

35. 测试技术

35.1 基本知识

35.1.1 有关测量的一些概念

(1) 测量

将被测量(参数或物理量)与具有工程单位的标准量进行比较后,得出具有一定误差和单位的量,此过程称为测量。

(2) 真值

就每一个物理量而言,都存在一个客观上的确切的量值,就是它的真值。通常一个物理量的真值不是轻易就可知道的,人们需要去测定它,这也是测试工作者的任务。但在实际工作中,由于测试仪器、测量方法、环境条件、人的观察力等都不能达到完美无缺的程度,故真值是无法测得的。

(3) 测量误差

所获得的测量值与真值之差值。将测量值 x_i 与真值 μ 之间的差值称为绝对误差 $\Delta x_i = x_i - \mu$; 而绝对误差 Δx_i 与真值的比值的百分数称为相对误差 $r = (\Delta x_i / \mu) \times 100\%$ 。与绝对误差相比,相对误差能对测量结果提供更可靠的评价。

(4) 测量的准确度、精密度和精确度

测量的准确度指的是测量中所得的测量值与真值相符合的程序。二者之间的差值越小就表示准确度越高,测量值可信程度就越高。

测量的精密度指的是在相同条件下进行多次测量,所得测量值之间互相符合的程度;它体现了测量值离散的程度。

测量的精确度表征着测量的准确度和精密度综合影响的程度。

对于具体的测量而言,准确度高的不一定精密度高;精密度高的准确度也不一定高。但精确度高的则准确度和精密度一定都高。今以靶上的弹着点为例来说明:如图 35.1-1 所示,(a) 图为准而不精的情况;(b) 图为准而不精;(c) 图为准又精的情况。

(5) 引用误差

它是仪器、仪表示值的相对误差。在量程范围内某一点的示值与真值(或标准值)之差 Δx_i (即绝对误

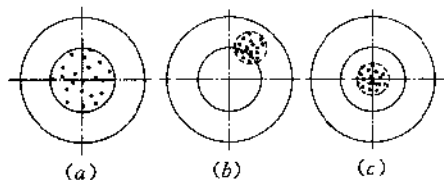


图 35.1-1 准确度、精密度和精确度说明图例

差)与满量程值 x_m 之比的百分数称为引用误差 r_n

$$r_n = (\Delta x_i / x_m) \times 100\%$$

通常以最大引用误差 r_m (又称为最大允许误差)来表示仪表的最大不精确度。它等于仪表各示值中最大的绝对误差 Δx_m 与满量程值 x_m 之比的百分数,即

$$r_m = (\Delta x_m / x_m) \times 100\%$$

此 r_m 是用来判别仪表是否合格的主要依据。习惯上将此最大引用误差称为仪表的“精度”。以它来划分仪表的“精度”等级。常用的测量仪器、仪表的“精度”等级 $r_m = \pm a\%$ 分为

$$a = 0.1, 0.2, (0.35), (0.4), 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4$$

精度等级都标明在仪表的刻度盘或面板上,其符号为:①、④……例如 1 级精度的仪表,就是说它所测出的值的最大绝对误差为该仪表满量程值的 $\pm 1\%$ 。

(6) 被测量的三种典型状态

静态 参数不随时间而变化,即处于静止状态。如静扭矩、恒值力负载、标定压力传感器时要求施加的标准静压力值等,如图 35.1-2(a)所示。

稳态 参数变化规律不随时间而变化的状态。如围绕某平衡点的等幅振荡、恒转速、等加速运动等,如图 35.1-2(b)所示。静态可视为稳态的一种特例。

瞬态(或称暂态) 它是两个稳态之间的过渡状态;是寻找平衡点的过程,如图 35.1-2(c)所示。

(7) 模拟量信号与数字量信号

所谓模拟量信号指的是随时间连续变化的,并能直接表现出大小和极性的信号。如正弦变化的电压、仪表指针的偏移等。而数字量信号指的是不连续的、量化了的离散信号,如 BCD 编码信号。

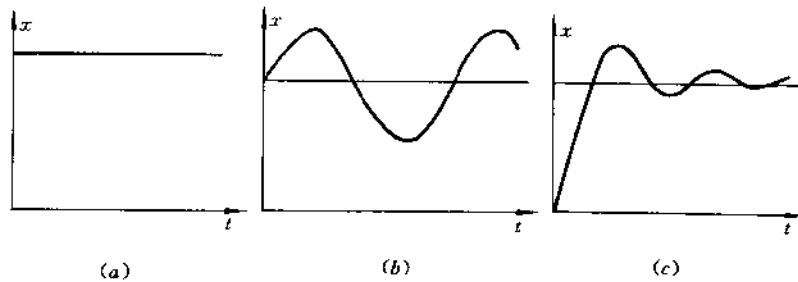


图 35.1-2 被测量三种典型状态曲线

35.1.2 测量系统

(1) 测量链与测量系统

从被测量开始到获得所要求的测量结果的最终表达形式止,在此过程中测量信号要经过许多中间环节(包括信号的传递、转换、存储、处理等),形成了一个完整的测量链。而构成测量链的各环节可分别由一系列的、独立的测量元件和仪器组成。

测量系统就是组成一个完整的测量链所需元件、仪器的总称。根据它所能接受(或能识别)的信号型式分为模拟量系统和数字量系统。以往的测量系统大都是模拟量系统。各种参数传感器转换的输出信号也是随时间连续变化的电信号,然后由测量系统变成人能感觉到的指针偏转、记录曲线等。随着计算技术的发展,大量出现了数字式测量仪器,它们能实现试验数据的直接数字显示、打印和输往计算机进行处理等。从数据的可靠性、测量速度和精度等方面看,数字量系统较之模拟量系统有很大提高;但它只能识别数字量信号,要求采用数字式传感器;或将模拟量信号通过模一数(A/D)转换器变成数字量信号。

(2) 理想的测量系统

理想的测量系统应该是一个线性定常系统(或称线性时不变系统),它应具有如下性质:

齐次性 当系统的输入信号扩大某常数倍时,系统的输出信号等于原输出信号的常数倍。

叠加性 输入信号之和所对应的输出信号等于各信号单独输入时所引起的输出信号之和。

频率保持性 系统的输出信号中所包含的频率成分一定与输入信号所含频率成分相同。系统只能改变信号的振幅和相位。这是线性定常系统一个很重要的性质。

若一个测量系统具备了这三条基本性质,那就是理想的测量系统。系统的输入点(激励点)所感受的信

号就是被测量,而其输出点(响应点)上所获得的信号就是测量结果。它所完成的测量任务就是要用其输出信号去确认或去估计输入的被测量。可见为了精确、可靠地进行测量,要求测量系统本身既要有不失真地传输信号的能力,还应有较强的抗外界干扰和自己不产生干扰的能力。实际测试工作中所研究的测量系统应该是尽可能准确、真实地反映被测量,达到理想化的程度。测量系统质量的优劣将直接影响测量任务的完成。为此就要对它作出评价,而评价和比较的标准就是公认的一些特性参数和品质指标。

(3) 测量系统的特性

A. 静态特性

与时间无关的特性称为静态特性。当测量系统处于规定的静态条件下(如规定的周围环境温度、湿度、大气压等),给系统输入不同的标准量(或恒值输入量),实测与之相应的系统输出量,所得到的输出与输入量之间的关系就是静态特性。获取静态特性的过程就是静态标定;所绘制的输出与输入量之间的关系曲线就是静态特性曲线,或静态标定曲线。由曲线上可得到的静态特性指标有:

灵敏度 它等于单位输入量的变化所对应的输出量的变化;或输出量的增量 Δy 与对应的输入量增量 Δx 之比

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

若特性曲线为直线时,显然灵敏度为常数。灵敏度是有量纲的,为输出量与输入量量纲之比。

线性度 它表示实测的静态特性曲线与理想的拟合直线(或称参考直线)接近的程度。也可以说是输出量与输入量之间保持一定比例关系的程度。由于参考直线的确定方法不同,故线性度有不同的称谓。参考直线一般有三种确定的方法:

- 端点直线与端点线性度、端点系指与量程的

上、下限对应的标定数据点。通常以零点输出值作为起点,满量程输出值为终点,此两端点的连线称为端点直线。以它作为参考直线与静态特性曲线比较所得的线性度称为端点线性度,如图 35.1-3(a)所示。

$$L = (B/A) \times 100\%$$

式中: L 为线性度; B 是静态特性曲线偏离参考直线的最大值; A 是标定时的最大输出值。一般是以输出量作为特征量的,即 B 和 A 都是输出量。同样也可以输入量作为特征量来求取线性度。

• 端点平移直线与“独立”线性度 (Independent linearity)。在端点直线的基础上,作两条与端点直线

平行的直线,使它们正好包围所有的静态标定数据点 (或静态特性曲线),然后再作一条直线通过两平行线之间的中点。可见实测的静态特性曲线相对于此中点直线的最大正、负偏差值是相等的 ($C = D$)。称此中点直线为端点平移直线,以它作为参考直线所获得的线性度称为“独立”线性度,如图 35.1-3(b)所示。

• 最小二乘直线和最小二乘线性度。根据静态标定所得数据,按最小二乘法原理拟合的直线称为最小二乘直线。它与实测静态特性曲线上各点的偏差 Δx_i 的平方和为最小。若以此拟合直线作为参考直线,与静态特性曲线比较所得的线性度称为最小二乘线性度。

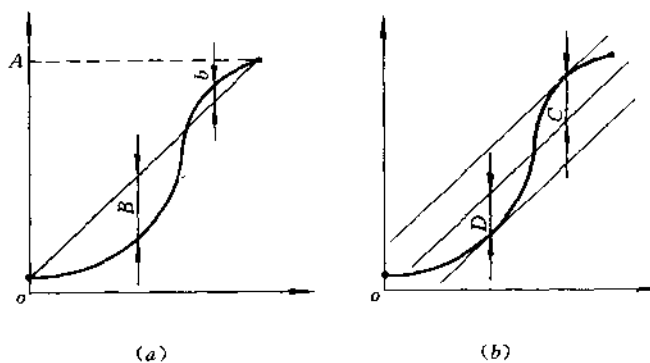


图 35.1-3 端点直线与端点平移直线

滞环 当输入量变化一个工作循环,即由零逐渐增大到正的某规定值或正额定值后,又逐渐减小至零;再由零减小到负的某规定值或负额定值后,又逐渐增加至零这样一个工作循环,测出输出量随之变化的情况。根据所测得的数据绘制的上升曲线与下降曲线不

重合的现象称为滞后效应。此现象产生的原因,主要是由于摩擦、滞后阻尼及磁性材料的磁滞特性等造成的。图 35.1-4(a)所示为只有内摩擦和滞后阻尼时的曲线形状;(b)为纯机械摩擦时的情况;(c)为两者同时存在的综合情况。

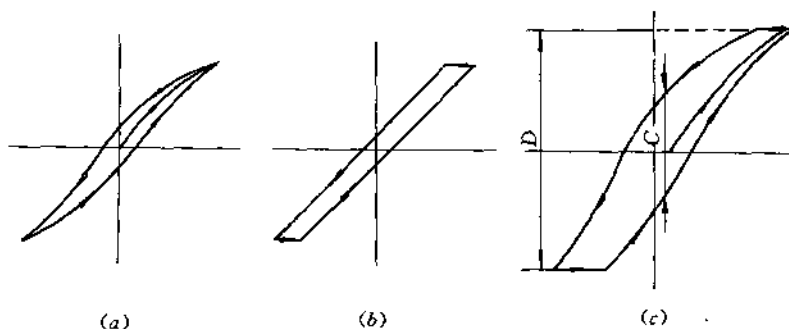


图 35.1-4 各种原因形成的滞环特性

滞后效应大小的量度是滞环 h (或称回差)。当以输出量为特征量时,它等于某一输入量对应的两输出量的最大差值 C 与输出量最大范围 D 之比的百分数。

$$h = (C/D) \times 100\%$$

死区 指的是有输入信号而无输出时的范围。可用此时输入信号范围的大小来直接衡量;也可用此范围与额定输入信号之比的百分数来表示。

重复性 系指在相同的试验条件下,输入量按同样方向在全量程范围内作多次工作循环时,测量系统重复输出值的能力。

B. 动态特性

系统对快速变化的输入量的反应能力就是动态特性。此特性完全由系统本身的固有特征参数所决定的。

系统对不同的输入信号其响应特性也不同,因此响应特性的称谓也不同。一般输入信号有时间域信号、频率域信号和随机域信号。常用的时间域信号有:阶跃信号、脉冲信号和斜坡信号。在系统的输出处所获得的对它们的响应信号分别称为阶跃响应(或称过渡过程特性)、脉冲响应和斜坡响应。而频率域的输入信号就是振幅不变、频率按一定规律(对数或线性)扫描的正弦信号。系统在这样的输入信号的激励下,其输出信号与输入信号在各频率时稳态值的振幅比和相位差就是该系统的频率响应特性。另外随机域则是以伪随机信号或白噪声信号作为输入信号,然后通过谱分析技术求出系统输出、输入信号之间有关的统计特性,如自功率谱密度函数、互功率谱密度函数、频率响应函数、相干函数等。

若系统的输入信号为 $x(t)$,引起的输出信号为 $y(t)$ 。从时间域上看,此两信号之间应满足什么关系,测量系统才可称得上是不失真测量呢?如果

$$y(t) = K_0 x(t - t_0)$$

可见输出与输入信号的幅值比为常数 K_0 ;另外输出信号始终滞后输入信号一个恒定的时间 t_0 。将上式两边同时进行傅里叶变换,就得到了该系统的频率响应特性:

$$H(j\omega) = K_0 e^{-j\omega t_0}$$

可知系统的幅频特性为 $|H(j\omega)| = K_0$;相频特性为 $\varphi(\omega) = -\omega t_0$ 。图 35.1-5 所示为系统的频率特性图形。幅频特性为一水平线。说明输入信号中所含的各频率成分的幅值在通过此系统后均扩大了 K_0 倍, K_0 值为常数。这也说明了系统具有很好的频率保持性,对输入信号没有滤波和衰减作用。表明此系统具

有无限宽的频带。由相频特性图可见为一条具有负斜率的直线,说明输出信号相对于输入信号的相位滞后是与频率成正比的。以上就是一个满足不失真测量条件的理想系统的频率特性。

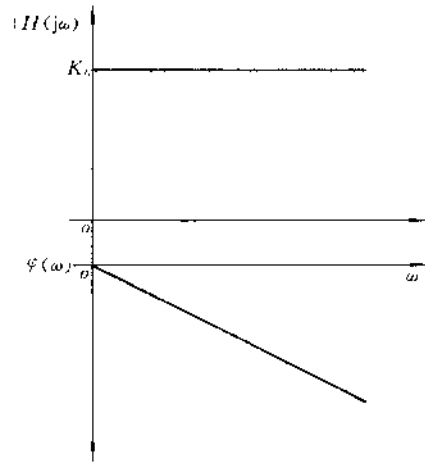


图 35.1-5 理想测量系统的频率特性曲线

(4) 实际的测量系统

在实际的测试工作中,所使用的测量系统的性能均不能达到理想系统的要求。只能想方设法使所研制的测量系统尽量接近理想化的程度,使所得测试结果在一定的条件下,在允许的误差范围内达到为人们能接受或认可的程度。现将有关的若干问题的处理办法和注意事项介绍如下。

A. 非线性

实际系统中或多或少都包含一些非线性因素,如死区和饱和等。这些非线性因素都将影响系统的工作特性,并使输出信号频谱中出现高次谐波成分等。在分析系统特性时,可采用线性化的方法。这是非线性不太严重时,工程实践中常用的方法。在实际工作中可采取在输入处加偏置和限制信号的幅值来避开死区和饱和区。而当系统的输出信号中夹杂有许多不希望的成分时,例如在用古典频域法测被试系统的频率特性时,其输出信号中除了有要求的基波分量外,往往还有不希望的直流分量、高次谐波成分和随机干扰等。为了从混杂的信号中提取希望的有用信号,一般采用相关滤波技术。

B. 系统的滤波作用

实际的测量系统的频率保持性是有限的,其频宽

也不能达到像理想系统一样为无限宽。这就必然会使输入信号中包含的某些频率成分,在通过系统时被滤掉或被抑制、衰减。所以实际系统只能在一定的频率区段上,依据允许的误差范围来满足不失真的测试条件。一般系统的频带宽度是定义为系统输出信号的幅值保持恒定的频率区段。有的是以输出信号幅值下降为原幅值的 $1/\sqrt{2}$ 倍(或下降负 3dB)时所对应的频率定为频带宽度的上限;或以输出信号相位滞后于输入信号 90° 时所对应的频率定为频宽的上限。

C. 系统的固有频率 ω_n

任何系统都具有一定的固有频率,它是由系统本身的固有特性参数决定的,如弹簧刚度、运动质量、电容、电感、阻尼度等。而被测信号是测量系统的输入激励信号,如果此信号的频率达到或接近测量系统的固有频率时,就会引起系统共振。此时系统的输出信号必然会产生较大的振幅畸变和失真。当然振幅的大小还与系统的阻尼度 ζ 有关。实际测量系统的阻尼度(或称阻尼比)都是设计成等于 $0.6 \sim 0.8$, 这样就会使其输出信号基本没有谐振峰值出现。

为了获得准确的测量结果,系统的固有频率应该如何选择呢? 这对于动态测量尤为重要。从信号分析的角度来看,一般具有复杂波形的周期信号都可以按傅里叶级数进行分解。即是可以用不同频率、振幅和相位的正弦、余弦信号来描述。分解以后与原信号频率相同的简谐波称为基波,频率为 ω , 然后频率为 2ω 、 $3\omega \dots$ 的波称为二次、三次谐波及高次谐波。所取的谐波次数越多,合成的波形越接近原信号波形。理论上谐波次数应为无限多。实际工作中当然谐波次数不能取为无限多,必然要舍弃部分高次谐波。舍弃高次谐波项的原则是:因为高次谐波的振幅是随着谐波次数的增加而逐渐减小的。当其振幅 A_n 减小到为基波振幅 A_1 的 2% 以下时,即 $A_n = 2\% A_1$ 我们就认为从此以后的高次谐波都可以不予考虑而忽略掉,而不会有太大的误差。

例如如图 35.1-6 所示的方波信号,它的傅里叶级数的表达式为

$$f(t) = \frac{4}{\pi} (\sin\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots)$$

$$= \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\omega t \quad (n = 1, 3, 5, 7, \dots)$$

可见高次谐波的振幅 A_n 与基波振幅 A_1 比较,是按 $1/n$ 的规律下降的,即 $A_n = (1/n) A_1$ 。当 $A_n = 2\% A_1$ 时,必然要取 $n = 50$ 。也就是说对于此方波来说,

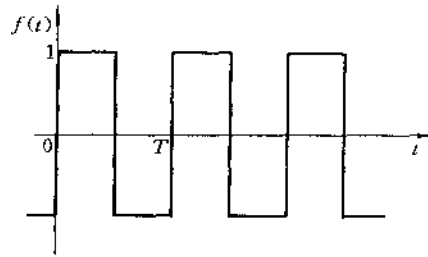


图 35.1-6 方波信号波形图

若用傅里叶级数来描述,一定要覆盖到 50 次谐波。而如图 35.1-7 所示的三角波,其傅里叶级数的表达式为

$$f(t) = \frac{4}{\omega\pi} (\sin\omega t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega t - \frac{1}{7^2} \sin 7\omega t + \dots)$$

$$= \frac{4}{\omega\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)^2} \sin(2n-1)\omega t$$

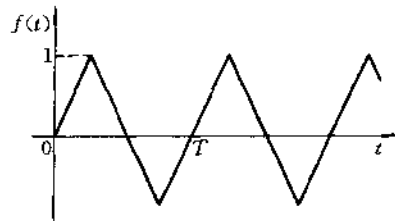


图 35.1-7 三角波信号波形图

可见其高次谐波的振幅是按 $1/n^2$ 的规律下降的。那么要达到 2% 基波振幅的谐波次数与方波相比就大为减少,只要覆盖到 7 次谐波也就够了,因为 $A_n = (1/n^2) A_1$ 。

从这两个例子可看出,为了描述波形变化陡峭的方波要比波形变化平缓的三角波需要覆盖的高次谐波项的次数多七倍以上。也就是说应根据所要描述的波形变化急缓程度来合理选取高次谐波的项数。

为了要能够准确无误、不失真地测量和记录被测信号,在选择测量系统和记录仪器时,一方面需要了解测量系统或仪器本身的固有特性,如它的响应能力、固有频率、量程范围和测量精度等;另一方面还需要事先知道或估计出被测信号的最高变化频率和波形。然后再根据前面所述的办法来选择。若是波形变化陡峭的信号,就要求考虑较多的不可忽略的高次谐波项。例如

频率为 1Hz 的方波信号,它的基波频率为 1Hz,而不可忽略的高次谐波频率要求达到 50Hz。那么为了不失真地记录或测量此信号,采用的测量系统或仪器的固有频率除了要能覆盖此最高的高次谐波外,还要求系统的固有频率 ω_n 应比被测信号最高变化频率 $\omega_{s,max}$ 大 5~10 倍,即 $\omega_n \geq (5 \sim 10) \omega_{s,max}$ 。可见为了记录和测量 1Hz 的方波信号,就要求测量系统的固有频率为 250~500Hz。固有频率是否选取得愈大愈好呢?不是的。因为在实际测试过程中,被测信号中可能混杂

有其它频率的干扰信号,若测量系统的固有频率高,意味着其频带较宽,那么它对混杂的干扰信号也会有所响应。所以选取时应该实事求是;另外也可以与滤波器配合使用。

当获得了测量系统或被测对象的动态特性之后,由所得曲线上能获得些什么动态特性指标呢?以二阶系统为例,图 35.1-8(a)所示为典型的阶跃响应特性曲线。由该曲线可获得的动态指标有:

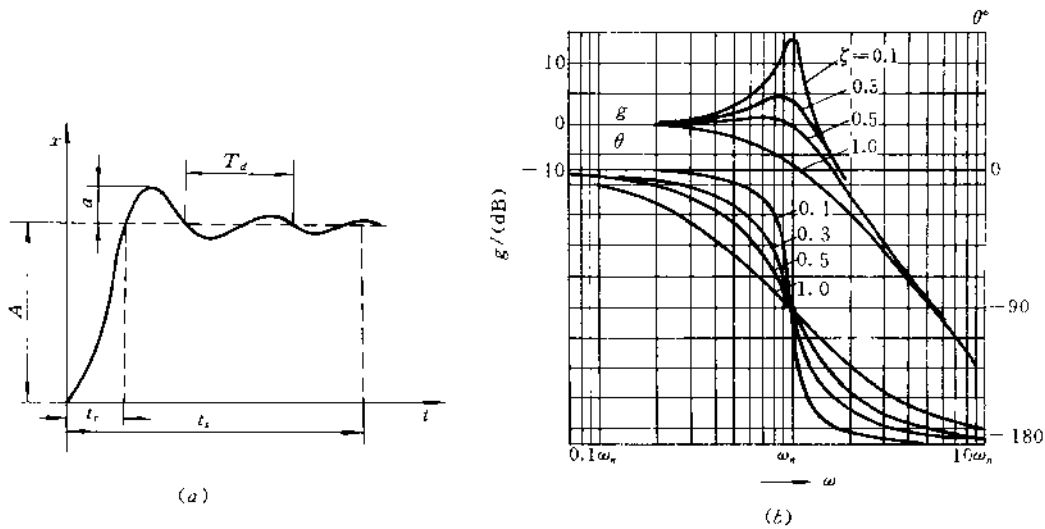


图 35.1-8 系统动态特性曲线

- 上升时间 t_r (或称第一次谐调时间),它反映系统的响应速度。
- 过渡过程时间 t_s ,它表示过渡过程结束的时间。所谓过渡过程结束就是振荡幅值进入 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 的稳态值范围时,标志过程结束。
- 有阻尼振荡周期 T_d ,因为 $T_d = 2\pi/\omega_d$,且 $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 。因此,只要知道系统阻尼比 ζ 的大小,就可求出系统的无阻尼自由振荡频率 ω_n (固有频率)

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

由过渡过程曲线上可测得超调量 a ,进而可求得系统的阻尼比 ζ :

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{\ln \frac{a}{A}}\right)^2 + 1}}$$

由对数频率响应特性曲线[35.1-8(b)]上可获

得的动态指标有:由幅频特性峰值点可找到对应的系统谐振频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。根据系统频带宽度的定义方法,可获得 -3dB 的频宽上限和滞后 90° 时的频宽上限。(这部分内容可参阅自动控制理论方面的书籍)

D. 系统中的惯量、摩擦、间隙和磁滞

这些因素都将直接影响系统的动态和静态特性。若系统中存在具有一定质量的运动部件,必然要影响系统对快速变化信号的响应速度,使固有频率降低。电子仪器的惯量小且没有运动部件;而按机械传动原理工作的仪器、仪表则惯量大。对于动态测量而言,这是一个重要的被考虑的因素。机械摩擦、间隙、磁滞等都将使测量结果中引入误差,产生磁环。因此在设计或组成测量系统时应尽量消除和避免。例如采用无接触测量就可消除部分摩擦的影响;另外光和电的信号传递也是没有摩擦的。在实际测试中为了减小静态特性中的滞环,通常在系统的输入处叠加高频、小振幅的颤振信号。

E. “负载效应”和阻抗匹配问题

在实际的测试工作中,往往要把各种不同的仪器连接起来使用。一般来说后续仪器是作为前级仪器的负载而出现的。它的接入肯定要对前级仪器的输出参数产生影响,也就是说会使前级仪器理论上的应输出值发生变化。因此测出的结果必然会附上一定的误差,这就是负载效应。从保证准确测量的角度出发,要求将此负载效应的影响减至最低程度。为此,希望后续仪器的输入阻抗必须远大于前级仪器的输出阻抗。这也就是通常在电压测量中,为什么要求电压表要具有较高的输入阻抗的道理。因为只有这样才能保证测出的电压值接近开路电压值,使测量仪表接入后的影响减至最小。另外负载效应不只出现于仪器间的互连接时,在机械、液压等系统中也存在,比如用带弹簧的力传感器、百分表中的弹簧在对力和微小位移量进行测量时,它们的弹簧刚度都会对被测参数产生影响;压力测量仪表、动态压力传感器的安装方法、结构和测压管道参数等都会对被测压力值产生影响。特别是在动态压力测量时要考虑的“容腔效应”(在压力测量中详细讨论)等,这些影响都可认为是负载效应的推广。

从信号的能量传输的角度出发,在保证信号不失真的前提下,要求尽可能实现以最大功率来传输,这就提出了仪器间(或级间)的阻抗匹配问题。电路分析理论证明只有当前级仪器的输出阻抗与后续仪器的输入阻抗相等的条件下,前级才会以最大功率的信号传给后者,这是最佳状态,偏离此点则传输的功率都将下降。一般来说,输出阻抗高的仪器主要是以电压作为输出特征量的,其输出电流的能力很弱;而低输出阻抗的仪器则多是以电流作为输出特征量的,电压比较低。作为负载的后续仪器,由于其输入阻抗高低不同,同样它也要求相应的输入电压或电流为特征量的信号。如果前后仪器阻抗不匹配的话,就不能确保它们之间信号能以一定的功率有效地传输,甚至会达到不能传输的程度。阻抗匹配的方法很多,如接入匹配变压器、匹配电阻和采用适当的匹配电路等。只要在接入测量系统时,考虑到负载效应、阻抗匹配,在信号不失真的条件下,信号能具有一定的功率,达到有效地传输就可以了。

(5) 电测非电量的测量系统

将非电量的一些物理参量,例如液压试验中的压力、流量、转速、转矩等,想方设法使它们变成相应的电量(电压、电流、电阻、电容、电感、频率、相位……)后再进行测量。

一般电测非电量的测量系统由四部分组成:传感器,信号调节放大器,测量、记录和显示仪器(包括数据处理系统),电源,如图 35.1-9 所示。

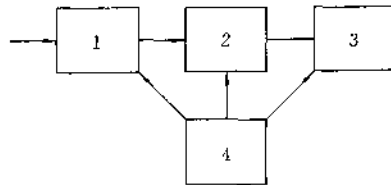


图 35.1-9 电测非电量测量系统组成框图

1—传感器;2—信号调节放大器;
3—测量、记录仪器;4—电源

A. 传感器

凡是能够从被测对象中直接取出所需信号的装置称为传感器(或称检出器、感测器、变送器)。传感器相当于人的感觉器官。在测量系统中,它作为敏感元件,将非电量的被测量的变化按比例地转换成一个相应的电量变化。传感器有的按用途分类,如压力传感器、流量传感器等;有的按工作原理分类,如差动变压器式、电磁感应式、压电晶体式、电容式、相位差式等。通常则把两种分类方法混合来分类,如差动变压器式位移传感器、应变电阻式压力传感器等。

理想的传感器应具备下列特点:

- 能不失真地感测出被测量,并按比例转换成电量,即线性好;且转换效率高。
- 分辨力要强、灵敏度高。所谓分辨力指的是传感器能感测到的被测量的最小变化量。通常用此最小变化量与满量程之比的百分数表示。灵敏度高的传感器能感受较小的被测量变化且能输出较大的信号。
- 具有较高的固有频率。它必须保证所得测量值不会因传感器本身的谐振而失真。
- 性能稳定、工作可靠且经久耐用。其性能不会因外界条件变化而变化;不会在自身内部产生干扰,也不会从外部引进干扰。工作可靠一般指的是复现性好,有互换性,抗干扰能力和抗腐蚀能力强,能较长期使用等。
- 体积小、重量轻、容易校正和维修、安装和使用方便。不会因传感器的装入而使被测对象性能受到影响。

B. 信号调节放大器

由于传感器输出的信号一般是很微弱的,不能直

接驱动后续仪器进行测量,必须经过此环节不失真地放大后,并转换成测量仪器或记录、显示、处理装置所要求的信号功率和型式,如交、直流电压和电流,模拟量信号或数字量信号等。可见此环节并不单纯是放大器,还要求它能对传感器的输出信号进行预处理,以便传输、记录和处理。由于它处于传感器和测量仪器之间,要考虑它与传感器和后续仪器之间的阻抗匹配问题。另外还要求它具有较宽的动态范围和较低的噪声干扰。一般属于此环节的线路有:交、直流放大,相敏整流放大和滤波,调制-解调线路,A/D和D/A转换电路等。

C. 测量、显示、记录仪器或数据分析、处理系统

这部分的作用是对由传感器感测的,并通过信号调节放大器处理的电信号进行测量、显示和记录。所采用的仪表有:电压表、电流表、频率计、相位差计、函数记录仪等。一般把这些仪表俗称为二次仪表。为了确保试验数据的可靠性、准确和较高的试验效率,要求测量仪器应具有一定的精度,质量要稳定,并要求能自动显示数据、打印、记录和描绘曲线等。为了使用方便和能与计算机联系,要求同时具有模拟量和数字量的输出信号和标准接口(GP-IB)。对于更进一步的自动试验而言,这部分就属于数据分析和处理系统了。

D. 电源

电测非电量的测量系统前述三部分都要求外电源供电,如市电电源、直流稳压电源、某频率的参考电源等。对于各种不同的电源总的要求是在满足功率输出的前提下,力求电压稳定。当然,不同的电源还会有一些不同的指标要求,如直流电压的纹波系数、交流频率的稳定度等。在相当多的情况下,由于电源电压不稳或电源装置质量粗劣,会造成严重的测量误差,甚至会使用试验测试工作无法进行。因此,对电源的质量和稳定问题应引起试验工作人员的充分重视。

35.1.3 测量误差分析

(1) 测量误差的分类

由于各种原因,误差是不可避免的。习惯上将测量误差分为系统误差、人为误差和随机误差。

A. 系统误差

在一定的条件下,多次重复测量同一参数时,所得测量误差的大小和符号保持不变;或在条件改变时,按一定规律变化的误差就是系统误差。通常造成系统误差的原因有:

工具误差 它是由于测量工具、测量仪器本身不完善所造成的,如仪器本身制造上的误差、表盘刻度不

均匀等。

调整误差 主要指的是由于测量仪器调整不当带来的,如指针式仪表的机械零位偏移、仪器本身校验不准确等。

习惯误差 由于测量人的习惯偏向造成的。若采用数字显示和自动打印记录就可避免此误差。

条件误差 在测量过程中,周围环境条件的变化所造成的误差。周围环境条件包括温度、振动、噪声和磁场等因素,所以测量仪器最好是在现场进行动态标定。

方法误差 由于测量方法不完善、不正确造成的误差。如传感器的安装位置及仪表接地方式不正确等。

在实际工作中,系统误差产生的原因是可以查明的。也可以找出系统误差的大小和规律,对测得的数据作出修正。所以说系统误差是可以减小和消除的,但由于它不符合正态分布规律,故不能用增加测量次数的办法来消除。

B. 人为误差(或过失误差、粗差)

由于参加试验的人员粗心、过渡疲劳、精神紧张、不会正确地使用仪器或违反操作规程等造成的操作错误、笔误、读数错误以及计算错误等。一般这种误差明显地歪曲了测量结果,且数值较大,还没有一定的规律可循。

C. 随机误差

在消除了系统误差和舍弃了人为误差之后,对同一参数多次测量所得数据,在末位或末二位数字上仍有差别,称此误差为随机误差。它没有确定的变化规律,也不能事先估计,其数值时大时小,或正或负。但在足够多次重复测量后,会发现它符合正态分布(或称高斯分布)。因而增加测量次数可使随机误差对测量结果的影响减小。它产生的原因是许多尚未掌握的因素或一时不便于控制的因素的变化造成的。如在节流小孔流量系数的测定实验中,如果对油温不加控制的话,将给测量结果带来系统误差。若对油温进行控制时,比如 $30 \pm 5^\circ\text{C}$,则油温在 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 范围内变化(这是温度控制所允许的误差)。在此范围内,温度的变化是不受控制的,具有随机性。因此将造成油的粘度的随机变化,使所测得的流量系数数值也有微小变化。这就是随机误差。通常产生随机误差的原因有:

- 测量仪器本身的允许误差;
- 测量方法的不精密性带来的误差。如从示波图上读取数据时的误差等;

• 因周围环境条件允许有一定的变化范围所带来的误差。

综上所述, 由于系统误差和人为误差是可以消除和避免的, 故在对试验数据进行误差分析时, 应该是在消除了系统误差和剔除了人为误差之后, 只对随机误差进行分析。由于它服从统计规律, 所以要用统计理论来处理。

(2) 测量误差分析

A. 随机误差的正态分布

在对同一参数进行无限多次测量以后, 以测量值 x 为横坐标, 且间距 Δx 取得非常小 (d_x), 以概率密度 $P_x(x_i)/d_x$ 为纵坐标。这样在直角坐标上各点连成的一条光滑曲线, 叫正态分布曲线如图 35.1-10 所示。此曲线表示的函数 $f(x)$ 称为概率密度函数。这是最常见的一种连续型的分布。概率密度函数的表达式为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

通常此式简写为 $N(x; \mu, \sigma^2)$ 。式中 μ 就是被测量的真值, 也是曲线最高峰点对应的横坐标值。 σ^2 称为方差; σ 称为正态分布的标准误差 (或称均方根误差)。由曲线可见, 它以 μ 为轴左右对称; 在 $x = \mu \pm \sigma$ 两点处具有拐点。横坐标上各测量值 x 与真值 μ 之间的距离就是随机误差 δ

$$\delta = x - \mu$$

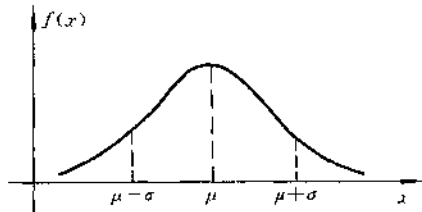


图 35.1-10 正态分布曲线

若以 δ 作为横坐标时, 曲线则如图 35.1-11 所示。由图示曲线可得出几点结论: • 小误差比大误差出现的机会多;

• 对于 $\delta = 0$ 的纵坐标而言, 曲线是对称的。即是说绝对值相等的正、负误差出现的概率相同。

• δ 趋于 $\pm \infty$ 时, $f(\delta) \rightarrow 0$, 即是说大误差一般不会出现。在一定的测量条件下, δ 绝对值是不会超过一定界限的, 称为误差的有限性。通常规定误差出现的范围是以标准误差 σ 为单位来衡量的。此范围 Δ 称为误差限

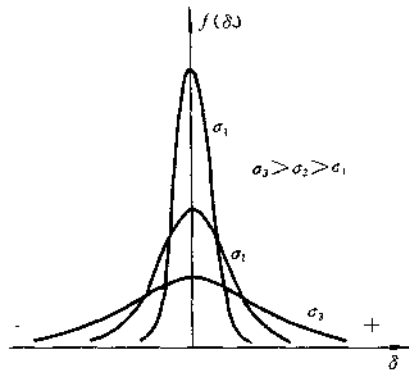


图 35.1-11 随机误差的正态分布曲线

$$\Delta = k\sigma$$

由概率论可知, 当 $k = \pm 3$ 时, 误差值不在此限内的概率只有 0.27%, 也就是说不在此范围内的误差值出现的可能性极小。

• 因为随机误差的概率密度函数为

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

当 $\delta = 0$ 时 $f(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma}$, 这就是随机误差分布曲线的最高点对应的纵坐标值。可见其大小与标准误差 σ 成反比。 σ 变化时则曲线的陡度变化, σ 愈小则曲线中部升得愈高, 两旁下降愈快; σ 愈大则曲线变化平缓。这也就表明, 曲线愈陡, 随机误差极限范围愈小, 因而测量值互相之间愈接近, 测量的精密度高。由于标准误差 σ 决定了测量值的散布情况, 所以 σ 是表示测量精密度的重要参数之一。

B. 标准误差 σ

由于随机误差符合正态分布, 正、负大小相等的误差出现的概率相等, 也就不可能求得误差的平均值。当测量次数足够多的话, 误差之总和必然趋于零。对于等精度的, 单个测量值而言, 其标准误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$$

式中 $\delta_i = x_i - \mu$, 但是真值 μ 未知。根据概率论, 可利用测量值的算术平均值 \bar{x} 来估计真值 μ 。此时得到的误差 $\nu_i = x_i - \bar{x}$ 称为剩余误差或偏差, 从而可导出实际应用的根据有限次测量值求取标准误差 σ 的公式

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{n-1}}$$

这就是白塞尔公式;一般测量次数 $n < 30$ 次。

C. 可疑数据的取舍

在实测的数据中往往会发现某一个或几个过大或过小的数;从数值上看它们与其余的测量值相差很大,或明显地偏离其应有的数值;或破坏了其余各数据点连成的平滑曲线的走向等。若是在试验过程中及时发现了这种情况,一般采取重新进行测量的办法,看是否有重复性。若有重复性则保留此数据,否则去掉。试验结束,在处理试验数据时发现这种情况,最好是能分析出明确的物理或工程技术方面的原因,然后再决定其取舍。不应该为某种企图而轻率地舍弃“坏”数据。若没有充分理由,则应该用统计学中可疑数据处理法来决定取舍。可疑数据舍弃法则比较多,最常用的是莱因达准则,但它比较保守。总之应本着科学和慎重的态度来对待。

D. 测量误差的传递

在试验中对许多参数是直接进行测量的,如长度、压力、流量等。但在很多情况下,数据并不是从直接测量而获得,而是在同时对几个参数直接进行测量后,再按一定函数关系进行计算才能得出,这被称为是间接测量。由于各直接测量所得数据都具有一定的测量误差,必然要对计算出的结果产生影响,这就是误差的传递问题。

E. 微小误差准则

在误差的传递计算和实际应用中,为了简化,需要忽略部分影响小的误差。衡量可忽略误差的标准就是微小误差准则。

(A) 按代数和合成误差时的微小误差准则

因为 $\epsilon_y = \sum D_{\epsilon_i} = D_{\epsilon_1} + D_{\epsilon_2} + \dots + D_{\epsilon_k} + \dots + D_{\epsilon_n}$

其中 $D_{\epsilon_i} = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \epsilon_{x_i}$;若 D_{ϵ_k} 项或其中几项之和小到可以忽略的话,设忽略后的计算结果为 ϵ'_y 。可忽略的条件是

$$\frac{|\epsilon_y - \epsilon'_y|}{\epsilon_y} = \frac{|D_{\epsilon_k}|}{\epsilon_k} \leq 0.05$$

或

$$|D_{\epsilon_k}| \leq 0.05 \epsilon_y = \frac{1}{20} \epsilon_y$$

这就是按代数和合成误差的微小误差准则。在一般技术测量中,可放宽为当 $|D_{\epsilon_k}| \leq 0.1 \epsilon_y$ 时就可忽略。

(B) 按方和根合成误差时的微小误差准则

因为

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\sum D_{\epsilon_i}^2}$$

$$= \pm \sqrt{D_{\epsilon_1}^2 + D_{\epsilon_2}^2 + \dots + D_{\epsilon_k}^2 + \dots + D_{\epsilon_n}^2}$$

其中 $D_{\epsilon_i} = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \sigma_{x_i}$;若 D_{ϵ_k} 项被忽略,则得到的总误差为 σ'_y ;可忽略的条件是 $\sigma_y - \sigma'_y \leq 0.05 \sigma_y$,即

$$0.95 \sigma_y \leq \sigma'_y$$

$$D_{\epsilon_k}^2 \leq 0.0975 \sigma_y^2$$

$$D_{\epsilon_k} \leq 0.3 \sigma_y \approx \frac{1}{3} \sigma_y$$

这就是按方和根合成误差时的微小误差准则。在一般技术测量中可放宽为 $\sigma_y - \sigma'_y \leq 0.1 \sigma_y$, $D_{\epsilon_k} \leq 0.4 \sigma_y$ 时,它就可忽略掉。

在测量仪器及系统的标定中,有一项较为重要的工作,也是属于“试验设计”的范畴,就是标准仪器精度等级的选取问题。这就要根据上述微小误差准则,使选定的标准仪器允许的误差对标定结果总误差的影响应小到可以忽略的程度。

设被标定仪器允许误差为 $r_b = a\%$;

标准仪器的精度级别为 $r_p = A\%$;

标定结果的误差为 r ; $r = \sqrt{r_b^2 + r_p^2}$

根据方和根合成的微小误差准则,当 $r_p \leq \frac{1}{3} r$ 时,则标准仪器的误差 r_p 对标定结果误差 r 的影响可以忽略,因而 $r \approx r_b$ 。可见:

$$r_p \leq \frac{1}{3} r = \frac{1}{3} r_b = \frac{1}{3} (a\%)$$

即

$$A\% \leq (1/3)(a\%)$$

这就是一般希望标准仪器的精度比被标定仪器的精度至少要高三倍的理由。

F. 误差的分配

在间接测量中,根据误差的传递及合成解决了已知各直接测量值的误差求总误差的问题。若已知或预先规定了测量结果允许的误差范围,要求将此总误差分配到各直接测量的误差中去,以保证达到预定的要求,这就是误差的分配问题。由前述已知,对于随机误差,误差的合成公式为

$$\sigma_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n D_{\epsilon_i}^2}$$

今 σ_y 为已知,是预先规定的。而公式右边的根号下的各直接测量值的误差对总误差的影响项却有若干个,公式只有一个。因而对于各种不同的 D_{ϵ_i} 的组合都可使 σ_y 小于或和等于预定的值。一般误差的分配可按两步进行:

(A) 按等影响原则分配。假定各直接测量值的

误差对总误差的影响项均相等,即

$$D_{\sigma_1} = D_{\sigma_2} = \dots = D_{\sigma_n} = D_{\sigma}$$

所以 $\sigma_y = \pm \sqrt{nD_{\sigma}^2} = \pm \sqrt{n}D_{\sigma}$

$$D_{\sigma} = \pm \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}}$$

实际上这种等影响的现象是不存在的。按这种分配原则求出的 D_{σ} 也是不合理的,只能是作为一次近似和试探。

(B) 在已求出的 D_{σ} 基础上,根据每个直接测量参数现有的测试水平、仪器设备的发展状况、试验环境、操作难易程度、经济指标以及各直接测量值误差对总误差的影响效果大小等具体情况,对 D_{σ} 进行加权调整。以便使测试工作能在既简单、经济,又在实际条件下切实可行的完成,保证实现预定的总误差指标。

35.1.4 试验数据处理

对于任何试验来说都要通过各种试验方法和测试手段来获取试验数据。但这些原始数据并不是我们所要求的结果,还必须对它们进行处理后才能达到预定的目的。从试验的整个过程来看,对试验数据的处理是一个很重要的环节。只有在处理的基础上才能得到各种特性曲线和性能指标,作出合理的试验结论。

数据处理的方法很多,过去往往是人工手记、手算、列表、画曲线、求方程等。现代发展为试验数据数字显示、打印输出、记录仪自动记录和存贮、自动描绘特性曲线、数据处理系统自动分析和处理数据。以计算机为中心的实时分析处理系统同时还参与试验过程的控制(即 CAT)。

常用的试验数据表示方法有:

(1) 试验数据列表法

列表法就是将测得的数据,按照自变量的变化顺序,对应列出各因变量随它而变化的数值。列表法具有的优点如下:方法简单、形式紧凑、数据表示清楚了,互相之间进行比较很方便;在同一表格内可同时表示很多变量之间的相互关系而不混乱。

(2) 试验数据的图形表示法

通过采用各种坐标系,如直角坐标、极坐标、对数坐标、立体三维坐标系等,将试验数据以曲线、曲面、体积等图形表示出来就是图形表示法。在数据处理中此方法应用极为普遍。通过图形可以弥补试验点的不足,直接找到中间的过渡值而不需要另作插入计算。另外从图形上可直接微分,即求曲线上某点的切线斜率;还可对自变量求积分,即求曲线下某区段内的面积等。还可以根据图形的形状,按数学方法拟合曲线

的方程,找到参数之间的函数关系或经验公式。

根据试验数据作图时应注意的事项有:

A. 图纸的选择

根据试验数据和试验目的,确定应采用的坐标形式后,就可选择坐标纸。常用的坐标纸有:直角坐标纸,俗称方格纸;对数坐标纸,它又分为单对数和双对数坐标纸;还可根据需要选不同数量的十倍频程的坐标纸。另外还有极坐标纸。

B. 坐标的分度原则

习惯上以横坐标(x 轴)代表自变量,纵轴(y 轴)代表因变量。所谓分度就是沿坐标轴以一定的长度间距代表一定数值大小来划分刻度的工作。分度时总的原则就是要使每一试验点的数据值能迅速而方便地在坐标轴上找到。一般分度间距为 1、2、4、5 等较为方便。

因为直线是最容易画的,且画的时候误差也最小。所以在进行数据处理时,通过坐标轴按不同的函数规律分度,使参数之间的关系变为线性关系或近于线性关系。例如若自变量 t 与因变量 P 之间的函数关系为

$$P = Ct^n$$

C 和 n 均为常数,此式为指数关系。若将此函数式稍加变换,等式两边都取对数,则得到

$$\log P = \log C + n \log t$$

可见变成了直线方程。采用双对数直角坐标,则在此坐标平面上画出为一直线,如图 35.1-12 所示。 $\log C$ 为截距, n 为直线的斜率 $n = \tan \alpha$ 。

当然,如果函数关系比较复杂时,要变成线性关系并不容易。对于直角坐标,一般常用的关系有: $x - y$ 、 $\log x - y$ 、 $\log x - \log y$ 、 $x^n - y$ 、 $x^{1/n} - y$ 、 $x - (1/y)$ 、 $(1/x) - y$ 等。

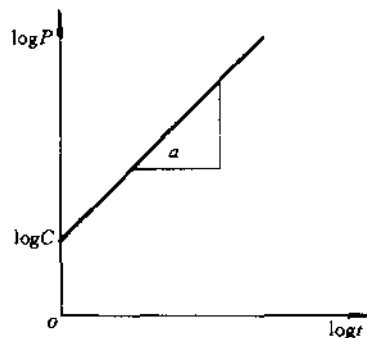


图 35.1-12 曲线—直线变换图

C. 描点和逐点描述作曲线的方法

描点就是根据试验数据,由坐标轴上的点找出坐标平面上的点 $[(x, y)$ 或 $(R, \theta)]$ 的位置来。以直角坐标为例,由于在 x 轴上自变量的点与 y 轴上因变量的点都带有误差,因而坐标平面上的点 (x, y) 就不能用简单的点来表示,而要用一矩形来表示,如图 35.1-13 所示。矩形的边的长度分别代表自变量或因变量的误差大小,矩形的中心就是算术平均值。若两变量的误差大小相等,则可将矩形改为圆,半径代表误差大小。若要在同一坐标平面上画出几个因变量随同一自变量的变化曲线时,对应每一个因变量的数据点必须用不同的符号表示,也可用不同颜色来区别。总之必须能表示清楚,使人一目了然。

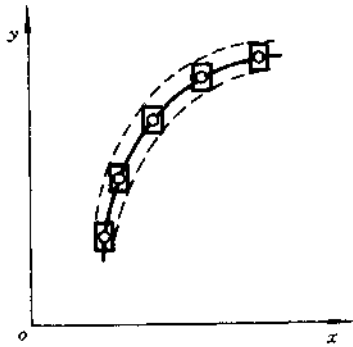


图 35.1-13 具有误差的数据点的曲线图

35.2 参数的测量及仪器简介

35.2.1 参数的测量

(1) 压力(p)

A. 压力的测量仪表

在液压试验中需要测量的压力不外乎有两种:稳态压力(静压力)和瞬态压力。它们对测压仪表有着不同的要求,并且测量方法也不同。下面简单介绍各种压力测量仪表的工作原理:

(A) 弹簧管式压力表

它是最常用的测压仪表。图 35.2-1 所示为其结构原理图。主要由三部分组成:感测元件为弹簧管 1;由杠杆机构 3、齿弧 2 和齿轮 8 组成的传动机构;指示部分为指针 9 和刻度盘 6。弹簧管是由黄铜、磷青铜、铍青铜、不锈钢或高强度合金钢等材料制成的。为具有椭圆形截面的薄壁管件。其信号传递过程如图 35.2-2 所示。感测元件将压力 p 转换为封闭端的位移 x ,通过放大元件,即传动机构,将 x 转换为指针转动角 θ ;然后由刻度盘的刻度读出具有一定单位的压力

值。在信号传递过程中,由于存在着运动副之间的摩擦、运动件的惯性等因素,决定了此类仪表对信号的响应速度是不高的,因此它只能用于静态测量和指示性测量。

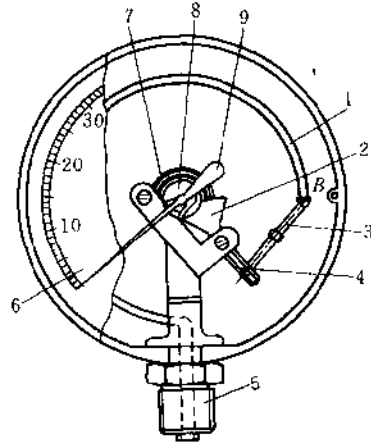


图 35.2-1 弹簧管式压力表结构图
1—弹簧管;2—齿弧;3—杠杆;4—调节槽;5—进油接头;6—刻度盘;7—游丝;8—齿轮;9—指针

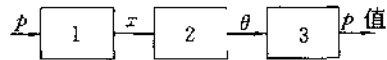


图 35.2-2 压力信号传递过程框图

1—感测元件(弹簧管);2—放大元件(传动机构);
3—显示刻度盘

(B) 霍尔式压力传感器

它是根据半导体的霍尔效应原理制成的,如图 35.2-3 所示。若将半导体薄片置于磁场 B 中,当片上通有电流 I ,且电流方向与磁场方向互相垂直时。结果半导体中运动的电子在磁场中要受到洛伦兹力的作用,将电子推向半导体一侧形成电子积累。因此在与磁场方向和电流方向构成的平面平行的两侧面上形成静电场,将此电场称为霍尔电场(或霍尔电势)。这种现象称为霍尔效应。

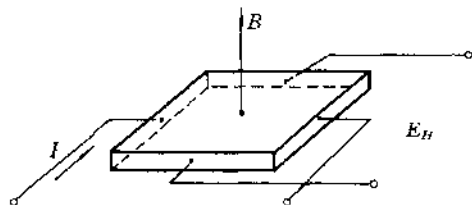


图 35.2-3 霍尔效应原理图

霍尔电势 E_H 的大小为:

$$E_H = K_H IB$$

式中: E_H 为霍尔电势(mV); I 为通过半导体片的电流(mA); B 为磁感应强度(T); K_H 为霍尔元件灵敏度系数[mV/(mA·T)], 它不仅与材质有关还与几何尺寸有关。

在实际应用中, 将 I 和 B 两个量中之一保持为常量, 另一个作为输入变量, 此时产生的输出霍尔电势 E_H 则与输入量成比例。由于建立霍尔电势所需时间极短, 约为 $10^{-12} \sim 10^{-4}$ s, 因此其响应频率是很高的, 可达 10^9 Hz 以上。

若将霍尔元件的两端放置在两个方向相反的磁场中, 如图 35.2-4 所示。右侧磁场磁力线方向向下, 左侧磁场磁力线方向向上, 且这些磁场都是具有均匀梯度的磁场。只要保持霍尔元件上的电流 I 为常量时, 当霍尔片在此磁场中移动, 则其输出电压 U_H 只取决于它在磁场中的位移量 x 。因为两磁场是方向相反配置的, 因而同时在霍尔片上要产生两极性相反的霍尔电势, 故其输出电压 U_H 为此两电势之差。当霍尔片处于中立位置时, 则表现输出电压为零。当霍尔片移

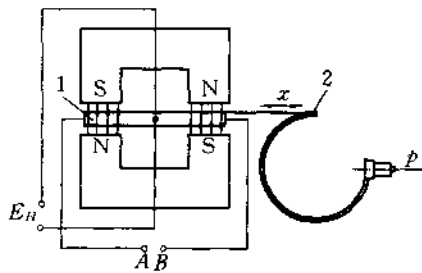


图 35.2-4 霍尔式压力传感器原理图

动, 偏离中立位置, 其上呈现的电压大小与位移量成比例, 极性与位移的方向对应。输出电压 U_H 与位移量 x 之间的关系曲线如图 35.2-5 所示。如果磁场变化梯度 dB/dx 越大, 则灵敏度越高; 梯度变化越均匀, 则 U_H 与 x 之间关系就越接近线性。

综上所述可利用此原理来测量位移量。若将霍尔元件固定在压力表中弹簧管封闭的自由端上时。当有压力油进入弹簧管, 自由端产生正比于压力值的位移量, 也就带动霍尔片在磁场中移动, 因而产生的输出电压大小就代表着所测压力值。这样就将非电量的压力信号转变成一个与之对应的电量(电压)信号了。

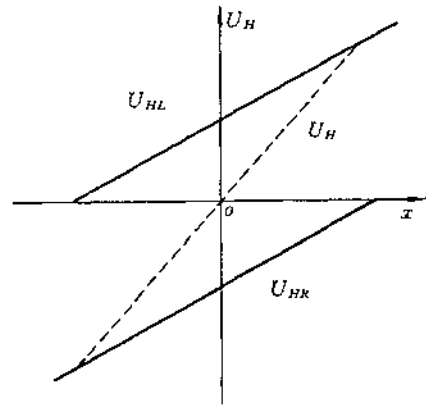


图 35.2-5 $U_H - x$ 特性曲线

为了使所产生的霍尔电势与位移量或压力成单一的线性关系, 必须保证给霍尔元件提供恒定的直流电流 I , 故要求配备高质量的恒流源。当然也要求有性能稳定、梯度变化均匀的永久磁场。因为半导体元件对温度变化较敏感, 其性能随温度变化较大, 故要求对温度变化进行补偿, 以尽量减小其影响。

虽然此传感器中运动部分没有摩擦, 尽管霍尔电势的响应极快, 但在压力油作用下, 弹簧管自由端要产生约 ± 1.5 mm 左右的位移, 还要带动具有一定质量的霍尔元件运动, 必然具有一定的惯量和材料变形时的滞后阻尼等, 这样也就限制了它的响应速度。故霍尔式压力传感器只能作为非动态的压力测量用。由于其输出为电压信号, 故可以用于远距离测量和显示。

(C) 应变电阻式压力传感器

应变电阻式压力传感器就是用于动态压力测量的传感器之一。它是根据电阻丝的阻值随其几何尺寸变化而变化的原理制成的应变片, 由应变片来感测压力的作用而引起的变形量。应变片的特性以它的灵敏度系数 S 表示

$$S = \frac{\Delta r/R}{\epsilon}$$

式中: ϵ 为由应变片感测的应变变量; Δr 为由于应变变量 ϵ 引起的应变片阻值的变化量; R 为应变片的原电阻值。

若将应变片贴在一金属薄壁圆筒的外壁上, 当筒内通入压力油时, 圆筒变形, 因而引起贴在外壁上的应变片的几何尺寸发生变化, 导致其阻值变化, 如图 35.2-6 所示。圆筒壁变形量与筒内所受压力值成正比; 应变片阻值的变化又与应变变量成正比。所以只要测量

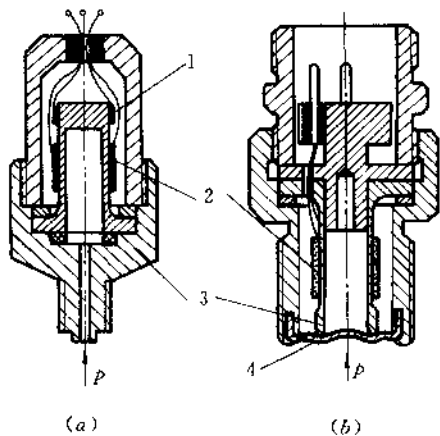


图 35.2-6 应变式压力传感器结构示意图

1—补片;2—应变片;3—应变管;4—感压膜片

此阻值的变化就反映了被测压力值的变化。也就达到了将压力值转成电量(电阻值)的目的。测量电阻值的变化一般采用电桥线路,如图 35.2-7 所示。贴在圆筒薄壁处外侧的应变片 R_1 作为电桥的测量臂,其余均为固定电阻 R_2, R_3, R_4 。当筒内无压力时,电桥平衡,无信号输出。当筒内有压力时,筒壁变形, R_1 阻值发生变化,电桥原始平衡破坏,在输出端有正比于 R_1 阻值变化的输出信号。经应变仪放大和处理后即可由显示或记录仪进行测量和记录。

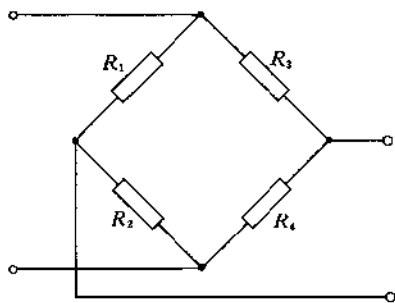


图 35.2-7 桥式电路图

由于应变片的阻值不仅随其几何尺寸变化而变化,而且还受试验时油温和周围温度变化的影响,因此需要考虑温度补偿问题。最简单的温度补偿办法是除了在测压圆筒的薄壁外侧贴一片测量用应变片外,在圆筒的厚壁处,此处与薄壁变形处具有相同的温度变化,而在测压时并不变形。在此处外侧也贴一片应变片,作为温度补偿用。此两片分别为电桥的两个臂,当温度变化时,两臂阻值同样变化,以抵消温度的影响。

因为这种传感器中无运动部件,所以无惯性、无摩擦、无间隙,故其响应速度是很高的,可达 35kHz,可以

用于压力的动态测量。它虽具有灵敏度高、线性好、结构简单等优点;但它抗干扰能力差,还必须与应变仪配套使用才能进行测量,使用时不大方便。

(D) 扩散型应变电阻式压力传感器

这种传感器是以单晶硅材料制成感测膜片。通过印刷和刻蚀方法加工成要求的形状,图 35.2-8 所示为成形后的膜片。然后直接向沟槽中渗入某种杂质而形成应变片。直接作出四片组成测量电桥,使基膜片与应变片合为一体。当膜片受到压力作用时,沟槽处产生弯曲变形,使桥臂阻值发生变化,其输出信号电压幅值与压力值成比例。

由于硅晶体是一种极好的弹性材料,受力后没有塑性区,基本没有蠕变现象,且材料强度很高。所以这种传感器的特点是线性好、灵敏度高、固有频率高(55kHz~1MHz)、滞后现象很小,通常小于 0.05%、重复性好、过载能力强等。由于其输出信号大(满量程达 300mV),可以不要应变仪,直接配放大器即可。

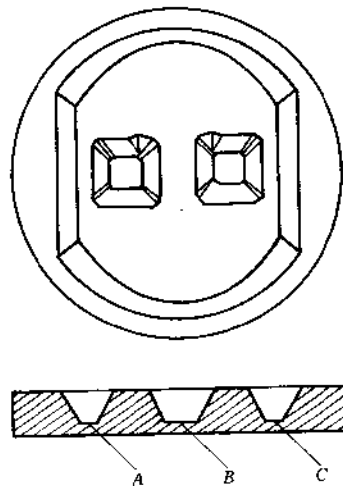


图 35.2-8 测压膜片结构示意图

A、B、C—沟槽

(E) 特殊用途的压力仪表

真空表是为了测量试验系统中某处的真空度(或负压)的仪表。如液压泵自吸能力试验中要求测量泵的入口压力。图 35.2-9(b)所示为其国标图形符号。

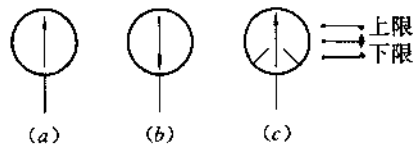


图 35.2-9 压力表符号图

(a)普通压力表;(b)真空表;(c)电接点压力表

电接点压力表是一种由压力值来控制触点开闭的压力表。它的指针带动一个“动”触点,该触点随着指针移动。另外还有两个“静”触点,它们的位置由人工调定,一个作为上限触点,一个作为下限触点。上、下限触点之间就是压力的控制范围。当压力在下限值以下时,动触点始终与下限触点相接触,使外电路接通;一旦压力值进入控制范围内时,动触点与下限触点断开而处于“浮动”状态。当压力值升高到上限值或超出控制范围时,动触点就始终与上限触点接触,使另一外电路接通。图 35.2-9(c)所示为其国标图形符号及工作原理图。这种压力表通常用在由压力控制的电气线路如超压保护系统中作为敏感元件。其作用与压力继电器的作用类似。而电接点压力表因为具有指针和刻度盘,可以更方便地了解压力的控制情况。

B. 压力测量仪表的选择和使用

(A) 根据试验大纲规定的测试方法和精度要求来选择合适的测压仪表。若为一般性的静态测量和指示性测量,采用弹簧管式压力表。

(B) 仪表测量范围的选择原则是:若采用弹簧管式压力表进行静态压力测量或压力波动较小时,测量范围可为压力表满量程的 1/3~2/3。不要超量程使用。

(C) 若要求测量动态压力,则要预先估计压力信号的波形和最高变化频率,以便选择具有比此频率大 5~10 倍以上固有频率的压力传感器或测量系统。此外,还应照顾到与之配套使用的测试仪器的最高工作频率范围。另外,压力传感器的正确安装和使用也是准确、可靠测量的一个极为重要的保证。因为测压或传压管道和容腔本身就是一个谐振系统,且具有较低的固有频率。当被测压力的变化频率接近或等于管道系统的固有频率时就会发生谐振现象,导致传感器输出的测量结果附加上较大的误差,达到难以置信的程度。虽然所选压力传感器本身固有频率很高,而它所测出的却是管道系统谐振时的压力值。可见由于安装和管道的影响,使它测不到真正的该测的压力值,此种现象称之为“容腔效应”。

一般常见的压力传感器安装时的结构都是带有小容腔的测压管道,如图 35.2-10 所示。这种管道系统的固有频率可按下列式计算:

$$\omega_n = \frac{c}{L} \sqrt{\frac{V_t}{V}} \quad (\text{rad/s})$$

式中 c 为声速, V_t 为管道内部容积 $V_t = \frac{\pi d^2}{4} L$;

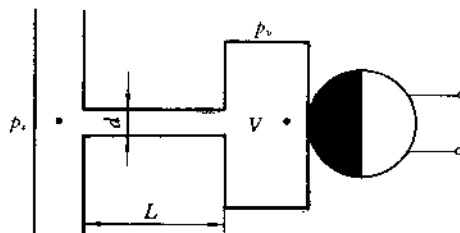


图 35.2-10 “容腔效应”原理图

d 为管道内径; L 为管道长度; V 为容腔体积。可导出

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{cd}{4L} \sqrt{\frac{1}{\pi LV}} \quad (\text{Hz})$$

由此可见,管道内径 d 、长度 L 和容积 V 是对管道系统固有频率 f_n 有直接影响的三个结构参数。为了提高固有频率以减小它对动态压力测量的影响,可采取的相应措施有:

- 尽量缩短测压管道的长度 L 。在安装压力传感器时,力求作到使其前端测压平面与管道内壁齐平,使它直接靠近测压点处, L 达到最短程度。国标有特殊规定者除外。
- 尽量缩小压力传感器前的小容腔体积 V 。上述齐平安装也是减小 V 的有效措施。
- 在不影响测量的前提下,可适当增加测压管道内径。

若压力传感器按如图 35.2-11 所示的直管式安装,则管道系统的固有频率可按下列式计算:

$$f_n = \frac{c}{4L}$$

可见管道内径 d 在公式中并不出现。实际上测压管道太细,由于液体的粘滞性会使吸收效应增大,使压力波的衰减就越显著,这对测量的真实性也是不利的。

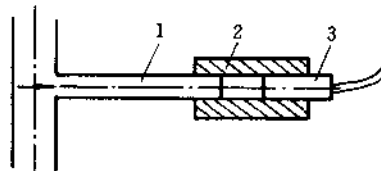


图 35.2-11 直管式安装图

1—测压管; 2—接头; 3—压力传感器

图 35.2-12 所示为常见的压力传感器的两种安装方式。

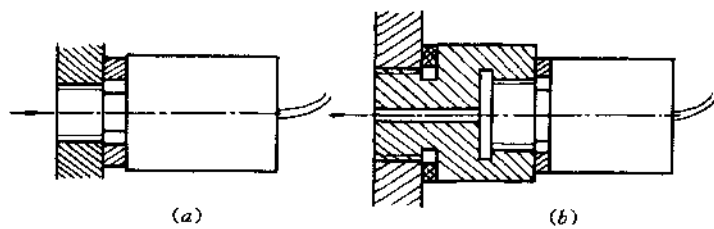


图 35.2-12 压力传感器安装示意图

(D) 压力波动往往会造成直读式压力表指针的振动。一方面会使读数困难;另一方面由于传动机构来回振荡易造成压力表中机件的损坏。为此常在压力表前安装阻尼装置,图 35.2-13 所示为几种常见的阻尼器的示意图。

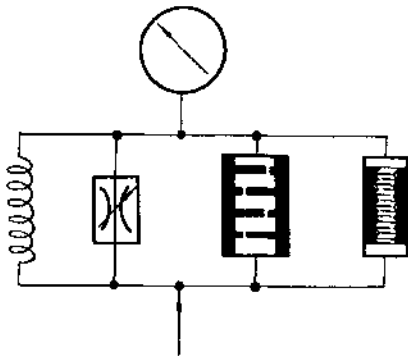


图 35.2-13 压力表的阻尼方式原理图

在压力表的外壳中充满阻尼油液,也可使指针得到阻尼。

(E) 压力仪表的标定和校准。对压力传感器的静态标定工作就是借助于标准压力发生器,人为地对被标定的传感器施加一个已知的标准压力,测出其相应的输出量,然后找出它们之间的对应关系来。静态标定时要求的标准压力发生器(压力表检验泵或称活塞式压力计)如图 35.2-14 所示。

对于一般具有指针、刻度盘和精度等级的压力仪表,进行这样一整套的标定工作叫校准。精度较低档的压力表可用高档级的压力表(标准表)或检验泵来校验它。如果其示值与标准值比较,误差处在规定的精度范围内,就认为被校表是合格的。

压力表检验泵的精度等级一般分为三级:一级为 $\pm 0.02\%$;二级为 $\pm 0.05\%$;三级为 $\pm 0.2\%$ 。它们都要求在周围环境温度为 $20^\circ \pm 3^\circ\text{C}$ 、相对湿度不大于 80% 的条件下工作。

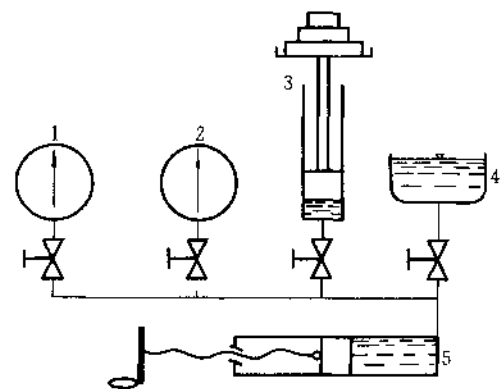


图 35.2-14 压力表静态标定原理图

1—被校表;2—标准表;3—砝码;4—贮油杯;5—压力泵

为了测量动态压力,必须进行动态标定,目的在于找出被标传感器的频率响应特性(或固有频率),或阶跃响应特性。为此就要求采用动态压力信号发生器。目前使用的有正弦压力信号发生器、快速开放装置、落球法和激波管法等动态标定方法。

(2) 转速(n)

转速指的是在试验中要求测量的,具有旋转运动的试验对象(如液压泵轴、液压马达轴或壳体等),在单位时间内旋转的圈数。转速又称为旋转频率。有平均转速和瞬时转速之分。在法定计量单位制中转速的单位规定为 s^{-1} 和 r/min 。

$$1\text{r}/\text{min} = (1/60)\text{s}^{-1}$$

转速的测量仪表及方法:

A. 测速发电机

常用的多为直流测速发电机,它又分为永磁式和他激式;还有高速、低速之分。它是根据在激磁条件一定的情况下,其输出电压与它的轴转速成比例关系的原理来测速的。对于直流测速发电机而言,在测量的每一瞬间,其输出电压 U_t 都与轴的瞬时角速度 ω 或转速 n 成比例,极性与轴的旋转方向对应。

$$U_T = K_T \frac{d\theta}{dt} = K_T \omega = K_T n$$

式中： θ 为轴转角(rad)； ω 为轴的角速度(rad/s)； n 为轴转速(r/min)； K_T 、 K_r 为比例系数。

此关系式只有当测速发电机输出端开路(即负载电阻 $R = \infty$)时才成立。

$$U_T - K_T \omega = E_T$$

式中 E_T 是它的电势，当有负载时，必然有电枢电流产生，因而在电枢电阻 R_S 上要产生电压降，此时电枢电势 $E_T = U_T + IR_S$ ，故

$$U_T = E_T - IR_S$$

可见随着负载电阻的减小， U_T 与轴转速之间非线性关系将愈严重。所以使用时，必须使负载电阻尽可能大些。图 35.2-15 所示为测速发电机在各种负载下的输出特性曲线

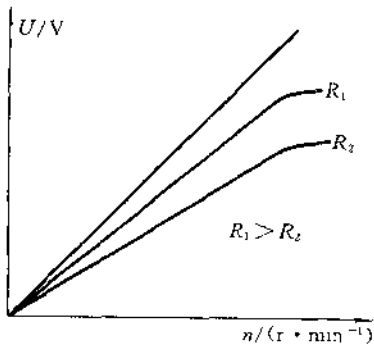


图 35.2-15 测速发电机特性曲线

当转速小于 300r/min 以下的测量，应选用测低速的直流高灵敏度测速机。

国产高速测速发电机有博山电机厂生产的 ZCF 系列他激式直流测速机；低速测速机有北京微电机厂生产的 CYD 系列直流高灵敏度测速发电机。

B. 磁电感应式转速传感器

图 35.2-16 所示为此传感器的结构示意图。它主要由永久磁铁、极靴和线圈所组成。其测速原理如

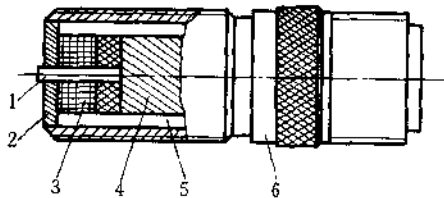


图 35.2-16 转速传感器结构示意图

1—极靴；2—骨架；3—线圈；4—永久磁铁；5—浇注填充材料；6—接线插头

图 35.2-17 所示。在被测轴上安装一个带齿的圆盘或小模数齿轮，它们均由强导磁材料制成。一般齿数为 60 或 6 的倍数。将传感器极靴对准齿顶安装，中间留有小于 2mm 的间隙。因为间隙小、磁阻小，则磁通强；当被测轴带动圆盘旋转时，每转过一个齿，磁通变化一次，在线圈中就要产生感应电势，输出端就呈现出电压幅值的变化，而变化的频率是与被测转速成比例的。这样就将非电量的转速 n 转换为电信号的频率 f 了。然后通过频率计进行转速测量。

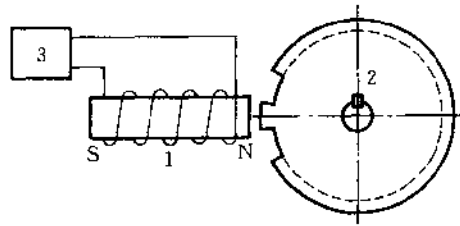


图 35.2-17 转速测量原理图

1—转速传感器；2—齿盘；3—频率计

传感器的输出信号由于波形不规范，在进行测频之前需要经过整形线路处理后变成规矩的方波，再经过微分和削波线路变成脉冲电压信号，此信号频率与原信号频率是一致的。若能测出信号频率 f ，就相当于测出转速 n 了。

$$n = 60f = \frac{60N}{tz} \quad (\text{r/min})$$

式中： t 为测量时间(s)； z 为圆盘齿数； N 为在测量时间 t 内传感器输出的电压脉冲数。

在选择测量时间 t 内，计数信号脉冲数的工作是由数字式频率计来完成的。图 35.2-18 所示为其工作原理框图。

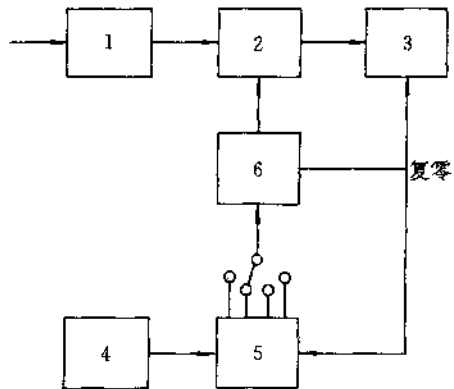


图 35.2-18 频率计工作原理框图

1—整形放大器；2—主门电路；3—十进制计数译码、显示器；4—石英晶体振荡器；5—时基分频器；6—门控电路

根据转速测量的工作原理可知,只要使选择的测量时间 t 和齿盘齿数 z 满足 $tz = 60$ 时,此时数码管显示的数字即为所测转速,单位为 r/min 。测速齿盘齿数 $z = 30, 60, 120$ 。那么相应的测量时间 $t = 2, 1, 0.5$ (s)。图 35.2-19 所示为采用频率计测转速时的波形变化图。

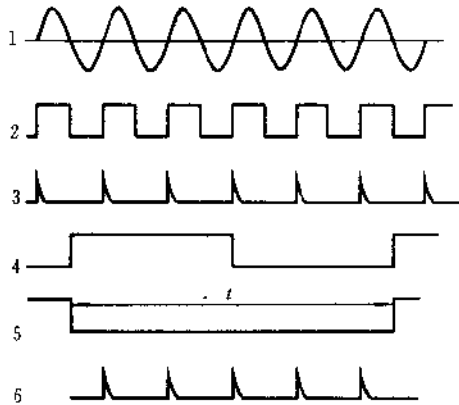


图 35.2-19 频率计测速时的波形变化图
1—输入信号;2—整形后信号;3—削波后信号;
4—时基输出;5—门控信号;6—计数脉冲

此种测转速的方法只能分辨一个脉冲。即一个脉冲代表的转速为分辨率。可见在测量时间里通过的脉冲数 N 越大,它的分辨率越强。故可以通过增加齿数 z 来提高分辨率。当然齿数增加是要受到结构限制的。另外其输出电压幅值与磁通变化速率有关,故此法只适用于测量较高的转速。

此测量方法的误差主要由两部分组成:一是石英晶体振荡器产生的标准频率信号的稳定性和误差。其稳定性是很高的,约为 $10^{-5} \sim 10^{-4}/\text{日}$ 。另一是数字仪表的计数误差。这是由于输入脉冲与门控信号在开始计数与终止计数时不同步而出现的其值 ± 1 个数字。它与计数容量无关。

C. 光电反射式转速传感器

图 35.2-20 所示为其测转速的工作原理图。

被测轴上带一个圆盘,圆盘外侧面上分布有等宽度、黑白相间的条纹。传感器中点光源的光通过透镜 1 变成平行光,经半透明膜的反射,再经过透镜 2 聚焦到圆盘外侧面上。若光点照射到白条上,就反射回来,通过透镜 2 变为平行光,再穿过半透明膜,经透镜 3 聚焦到光敏管上,产生一个电压信号。因此当每转过一根白条,则照射到光敏管上的光增强一次。当圆盘连续旋转时,光敏管则输出近似于正弦的电压信号。将

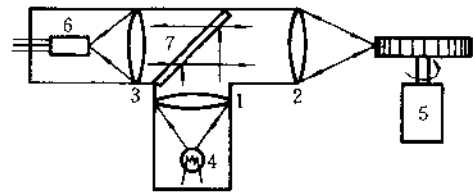


图 35.2-20 光电反射式转速传感器原理图
1, 2, 3—透镜;4—光源;5—被测对象;
6—光敏管;7—半透明膜

此信号输往数字式频率计就可测量和显示转速值了。

综上所述,磁电式和光电式转速传感器与频率计配合测转速的最大优点是可以进行无接触测量,并可以直接数字显示和打印输出测量结果,自动化适应性强、精度高。

D. 霍尔式转速传感器

由于磁电式传感器在测较低转速时,磁通变化速率慢,因而线圈中产生的感应电压较低,可能出现“丢转速”的现象,测量值不可靠。而霍尔式转速传感器是一种磁型传感器。它由霍尔元件、永久磁铁和直流恒流源组成。霍尔元件为敏感元件。根据前面压力测量中叙述过的霍尔效应,可知:

$$E_H = KIB$$

只要使通过霍尔片的电流 I 保持常量,改变磁感应强度 B ,则输出的霍尔电势将随之呈线性变化。图 35.2-21 所示为其工作原理图。

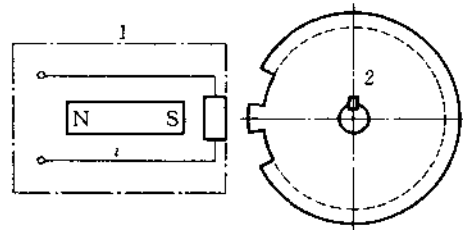


图 35.2-21 霍尔式转速传感器测速原理图
1—传感器;2—测速齿盘

将霍尔片对准测速齿盘安装,当对准齿顶时,磁阻小,磁通强;对准齿间时,磁阻大,磁通弱。磁通变化即 B 值改变,若由恒流源给霍尔片供电, I 为常量,则此时输出霍尔电势 E_H 将随 B 值而变。由于磁阻改变只随气隙变化而变化,与被测转速无关。即霍尔电势的变化频率与被测转速成正比,而其幅值与转速高低无关。所以这种传感器可以测量由极低到极高的转速范围。当然测速齿盘还应由强导磁材料制成。

当测转速时,被测轴带齿盘连续旋转,由霍尔元件上取出的霍尔电势,经整形、放大、微分和削波等处理后,由频率计即可显示测量结果。此种传感器体积小、重量轻、测量范围大。但对温度变化较敏感。

常用的 MP-981 型霍尔式转速传感器技术数据为:

表 35.2-1

测量范围	1~20000r/min(1~20kHz)
测速齿轮	模数为 0.5~3mm, 齿宽 3mm
输出波形	低电平 +0.5V 或更低; 高电平 5V ± 0.5V

(3) 流量(q)

油液的流量是指在单位时间内流过某处(如管道中某截面处、滑阀的节流口处等)的油液的体积、重量、质量。它们分别称为体积流量 q_v (容积流量)、重量流量 q_w 、质量流量 q_m 。

流量的测量仪表及方法:

A. 重量流量的测量方法

如图 35.2-22 所示,将量筒置于具有一定精度的磅秤上,先挂上一定重量的砝码。当往量筒中放油时开始计时,秤杆平衡时停止计时,这样所测得的是在一定时间 t 内流入量筒中油液的重量 w ,故

$$q_w = w/t$$

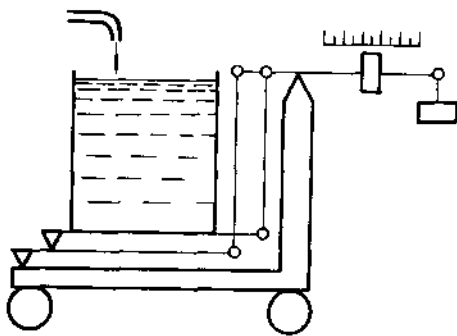


图 35.2-22 重量流量测量原理图

可见此为一平均值,不能反映流量的瞬间变化。此方法的测量误差主要取决于秤的精度和计时器的精度。可以通过电磁阀来控制通油时间,然后称出油的重量,求平均的重量流量;也可以采用光电转换原理,利用秤杆的抬起切断光源来产生脉冲信号,以启动或停止电子计时器。总的来说,此方法操作简单、容易,并具有

一定的精度。但不能测流量的瞬时值,所以此方法适宜于测量静态稳定流量值。通过精确标定后,可用于校准其它流量计。

B. 体积流量的测量仪表及方法

(A) 量筒-秒表法

只要将量筒的刻度经过精确标定之后,用秒表重复测量,然后取平均值,得到对应流满一定体积的油液所需的时间,计算后求出平均体积流量值。测量过程中油液中若悬浮有气泡,将影响体积流量的测量精度,因此应避免产生气泡。而在测重量流量时,气泡产生的影响可忽略不计。量筒-秒表法简单易行,所得结果还是具有一定精度的。特别在测量小流量时,取较长一点的时间间隔,可以得到误差较小的结果。也可以利用液面的升降与光电转换系统配合来控制电秒表的通断计时来实现流量测量。

(B) 浮子式流量计

图 35.2-23 所示为其工作原理图。它主要是由一根垂直放置的锥形管与放在管内的浮子所构成。锥形管是大端朝上,小端朝下安装。浮子的最大外径小于锥形管的内径,因此浮子可在管内沿轴线方向自由移动。其工作原理是根据节流公式:

$$q_v = C_d A \sqrt{\frac{2g}{r} \Delta p}$$

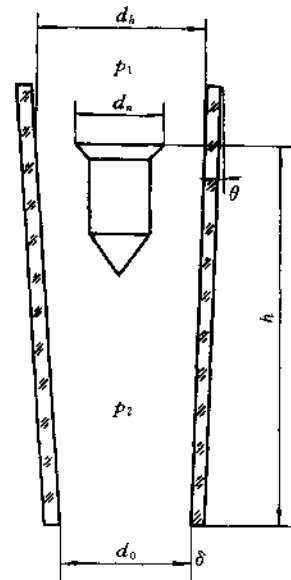


图 35.2-23 浮子流量计工作原理图

当有油液自下而上通过由于锥管内径与浮子最大外径之间所形成的缝隙时,浮子的重力和管道缝隙的节流阻力,造成浮子上、下的压力差 $\Delta p = p_2 - p_1$ 。此压差乘以浮子的最大截面积 A_f ,即为作用于浮子下面,使它上升的浮力。在此力作用下,浮子上升;同时它与锥管之间的缝隙面积增大,阻力减小,直到当浮力等于浮子浸在油液中的重力时停止上升,达到平衡位置。

此种流量计由其工作原理可知,是属于变截面、等压差流量计。由于其结构简单、工作可靠,压力损失恒定,在工厂和一般要求的试验中得到较为广泛的应用。它的缺点是对污染较敏感、性能参数受油液种类、粘度、温度等因素影响较大,并且不能应用于高压下和动态流量测量。另外每台流量计必须单独标定,精度一般为 1.5~2.5 级。

(C) 涡轮流量传感器

图 35.2-24 所示为其结构装配原理图。它的主要零件有涡轮组件、导流架(或称支撑架)、壳体和磁电式传感器等。涡轮由导磁材料制成,其表面有几片涡轮叶片,它由轴承支承在导流架上,且处于通油管的中央,使它的轴线与管道轴线一致。当有油液流过时,由于具有一定的流速和动能,就要推动涡轮旋转。其旋转的速度和方向取决于流速和叶片的倾角方向。所以

一般的涡轮流量传感器只能接受单方向流动的油液。因为流速是与通过它的流量成正比的。只要能测出涡轮的转速就可知流量的大小。传感器的壳体是由非导磁的或导磁率较低的材料制成,如铝合金、不锈钢等材料。其上安装有磁电式转速传感器,它是对准涡轮叶片的,可将涡轮的转速变成近似正弦的电压信号的频率 f :

$$q_v = 60 \frac{f}{\zeta} \quad (\text{L/min})$$

式中: f 为传感器输出信号的频率(Hz 或 r/s); ζ 为仪表常数。

所谓仪表常数就是当通过传感器一升油液时,对应输出多少个电压脉冲数。每只传感器出厂前,都要在常温下用水单独进行标定;并将测出的仪表常数附在说明书上。当被测流量的油液粘度在 $5 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ (5cSt) 以下,并在常温下使用时, ζ 值可不必重新标定。而在大多数的液压试验中,既不是低粘度油液,又不是在常温下,为了准确测量流量,不能援引生产厂提供的仪表常数,而是要在试验现场进行标定或在标定装置上根据具体的使用条件重新标定出仪表常数。

由它的工作原理可知,利用这种传感器还可以测量流过传感器油液的总体积 V

$$V = N/\zeta \quad (1)$$

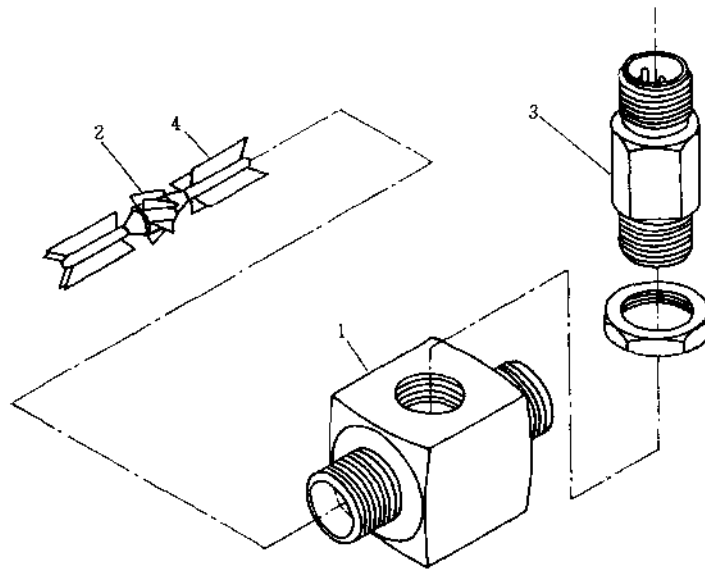


图 35.2-24 涡轮流量传感器结构原理图

1—壳体;2—涡轮;3—转速传感器;4—导流架

式中: N 为传感器输出的脉冲数。

因为 $\zeta = N/V = 60f/q_v$, 从使用角度看, 要求在使用过程中 ζ 始终应保持常数, 实际上并不能作到这点, 必须充分考虑如油温、粘度、安装方式等对 ζ 的影响, 从而减小测量误差。只有当涡轮上的阻力矩为零时, 才是 ζ 值保持常数的理想条件。图 35.2-25 所示特性 1 为水平线, 是理想特性。而实际特性 2, 当通过的流量小时, 与理想特性差距较大。因为涡轮上的阻力矩是客观存在的, 它来自轴承的摩擦, 涡轮在粘性液体中运动时要受到粘性阻力等。实际的阻力矩导致流

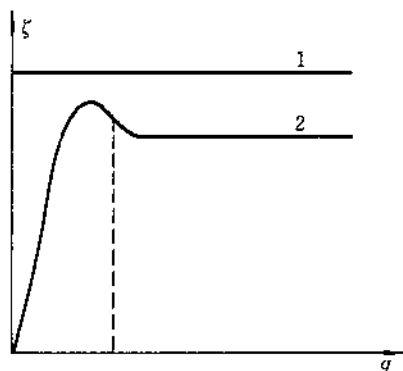


图 35.2-25 仪表常数 ζ -流量 q 关系曲线

量增长速率与涡轮转速增长的速率不一致。特别是在小流量通过的情况下, ζ 值很小。由于流速小、动能小, 驱动涡轮旋转的主动动力矩小, 相对来说涡轮上的阻力矩就不可忽略了; 另外对于高粘度的液体, 涡轮旋转需要克服的粘性阻力矩就大了。图中特性曲线 2 是对于某一种工作油液、在一定的温度和安装方式下获得的。由曲线可见, 只有当通过的流量较大时, 流速大、动能大, 这时驱动涡轮旋转的主动动力矩比阻力矩大得多时, ζ 值才趋于不变。一般在雷诺数 Re 小于临界值的区域内, ζ 值变化大, 传感器不能正常工作。所以要确定一种涡轮流量传感器的工作范围, 一定要在 ζ 值

不变的区域。因此在实际使用时, 为了保证测量的准确性, 应尽量在靠近量程上限范围内使用。另外还须注意传感器进、出口管道的安装, 要求前后均有一段平直管道。上游管道平直段的长度为 $10 \sim 20d$; 下游为 $5d$, d 为管道内径。在出口管中要求有一定的背压, 以防止气穴的产生。

此种流量传感器具有体积小、重量轻、使用方便等优点; 在测量低粘度、大流量油液时精度好, 也具有一定的动态响应。但它一般只用于测量稳定流量。它的缺点是仪表常数标定不方便, 且随介质种类和油温而变。其量程范围较窄, 一般为 $10:1$, 所以当流量变化范围较宽时, 需要转换不同规格的多个传感器, 使用就比较麻烦了。

(D) 椭圆齿轮式流量计

图 35.2-26 所示为其工作原理图。它主要由一对密封在壳体内的椭圆齿轮组成。在进、出口之间的压力差的作用下, 推动椭圆齿轮旋转。(a) 图所示的状态时, 齿轮 1 由于油压产生的作用力对其轴而言是平衡的, 即推动它的外力矩为零; 而在齿轮 2 上, 由于 p_1 所产生的力对其轴的力矩比 p_2 所产生的反方向力矩要大, 因此在这差值力矩作用下, 推动齿轮 2 按顺时针方向旋转, 从而也就带动齿轮 1 按反时针方向旋转, 此时齿轮 2 为主动轮。然后随着齿轮的转动变为 (b) 图状态, 在旋转过程中作用在齿轮 2 上的外力矩逐渐减小, 而齿轮 1 上的外力矩逐渐增加, 直到 (c) 图状态为止。此时齿轮 1 上的外力矩增到最大, 而齿轮 2 上由于油压的平衡而导致外力矩为零, 这样就形成与 (a) 图完全相反的状态, 齿轮 1 变为主动轮了。因此只要有压力差存在, 这种状态就会交替发生, 这对齿轮也就一直不停地旋转。由图可见, 随着主动轮的旋转, 就会将它与壳体之间形成的月牙形封闭腔 (I、II) 内的油液由进口输送到出口排出。齿轮每转一圈, 它与壳体之间形成两次月牙腔。故这对齿轮啮合转一

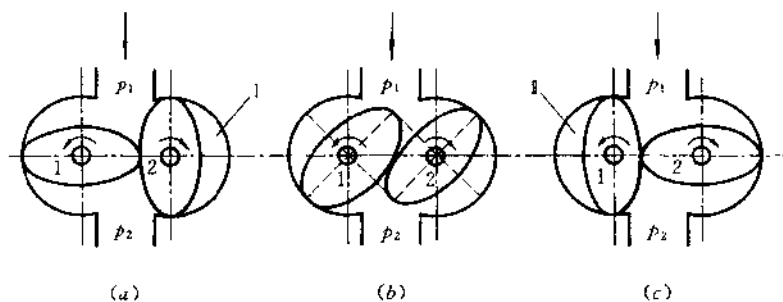


图 35.2-26 椭圆齿轮流量计工作原理图

圈排出的油液体积等于四倍的月牙腔体积,这就是它的排量。所以只要直接测量齿轮轴的转数和转速就可知通过它的油液体积和流量了。

通常椭圆齿轮式流量计是由其轮轴通过减速器而带动指针和机械计数器,以显示流过它的油液总体积。也可使其轮轴带动测速发电机,以获得与转速成正比的电压信号;还可以带动轻质齿盘等,与光电式或磁电式转速传感器配合获得与转速成正比的脉冲频率信号。由于椭圆齿轮啮合转动时具有的摩擦、惯性、间隙等因素,决定了它只适合于测量稳定的流量。另外它是依靠进、出口之间压差来工作的,必然在齿轮与壳体之间的间隙处有油液泄漏,这部分油液并未通过计量月牙腔而输出,引起测量误差。当测量低粘度、小流量油液时,或测量大流量且压差大时,泄漏都比较严重。为了消除此误差,只有在试验的具体条件下进行精确标定。国产的 SLC 型伺服流量计,解决了用椭圆齿轮式流量计测低粘度和小流量油液的问题。其原理是通过检测进、出口压力差,在齿轮轴上施加相应的补偿力矩,使压力差保持为最小值。

(E) 齿轮式流量传感器

这种传感器的主要部分就是一台齿轮式液压马达,只不过它把两齿轮封闭在壳体中,没有轮轴外伸。在油液的压力作用下推动两齿轮啮合旋转,而每转一圈所需要供给它的油液的体积 V_M 即是它的排量。 V_M 是可以精确标定而获得的。因此只要能测出齿轮的转速就可知通过它的流量值了。

$$q_v = V_M n$$

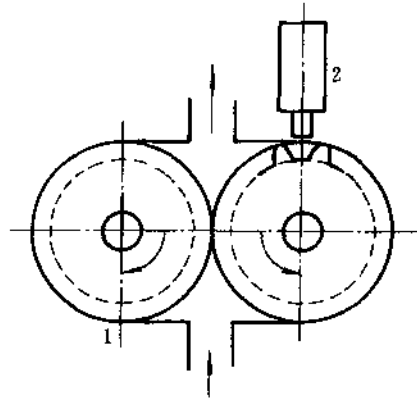
如果在壳体一侧对准一个齿轮的轮齿部分安装一只磁电式转速传感器或压力传感器,就可将齿轮的转速转变成输出信号的频率了。最后通过二次仪表的处理可由液晶显示屏显示出具有所需单位的流量值;还可以输出模拟量的电压信号和数字量的 BCD 信号。图 35.2-27 所示为其结构原理图。由于它的所有零件是通过精密加工和装配的。故这种传感器在工作过程中压力损失较小;可以测量正、反向流量,且具有一定的动态响应能力。

(F) 用液压缸测量静态和动态流量

因为液压缸本身的特性决定了它的输出速度 v 是与外部输给它的流量 q_v 成正比的

$$q_v = Av$$

式中: A 为油缸活塞的有效面积。一般作为测流量用的液压缸是双作用式双杆液压缸。对它的要求是:启



35.2-27 齿轮式流量传感器工作原理图

1—壳体;2—传感器

动压力要小。这意味着运动副的摩擦要小,运动要灵活、轻便、平稳;容积效率要高,即内部漏损要小;运动部分的惯性要小、固有频率要高等。所以应根据具体情况,使用场合,侧重保证上述要求中对测试结果影响较大的要求。对于无载条件下静态流量用的液压缸,主要是保证启动压力小的要求。为了使运动副之间的摩擦减至最小,在活塞与缸体之间、活塞杆与端盖之间不放密封圈,靠提高加工精度和装配精度来达到“间隙密封”。另外为了既保证摩擦小,又能使漏损小这两条要求,可采用“包氟 O 型”橡胶密封圈,其密封作用仍是靠橡胶的弹性,而减摩性却是靠氟塑料膜层。对于在高压下静态流量测量而言,主要考虑的是容积效率高、内部漏损小;启动压力的要求就属于次要的了。

若采用液压缸来测量动态流量时,除了要保证上述无载措施外,对活塞的有效面积、两腔的容积、与液压缸相连的管道直径和长度、运动部分的质量等因素都需要仔细慎重考虑和匹配,因为它们将直接影响液压缸的固有频率和使用范围。这种“无载液压缸”常用在电液伺服阀的频率特性试验中。

根据上述测流量原理,当然旋转式液压马达同样也可用于流量测量。

$$q_v = V_M n = \frac{30}{\pi} V_M \omega$$

式中: q_v 为被测流量; V_M 为液压马达排量。

只要能测出液压马达轴的转速 n ; 并精确标定出排量 V_M 就可知流量了。液压马达作为流量计只能测量静态流量。但它可作到正反向测量,测量范围宽、使用方便。若使其轴带动测速发电机就可得到转速的模拟量输出信号。这种测体积流量的方法已经在国内

很多研究单位和工厂使用。实践证明,只要液压马达本身质量满足要求,配合采用较先进的测速装置,可以达到较高精度的自动记录数据和数字显示的测量结果。

C. 流量计的标定

因为流量测量仪表的精度和量程直接受到工作油液的种类、油温、粘度等因素的影响。而一般流量计生产厂家只提供流量计在常温下水作介质时标定的特性曲线或仪表常数。这些数据在实际液压试验中使用价值不大,因而要求按实际使用条件重新进行标定,或在使用现场标定。下面介绍几种简易的静态标定方法:

(A) 静态重量标定系统

图 35.2-28 所示为此种标定系统的工作原理图。要求它能精确测量出通过被标流量计的重量流量,然后换算成体积流量,再与被标流量计的显示值进行比较,以确定被标流量计的精度或仪表常数。

将物理性能已知,且温度一定的干净油液先经过

液流校正器 12,变成稳定的流束进入被标定的流量计 11。流量大小的选择由油源或流量控制阀 8 控制。当不标定时,分配器 3 使油液直接流回油池。预先在秤杆上挂一定重量的砝码,它等于称重油箱 1,放油阀 4 及管道、油箱底部规定的预置容积的油液重量之和。由于挂上了砝码,秤杆靠在下限位块上。一旦给电磁铁 6 通电时,分配器转至对准油箱 1 的进口,当油液达到预置的重量时,秤杆抬起,切断光电开关的光源,光电开关发出信号,启动电子计时器计时。然后立即在砝码盘上再加上与要求测定的容积油液重量相应的砝码,秤杆仍落下靠于下限位块上。当流入的油液重量达到所加砝码重量时,秤杆再次抬起,第二次切断光源,光电开关发出信号停止计时;同时也使电磁铁 6 断电,分配器恢复原位。这样就测出了流入一定重量的油液所需的时间间隔,就可计算出此段时间内的平均重量流量。将它与标定温度下油液的重度 γ 相除所得的商就是对应的体积流量。

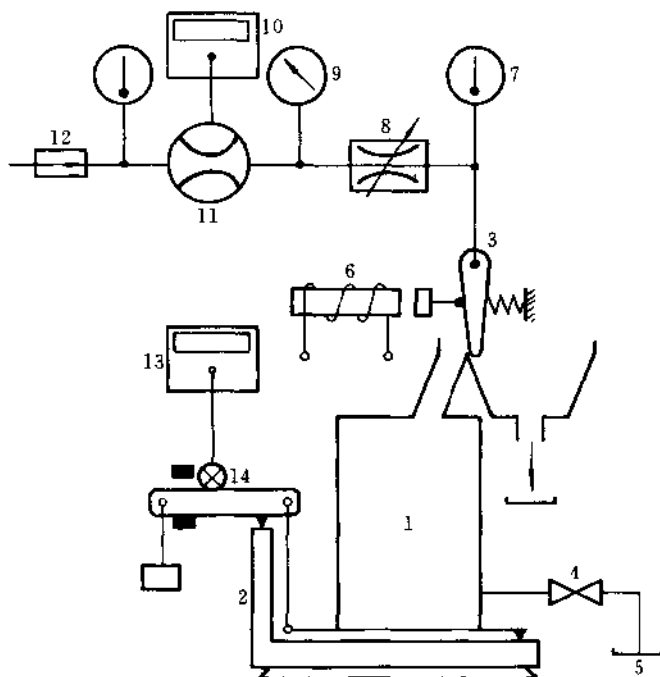


图 35.2-28 静态重量标定系统原理图

1—称重油箱;2—台秤;3—分配器;4—放油阀;5—油池;6—电磁铁;7—温度计;8—流量控制阀;9—压力表;
10—被标流量计二次仪表;11—被标流量计;12—液流校正器;13—电子计时器;14—光电开关

(B) 体积—时间标定系统

图 35.2-29 所示为此系统工作原理图。供油油箱内有一活塞、活塞下充满已知物理性能,一定温度的

油液;活塞上为压力恒定的气体。在往外供油的过程中,油箱上腔压力 p 始终保持常值。 S_1 和 S_2 是两只液位信号发生器,它们位置之间的油箱容积是事先经

过精确标定的。在标定流量计时,从油箱中流出的油液经液流校直器 3、被标定流量计 4 和流量控制阀 6 后回油箱。流量大小由阀 6 调节。当油箱中液面下降到 S_1 时,它发出信号使计时器 8 启动开始计时;液面下降到 S_2 时,发出信号停止计时。这样就测得了流

出已知体积油液所需的时间间隔,也就得出了对应的平均体积流量。将它与被标定流量计的二次仪表显示值比较,以确定被标定流量计的精度和仪表常数。

(C) 流量计的现场标定和校准系统

图 35.2-30 所示为此系统工作原理图。

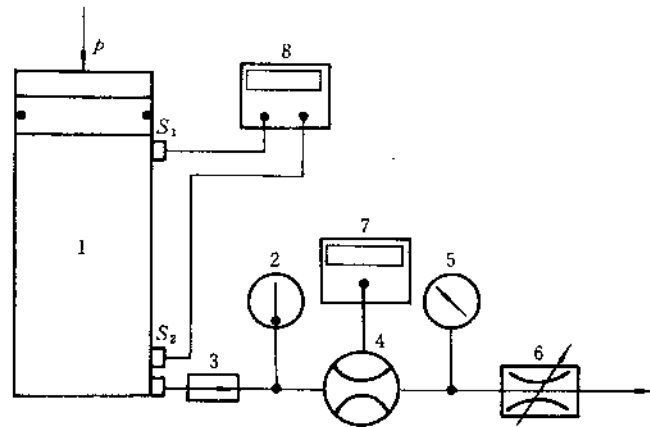


图 35.2-29 体积-时间标定系统原理图

1—供油油箱;2—温度计;3—液流校直器;4—被标流量计;
5—压力表;6—流量控制阀;7—二次仪表;8—电子计时器

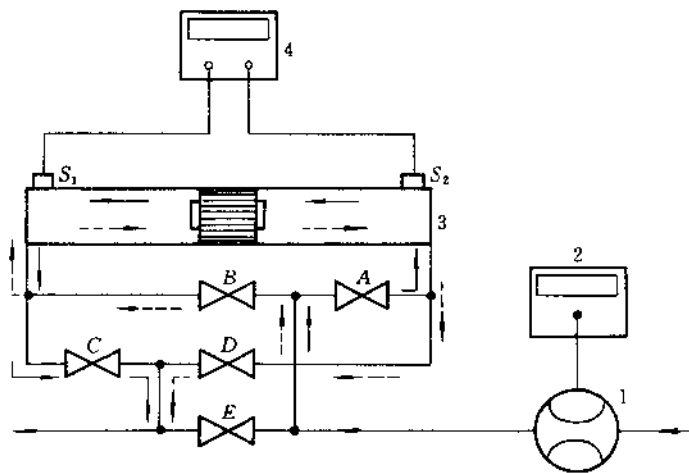


图 35.2-30 现场标定系统原理图

1—被标定流量计;2—二次仪表;3—标定器;4—电子计时器;5—A、B、C、D、E 为截止阀

它也是根据容积法测流量的原理工作的。标定器 3 是由一段直管和管内活塞所组成。活塞由通过被标定流量计 1 的油液所驱动。在 S_1 和 S_2 两位置信号发生器之间的直管内容积是经过精确标定的,只要活塞经过此位置时就发出一个电信号,利用此电信号去

控制电子计时器 4 的启动和停止,以获得活塞通过这段管道的平均速度,也就对应着平均体积流量。将它与被标定流量计二次仪表显示值进行比较,就可确定在使用现场条件下流量计的精度和仪表常数。

根据油路图可知,它是双向都可进行标定的,只不

过要取决于 A、B、C、D、E 五个截止阀的开闭状态。各阀的开闭状态和活塞运动方向见表 35.2-2。E 阀开启将标定系统“短路”，油液从被标定流量计流出后，不进入标定系统而直接经 E 阀去工作系统。当各阀门调整好以后，再关闭 E 阀，使系统投入工作。当活塞左行或右行结束时，一定要自动将 E 阀打开，否则油路堵死，系统压力升高。

表 35.2-2 阀的开闭状态和活塞运动方向

活塞运动方向	截止阀状态	
	开	关
左 行	A	B
	C	D
		E
过 渡	E	
右 行	B	A
	D	C
		E

这种标定系统可以直接并联安装在有流量计的工作系统管路中，以便进行现场标定，不需要将被标定流量计从安装处卸下来。这对于流量计的合理使用提供了有利的条件。

(4) 转矩(T)

转矩是指作用在轴上的力与其作用线到轴中心的距离的矢量积的总和，如图 35.2-31 所示。若以顺时针为矢量的正方向，则转矩的表达式为：

$$T = F_1 r_1 - F_2 r_2 - F_3 r_3$$

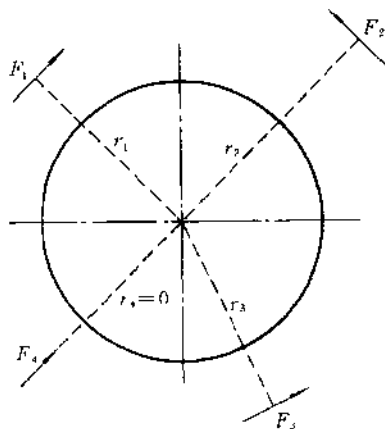


图 35.2-31 转矩形成图

转矩的单位由力和长度单位的积来表示。法定单位制规定为 N·m。

在液压试验中，一些动力轴上功率的传递是在一定转速下，通过所受的转矩来传递的。一般是将传递的转矩和转速同时测量，此两参数可作为功率测量的直接测量参数；所测出的转矩值也可用于计算液压机械的机械效率等。

转矩的测量仪表及测量方法：

转矩测量仪表按其工作原理可分为两大类：一类是根据牛顿第三定律，作用力与反作用力相等的原理设计的；另一类是利用扭力轴受扭后要产生一个变形扭转角的原理设计的，直接测量此扭转角的大小来衡量所传递的转矩大小。

A. 反作用转矩测量法

此法是根据作用转矩与反作用转矩相等的原理工作的。利用测量已知长度的力臂端部上的力来实现的。如摩擦测功器、平衡电机、磁粉加载器等都是通过外壳上的杠杆将转矩转换成杆端的力来测量的。

B. 数字相位差式转矩仪

它是属于通过测量扭力轴的变形扭转角来测量转矩的方法。扭力轴的设计原理如图 35.2-32 所示。

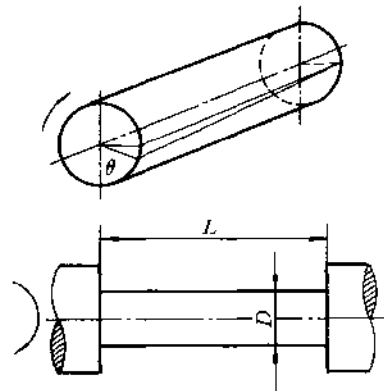


图 35.2-32 扭力轴结构示意图

当扭力轴受扭后，一端相对于另一端就会产生一个扭转变形角 θ 。根据工程力学原理可知

$$\theta = \frac{32L}{\pi GD^4} T \quad (\text{rad})$$

式中 L 为扭力轴长度(m)；D 为扭力轴直径(m)；T 为外加转矩(N·m)；G 为轴材料的剪切弹性模数。

由此可见，只要轴受扭在材料的弹性极限以内，扭转角 θ 与外加转矩 T 是成正比的。所以 θ 的大小就可以直接代表扭转的大小。若能通过采用各种传感

器将此扭转角 θ 转换成其它的物理量,如相位差、位移、电感、电容、光点位移等并加以测量和显示,就是一套完整的转矩测量仪。

数字相位差式转矩仪由磁电式转矩传感器和数字式相位差计(二次仪表)两部分组成。图 35.2-33 所示为其工作原理简图。在扭力轴两端各安装有一个测速齿轮,它们之间的安装位置保证两齿轮相互对准。每个齿轮外侧都安装有一只磁电式转速传感器。扭力轴在动力源带动下旋转;在两转速传感器中分别产生

近似正弦的电压信号 S_1 和 S_2 。当扭力轴不受扭时,两信号是同相位的,它们之间无相位差角。若扭力轴受扭以后,产生扭转变形角 θ ,即引起两齿轮之间相对位置错移,因而使两输出信号 S_1 和 S_2 之间形成一个相位差 $\Delta\alpha$ 。此相位差 $\Delta\alpha$ 与扭转角 θ 成比例,而 θ 又与扭力轴所受转矩 T 成比例。这样就把被测量转矩转换成两信号的相位差了。故与此转矩传感器相配的二次仪表就是相位差计。

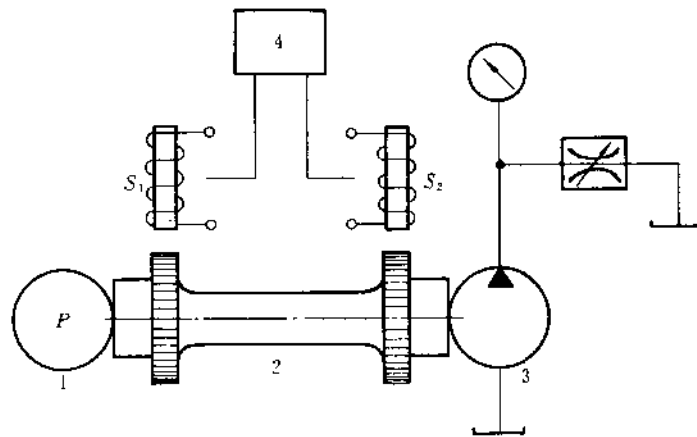


图 35.2-33 数字相位差式转矩仪原理简图

1—动力源;2—扭力轴;3—负载装置;4—数字式相位差计

图 35.2-34 所示为磁电式转矩传感器的结构原理图,在扭力轴 9 两端各装一外齿轮 7,而与之相对的

两个内齿轮 6 与永久磁铁 5 安装在转子 2 上。转子可由固定在壳体 1 上的驱动电动机 3 通过皮带带动旋

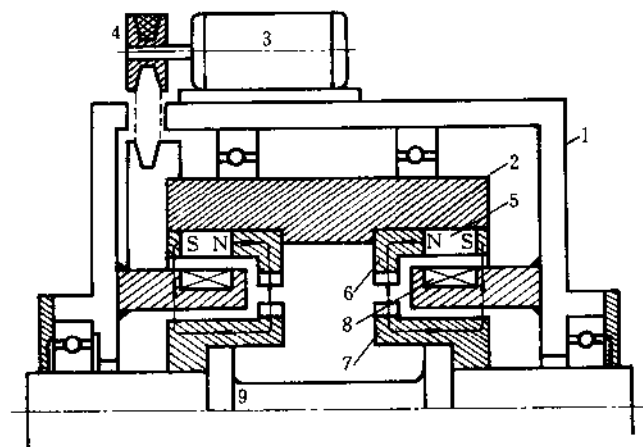


图 35.2-34 磁电式转矩传感器结构原理图

1—外壳;2—转子;3—驱动电动机;4—皮带轮;5—永久磁铁;6—内齿轮;7—外齿轮;8—线圈;9—扭力轴

转。不论是轴旋转、转子旋转,还是两者同时反向旋转均可使轴与转子之间产生相对的旋转运动。这样就使内、外齿轮的齿之间的相对位置发生变化,时而齿顶相对,时而齿顶与齿间相对。由于内、外齿轮之间的间隙正是磁路的气隙部分,齿顶相对时气隙小、磁阻小、磁通强;齿顶对齿间时气隙大、磁阻大、磁通弱。当内、外齿轮有相对运动时,磁通周期变化,在感测线圈 8 中就要感应出近似正弦的电压信号。此原理与前面叙述过的转速测量原理是一样的。可见为了测量转矩值,只要将此两信号输往相位差计,测出相应的相位差值即可。为了在测转矩的同时测出轴的转速值,就只要将此两信号之一输往频率计即可。

这种传感器的工作原理决定了内、外齿轮之间必须存在相对运动,才可能有信号输出。若用于测量静转矩时,扭力轴是不旋转的。为了获得内、外齿轮之间的相对运动,所以使内齿轮所在的转子由一专门设置的附加电动机驱动。其转向应与扭力轴受扭方向相反。另外,前面已叙述过,按上述原理检测到的输出信号的幅值是磁通变化的速率有关。也就是说在测量低速下的转矩时,由于输出信号幅值低会带来较大的测量误差。所以在测量低速大转矩马达的特性时就应注意此问题。为此也希望增加内、外齿轮间的相对运动速度。在附加电动机运转的情况下,若仍以输出信号之一为转速信号时,则所测出的转速值为扭力轴转速与附加电动机驱动转子的转速之和。

这种传感器测量准确、使用方便、设计保证在正、反方向受扭都有一倍左右的超载能力。

数字式转矩仪是上述传感器的二次仪表。由传感器将被测转矩转换成两同频率正弦电压信号之间的相位差角 $\Delta\alpha$,所以二次仪表的功能之一就是要测出此相位差角 $\Delta\alpha$ 的大小,并通过数字显示直接表示出具有规定的单位(如 $N\cdot m$ 、 $kgf\cdot m$)的转矩值;实际上它起着相位差计的作用。它的另一个功能就是在显示转矩的同时还要测量和显示被测轴的转速,这样它又起着转速计(或频率计)的作用。

图 35.2-35 所示为它的方块图和信号波形变化图。波形 1,2 是转矩传感器输出的近似正弦的信号 S_1 和 S_2 。它们之间在扭力轴不受扭时就具有一个固定的原始相位差角 $\alpha_0(180^\circ)$;虚线波形表示受扭后具有相位差角为 $\alpha_0 + \Delta\alpha$ 的波形。 S_1 和 S_2 信号经过整形、放大、微分、削波等处理后变为脉冲信号,如波形 3,4 所示,其周期与原信号相同。波形 5 为门控电路

I 综合后输出的门控信号,其波谷宽度代表着两信号的相位差角 $\alpha_0 + \Delta\alpha$,也就是把扭力轴受扭后的扭转角变成了波谷宽度,也就是对应着在全周期角 2π 中的占空比 $(\alpha_0 + \Delta\alpha)/2\pi$ 。此占空比与外加转矩成比例。在门控信号控制下,门电路 1 开通,让时基脉冲通过。时基脉冲是由标准的时基振荡器产生的,频率为 1MHz。波形 6 为门电路 1 的输出信号。可见在对应的门控信号的波谷处由时基脉冲所填充,脉冲数与标准时基周期 $T_0(T_0 = 1/1\text{MHz})$ 的积就是门电路开通时间。门电路 1 的输出信号输往门电路 2。而门电路 2 又受门控电路 II 控制,波形 7 为门控电路 II 输出的门控信号。所控制的开通时间 τ 就是测量时间。 τ 的长短是由转矩仪静态标定来确定的。在 τ 时间间隔里显示计数窗 1 的显示值为具有所要求的工程单位的转矩值。为了消除原始相位差 α_0 的影响,设置了门电路 3 与零点调节修正电路。而门控电路 II 是由“时间系数”调节电路控制的,控制着 τ 的长短。而 τ 的确定是要通过静态标定来确定的。波形 9 即为最后显示的转矩值对应的脉冲数。

为了在测量转矩的同时,由显示计数窗口显示轴的转速值,将 S_2 信号经整形放大后的信号由“内接”方式输往转速测量电路。也可由外接转速传感器的信号来测量转速。

这种测转矩方法比较先进,采用数字显示,使用方便;同时可获得数字量(BCD)和模拟量的电压输出信号;自动化适应性强;精度高。

常用的 DSTP-5 型磁电式转矩传感器的技术数据见表 35.2-3。

表 35.2-3

感测齿轮	60 齿/ r , 模数 0.9
额定转矩时扭转角	$\pm 1.5^\circ$
额定转矩 T	49N·m
允许超载	在 120% 以内
冲击超载	在 200% 以内
速度范围	0~6000 r / min
附加电动机	$\bar{V} = 380\text{V}$, $n = 1360\text{r}/\text{min}$, $P = 0.2\text{kW}$

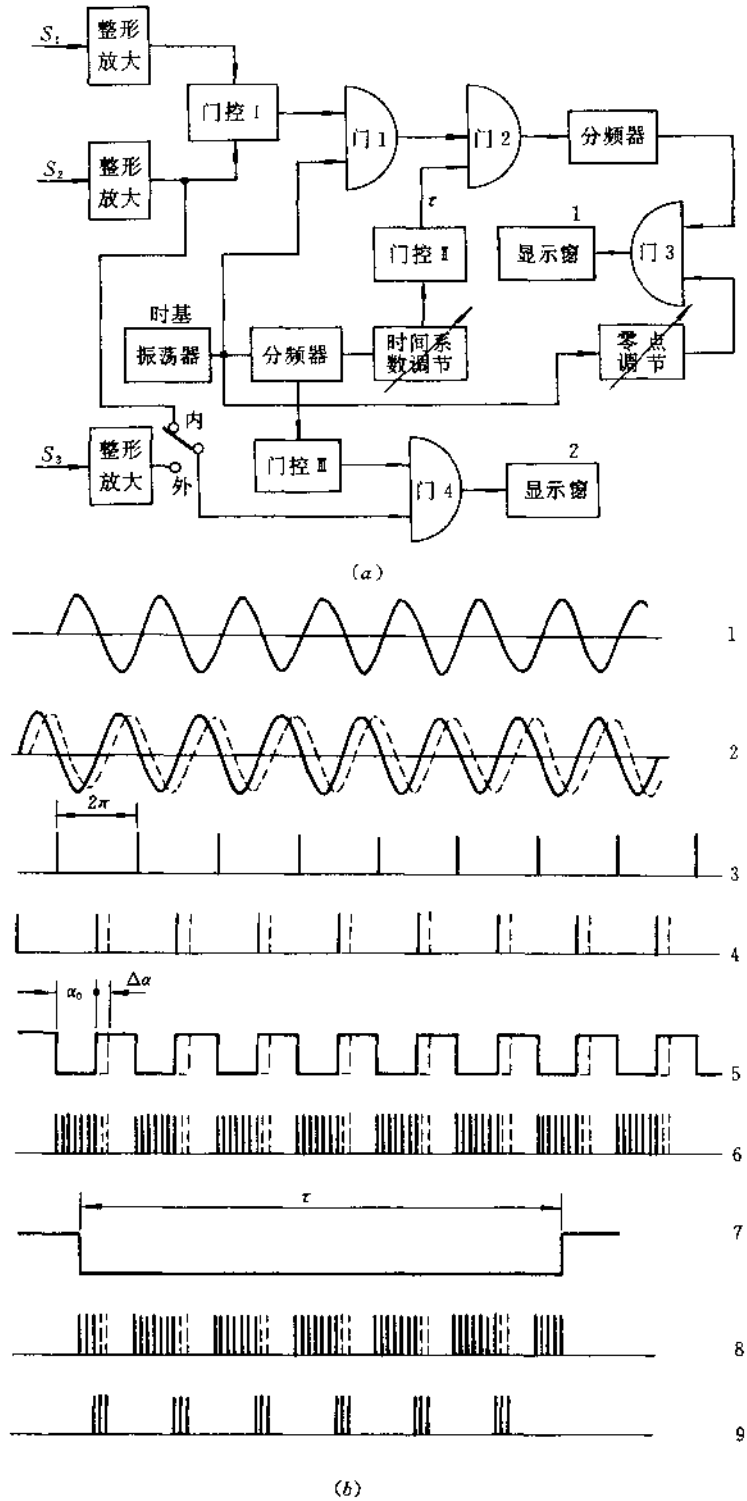


图 35.2-35 转矩测量仪的原理框图和波形变化图

DSTP 型系列转矩传感器的测量范围由 0.49 ~ 2942N·m 之间分为 12 级。与此系列传感器配套使用的数字式转矩仪有 DTM-407、408 型和 TS-200 型。其中 DTM-407 型技术数据见表 35.2-4。

表 35.2-4

测扭部分	
输入信号	由磁电式传感器来的具有相位差的两近似正弦的信号
显示范围	0000~9999
测量时间	0.1~999.9ms
零点调节范围	0000~9999
量程范围	1、2、5、10(人工选择)
小数点位置	人工选择
显示时间	0.2~3s(人工调节)
显示单位	kgf·m(1kgf·m=9.81N·m)
测速部分	
输入信号	磁电式传感器的输出信号
输入电压	0.3V(p-p)~15V(p-p)
输入信号频率范围	100Hz~20kHz
时基 1s 或 0.1s	显示范围 0000~9999
传感器脉冲	60p/r 或 120p/r

C. 转矩仪的标定

为了使测量结果准确、可靠,最好定期对转矩传感器及其二次仪表同时进行标定。

(A) 单臂杆静态转矩标定器

它是最简单的静态标定器。由一单向悬臂杆和砝码组成。标定时把悬臂杆安装在被标定传感器轴一端上,轴的另一端夹紧不动。在杆端加上标准砝码,即对传感器施加了标准转矩,将此值与显示值进行比较。此方法简单易行。但其标定精度取决于悬臂杆长的测量精度和砝码的精度。其严重的缺点是在给传感器施加静转矩的同时,还给轴端附加一个弯矩。为了消除弯矩的影响,轴必须被很好地支承。

(B) 双臂梁静态转矩标定器

图 35.2-36 所示为双臂梁标定器的结构原理图。双臂梁 4 的轴支承在两个精密轴承上;砝码 3 加在梁两端的砝码盘上,砝码盘挂在特设的刀口上。梁的水平度由顶部的水平仪 5 来衡量。由于砝码所加的力是不能连续调节的,所以增设了一个微调加力器 2。砝码到中心的距离为 L ,微调加力器到中心的距离为 l ,

故施于轴上的转矩 T 为

$$T = WL \pm Fl$$

式中 W 为砝码重力; F 为微调加力器施加的力。

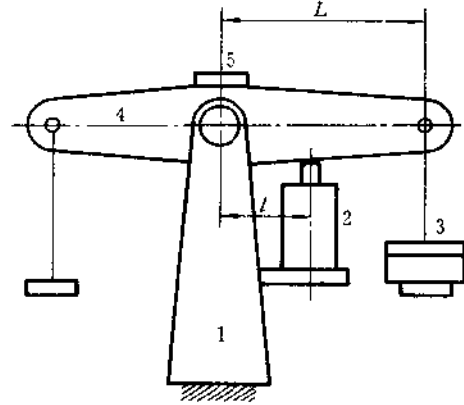


图 35.2-36 双臂梁式静态转矩标定器

此方法也比较简单,其精度除砝码及微调加力器的精度外,主要取决于与双臂梁有关的一些因素:梁臂长度的影响。对于一定量值的转矩而言,可采用短臂和重砝码;也可采用长臂和轻砝码,这与标定器安装位置等有关。而具体臂长的确定,却要根据当地的重力加速度来决定。目的是为了当加上一定整数质量的砝码时,使它的重力与臂长 L 相乘得到整数的标准转矩值。例如:标准重力加速度为 9.8067m/s^2 ,若取 $L = 1.5296\text{m}$,则当加上 25kg 质量的砝码时,所加转矩 T 为

$$T = 25\text{kg} \times 9.8067\text{m/s}^2 \times 1.5296\text{m} = 375\text{N} \cdot \text{m}$$

若当地重力加速度为 9.8155m/s^2 时,取 $L = 2.547\text{m}$,则加 25kg 质量的砝码,所加转矩值 T 为

$$T = 25\text{kg} \times 9.8155\text{m/s}^2 \times 2.547\text{m} = 625\text{N} \cdot \text{m}$$

另外还要考虑双臂梁的刚度和抗弯能力。为了提高精度,必须减小支承梁的轴承的摩擦。可采用高精度的滚珠轴承、气浮轴承和液体静压轴承等。

(5) 位移(S)

在液压试验中需要测量的位移有直线位移和角位移(即角度)。测量范围很宽,一般直线位移由几微米(μm)直到几米(m);角度由几秒($''$)到 360° 。它们的单位是:法定计量单位制规定为 m(米)、cm(厘米)、mm(毫米)、 μm (微米);rad(弧度)。

$$1^\circ = (\pi/180^\circ)\text{rad} = 60' = 3600''$$

位移的测量仪表及方法:

A. 直线位移的测量

(A) 光学测量仪测量

采用工具显微镜、带分划板的光学读数管等都可测直线位移和角位移,精度可达 0.01mm 以上。用入射式光学读数管测位移,精度可达 0.001mm。这些都可以作到无接触测量,但只能进行静态测量。

(B) 电位计式位移传感器

图 35.2-37 所示为由两只电位计组成的桥式测量电路。其中一电位计的滑臂由被测对象带动。两滑臂之间的电压大小与位移量成比例,输出电压的极性与运动方向对应。此方法简单易行,还可用于频率不太高的动态测量场合。

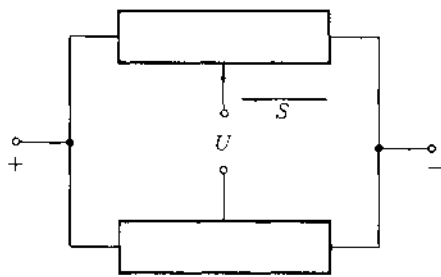


图 35.2-37 电位计式位移传感器

(C) 差动变压器式位移传感器

它是根据电磁感应原理工作的。其结构原理及线路如图 35.2-38 所示。它由初级线圈、两份差接的次

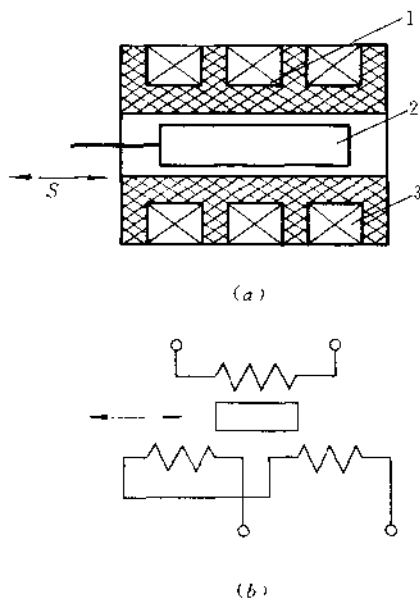


图 35.2-38 差动变压器式位移传感器原理图
1—初级线圈;2—铁芯;3—次级线圈

级线圈以及处于线圈中的铁芯组成。铁芯由导磁材料制成,在线圈里可作轴向自由移动。当给初级线圈输入高频的激磁电压时,由于电磁互感作用,在次级线圈中产生同频率的感应电动势。当铁芯处于中立位置(或称零位)时,则在两次级线圈中产生的感应电动势大小相等、相位相反,所以其综合输出电压为零($V_0 = 0$)。当铁芯偏离中立位置时,两次级线圈中的感应效果不同,故产生大小不相等的电压,因而在输出端上的综合电压不为零($V_0 \neq 0$)。其幅值大小与铁芯偏离中立位置的位移量 S 成比例,相位则取决于移动的方向。图 35.2-39 所示为其输出电压幅值与位移量的关系。

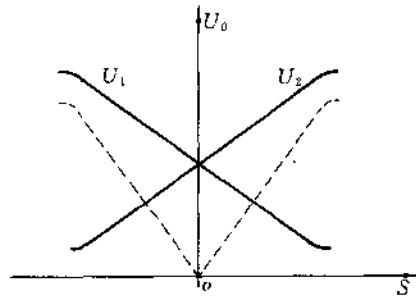


图 35.2-39 差动变压器式位移传感器输出特性曲线

根据工业电子学中的调制和解调的概念可知,此为调幅(AM)过程。输入到初级线圈中的高频(如 1000Hz)信号为载波信号;由铁芯输入的位移量缓慢变化信号为调制信号;而由此传感器输出的、幅值由位移量控制的高频信号即为调制波,属于调幅波。由于传感器输出的调制波幅值较小,而且还是高频信号,并不是要求的测量结果形式,还必须经过交流放大、相敏整流和滤波等,最后得到放大的直流缓变信号。这样此传感器就把非电量的位移变化转换成电压变化了,极性代表位移的方向。此过程也就是解调过程。图 35.2-40 所示为位移测量过程的方块图。

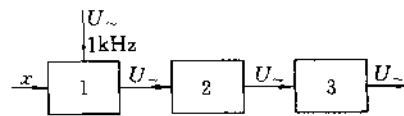


图 35.2-40 位移测量的原理框图
1—差动变压器式位移传感器;
2—交流放大器;3—解调器

由于这种传感器具有结构简单、灵敏度高、线性好、测量范围宽等优点,故在液压试验中广泛用来作为

静、动态直线位移测量用。

常用的位移传感器有 CWZ 型系列差动变压器式位移传感器。CWZ·0.3 型传感器的技术数据见表 35.2-5。

表 35.2-5

输出特性	
线性范围	$\pm 2\mu\text{m} - 3\text{mm}$
线性度	小于 3%
灵敏度	$(70\text{mV}/\text{mm})/\text{V}$
输出阻抗	1.2k Ω
工作条件	
激磁电压	1-7V
激磁电源频率	1kHz
电源最大功率损耗	0.23VA
使用环境温度	-20 $^{\circ}\text{C} \sim +65^{\circ}\text{C}$

B. 角位移的测量

(A) 磁电式小角度传感器

它的结构工作原理如图 35.2-41 所示。在一个由电动机 M 带动的感测齿轮 G 的旁边, 安装了两个磁电式转速传感器。传感器 1 固定在外壳上; 传感器 2 则与被测转轴相连。测量时由电动机以一定的转速带着齿轮 G 旋转。由于两传感器相对于齿轮的位置决定了两输出信号具有一定的初始相位差 α_0 。当由转轴 S 输入一个小的角位移时, 则传感器 2 也要移动一个同等的角位移, 因而导致两信号的相位差增加 $\Delta\alpha$, $\Delta\alpha$ 与被测角位移成比例。与前述测转矩的原理

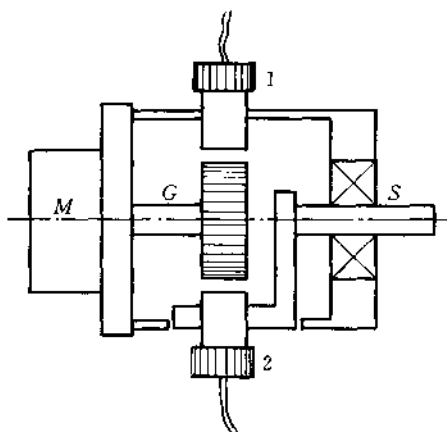


图 35.2-41 磁电式小角度传感器结构原理图

一样, 将此两输出信号输往相位差计, 就可测量和显示角位移的大小。这种传感器的测量范围受到感测齿轮齿数的限制。其最小感测角度可达 $1/4000$ 度; 测量精度为 $\pm 0.05\%$ 。

ΔP 型小角度传感器技术数据见表 35.2-6。

表 35.2-6

型号	齿数	测量范围
AP-3 型	120	$0.001^{\circ} \sim 3^{\circ}$
-4	90	$0.001^{\circ} \sim 4^{\circ}$
-6	60	$0.0015^{\circ} \sim 6^{\circ}$
-10	36	$0.0025^{\circ} \sim 10^{\circ}$
-20	18	$0.005^{\circ} \sim 20^{\circ}$

(B) 旋转变压器(微动同步器)

它也是根据电磁感应原理工作的。图 35.2-42 所示为其结构原理图及感应线圈中电压波形图。定子上有四个磁极, 每个磁极上都绕有一份激磁绕组和一份感应绕组。1、2 磁极上激磁绕组绕向相同; 3、4 磁极上的却与 1、2 上绕向相反; 它们之间是串联的。同样, 感应绕组也是这样安排的, 只不过与激磁绕组的绕向正好相反。当给激磁绕组供给固定的高频电压 U (如 1kHz)。若转子(由被测轴带动)处于零位, 即对称位置时, 它与各极靴之间所形成的气隙都是一样的, 因而磁通 $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ 全相等, 感应绕组中的感应电压 $E_1 = E_2 = E_3 = E_4$, 而 E_1, E_3 与 E_2, E_4 相位差 180° 。由于它们也是串联的, 所以总的合成输出电压 $U_0 = 0$, 如图中虚线所示。若转子按顺时针方向转动 α 角, 此时 1、3 极靴前气隙加大, 2、4 极靴前气隙减小, 因而导致 $\Phi_2 = \Phi_4 > \Phi_1 = \Phi_3$, 故 $E_1 = E_3 < E_2 = E_4$, 此时 U_0 为

$$U_0 = E_2 + E_4 - (E_1 + E_3)$$

其频率与激磁电压频率相同, 相位与 E_2, E_4 相同; 其幅值大小与转角 α 成比例。若转子按逆时针方向转动, 则输出电压相位与 E_1, E_3 相同。

综上所述, 与前述差动变压器式位移传感器工作原理一样, 旋转变压器式角度传感器的输出电压也是频率与激磁电压(载波信号)的频率相同, 幅值(即包络线)是根据转子的转角(被测角度)来控制的, 所以也是调幅波。然后经过解调处理就可得到与转角成比例的缓变直流电压信号, 极性与转向对应。这种传感器使用方便、反应灵敏, 可用于静、动态角位移测量。

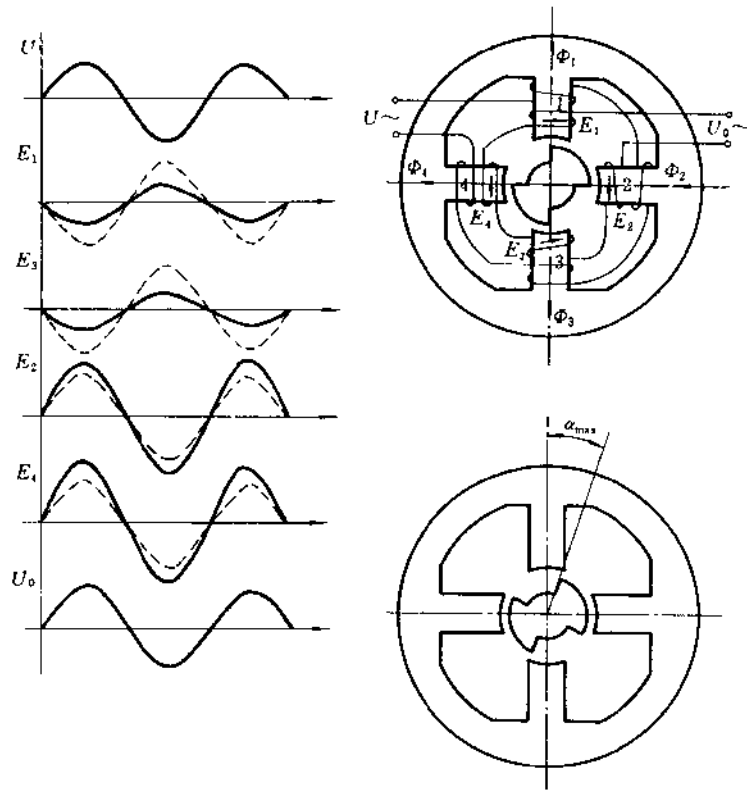


图 35.2-42 旋转变压器原理图

(6) 直线速度(v)

直线速度指的是单位时间里被测对象沿直线方向运动的距离,其单位为 m/s 。

直线速度的测量仪表与测量方法:

A. 平均速度测量法

测量被测对象通过已知距离 L 的时间间隔 τ , 即

$$v = L/\tau$$

这是最简单的方法。当然测出来的是平均速度。主要测量的参数为时间间隔 τ 。 τ 的测量将在后面的时间间隔的测量中介绍。

B. 用低速直流测速发电机测直线速度

用高灵敏度低速直流测速发电机测直线速度的工作原理如图 35.2-43 所示。若要求测量的是双作用双杆式油缸 1 活塞左右运动的速度 v 。通过与油缸杆端连接的细钢丝和滑轮带动低速直流测速发电机 2 的轴转动。因为测速机的输出电压 U_T 正比于其轴的转速 n ; 而 n 又正比于油缸活塞的运动速度 v , 故电压 U_T 就可代表运动速度 v 。在液压试验中, 这套装置是

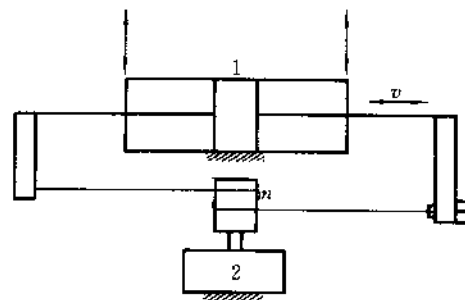


图 35.2-43 用测速发电机测直线速度原理图

1—油缸; 2—测速发电机

用于测量进入油缸的静态流量的, 所以输出电压大小代表着流量的大小; 其极性代表着流动的方向。

由于一般直线速度传感器的工作行程都比较短, 所以这还是一种测量较长距离范围内运动速度的办法。电压 U_T 的变化还能反映速度的瞬时变化值。但使用此法时必须注意的是: 测速机本身质量的优劣; 细钢丝传动时由于伸长变形等造成的滑移引起的误差。

C. 动圈式直线速度传感器

图 35.2-44 所示为其结构原理图。被测对象带着可动线圈运动；线圈安放在磁场中，由于它在磁场中作切割磁力线运动，线圈中就要产生感应电动势。电动势 U_e 的大小与线圈在磁场中运动的速度成正比；其极性与运动方向对应。

$$U_e = kBNLv$$

式中： k 为比例系数； B 为磁感应强度； N 为线圈匝数； L 为一匝线圈的有效长度。当传感器结构确定以后，上述这些参数均为常数，可见传感器输出电压完全与直线运动速度 v 成正比关系。

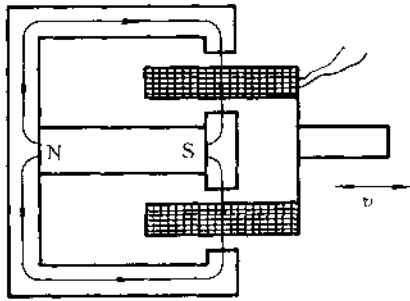


图 35.2-44 动圈式速度传感器工作原理图

这种速度传感器由于其结构简单，使用方便，且可用于动态测量，所以得到广泛应用。例如在电液伺服阀的动态试验中，无载油缸的速度就是用它来感测的。

常用的 SZQ-2 型速度传感器的技术数据见表 35.2-7。

表 35.2-7

测量频率范围	0-300Hz
最大可测位移	±15mm
速度灵敏度	800mV/(mm/s)
动圈阻抗	17kΩ
运动部分质量	28g
运动部分固有频率	>300Hz

(7) 时间间隔(τ)

在液压试验中所需要进行的时间测量一般是指一段时间间隔 τ ，如转速 n 和流量 q 都是通过测量 τ 时间间隔里的脉冲数来衡量的。动态试验中要求测量的过渡过程时间、时间常数、响应时间等也都是一段时间间隔。 τ 的测量范围较宽，从小到几微秒(μs)大到数

小时。时间的法定计量单位制为 s、min、h、d。它们之间的关系为

$$1d = 24h = 86400s;$$

$$1h = 60min = 3600s; 1s = 10^3ms = 10^6\mu s$$

时间间隔 τ 的测量仪表及测量方法：

A. 秒表

秒表的最小刻度为 0.1s 或 0.01s。由于是由人工来启动和停止，其测量误差与人的习惯和熟练程度有关。

B. 电秒表

由于它可以通过外部控制线路来实现启动和停止，故使用比较方便。当然其测量精度一方面取决于电秒表本身的精度；另外还要取决于控制线路引入的误差。

图 35.2-45 所示为 EAW 型电秒表的结构原理图。它由驱动用的交流恒速电动机、离合器及指针传动系统、离合器的控制继电器 J_1 、停止继电器 J_2 等元件组成。

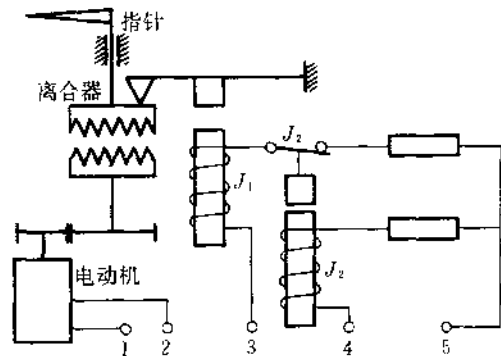


图 35.2-45 EAW 型电秒表结构原理图

当给 1、2 端点通电时，电动机启动旋转。但由于离合器未结合上，指针不动。当给 3、5 端点通电时，继电器 J_1 的线圈通电，继电器动作使离合器结合上，指针旋转，开始计时。一旦 4、5 端点与电源接通， J_2 线圈获电，继电器动作使常闭触点 J_2 断开， J_1 线圈断电，离合器脱开，指针停止旋转，计时停止。由刻度盘上直接读出指针开始转动到停止这段时间间隔值。可见它的计时精度虽然主要取决于电动机的恒速程度，但也与交流电源的电压和频率稳定度、继电器和离合器的吸合、释放时间有关。该电秒表刻度盘上最小刻度为 0.1s。常用的还有国产 405 型电秒表，它是便携式、精密短时间间隔的测量仪。其工作原理与上述电

秒表相同,测量范围为 0.01s ~ 600s;测量误差为 $\pm 6/1000s$;环境温度为 $20^\circ \pm 10^\circ C$ 。

C. 常用的其他方法

(A) 电磁式周波积算器或电磁式脉冲计数器

它们都是根据在一定的交流电压下,以 50Hz 频率为基准来工作的。电压变化一个周期,其可动衔铁摆动一次,推动机械计数装置的指针走一格。故它的最小刻度为 1/50s。通电开始计时,断电停止计时。其精度主要是由电源的 50Hz 频率稳定度所决定。

(B) 用数字式计数器测时间间隔

它的工作原理及波形变化如图 35.2-46 所示。

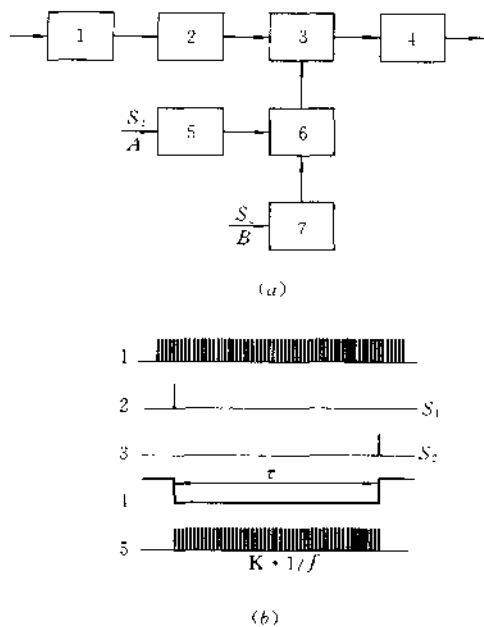


图 35.2-46 数字式计数器测 τ 的原理框图和波形变化图

(a): 1—石英晶体振荡器;2—时基分频器;3—门电路;
4—计数译码器;5—A 通道整形放大器;6—门控电路;
7—B 通道整形放大器

(b): 1—标准时基脉冲;2—启动信号 S_1 ;3—停止信号 S_2 ;
4—门控输出;5—计时结果

计时启动脉冲信号 S_1 由 A 通道输入;计时停止脉冲信号 S_2 由 B 通道输入,都经过整形、放大后输往门控电路。 S_1 控制主门电路开启, S_2 控制主门电路关闭。门控信号波谷宽度代表着两信号之间的时间间隔 τ 。在此信号控制下主门电路开通,允许标准时基脉冲通过,输往计数译码显示器。所显示的标准时基脉冲数 K 与其本身的周期 $1/f$ 相乘即为所测时间间隔 τ

$$\tau = K \frac{1}{f}$$

由于石英晶体振荡器的频率稳定度很高,故用此方法测量时间间隔是较准确的。具有使用方便、数字显示、便于控制等优点,所以得到较为广泛的应用。

常用的测量时间间隔的仪器有国产 E323 型数字计数器、413B 型数字式毫秒仪等。413B 型数字式毫秒仪的技术数据见表 35.2-8。

表 35.2-8

时基选择	0.1 ~ 9999.9s, 10ms ~ 999.99s, 1 ~ 99.999s, 0.1ms ~ 9.9999s
输入灵敏度	方波 700mV
输入信号幅度	$\pm 1 \sim \pm 250V$
时间测量误差	晶体稳定度 \times 量程 ± 1 个数字
石英振荡器频率	100kHz

(8) 温度 (t)

温度测量和控制温度的变化范围对于工业生产和科学试验都有着重要的作用。在液压试验中要求测量试验过程中的油温,并使它控制在试验规范所要求的范围内;在试验过程中了解被试对象各部分温度的变化也是非常重要的。

温度的单位在法定计量单位制中规定为热力学温度,单位为 K(开尔文)。开尔文是水的三相点热力学温度的 1/273.16。百分温标就是我国通用的摄氏温标($^\circ C$),它是将水的冰点和沸点之间的温度分为 100 等分(度),并规定冰点温度为 $0^\circ C$,沸点为 $100^\circ C$ 。根据热力学温度可导出

$$t = T - 273.15K$$

式中: t 为摄氏温度; T 为热力学温度。

在液压试验中常遇到的温度范围为 $-70 \sim 150^\circ C$,所以测量仪表和方法也就只限于在此范围内介绍。

A. 玻璃温度计

它是由玻璃毛细管和与之相连的充液玻璃球组成。毛细管上端封闭,由于外部温度变化,引起球内充注液体的体积变化,导致毛细管内液柱的升降。一般充注的液体为水银、酒精等。水银玻璃温度计测温范围由 $-30 \sim 150^\circ C$;有机液体玻璃温度计测温范围由 $-100 \sim 150^\circ C$ 。由于这种温度计结构简单、复现性好、可靠和便宜等优点,使它得到广泛应用,缺点是易损坏和精度一般。常用于测量室温、手持测油箱油温等。

B. 压力式温度计

它的工作原理如图 35.2-47 所示。其感测部分为温包, 里面充有惰性气体或某些液体(如易挥发的甲苯、乙醚、氯甲烷、氟里昂 12、丙酮等)。温包通过毛细管与测压元件(盘簧管、波登管等)相连。当温包感受到外部温度的变化时, 根据热胀冷缩原理, 内部介质的体积变化, 使管内压力变化。通过毛细管传至测压元件, 转变成指针的转动以显示温度的变化, 所以称为压力式温度计。由于它的毛细管的长度可达 20m 左右, 故它可作为中等距离的温度测量。常用于显示油箱中的油液温度。

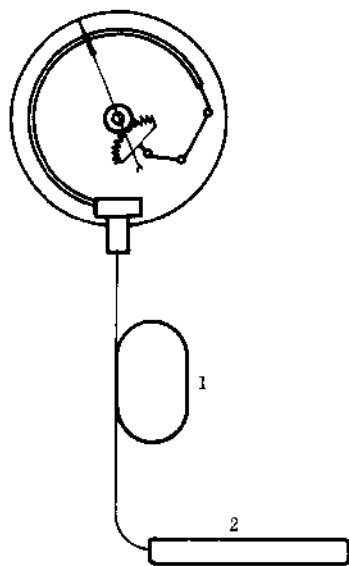


图 35.2-47 压力式温度计结构原理图

1—毛细管; 2—温包

电接点压力式温度计, 它具有能通过人工来装定温度的上、下限值的电触点装置。当检测的温度使指针达到下或上限值时, 可使外部电路接通, 其工作原理如图 35.2-48 所示。这样就可实现某些控制功能, 如温度报警、自动控制油液的加热和冷却等。

C. 热电阻测温法

它是根据金属的电阻值随着温度增高而线性增加的性质来实现对温度的测量的。可见只要把作为测温元件的金属丝加上保护套和接线插头就组成了温度传感器。当外界温度变化时, 其阻值发生变化, 采用桥式电路就可将电阻值的变化转换为电压或电流值输出, 以作为被测温度值的显示。

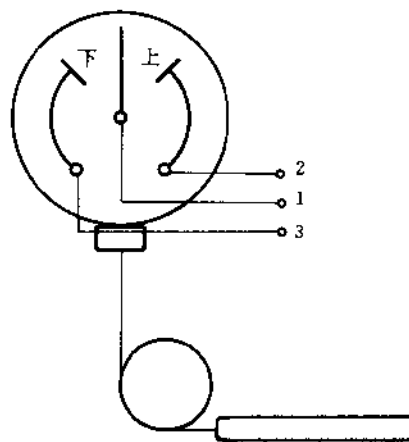


图 35.2-48 电接点压力式温度计工作原理图

一般作为热电阻的金属及其测温范围如下: 铂(-258~+900℃)、镍(-150~+300℃)、铜(-200~+120℃)。

D. 热敏电阻测温法

与金属的性质相反, 某些半导体的电阻随着温度增高而降低, 而且只要有微小的温度变化就能引起电阻值的变化。其电阻值与温度的变化关系在 -60~+400℃ 范围内完全呈线性。热敏电阻可作成各种形状, 并装入探测头中。圆珠型的热敏电阻直径可小至 $\phi 0.4\text{mm}$ 。同样通过电桥电路可将电阻值的变化转换成其它电量输出并显示。图 35.2-49 所示为其工作原理图。

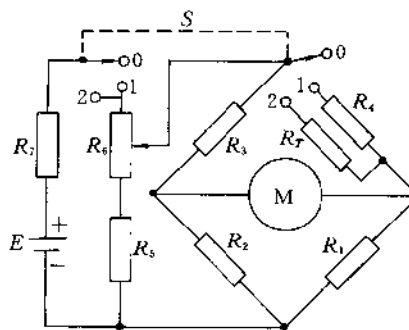


图 35.2-49 半导体点温仪工作原理图

图中 R_T 为热敏电阻; R_3 为起始点温度对应的阻值; R_4 为满量程对应的阻值。它们担负着校准电桥平衡及供桥电压的任务。 R_1 、 R_2 为电桥平衡电阻, 即固定的半桥臂; R_5 、 R_7 为分压电阻; R_6 为供桥电压调节电位计; S 为转换开关; E 为电源电池。当开关由 0 位转至 1 位置时, R_4 接入电桥, 调节 R_6 使电表指针偏转至满刻度值。此调节的目的在于消除电池 E 电压的变化引起的误差。当 S 转至 2 位置时就是测量状态, 将 R_T 接入电桥。若温度是处于量程起始温度时, 此时 R_T 阻值与 R_3 相等, 电桥平衡, 电表指针不动。随着温度变化, 指针偏转; 一旦 $R_T = R_4$ 时, 指针偏转至最大位置, 即为温度达到量程的满刻度值了。

此种测温仪的优点在于体积小、灵敏度高、快速响应好(即热惯性小)。但其缺点是稳定性差、感测头不能互换。

35.2.2 测试仪器简介

(1) 基本仪器的分类

在液压试验中要求测试各种元件和系统的静、动态特性; 被测量的参数变化多端, 需要采用各种行之有效的测试方法。这些都涉及各式各样的测试仪器。常用的基本仪器可分为三类:

A. 信号发生器

在试验中主要是作为信号源使用的。液压试验中所涉及的信号发生器, 按频率范围来分, 主要有两种: 音频范围 20Hz~20kHz; 超低频范围 0.001~200Hz。所使用信号的波形有正弦波、方波、三角波和脉冲。

(A) 音频信号发生器

频率范围为 20Hz~20kHz 输出波形为正弦波; 一般为电压输出, 有的还带有一定的功率输出。在液压试验中的主要用途有:

载波电源 主要用在调制—解调线路中, 如作为差动变压器式位移传感器的激磁电源(1000~3000Hz); 供给解调器中的相敏整流器作参考电压等。

颤振信号 为了改善电液伺服系统或伺服阀的品质指标, 要求在它们的输入处叠加一定频率、幅度的正弦信号或方波信号作为颤振信号。这是由音频信号发生器提供, 一般为 200Hz 以下的小振幅信号。

(B) 超低频信号发生器

频率范围为 0.001~200Hz 左右。输出波形有正弦波、方波、三角波、锯齿波等。它在液压试验中的主要用途是作为被试电液伺服系统或元件的试验激励信号源。在静态试验中为了获得所要求的特性曲线而采用连续描述的方法时, 要求超低频信号发生器提供频

率为 0.01~0.02Hz 的三角波作为输入信号; 在动态试验中测试频率响应特性时, 被试对象要求的激励信号为振幅不变而频率按一定规律扫描(线性扫描或对数扫描)的正弦信号。频率范围在 0.1~200Hz 以内。当进行阶跃响应特性试验时, 则要求输入方波信号作为阶跃信号。

(C) 伪随机信号发生器

在用现代谱分析法来测试伺服系统或元件的频率特性时, 要求输入伪随机信号作为激励信号, 分别测出输入和输出信号的互功率谱密度函数及输入信号的自功率谱密度函数, 二者的比值即为被试对象的频率特性。这种伪随机信号可由独立的伪随机信号发生器提供, 也可由信号处理机中的信号发生器获得。

B. 信号调节放大器

在测量系统中它是处于参数传感器与测量、记录、显示仪器之间的。担负着信号的传递、放大、转换等预处理的功能。属于信号调节放大的仪器有:

(A) 调制—解调器

主要用于非电量电测中。它一般包含在一些测试仪器中, 如伺服放大器、比例阀控制器中。也有独立配置的调制—解调器, 如天津电子仪器厂生产的 BB-3 型调制—解调器。

(B) 数据放大器

它是一种宽频带放大器, 能将微弱的信号在较宽的频率范围内不失真地加以放大。是较为有用的、通用的中间放大器。

(C) 动态电阻应变仪

它与应变电阻式传感器及后续的记录、显示仪器相匹配, 担负着信号的转换、放大、调制、解调、滤波等功能; 保证其输出信号的形式和功率满足后续仪器的要求。

(D) A/D 和 D/A 转换器

由于目前数字式仪器大量应用和计算机进入液压试验领域, 而很多传感器和执行器却是模拟量的, 所以要求模拟量和数字量信号之间的相互转换, 这就是 A/D 和 D/A 转换器的任务。

C. 测量、记录和显示仪器

它们是测量系统中的最后一个环节, 测量的结果由它们以不同的形式反映出来。

(A) 测量仪器

由于各种传感器将非电量参数转换成不同的电量, 信号经预处理后到达最后环节仍为电量信号, 当然就需要各种电量测量仪表与之相配, 如电压表、电流

表、频率计、相位差计等。

(B) 记录、显示仪器

由它们如实地将各参数的变化和测量结果记录和显示出来。例如用函数记录仪可把两参数的函数关系直接画出来;用光线示波器可把信号变化情况拍摄下来或用示波器的屏幕把信号变化显示出来等。

(C) 专用的特性分析和测定仪器

这类仪器是属于专门设计,用于某些项目的分析、研究的仪器,如频率特性分析仪,信号分析仪是用来测试系统和元件的频率特性和谐分析等动态特性及模态识别的仪器。容积效率测定仪则是更为专用的仪器了。

(2) 基本仪器介绍

鉴于电子学和电工学方面的一些经常使用的通用仪器,在工作中都较熟悉和了解,这里就不介绍了,只着重介绍在液压试验中经常用到而又较为重要的几种测试仪器。

A. 函数记录仪(X-Y记录仪)

函数记录仪是一种通用的静态记录仪。在具有某

函数关系的两个参数所对应的电压作用下,记录笔可自动描绘出它们之间的函数关系,即 $y=f(x)$ 。在多笔的函数记录仪中则可同时描绘出对应一个自变量 x 的几个因变量 (y_1, y_2, y_3) 的函数关系。在液压试验中,根据各种传感器输出的模拟量信号,如压力、流量、转矩、转速等可连续画出各种静态特性曲线。如液压泵的压力—流量曲线、电液伺服阀的各种静态特性曲线等。配合试验中的自动化措施,函数记录仪可免除人工逐点描绘画曲线,实现连续自动描绘曲线,从而达到了数据可靠、提高试验效率的目的。在自动试验系统中,通过适当的接口装置,它可与数字计算机相连,作为其输出的一种形式。它与频率特性测试仪相连,可自动画出各种动态特性曲线,如奈魁斯特图、波德图和尼科尔斯图等。所以对于液压试验而言,它是一种极为有用的记录仪器。其记录笔沿 X 轴或 Y 轴的运动是由两套互相独立的小功率位置随动系统驱动的。若为多笔记录仪则驱动系统数目相应增加。图 35.2-50 所示为其原理框图。

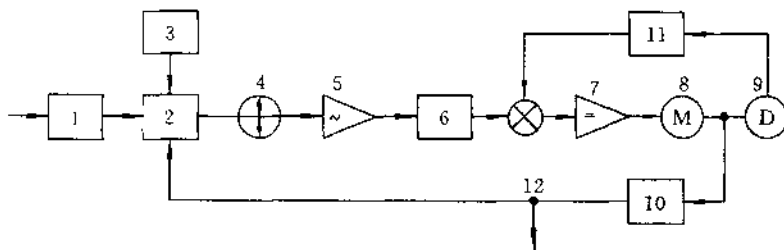


图 35.2-50 X 轴驱动系统的原理框图

1—衰减器;2—测量电路;3—稳压电源;4—振动变流器;5—交流放大器;6—解调滤波器;7—直流放大器;8—直流伺服电动机;9—直流测速发电机;10—减速器;11—速度反馈电路;12—记录笔

被测信号先通过衰减器 1 后输往比较测量电路 2。比较电路将被测信号与位置反馈信号进行比较,以获得随动系统赖以工作的误差信号。此误差信号需要经过振动变流器 4 进行调制处理,然后再经交流放大器 5 放大后,通过解调和滤波恢复成原输入信号的形式。经直流放大器 7 获得足够功率的直流信号驱动直流伺服电动机 8。电动机旋转一方面带动记录笔架运动;同时还要带动反馈电位计的滑臂运动,以减小误差信号。另外电机轴还带动直流测速发电机 9 旋转,输出的电压信号作为速度负反馈信号输往直流放大器,

给系统提供足够的阻尼,以改善整个系统快速运行时的稳定性。图 35.2-51 所示为函数记录仪的工作原理图。

由于笔尖运动是由 X、Y 两套系统驱动,所以其运动为两信号控制的合成,轨迹为两者的函数关系。

为了获得输入信号与时间的函数关系,即 $y=f(t)$,在仪器中设置了走纸机构。走纸速度是可调的,即时间坐标的变换。

国产函数记录仪(LM19 型)主要技术指标见表 35.2-9。

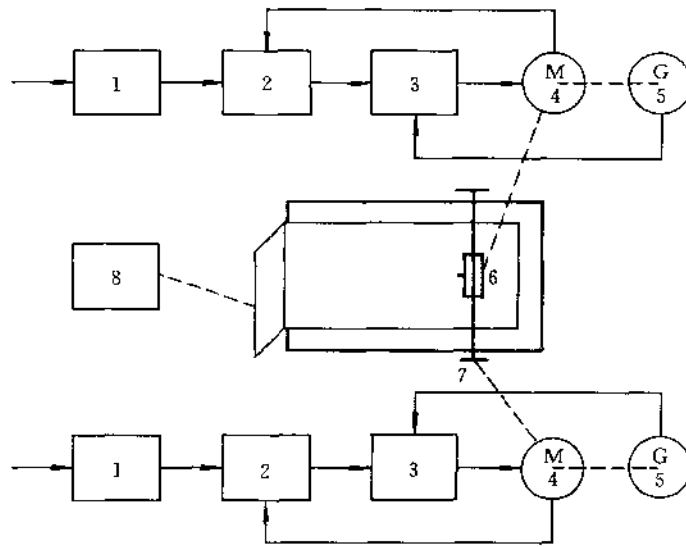


图 35.2-51 函数记录仪的工作原理框图

1—衰减器；2—测量比较电路；3—电子放大器；4—伺服电动机；5—测速发电机；6—记录笔；7—笔架；8—走纸机构

表 35.2-9

精度	$\pm 0.5\% \text{ FS}$
死区	$\pm 0.5\% \text{ FS}$
最大速度	$X > 800 \text{ mm/s}; Y > 600 \text{ mm/s}$
测量范围	0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 mV/cm
扫描精度	$\pm 2.5\% \text{ FS}$
扫描速度	0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 cm/s
输入阻抗	1 M Ω

B. 光线示波器

它是一种通用的模拟量电压或电流的记录仪器。通过各种物理参数传感器转换成的电压或电流的变化，由它变成相应的光点移动，再由其中的光路系统投射到感光记录纸带上，将光轨迹记录下来即代表着被测量的变化。

光线示波器的主要特点有：记录线数多(国产光线示波器中最高记录线数可达 60 线)，灵敏度高，记录纸容量大，直接记录，显示方便，操作简单，还具有测量动态参数的能力。作为记录仪器在科研和生产中得到广泛应用。图 35.2-52 所示为其简单工作原理图。

由光源 1 发出的光，经聚光透镜 2 及光栅 3 后投

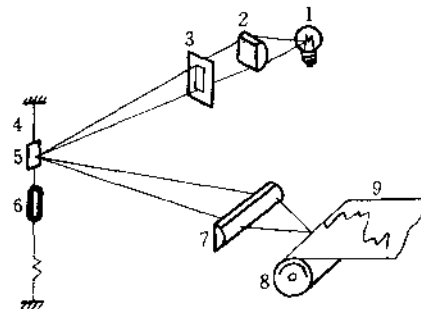


图 35.2-52 光线示波器工作原理简图

1—光源；2、7—聚光透镜；3—光栅；4—悬丝；5—小镜片；6—线圈；8—传动机构；9—记录纸

射到小镜片 5 上。通过镜片的反射，经聚光透镜 7 形成一个光点投射到由传动机构 8 带动的感光记录纸 9 上。若小镜片 5 按一定规律摆动的话，则光点在感光记录纸上也以同样的规律摆动。当记录纸移动时，光点的轨迹就被记录下来。小镜片 5 被固定在垂直方向拉紧的悬丝 4 上，而悬丝还与线圈 6 连接，它们是安装在永久磁场中的。由悬丝、镜片及线圈等零件组成一个独立的部件称为振动子。当外加的被测电流信号接入线圈后，线圈在磁场中受力，带动小镜片摆动，因而导致由它反射的光点移动。

在光线示波器中一般有三条光路构成的光学系统:振动物光路、时标光路和分格线光路。图 35.2-53 所示为国产 SC60 型光线示波器的光路图。振动物光路为实线所示;分格线光路为点划线所示;时标线光路为虚线所示。

C. 动态电阻应变仪

应变仪主要是用来测量材料及结构的动态应变量的。它必须与由应变片组成的测量电桥配合,对电桥的输出信号进行放大和处理,以便足以驱动后续记录、显示仪器,若与各种应变电阻式参数传感器(如压力传感器等)相配合,可用于对各种参数的变化进行测量。由于应变仪具有灵敏度高、使用方便;与它配合使用的应变片重量轻、体积小,实现各种参数对应变量的转换容易等优点,所以在各种学科领域得到广泛应用。与其配合的后续仪器有光线示波器、磁带记录仪、笔录仪等,只有通过它们才能测量和显示出测量结果。为了能进行多点同时测量,动态应变仪通常有几个数据测量通道(俗称为几线),如 Y6D-3A 型动态电阻应变仪为六线的。图 35.2-54 所示为其原理框图。

它主要由桥式测量电路、振荡器、缓冲级、载波放大器、相敏检波器、滤波器和电源等组成。国产应变仪的种类和规格繁多,在液压试验中常用的为 Y6D-3A

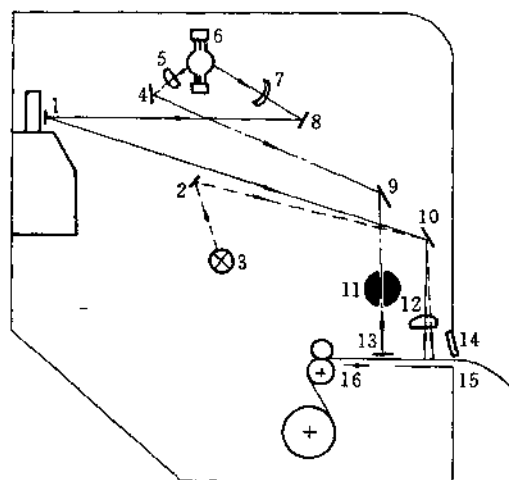


图 35.2-53 SC60 型光线示波器光路图

- 1—振动物;2、4、8、9、10—反射镜;3—时标灯;
- 5—透镜;6—高压汞灯;7—弧形透镜;11—分格线光栅;12—柱面透镜;13—分格线格子片;14—观察窗;15—记录纸;16—记录纸传动机构

型动态电阻应变仪,其主要技术数据见表 35.2-10。

D. 频率响应分析仪

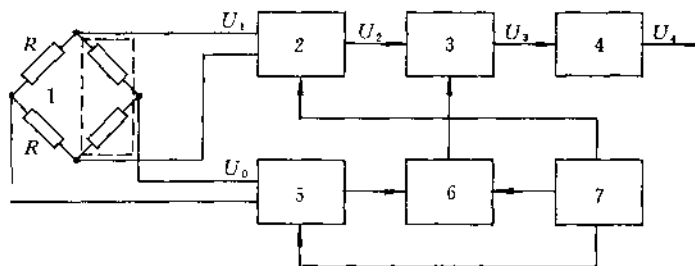


图 35.2-54 应变仪工作原理框图

- 1—电桥;2—载波放大器;3—相敏检波器;4—滤波器;5—振荡器;6—缓冲器;7—电源

表 35.2-10

测量线数	6 线
最大量程	$\pm 10000 \mu\epsilon$
载波频率	10kHz
工作频率	0~1500Hz

对于用古典频率域法的原理来测试电液伺服系统的动态特性时,需要利用频率响应分析仪。这类仪器的基本原理是基于被试对象在正弦信号的激励下,测量频率响应特性的模 $R(\omega)$ 、相位差 $\theta(\omega)$ 或同相分量 $A(\omega)$ 、正交分量 $B(\omega)$ 。它主要由函数发生器和计算显示装置两大部分组成。函数发生器的作用是产生频率和振幅均可调节,且稳定、精确的正弦、余弦信号;计

算显示装置是用来计算和显示测量结果 R 、 θ 或 A 、 B 的;并具有坐标转换功能。

按计算显示装置的种类不同,频率响应分析仪可分为:

(A) 直接式仪器

由三台独立式测试仪器组成测量系统。用超低频信号发生器产生正弦激励信号输往被试系统;而将输入和输出信号同时输往超低频峰值电压表和超低频相位频率计,前者测量模 $R(\omega)$ 或振幅比;后者测量两信号之间的相位差 $\theta(\omega)$ 。测量原理框图如图 35.2-55 所示。测量结果可数字显示或表头显示读数。在测试过程中需要逐点测量和换算,使用麻烦,测量精度低。对高次谐波和噪声的抑制能力差。

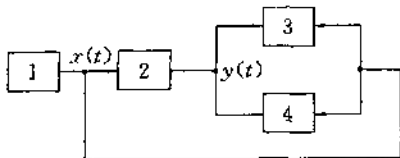


图 35.2-55 直接式频率响应分析仪原理框图
1—超低频信号发生器;2—被试系统;3—超低频峰值电压表;4—超低频相位频率计

(B) 相关式仪器

它是根据相关滤波技术设计的,是目前一种较为先进的频率响应测量仪。由于频率法分析主要是需要对输入纯正弦信号激励的系统稳态输出量进行分析,

因而对输出信号中除基波分量以外的其他分量应全部滤掉。在实际的频率特性测试过程中,一般系统的输出信号均由四部分分量组成:

基波分量 $R\sin(\omega t + \theta)$;

基波的各次谐波 $R_k\sin(k\omega t + \theta_k)$;

直流分量;

由各种随机干扰信号引起的噪声干扰。

输出信号可由下式表示

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \sin k\omega t + b_k \cos k\omega t) + \zeta(t)$$

式中: a_0 为直流分量; a_k 、 b_k 为傅里叶系数; $\zeta(t)$ 为随机噪声分量。

将输出信号 $y(t)$ 与 $\sin\omega t$ 和 $\cos\omega t$ 作相关运算。通过运算,在获得基波分量的同相分量 a 和正交分量 b 的同时,就较好地抑制了直流分量、高次谐波和随机噪声。

相关式仪器由两大部分组成:一是函数发生器,产生对被试系统激励的正弦和余弦信号;一是相关器。其作用是对采集的信号进行相关运算、坐标转换和数字显示。图 35.2-56 所示为其原理框图。

由于这种仪器采用了相关滤波技术,故它具有抑制高次谐波和噪声干扰的能力强,测量准确度高,使用方便等优点。目前在国内外得到广泛应用。英国输力强公司生产的 1250 系列频率响应分析仪就属于此类仪器。1253 型增益相位分析仪是此系列中的一种仪器,其主要技术指标见表 35.2-11。

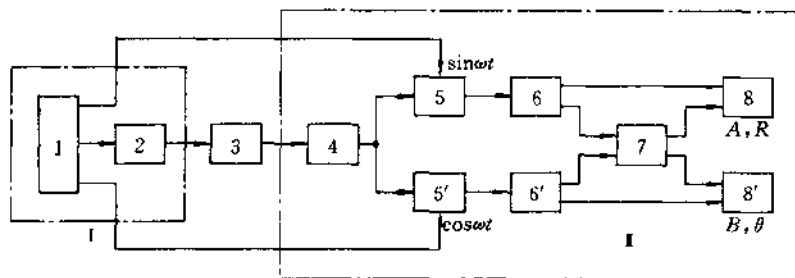


图 35.2-56 相关式频率响应分析仪原理框图

I 信号发生器 II 相关器

1—数字式振荡器;2—D/A转换器;3—被试系统;4—A/D转换器;

5、5'—乘法器;6、6'—平均积分器;7—坐标换算;8、8'—显示器

表 35.2-11

频率范围	1mHz~20kHz	
频率分辨率	1/4000	
频率扫描	对数型向上或向下扫描	
输入通道	双通道	
测量结果	$R, R(\text{dB}), \theta, a, \gamma b$	
分辨率	增益 R	0.01dB
	相位 θ	0.01°
具有 IEEE488 接口		