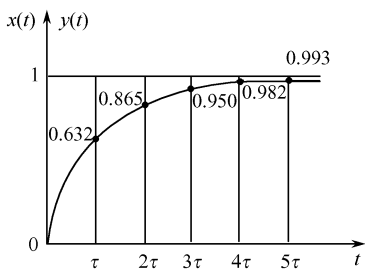


图 1.4.5 一阶传感器的单位阶跃响应曲线

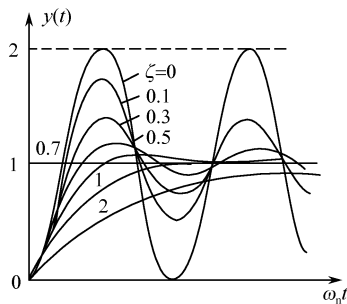


图 1.4.6 二阶传感器的单位阶跃响应曲线

(3) 瞬态响应特性指标

时间常数 τ 是描述一阶传感器动态特性的重要参数, τ 越小, 响应速度越快。

二阶传感器阶跃响应的典型性能指标如图 1.4.7 所示, 各指标定义如下:

- ① 上升时间 t_r , 输出由稳态值的 10% 变化到稳态值的 90% 所用的时间;
- ② 响应时间 t_s , 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;
- ③ 峰值时间 t_p , 阶跃响应曲线达到第一个峰值所需的时间;
- ④ 超调量 σ , 传感器输出超过稳态值的最大值 ΔA , 常用相对于稳态值的百分比 σ 表示, 即

$$\sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1.4.19)$$

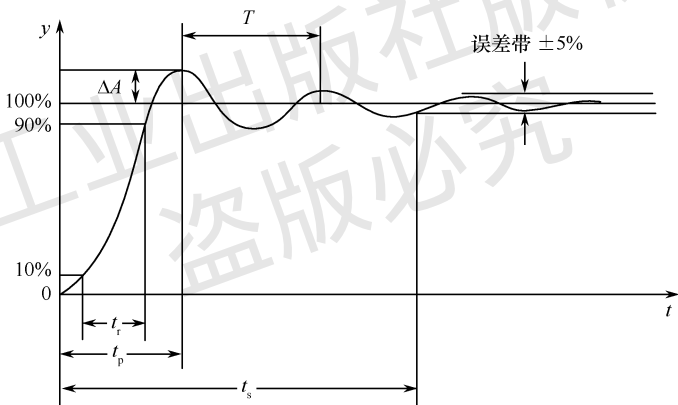


图 1.4.7 二阶传感器的动态性能指标

2. 频率响应特性

传感器对正弦输入信号的响应特性称为频率响应特性。频率响应法是从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性的方法。

(1) 零阶传感器的频率特性

零阶传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = k \quad (1.4.20)$$

频率特性为

$$H(j\omega) = k \quad (1.4.21)$$

由此可知, 零阶传感器的输出和输入成正比, 并且与信号频率无关。因此, 无幅值和相位失真问题, 具有理想的动态特性。电位器式传感器是零阶传感器的一个例子。在实际应用中, 一些

高阶系统在测量变化缓慢、频率不高的非电量时,都可以近似当作零阶系统。

(2) 一阶传感器的频率特性

将一阶传感器传递函数中的 s 用 $j\omega$ 代替,即可得到频率特性表达式

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \tag{1.4.22}$$

幅频特性
$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \tag{1.4.23}$$

相频特性
$$\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau) \tag{1.4.24}$$

图 1.4.8 所示为一阶传感器的频率响应特性曲线。

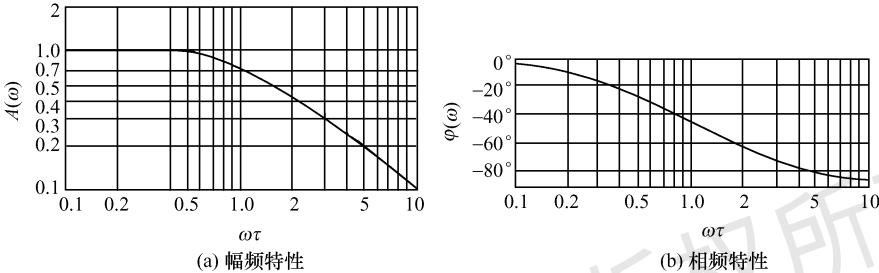


图 1.4.8 一阶传感器的频率响应特性曲线

从式(1.4.23)、式(1.4.24) 和图 1.4.8 可以看出,时间常数 τ 越小,频率响应特性越好。当 $\omega\tau \ll 1$ 时, $A(\omega) \approx 1, \varphi(\omega) \approx -\omega\tau$,表明传感器的输出与输入为线性关系,相位差与频率 ω 成线性关系,输出 $y(t)$ 比较真实地反映了输入 $x(t)$ 的变化规律。因此,减小 τ 可以改善传感器的频率特性。

(3) 二阶传感器的频率特性

二阶传感器的频率特性表达式、幅频特性、相频特性分别为

$$H(j\omega) = \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + 2j\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right]^{-1} \tag{1.4.25}$$

$$A(\omega) = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \tag{1.4.26}$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left[\frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right] \tag{1.4.27}$$

图 1.4.9 所示为二阶传感器的频率响应特性曲线。从式(1.4.26)、式(1.4.27) 和图 1.4.9 可以看出,传感器频率特性的好坏主要取决于固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。当 $\zeta < 1, \omega_n \gg \omega$ 时, $A(\omega) \approx 1, \varphi(\omega)$ 很小,此时,传感器的输出 $y(t)$ 再现输入 $x(t)$ 的波形。通常固有频率 ω_n 至少应大于被测信号频率 ω 的 3 ~ 5 倍,即 $\omega_n \geq (3 \sim 5)\omega$ 。

由以上分析可知,为了减小动态误差和扩大频率响应范围,一般应提高传感器的固有频率 ω_n ,但可能会使其他指标变差。因此,在实际应用中,应综合考虑各种因素来确定传感器的各个特征参数。

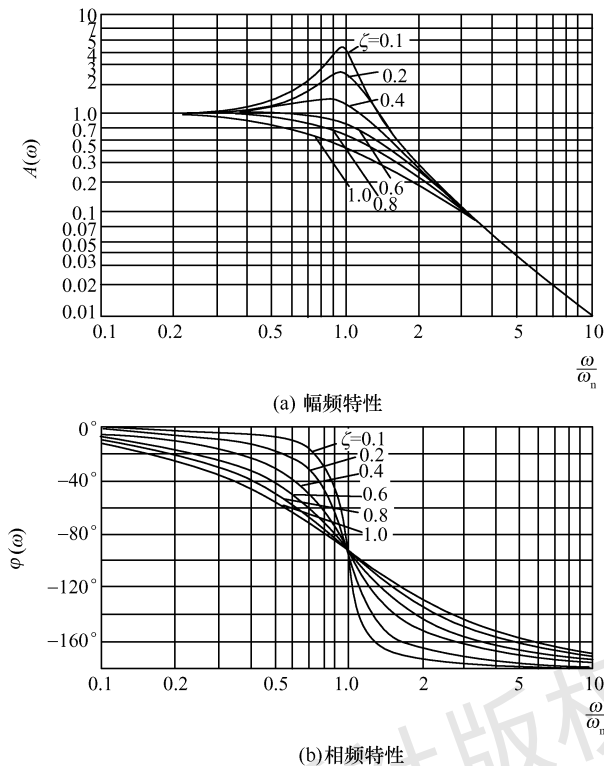


图 1.4.9 二阶传感器的频率响应特性曲线

(4) 频率响应特性指标

- ① 频带,传感器增益保持在一定值内的频率范围,即幅频特性曲线上幅值衰减 3dB 时所对应的频率范围,称为传感器的频带或通频带,对应有上、下截止频率。
- ② 时间常数 τ ,用时间常数 τ 表征一阶传感器的动态特性, τ 越小,频带越宽。
- ③ 固有频率 ω_n ,二阶传感器的固有频率 ω_n 表征了其动态特性。

可以采用动态补偿方法来提高传感器的动态响应速度,改善其动态特性,具体请详见本书 10.1.3 节。

1.5 传感器的标定和校准

任何一种新研制或生产的传感器在制造、装配完毕后都必须进行一系列试验,对其技术性能进行全面的检定,以确定传感器的实际性能。经过一段时间储存或使用的传感器也需对其性能进行复测。通常,在明确输出-输入对应关系的前提下,利用某种标准或标准器具对传感器进行标度称为标定;将传感器在使用中或储存后进行的性能复测称为校准。由于标定与校准的本质相同,本节以标定进行叙述。

传感器的标定是通过实验以建立传感器输入量与输出量之间的关系,同时确定出不同使用条件下的误差关系。

标定的基本方法是利用一种标准设备产生的已知非电量(如标准力、压力、位移等)作为输入量,输入待标定的传感器,得到传感器的输出量。然后将传感器的输出量与输入的标准量进行比较,从而获得一系列校准数据或标定曲线。有时输入的标准量利用标准传感器检测而得,这时的标定实质上是待标定传感器与标准传感器之间的比较。

传感器的标定工作可分为:① 新研制的传感器需进行全面技术性能的检定,用检定数据进行量值传递,同时检定数据也是改进传感器设计的重要依据;② 经过一段时间的储存或使用后对传感器的复测工作。这种再次标定可以检测传感器的基本性能是否发生了变化,判断其是否可以继续使用。对可以继续使用的传感器,若某些指标(如灵敏度)发生了变化,应通过再次标定对原数据进行修正或校准。

为了保证各种量值的准确一致,标定应按计量部门规定的检定规程和管理办法进行。工程测试所用传感器的标定应在与其使用条件相似的环境下进行。有时为了获得较高的标定精度,可将传感器与配用的电缆、滤波器、放大器等测试系统一起标定。有些传感器标定时还应十分注意规定的安装技术条件。

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的静态特性指标,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。

1.5.1 传感器的静态标定

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。所谓静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击(除非这些参数本身就是被测量)及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 $101 \pm 7\text{kPa}$ 的情况。

2. 标定仪器精度等级的确定

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,其次要选择与被标定传感器的精度要求相适应的一定精度等级的标准设备,最后才能对传感器进行静态特性标定。

标定步骤如下:

- ① 将传感器全量程(测量范围)分成若干等间距点;
- ② 根据传感器量程分点情况,由小到大一点一点地输入标准量值,并记录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减小,同时记录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,将得到的输出 - 输入测试数据用表格列出或作出曲线;
- 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。

因为各种传感器的结构原理不同,所以标定方法也不相同,下面以压力传感器为例说明传感器的静态标定方法。

4. 压力传感器的静态标定

用于动态测量的压力传感器,首先要进行静态标定。目前,常用的标定装置有:活塞压力计、杠杆式压力标定机和弹簧测力计式压力标定机。

图 1.5.1 是用活塞压力计对压力传感器进行标定的示意图。活塞压力计由校验泵(压力发生系统) 和活塞部分(压力测量系统) 组成。

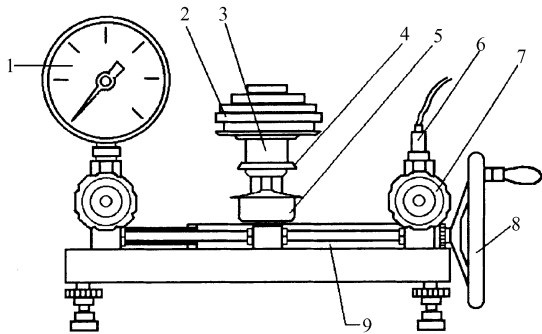


图 1.5.1 活塞压力计标定压力传感器示意图

1— 标准压力表 2— 砝码 3— 活塞 4— 进油阀 5— 油杯
6— 被标定传感器 7— 针形阀 8— 手轮 9— 手摇压力泵

活塞压力计是利用活塞和加在活塞上的砝码重量所产生的压力与手摇压力泵所产生的压力相平衡的原理进行标定工作的,其精度优于 $\pm 0.05\%$ 。

标定时,把传感器装在连接螺帽上。然后按照活塞压力计的操作规程,转动手摇压力泵的手轮,使托盘上升到规定的刻线位置。按所要求的压力间隔,逐点增加砝码重量,使压力计产生所需的压力,同时用数字电压表记下传感器在相应压力下的输出值。这样就可以得出被标定传感器的输出特性曲线,根据这条曲线可确定出所需要的各静态特性指标。

在实际测试中,为了确定整个测压系统的输出特性,往往需要进行现场标定。为了操作方便,可以不用砝码加载,而直接用标准压力表读取所加的压力。测出整个测试系统在各压力下的输出电压值或示波器上的光点位移量 h ,就可得到如图 1.5.2 所示的压力标定曲线。

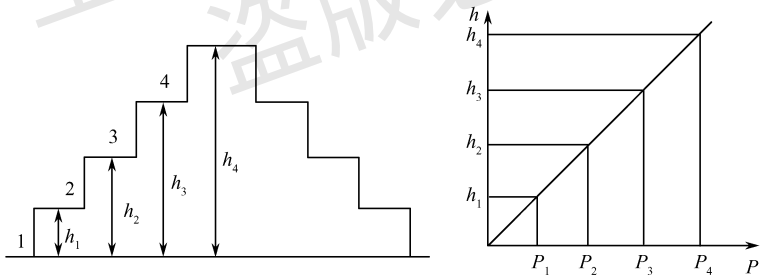


图 1.5.2 压力标定曲线

上述标定方法不适合压电式测压系统,因为活塞压力计的加载过程时间太长,致使传感器产生的电荷有泄漏,严重影响其标定精度。所以对压电式测压系统,一般采用杠杆式压力标定机或弹簧测力计式压力标定机。

为了保证压力传感器的测量准确度,需定期检定,检定周期最长不超过一年。

1.5.2 传感器的动态标定

1. 动态标定的一般方法

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

对传感器进行动态标定,需要对它输入一标准激励信号。为了便于比较和评价,常常采用阶跃变化和正弦变化的输入信号,即以一个已知的阶跃信号激励传感器,使传感器按自身的固有频率振荡,并记录下运动状态,从而确定其动态参量;或者以一个振幅和频率均为已知、可调的正弦信号激励传感器,根据记录的运动状态,确定传感器的动态特性。

对于一阶传感器,外加阶跃信号,测得阶跃响应之后,取输出值达到最终值的 63.2% 所经历的时间作为时间常数 τ 。但这样确定的时间常数实际上没有涉及响应的全过程,测量结果仅取决于某些个别的瞬时值,可靠性较差。如果用下述方法确定时间常数,可以获得较可靠的结果。

一阶传感器的单位阶跃响应函数为

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1.5.1)$$

令 $z = \ln[1 - y(t)]$, 则上式可变为

$$z = -\frac{t}{\tau} \quad (1.5.2)$$

式(1.5.2)表明 z 和时间 t 为线性关系,并且有 $\tau = -\Delta t / \Delta z$ (见图 1.5.3)。因此,可以根据测得的 $y(t)$ 作出 $z-t$ 曲线,并根据 $\Delta t / \Delta z$ 的值获得时间常数 τ 。这种方法考虑了瞬态响应的全过程。

二阶传感器($\zeta < 1$) 的单位阶跃响应为

$$y(t) = 1 - \left[\frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right] \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \arcsin \sqrt{1-\zeta^2}) \quad (1.5.3)$$

相应的响应曲线如图 1.5.4 所示,其中

$$M = e^{-\left(\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \quad (1.5.4)$$

或

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln M}\right)^2 + 1}} \quad (1.5.5)$$

因此,测得 M 之后,便可按式(1.5.5)求得阻尼比 ζ 。

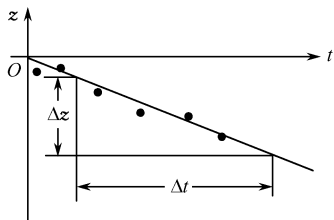


图 1.5.3 一阶传感器时间常数的求法

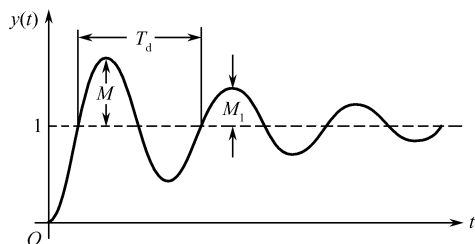


图 1.5.4 二阶传感器($\zeta < 1$) 的阶跃响应曲线

如果测得阶跃响应的较长瞬变过程,则可利用任意两个超调量 M_i 和 M_{i+n} 按式(1.5.6)求得阻尼比 ζ ,式中, n 是该两峰值相隔的周期数(整数)。

$$\zeta = \frac{\delta_n}{\sqrt{\delta_n^2 + 4\pi^2 n^2}} \quad (1.5.6)$$

式中

$$\delta_n = \ln \frac{M_i}{M_{i+n}} \quad (1.5.7)$$

当 $\zeta < 0.1$ 时,若考虑以 1 代替 $\sqrt{1-\zeta^2}$,此时不会产生过大的误差(不大于 0.6%),则根据式(1.5.6)可得

$$\sqrt{1-\zeta^2} = \sqrt{1 - \frac{\delta_n^2}{\delta_n^2 + 4\pi^2 n^2}} = \frac{2\pi n}{\sqrt{\delta_n^2 + 4\pi^2 n^2}} \approx 1 \quad (1.5.8)$$

由此可见 $\delta_n^2 \approx 0$,此时可用式(1.5.9) 计算 ζ ,即

$$\zeta = \frac{\ln \frac{M_i}{M_{i+n}}}{2n\pi} \quad (1.5.9)$$

若传感器是精确的二阶传感器,则 n 采用任意正整数所得的 ζ 值不会有差别;反之,若 n 取不同值获得不同的 ζ 值,则表明该传感器不是线性二阶系统。

根据响应曲线,不难测出振荡周期 T_d ,于是有阻尼的固有频率 ω_d 为

$$\omega_d = 2\pi \frac{1}{T_d} \quad (1.5.10)$$

则无阻尼的固有频率 ω_n 为

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1.5.11)$$

当然,还可以通过给传感器施加一个振幅和频率均为已知且可调的正弦激励信号,测定不同激励频率下输出和输入的幅值比和相位差,以确定传感器的幅频特性和相频特性。然后按照图 1.5.5 所示,根据幅频特性衰减 3dB(分贝)所对应的频率 ω ,求得一阶传感器的时间常数 τ ;按照图 1.5.6 所示的幅频特性,求得欠阻尼二阶传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。

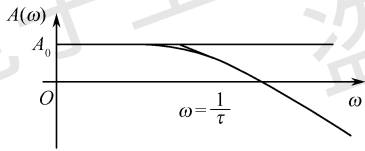


图 1.5.5 由幅频特性求时间常数 τ

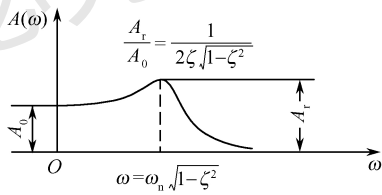


图 1.5.6 欠阻尼二阶传感器的 ω_n 和 ζ

下面仍以压力传感器为例说明传感器的动态标定方法。

2. 压力传感器的动态标定

压力传感器除进行静态标定外,还要进行某种形式的动态标定。对压力传感器进行动态标定,必须给传感器加一个特性已知的校准压力信号作为激励源,从而得到传感器的输出信号,经计算分析、数据处理,即可确定传感器的频率特性。

下面只介绍利用阶跃压力源进行动态标定的方法。产生阶跃压力有许多方法,其中激波管法是比较常用的方法。因为它能产生前沿很陡接近理想阶跃函数的压力信号,所以压力传感器在标定时广泛采用此方法。

激波管法具有以下 3 大特点:

- 压力幅度范围宽,便于改变压力值;
- 频率范围宽 (2kHz ~ 2.5MHz);
- 便于分析研究和数据处理。

此外,激波管结构简单,使用方便可靠,标定精度可达 $4\% \sim 5\%$ 。下面将分别介绍激波管工作原理、阶跃压力波的性质及标定方法。

(1) 激波管标定装置系统的工作原理

激波管标定装置系统如图 1.5.7 所示,由激波管、入射激波测速系统、标定测量系统及气源系统等组成。

① 激波管。激波管是产生激波的核心部分,由高压室 1 和低压室 2 组成。1 与 2 之间由铝和塑料膜片 3 隔开,激波压力的大小由膜片的厚度决定。标定时,根据要求对高、低压室充以不同的压缩空气,低压室一般为一个大气压,高压室充以高压气体。当高、低压室的压力差达到一定程度时,膜片爆破,高压气体迅速膨胀并冲入低压室,从而形成激波。这个激波的波阵面压力保持恒定,接近理想的阶跃波,并以超音速冲向被标定的传感器。传感器在激波的激励下按固有频率产生一个衰减振荡,如图 1.5.8 所示,其波形由采集系统记录下来用以确定传感器的动态特性。

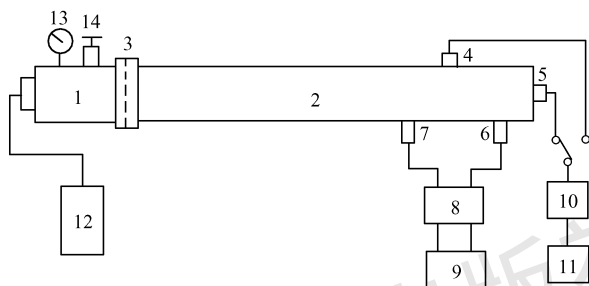


图 1.5.7 激波管标定装置系统

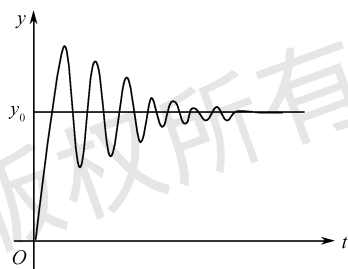


图 1.5.8 被标定传感器的输出波形

- 1—高压室 2—低压室 3—膜片 4—侧面被标定的传感器
5—底端面被标定的传感器 6,7—测速压力传感器
8—测速前置级 9—数字频率计 10—测压前置级
11—记忆示波器 12—气源 13—气压表 14—泄气门

激波管中压力波动情况如图 1.5.9 所示。图 1.5.9(a) 为膜片爆破前的情况, P_4 为高压室的压力, P_1 为低压室的压力。图 1.5.9(b) 为膜片爆破后稀疏波反射前的情况, P_2 为膜片爆破后产生的激波压力, P_3 为膜片爆破后高压室形成的压力, P_2 与 P_3 的接触面称为温度分界面, P_2 与 P_3 所在区域的温度不同,但其压力值相等。稀疏波就是在高压室内膜片爆破时形成的波。图 1.5.9(c) 为稀疏波反射后的情况,当稀疏波波头达到高压室端面时便产生稀疏波的反射,称为反射稀疏波,其压力减小为 P_6 。图 1.5.9(d) 为反射激波的波动情况,当激波压力 P_2 到达低压室端面时也产生反射,压力增大为 P_5 ,称为反射激波。 P_2 与 P_5 都是在标定传感器时要用到的参数,视传感器安装位置而定,当被标定的传感器安装在侧面时要用 P_2 ,当装在端面时要用 P_5 ,二者不同之处在于 $P_5 > P_2$,但维持恒压时间 τ_5 略小于 τ_2 。

计算压力的基本关系式为

$$P_{41} = \frac{P_4}{P_1} = \frac{1}{6} (7Ma - 1) \left[1 - \frac{1}{6} \left(Ma - \frac{1}{Ma} \right) \right]^{-7} \quad (1.5.12)$$

$$P_{21} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{6} (7Ma^2 - 1) \quad (1.5.13)$$

$$P_{51} = \frac{P_5}{P_1} = \frac{1}{3} (7Ma^2 - 1) \frac{4Ma^2 - 1}{Ma^2 + 5} \quad (1.5.14)$$

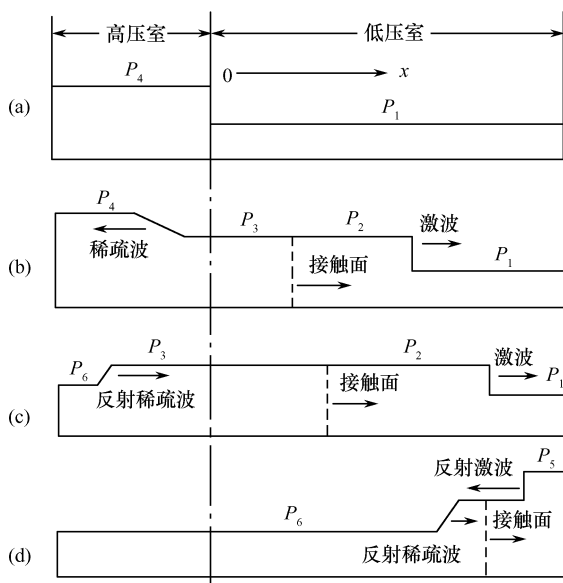


图 1.5.9 激波管中压力波动情况

(a) 膜片爆破前的情况 (b) 膜片爆破后稀疏波反射前的情况
(c) 稀疏波反射后的情况 (d) 反射激波的波动情况

$$P_{52} = \frac{P_5}{P_2} = 2 \frac{4Ma^2 - 1}{Ma^2 + 5} \quad (1.5.15)$$

入射激波的阶跃压力为

$$\Delta P_2 = P_2 - P_1 = \frac{7}{6} (Ma^2 - 1) P_1 \quad (1.5.16)$$

反射激波的阶跃压力为

$$\Delta P_5 = P_5 - P_1 = \frac{14}{3} (Ma^2 - 1) \frac{2Ma^2 + 1}{Ma^2 + 5} P_1 \quad (1.5.17)$$

式中, Ma 为激波的马赫数, 由入射激波测速系统决定。

以上基本关系式可参考有关资料。 P_1 可预先给定, 一般采用当地的大气压, 可根据公式准确地计算出来。因此, 上面各式中只要 P_1 及 Ma 给定, 各压力值便可计算出来。

② 入射激波测速系统。入射激波测速系统(见图 1.5.7) 由测速压力传感器 6 和 7、测速前置级 8 及数字频率计 9 组成。若测得激波的前进速度, 便可确定马赫数 Ma 。对测速压力传感器 6 和 7 的要求是一致性好, 尽量小型化。传感器的受压面应与激波管的内表面一致, 以免影响激波管内表面的形状。测速前置级 8 通常采用电荷放大器和限幅器以给出幅值基本恒定的脉冲信号, 数字频率计 9 若给出 $0.1\mu s$ 的时标即可满足要求。由两个脉冲信号去控制数字频率计的开、关门时间。入射激波的速度为

$$v = \frac{l}{t} \quad (\text{m/s}) \quad (1.5.18)$$

式中, l 为两个测速压力传感器之间的距离; t 为激波通过两个传感器间距所需的时间 ($t = \Delta t \cdot n$, Δt 为数字频率计的时标; n 为数字频率计显示的脉冲数)。

激波通常以马赫数表示, 其定义为

$$Ma = \frac{v}{v_T} \quad (1.5.19)$$

式中, v 为激波速度; v_T 为低压室在 $T(^{\circ}\text{C})$ 时的声速, 可用下式表示

$$v_T = v_0 \sqrt{1 + \beta T} \quad (1.5.20)$$

式中, v_0 为 0°C 时的声速 (331.36m/s); β 为常数, $\beta = 0.00366$ 或 $1/273$; T 为试验时低压室的温度 (室温一般为 25°C)。

③ 标定测量系统。标定测量系统由被标定的传感器 4 和 5、测压前置级 10 及记忆示波器 11 组成。被标定的传感器可以放在侧面位置上, 也可以放在底端面上。从被标定传感器来的信号通过电荷放大器加到记忆示波器上记录下来, 以备分析计算, 或通过计算机进行数据处理, 直接求得幅频特性及动态灵敏度等。

④ 气源系统。气源系统由气源 (包括控制台) 12、气压表 13 及泄气门 14 组成。它是高压气体的产生源, 通常采用压缩空气 (也可以采用氮气)。压力大小可通过控制台控制, 由气压表监视。完成测量后开启泄气门, 以便管内气体泄掉, 然后对管内进行清理, 更换膜片, 以备下次再用。

(2) 传感器动态参数的确定方法

传感器对阶跃压力的响应曲线是输出压力与时间的关系曲线, 所以又称为时域曲线。若传感器振荡周期 T_d 是稳定的, 而且振荡幅度有规律地单调减小, 则传感器 (或测压系统) 可以近似地看成二阶系统。在这种情况下, 可以根据试验获得的阶跃响应曲线, 按照本节前述方法确定传感器的固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ , 可求得压力传感器的幅频特性和相频特性分别为

$$A(\omega) = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (1.5.21)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \left[\frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right] \quad (1.5.22)$$

必须指出, 上面仅通过压力传感器介绍了静态标定与动态标定的基本概念和方法。由于传感器种类繁多, 标定设备与方法各不相同, 各种传感器的标定项目也远不止上述几项。此外, 随着技术的不断进步, 不仅标准发生器与标准测试系统在不断改进, 利用微型计算机进行数据处理、自动绘制特性曲线及自动控制标定过程的系统也已在各种传感器的标定中出现。

思考题与习题 1

1. 自动检测技术是自动化技术中的关键技术之一, 传感器是自动检测系统的重要组成部分。请问: 传感器处于自动检测系统的哪个环节? 为什么说没有传感器, 就没有控制?
2. 何为准确度、精密度、精确度? 并阐述其与系统误差和随机误差的关系。
3. 正态分布的随机误差有何特点?
4. 检定 2.5 级 (满量程误差为 2.5%)、满量程为 100V 的电压表, 发现 50V 刻度点的示值误差 2V 为最大误差, 问该电压表是否合格?

5. 为什么在使用各种指针式仪表时,总希望指针偏转在满量程的 $2/3$ 以上范围内使用?
6. 测量某电路电流共 5 次,测得数据(单位为 mA) 分别为:168.41,168.54,168.59,168.40,168.50,试求算术平均值和标准差。
7. 测量某物质中铁的含量为:1.52,1.46,1.61,1.54,1.55,1.49,1.68,1.46,1.83,1.50,1.56(单位略),试用 3σ 准则检查测量值中是否有坏值。
8. 在生产现场对某工序某加工零件进行检验,其检验结果的误差分布如图 1.1(a)、(b) 所示,试对图 1.1(a)、(b) 情况进行分析,并就提高该道工序加工质量提出工艺改进意见(说明:此题为应用误差理论解决工程实际问题,请查阅相关文献解答)。

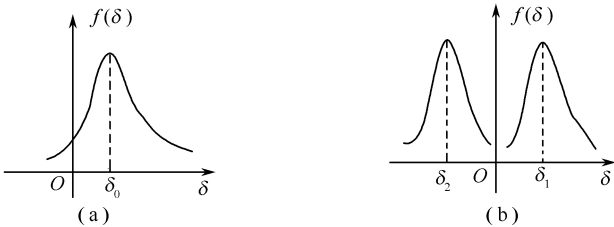


图 1.1 加工零件检验结果误差分布

9. 什么是传感器的静态特性?它有哪些性能指标?如何用公式表征这些性能指标?
10. 什么是传感器的动态特性?其分析方法有哪几种?
11. 已知某一位移传感器的测量范围为 $0 \sim 30\text{mm}$,静态测量时,输入值与输出值的关系如表 1.1 所示,试求该传感器的线性度和灵敏度。

表 1.1 输入值与输出值的关系

输入值(mm)	0	1	5	10	15	20	25	30
输出值(mV)	0.75	1.50	3.51	6.02	8.53	11.04	13.47	15.98

12. 某压力传感器的校验数据如表 1.2 所示,试用最小二乘法求非线性误差,并计算迟滞和重复性。

表 1.2 校验数据列表

压力 (MPa)	输 出 值(mV)					
	第 1 循环		第 2 循环		第 3 循环	
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
0	-2.73	-2.71	-2.71	-2.68	-2.68	-2.69
0.02	0.56	0.66	0.61	0.68	0.64	0.69
0.04	3.96	4.06	3.99	4.09	4.03	4.11
0.06	7.40	7.49	7.43	7.53	7.45	7.52
0.08	10.88	10.95	10.89	10.93	10.94	10.99
0.10	14.42	14.42	14.47	14.47	14.46	14.46

13. 在传感器动态特性标定中,为什么常常选择阶跃形式的标准非电量作为传感器的输入信号?
14. 用一个一阶系统测量 100Hz 的正弦信号,如幅值误差限制在 5% 以内,则时间常数应取多少?若用该系统测试 50Hz 的正弦信号,问此时的幅值误差和相位差为多少?
15. 设某力传感器可作为二阶振荡系统处理,已知传感器的固有频率为 800Hz,阻尼比 $\zeta = 0.14$,问使用该传感器测试 400Hz 的正弦力时,其幅值比 $A(\omega)$ 和相位差 $\varphi(\omega)$ 各为多少?若该传感器的阻尼比改为 $\zeta = 0.7$,问 $A(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 又将如何变化?
16. 什么叫传感器的标定?为什么要标定?

17. 何谓传感器的静态标定和动态标定?试述传感器的静态标定过程。
18. 传感器的线性度能否直接定为传感器的精度?并简述理由。
19. 在传感器动态特性试验中,用数字示波器采集传感器的输入和输出信号,试用 MATLAB 语言编制程序,计算传感器的幅频特性、模型参数和性能指标。
20. 有些传感器是用于计量系统的,有些传感器是用于控制系统的,对它们的测量准确度分别有何不同的要求?为什么?
21. 在传感器的性能指标中,有零点、零点漂移、温度漂移。请问零点与零点漂移有何不同?零点漂移与温度漂移有何不同?
22. 为什么在传感器的静态性能指标中放在首位的是线性度?简要介绍线性度指标的重要性。
23. 若传感器的非线性误差较大,但是,重复性误差也较大,这样的传感器能够通过微处理器进行软件修正或者校正吗?为什么?
24. 为什么动态标定时采用阶跃信号、脉冲信号和正弦信号作为输入信号?
25. 通过动态校准实验得到传感器的响应曲线,如何求性能指标?有哪些方法?

电子工业出版社版权所有
盗版必究