



第 1 章

测量的基础知识

为了实现对一种特定物理量的测量,需要涉及测量原理、测量方法和测量系统三个基本要素。

测量原理是指实现测量所依据的物理现象与物理定律的总体。例如,热电偶测温时所依据的热电效应,辐射测温时所依据的辐射定律,弹力测量时所依据的虎克定律等。

测量方法是指实现测量时所使用的技术方法。根据实现测量时所具有的不同特征,测量方法可分为电测法与非电测法、模拟量测量法与数字量测量法、单次测量法与多次测量法、等精度测量法与不等精度测量法、直接测量法与间接测量法以及偏差测量法与零位测量法等不同类型。

测量系统或测量仪器则是一种具有标定特性并用于测量的装置,它的输出量能够反映测量信息并直接通过显示装置被操作者所接受。测量系统一般由若干个测量装置与辅助装置所组成,它们之间具有通信联系,用来进行信息采集并发出便于传递、处理、显示或用于控制目的的信号。在现代检测技术中,测量系统与测量仪器之间在结构与功能上难以严格区分,因为现代测量仪器实际上也常是涉及多种学科领域的复杂系统。一个测量装置称之为系统或仪器都是相对的,在许多书中两种名称是等同的。

1.1 测量方法的类型

1.1.1 电测法与非电测法

两者的差别在于电测法的测量回路中有测量信息的电信号转换,而非电测法的测量回路中没有测量信息的电信号转换。在现代测量技术中一般都是尽量采用电测方法来测

量非电量,并称之为非电量电测法。广泛采用非电量电测法的原因是电测法可以对物理量遥测,实现远距离传输;可以将各种不同的物理量变换成电量形式,从而可使测量仪器规范化;容易对测量结果进行数字化,从而可以用计算机进行运算和数据处理;便于对信号进行放大,在输出端得到大功率信号和实现多量程测量以及可以获得很高的灵敏度与精度等优点。为了实现非电量的电测,首先必须有一种将非电量转换为电量的变换装置,这就是各种传感器,有的书中将传感器称为一次仪表。

1.1.2 模拟量测量法与数字量测量法

模拟量测量法与数字量测量法的差别是对测量信号在仪器中处理的方式和仪器输出信息的表达形式不同而言的。

在模拟量测量法中,被测量的大小与信号的大小之间有直接关系。测量结果所给出的不是数值,而是一个模拟量。与此相反,数字量测量法的特征则是测量装置能给出表示测量结果的数字数值,而且信号在仪器内也是以数字形式进行处理的。这两种根本不同的方法在信号处理和数据显示方面各有优缺点。图 1-1 给出了用模拟法和数字法表示测量结果的例子。

模拟法的优点是测量结果的表示比较直观,模拟仪表的指针运动或绘图记录仪所给出的信息要比打印机打出的数字序列形象得多、内容丰富得多。因此,在数据处理时有时也常常把数字结果绘制成模拟图形,这实际上相当于又把数字法转变为模拟法。

测量结果的数字处理方法的基础是数字运算,这种方法要比模拟法具有更高的精确度。

在读数方面,模拟法的测量结果需由操作人员读出,读数的精度事先不能确定,它取决于操作人员的分辨能力,所以模拟法的读数在理论上是含有误差的;而数字法的读数实际上是无误差的。

在数字法中,数据的处理是串行的,而且随着精度的提高,运算周期也迅速拉长,这是不利的方面。相反,模拟量的处理是连续的,因而大大改善了测量系统的动态特性,对于测量随时间而变化的物理量来说,即所谓动态测量情况来说,这一点特别重要。

当测量信号需要传输,特别是远距离传输时,数字法比模拟法更能保持信号的精度。因为模拟信号的传输品质在很大程度上依赖于电子元器件本身的漂移和噪声,以及线路中所产生的感生干扰。与此相反,脉冲或开关信号的计数则能忍受更大的外界干扰。

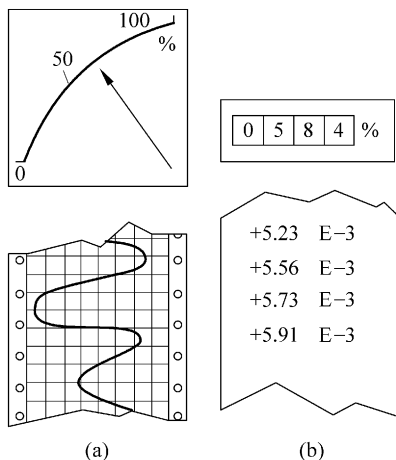


图 1-1 测量结果的表示方法

(a) 模拟法; (b) 数字法

1.1.3 单次测量法与多次测量法

单次测量法又称常规测量法,多次测量法又称统计测量法,它们之间的区别在于为得到一个量的测量结果所需进行的测量次数不同。单次测量法通过一次测量即可得到结果;而多次测量法的结果要通过对大量测量结果进行统计处理得到。

1.1.4 等精度测量法与不等精度测量法

假如对一个不变量的多次测量是在相同的条件下,由同一种仪器和同一个操作者进行,则这种测量方法称为等精度测量法;反之即为不等精度测量法。

1.1.5 直接测量法与间接测量法

直接测量法的特点是被测物理量的量值是通过与标准量具进行直接比较而得到。例如,物体的质量是通过与标准砝码(标准量具)的比较而得到;液体的黏度是通过与标准液体的黏度(标准黏度)进行比较而得到。

广义地说,所有用可直接读数的测量装置进行的测量都属于直接测量。例如用游标卡尺测量长度,用电压表测量电压,用弹簧或压强计测量压强等。因为从刻度盘或标尺上所读出的测量值就是测量结果,而刻度盘或标尺是经过标准量具标定过的,所以它们也是一种传递标准。

间接测量法的特点是被测物理量的值和若干其他物理量有一定的函数关系,并需要根据这个关系式计算后确定。例如,用活塞式压强计来测量压强时,要根据活塞的面积、砝码的重量和刻度盘的标定系数来算出被测压强值。再如,用雷达测距时,是通过发射脉冲的返回时间来计算出运动体的距离或速度。假如被测物理量 Y 与某些中间量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 之间有已知的函数关系,则间接测量法可用下式表示:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1-1)$$

式中,被测物理量 Y 的数值需要通过具有不同量纲的中间量 X_i 进行测量并经过换算得出。在实际测量中,当不可能直接测出物理量的量值,或直接测量很困难时,或用间接测量方法能获得更高的测量精度时,就要求使用间接测量方法。

设计间接测量方法的关键是找出被测量与中间量之间的物理规律以及设计相应的标定方法,为此要求设计人员有较深厚的理论基础知识、严密的逻辑思维和丰富的想像力。

1.1.6 偏差测量法与零位测量法

偏差测量法的特点是当被测量与标准量具进行比较时,比较装置本身会发生偏差或倾斜,据此给出被测量的数值(见图 1-2)。

图 1-3 是偏差测量法的结构原理图,其特点是由多个测量环节组成的串联开环回路。

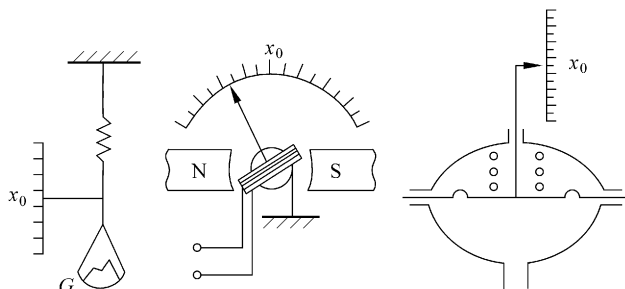


图 1-2 偏差测量法实例

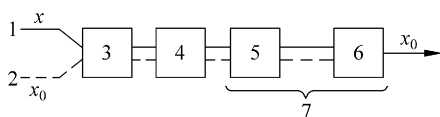


图 1-3 偏差测量法结构原理图

1—测量; 2—标度; 3—传感; 4—变换; 5—偏差形成; 6—度盘; 7—比较测量

偏差测量法的主要缺点是量程和测量精度两者之间不能兼顾,量程的扩大要降低量程低端的精度和灵敏度。例如在许多仪器中用经过标定的弹簧作为敏感元件,所以在在大偏差(即使用较大的弹簧)情况下,很难保证在弹簧力低端具有很高的精度与线性度。偏差法的另一个缺点是在测量时需要从测量系统中抽取一部分能量或功率,这会对被测量产生反作用,使被测量失真。最典型的例子是用电压表测量高阻抗电源输出电压。因此,使用偏差法时,必须明白刻度盘上所表示的测量信息有可能会失真(例如当弹簧的特性变化时或仪器零件变形时)。

零位测量法也称为平衡测量法,以此方法进行测量的仪器称为平衡式仪器。平衡式测量仪器的测量实例以及这种测量方法的特点如图 1-4 所示。仪器中是用标准量器所复现的量来平衡被测量的。不论被测量的大小如何,这两个量之间的差值总保持为微量,所以平衡式仪器总是工作在零域附近。这样就可得到较高的灵敏度并可消除在大偏差时经常出现的非线性。当仪器达到平衡状态时,零位法仪器无负载,所以也就不会对测量过程产生反作用。

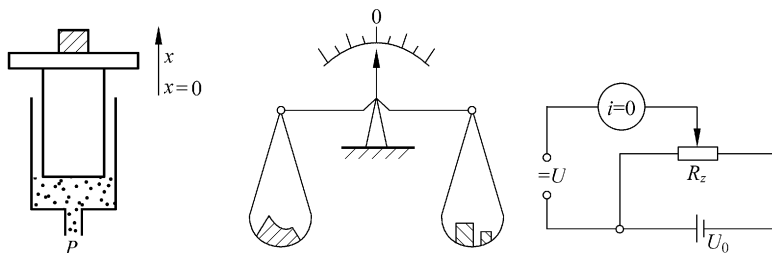


图 1-4 零位测量法实例

在零位法中,复制的标准量具可以在整个测量范围内平衡掉被测量,并显示出测量值。这种方法要求有较高精度的可调整的标准量具。

1.2 测量系统

测量系统或测量仪器是一种具有标定特性并用于测量的装置。它由若干个测量装置与辅助装置所组成,它的输出量能够反映测量信息并直接通过显示装置为操作者所接受。测量装置与辅助装置之间具有通信联系,用来进行信息采集并发出便于传递、处理、显示或用于控制目的的信号。

1.2.1 测量系统的类型

在工程应用或科学研究中,所测量的物理量范围很广。不同的物理量可以采用不同的测量原理、方法与设备来进行测量。对于某种特定的物理量,应当选用具有最为适当的测量方法与性能指标的测量系统。根据所测物理量的不同性质,测量系统可以分为:

(1) 长度计量仪器 这类仪器包括各种长度、角度测量仪器,如各种尺寸的量具、工具显微镜、测量仪、表面粗糙度和工件几何形状测量仪器及光电光波比较仪等。

(2) 力学计量仪器 这类仪器包括测力仪、压强计、硬度计、各种称重、测力传感器、力矩器、材料试验机以及振动测量仪器等。

(3) 热工计量仪器 这类仪器包括各种温度、压强和流量测量仪器,例如各种温度计,水、气、油的流量计,各种气压计,真空计等。

(4) 时间频率计量仪器 这类仪器中有各种计时仪器,例如石英钟、电子钟、铯原子时间频率基准器和各种频率计等。

(5) 电磁计量仪器 这类仪器中有电学量测量仪器,例如各种直流电压表、电流表、功率表、电容和电阻测量仪器;以及磁学量测量仪器,例如磁性材料测量仪和磁参量测量仪器等。

(6) 光学量计量仪器 这类仪器中有光度计、色度计、光谱辐射计、激光参数计量仪和光学传递函数测量仪等。

(7) 电离辐射计量仪器 这类仪器有放射性核素计量仪、X射线计量和中子计量仪器等。

(8) 标准物质计量仪器 这类仪器有标准物质测量、各种气体分析、有机分析、无机分析仪器等。

上面是按照被测基本物理量对仪器进行分类,还有许多测量导出量的仪器,例如从长度又可导出位移、速度、加速度,从力又可导出刚度等。

1.2.2 测量系统的结构原理

构成测量系统或测量仪器的核心是测量回路。测量回路是由许多测量与变换单元组合起来的总体。测量回路体现了设计测量系统所使用的测量原理与测量方法,并能满足测量任务对测量系统所提出的总体要求。根据测量回路的不同,测量系统的结构可以分为直接变换式系统和平衡变换式系统两种,见图 1-5。

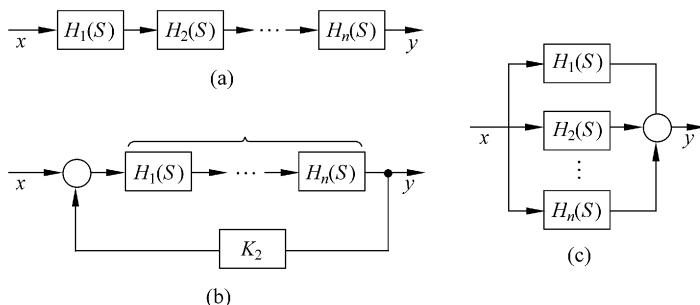


图 1-5 测量回路原理

(a) 直接变换式系统(串联); (b) 平衡变换式系统; (c) 直接变换式系统(并联)

1. 直接变换式测量系统

在大多数情况下,当敏感元件的能量不足以或不可以直接用于信号发送或用作输出信号时,则可采用在回路中串联或并联中间变换单元的方法对原始信号进行放大和调理,也可在测量回路中串联各种相应的功能单元以提高仪器的精度、可靠性或快速性等指标。

直接变换式测量系统的特征是其测量回路是开环的,测量回路的工作基于偏差测量法。根据测量回路中各测量变换单元连接方式的不同,直接变换式回路又可分为串联回路和并联回路两种,见图 1-5(a)和(c)。

串联直接变换式测量回路是测量系统中最常见的一种形式,其回路中各功能单元之间的连接要遵循两个原则。一是阻抗匹配原则,即前一级功能单元的输出阻抗应与下一级的输入阻抗相匹配,以保证从上一级传到下一级的功率为最大;二是空载原则,即下一级变换单元的输入阻抗应远大于上一级变换单元的输出阻抗,以保证信息的损耗为最小。目前在仪器设计中两个原则并存使用,但在精密仪器设计中,考虑到各功能单元之间能量交换的功率不大,故优先使用第二个原则。

直接变换式测量回路的优点是结构简单,工作性能可靠,灵敏度高,调节比较方便,尺寸、质量也比较小。但是由于它以偏差方式工作,所以这种回路的测量范围受到限制,抗干扰能力较弱,测量精度也不容易提高。

2. 平衡变换式测量系统

平衡变换式测量系统又称为伺服式测量系统,它的测量回路是具有反馈回路的闭环

系统。在测量系统中采用负反馈回路的目的是提高系统的测量精度与测量范围,同时改善系统的动态特性。反馈回路应在输出端上形成一个与一次仪表(敏感单元)输出信号性质相同的信号,所以应当是一种逆变换器,用以平衡或补偿掉一次仪表的输出。根据结构上的差异,平衡变换式测量系统又可分为有差平衡变换式和无差平衡变换式测量系统两种。

平衡变换式系统的优点是测量范围宽,抗干扰能力强,测量精度高,还能提高系统的动作快速性,即改善系统的动态特性。

1.3 测量系统的静态特性

测量系统的输入信号可能是常量,也可能是变量,系统对上述两类信号的反应是各不相同的。在测量过程中,系统或仪器自身也会产生固有运动,进行能量变换,例如膜盒或波纹管的变形、表头指针的偏转、水银的膨胀收缩、电路中电容器的充放电、继电器的开闭、测振仪的固有振动乃至模/数转换器的转换及 CPU 的数据处理等。这些运动都会使被测信号在幅值和相位两方面发生变化。根据仪器固有运动的速度和被测信号的变化速度之间的相对大小,测量过程可分为静态测量与动态测量。当被测量为常值或变化速度远小于(约一个数量级或更小)仪器的固有运动速度时,则称这种测量状态为静态测量;当被测量的变化速度和仪器的固有运动速度相当或更大时,则称为动态测量。所以仪器的性能也应当从静态与动态两个方面进行定义,即所谓仪器的静态特性和仪器的动态特性。

仪器的静态特性用仪器的输入量与输出量的稳定值之间的相互关系来表示,其数学模型为代数方程,不含有时间变量 t 。表示仪器静态特性的参数主要有标度特性、灵敏度、分辨率、重复性、准确度、线性度、变差、漂移等。

1. 标度特性

标度特性或标度函数表示测量系统的输入量与输出量之间的量值关系,即被测量与测量系统读数之间的函数关系。这种函数关系可以用数据表格列出,也可以用坐标曲线形式绘出,还可以用数学方程式 $y=f(x)$ 给出,式中 x 表示被测量, y 表示读数。这种由数学方程式给出的标度特性称为标度函数。

标度特性可分为线性与非线性两种。线性标度特性可用一次代数方程来表示,它的几何表示是直线。非线性标度特性用高次或超越方程表示,它的几何表示是曲线。从检测效果来看,总是希望测量系统具有线性标度特性。但是,由变换单元的物理特性所决定,也经常会遇到非线性标度特性。这时就要在测量系统中引入一个线性校正环节,用以补偿标度特性的非线性,以期达到测量系统标度特性的线性化。

2. 灵敏度

灵敏度 S 是仪器在静态条件下输出量的变化 Δy 与相应的输入量变化 Δx 的比值。

如果输入和输出都是不随时间变化的常量(或变化极慢,在所观察的时间间隔内可近似为常量),且它们之间的关系式为

$$y = \frac{b_0}{a_0}x = kx \quad (1-2)$$

式中,斜率 $k = b_0/a_0$ 为常数。在这种情况下,仪器的灵敏度 S 就等于特性曲线的斜率,见图 1-6(a),即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y}{x} = \frac{b_0}{a_0} = \text{常数} \quad (1-3a)$$

当特性曲线非线性关系时,见图 1-6(b),灵敏度的表达式为

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (\Delta y / \Delta x) = dy/dx \quad (1-3b)$$

即灵敏度是标度特性的导数,它表示单位被测量的变化所引起的测量系统输出值的变化。

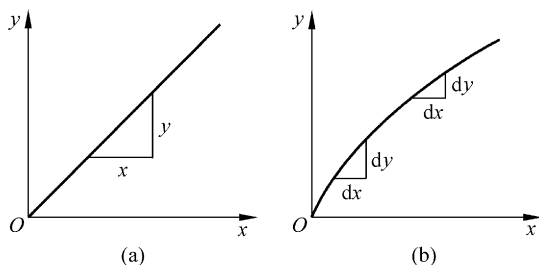


图 1-6 静态灵敏度的确定

(a) 线性关系; (b) 非线性关系

一般情况下,灵敏度是一个有因次的量。因此在讨论测量系统的灵敏度时,必须确切地说明它的因次。例如,位移传感器的被测位移的单位是 mm,输出量的单位是 mV,故位移传感器的灵敏度单位是 mV/mm。有些仪器的灵敏度表示方法和定义相反,例如记录仪及示波器的灵敏度常表示为 V/cm,而不是 cm/V。

假如测量仪器的输入与输出为同一形式的物理量(例如电压放大器),则常用“增益”这个名词来取代灵敏度的概念。

上述定义与表示方法都是指绝对灵敏度。另一种实用的灵敏度表示方法是相对灵敏度,相对灵敏度 S_r 的定义为

$$S_r = \frac{\Delta y}{\Delta x/x} \quad (1-4)$$

式中, Δy 表示输出量的变化; $\Delta x/x$ 表示输入量的相对变化。相对灵敏度表示测量系统的输出变化量对于被测输入量的相对变化量的变化率。

在实际测量中,被测量的变化有大有小,在要求相同的测量精度条件下,被测量越小,则所要求的绝对灵敏度越高。但如果用相对灵敏度表示,则不管被测量的大小如何,只要相对灵敏度相同,测量精度也相同。

测量系统除了对有效被测量敏感之外,还可能对各种干扰量有反应,从而影响测量精度。这种对干扰量有反应的灵敏度称为有害灵敏度,例如应变传感器的横向效应就是有

害灵敏度引起的。在设计测量系统时,总是设法使有害灵敏度降到最低限度。

许多测量单元的灵敏度是由其物理属性或结构所决定的。人们常常追求高灵敏度,但灵敏度和稳定性是相互矛盾的,不适当地提高灵敏度常会导致仪器工作稳定性的下降。另外,提高灵敏度还会缩小仪表的量程。

3. 分辨率

分辨率 Δr 是测量系统对被测量的最小变化量的反应能力。它用测量系统输出的最小变化量所对应的被测量的值来表示。例如,人眼所能观察到的最小的模拟量仪表的指针偏移量为 0.3mm,最小的示波器的变化为 0.5mm。对数字仪表来说,分辨率则为显示值的最末位的一个数字。再如,某测力系统的灵敏度为 $S=10\text{mm/kg}$,用模拟量仪表显示读数,则它的分辨率为

$$\Delta r = \Delta y / S = 0.3\text{mm} / (10\text{mm/kg}) = 0.03\text{kg} \quad (1-5)$$

为了保证测量系统的测量准确度,工程上规定:测量系统的分辨率应小于允许误差的 1/3、1/5 或 1/10。为此,可以通过提高仪器的敏感单元的增益的方法来提高分辨率。例如,使用放大镜可以比裸眼更清晰地观察刻度盘相对指针的刻度值,用放大器放大测量信号等。提高分辨率相对而言是比较方便的,因为在仪器的设计中提高增益不成问题。因此,尽管测量仪器必须有足够高的分辨率,但这还不是构成良好仪器的充分条件。分辨率的大小应能保证在稳态测量时仪器的测量值波动很小。分辨率过高会使信号波动过大,从而会对数据显示或校正装置提出过高的要求。一个优秀的设计应使其分辨率与仪器的功用相匹配。

4. 重复性

重复性表示测量系统在同一工作条件下,输入量按同一方向做全量程多次(三次以上)测量时,对于同一个输入量其测量结果不一致的程度。在工程中还习惯用“精密度”这个术语来表达重复性,但许多新的标准中已经不再使用这个术语。

重复性 b 用输入与输出特性曲线的最大偏差 $\Delta_{\max}$ (见图 1-7) 对量程的百分比来表示,即

$$b = \frac{\Delta_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中, A 为量程。

5. 准确度

准确度是指测量仪器的指示接近被测量真值的能力。准确度是误差和线性度等参数的综合。

准确度可以用输出单位来表示,例如温度表的准确度为 $\pm 1^\circ\text{C}$,千分尺的准确度为 $\pm 0.001\text{mm}$ 等。但大多数测量仪器或传感器的准确度是用无量纲的百分比误差或满量程百分比误差来表示,即

$$\text{百分比误差} = \frac{\text{指示值} - \text{真值}}{\text{真值}} \times 100\% \quad (1-7)$$

在工程应用中多以仪器的满量程百分比误差来表示,即

$$\text{满量程百分比误差} = \frac{\text{指示值} - \text{真值}}{\text{最大量程}} \times 100\% \quad (1-8)$$

准确度表示测量的可信程度,准确度不高可能是由于仪器本身或计量基准的不完善两方面的原因造成的。指针式电压表的指针弯曲后,其分辨力和重复性与指针未弯曲之前相同,但电压的指示对于真值却有偏差。

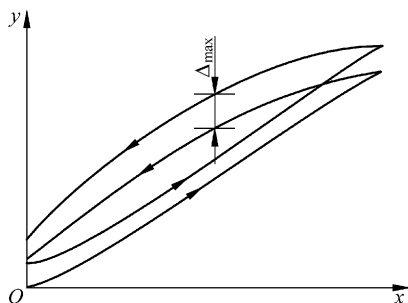


图 1-7 重复性

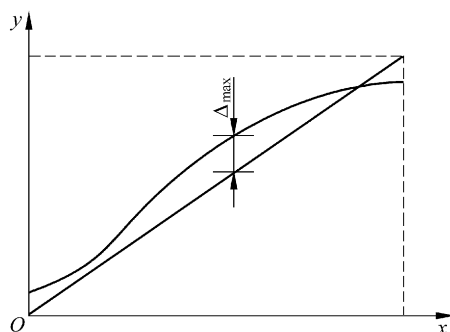


图 1-8 实际输入输出特性曲线对理想线性输入输出特性曲线的最大偏差

6. 线性度

线性度 α 是指测量系统的实际输入输出特性曲线对于理想线性输入输出特性曲线的接近程度或偏离程度。它用实际输入输出特性曲线对理想线性输入输出特性曲线的最大偏差量(见图 1-8)对满量程的百分比来表示,即

$$\text{线性度 } \alpha = \frac{\Delta_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中, A 为量程; $\Delta_{\max}$ 为最大偏差。

理想特性直线(也常称拟合直线)的选取方法一般可分为最佳直线、零基最佳直线和端基直线等,通常以零基最佳直线使用的最多。

所谓最佳直线是指用最小二乘法拟合得到的直线。所谓零基最佳直线就是过坐标零点的最佳直线。大多数测量系统当输入为零时其输出也为零,所以在工程测量中零基最佳直线最为常用。所谓端基直线是指连接量程的上限与下限,即连接两个端点所画出的直线(见图 1-8)。拟合直线的斜率常称为名义标定系数。

仪器的非线性通过标定实验确定,假如实验数据具有随机性质,则只能以标准偏差或其他统计特性来表示。

7. 变差

变差也称为回归误差或滞后,是指当输入量按不同方向往返做全量程变化时对应于