

第4篇 检测基础

主编单位

北京工业大学

编写单位

北京工业大学 北京化工学院

合稿人

张国忠

编写人

鹿树理 张国忠 张俊漠 尹显荣

特约编辑

朱良漪

CA14/2204

常用符号表

A ——放射源强度; 原子量; 色谱峰面积; 涡流扩散项	合系数; 波耳兹曼常数; 电化当量; 分配系数
A_0 ——放射源初始强度	K_H ——横向灵敏度系数; 乘积灵敏度
a ——电阻骨架厚度; 电容极板宽度	K_z ——轴向灵敏度系数
a_i ——被测离子浓度	K_o ——应变灵敏度
a_j ——干扰离子浓度	L ——真值; 应变片基长; 照度; 位移; 电感
B ——磁通密度; 分子扩散项系数	l ——线圈长度; 铁心长度
C ——置信系数; 横向效应系数; 浓度; 传质项系数	L_{cp} ——线圈平均匝长
C_D ——附加电容	M ——鉴定器的灵敏度; 互感
C_e ——等效电容	$M_b(T)$ ——黑体在 T 度时辐射出射度
CMRR ——共模抑制比	$M_b(\lambda, T)$ ——黑体在 T 度时光谱辐射出射度
c ——光速	m ——进样量
c_1 ——第一辐射常数	NBP ——噪声等效功率
c_2 ——第二辐射常数	N_T ——电子密度
D ——直径; 辐射剂量; 响应率	n ——载流子浓度; 理论塔板数
D^* ——归一化探测率	P ——压力; 力; 电荷面密度; 极化强度
d ——导线直径; 物质质量厚度	P_m ——平均误差
d_H ——物质饱和厚度	p ——光子动量
d_p ——固定相填充粒度	Q ——线圈品质因数; 电荷; 电离电荷
E ——电场强度; 杨氏模量; 纵向弹性模量; 电势; 电极电位; 光密度; 分子能量	q ——电子电荷
E^e ——标准电极电位	R ——半径; 电阻
$E_{AB}(T, T_0)$ ——热电偶AB在二端温度为 T, T_0 热电势	R_C ——导线电阻
E_e ——电子能量	R_e ——涡流损耗电阻
E_g ——禁带宽度	R_f ——磁滞损耗电阻
E_m ——粒子最大能量	R_H ——霍尔系数
E_r ——转动能量	R_i ——负载电阻
E_v ——振动能量	R_s ——极板电阻
e ——随机不确定度; 电子电量	R_M ——磁阻
$e_{AB}(T)$ ——温度 T 时A、B热电极接触电势	R_p ——介质泄漏损耗等效电阻
F ——磁势; 法拉第常数; 焦距	R_t ——温度 t 时的电阻值
$F(j\omega)$ ——复频率响应	r ——电阻; 半径
$F(\omega)$ ——幅频响应	S ——变换灵敏度; 导线截面; 极板面积; 电离比 值; 鉴定器灵敏度
f ——干扰信号; 频率	SMR ——串模抑制比
f_c ——多普勒频差	T ——切应力; 温度; 绝对温度; 离子飞行时间; 透射 比
f_o ——谐振频率	T_m ——调制周期
G ——电导	t ——温度; 时间; 物质厚度
H ——磁场强度; 理论塔板高度	t_r ——保留时间
H_c ——矫顽力	t_r^0 ——死时间
H_{min} ——最小理论塔板高度	U_D ——屏输出电压
h ——普朗克常数	U_i^0 ——正离子迁移率
I ——射线辐射强度; 光强度; 离子流强度	U^- ——负离子迁移率
I_p ——射线反射强度	u ——载气线速度
i_{p0} ——射线饱和反射强度	V ——应变波传递速度; 载气体积; 离子加速电压
I_0 ——射线初始辐射强度	V_G ——流动相体积
K ——放大系数; 灵敏度; 相对灵敏度; 定滑尺间隔	

V_H —— 霍尔电势	ε_T —— 全发射率
V_L —— 固定相体积	ε_H —— 横向应变
v —— 速度; 离子速度	ε_Z —— 纵向应变
v_0 —— 微波在介质中的传播速度	ε_0 —— 真空介电常数
W —— 匝数	$\varepsilon(\lambda, T)$ —— 波长 λ 的发射率
W_0 —— 基线宽度	η —— 检测器效率; 当量浓度; 液体粘度
x —— 输入信号; 线位移	θ —— 温度; 角位移
$\bar{x}$ —— 算术平均值	θ_T —— 居里点
x_i —— 测量值	λ —— 应变波波波长; 磁导; 衰减常数; 充填因子
y —— 概率密度; 纵向杨氏模量	μ —— 迁移率; 泊松系数; 磁导率
z —— 原子序数; 元素的化学当量	μ_m —— 质量吸收系数
z_C —— 特征阻抗	μ_n —— 核磁子; 电子迁移率
z_K —— 短路阻抗	μ_p —— 空穴迁移率
z_R —— 辐射阻抗率	μ_0 —— 空气磁导率
z_S —— 声阻抗率	π —— 压阻系数
z_X —— 空载阻抗	π_1 —— 纵向压电系数
z_1 —— 输入阻抗	ρ —— 电阻率; 物质密度
z_2 —— 输出阻抗	ρ_{ij} —— 相关系数
α —— 电阻温度系数; 衰减常数; 腔体膨胀系数	σ —— 均方根误差; 应力; 电导率; 斯一玻常数
α_t —— 应变电阻的温度系数	σ_s —— 材料对中子的减弱截面
β —— 相位常数	$\sigma_{\bar{x}}$ —— 算术平均值均方根误差
β_f —— 弹性元件线胀系数	τ —— 节距, 时间常数
β_s —— 线胀系数	ν —— 共振频率; 微波频率
γ —— 相对误差; 相对均方根误差	$\varphi(\omega)$ —— 相频响应特性
δ —— 精密度; 随机误差值; 变换误差; 非线性误差; 铁心气隙	Ψ —— 磁链
ε —— 应变变量; 介电常数; 光子能量	ω —— 角频率
ε_r —— 相对介电常数	ω_g —— 发射微波角频率
	$\Delta\omega_m$ —— 频率调制带宽

第1章 绪 论

1 工业过程检测的基本知识

1.1 工业过程检测的特点

检测是指在科学实验和工业生产过程中,为及时掌握实验情况和监视、控制生产过程,而对其中一些量进行的定性检查和定量测量,因此是意义更为广泛的测量。

检测技术涉及的内容非常广泛,包括被检测信息的获得、转换、显示等技术。工业过程检测技术的特点为:

1) 被测介质形态多样(气态、液态、固态及混合物),有些还具特殊性质(强腐蚀、强辐射、高温、高压、深冷、真空、高粘度、高速运动等);

2) 被测量不仅参数性质多样,而且量值有恒定量、变化量,量值范围也十分宽广。

这些均要求用多种检测原理和手段来适应(如接触或非接触测量;单参数或多参数检测),而且要有良好的静态特性和动态特性。

3) 检测既有断续进行的,也有长期连续进行的。因此要求检测仪表有很高的再现性、可靠性。

4) 检测环境比较恶劣,存在众多的影响和干扰,如电源电压、频率波动,温度、压力变化,水汽、湿度、光照、辐射、盐雾、烟雾、粉尘等。这些要求检测仪表有稳定的工作特性、高的抗干扰能力和相应的防护措施。

5) 检测出的信号要便于显示、记录、调节。因此检测仪表常具有信号放大、整流、微分、积分、模-数及数-模转换等环节。有时还需对特性进行平滑、线性化等处理。

1.2 检测仪表的品质

根据工业过程检测的特点,对检测仪表的品质有多种要求。

1) 精确度——测量结果与真值的一致程度。精确度高意味着系统误差、随机误差都很小。

2) 灵敏度及灵敏度限

灵敏度——仪表在达到稳态后,输出增量与输

入增量之比。

灵敏度限——仪表所能测量到的被测量之最小变化量。

3) 线性度——线性仪表的校准曲线对一条直线的吻合程度。

4) 变差——仪表正向(上升)特性和反向(下降)特性不一致的程度。以输出最大差值与输出上、下限值之差的比值来表示。

5) 稳定性——在规定工作条件保持恒定时,仪表性能在规定时间内保持不变的能力。

6) 动态特性——指被测量随时间迅速变化时,仪表输出追随被测量变化的特性。可以用微分方程和传递函数来描述。但通常以典型输入信号(阶跃、单位冲激、正弦)所产生相应的输出(阶跃响应 $h(t)$ 、冲激响应 $w(t)$ 、频率响应)来表示。

1.3 检测方法的分类

常用检测方法见表4.1-1。

1.4 检测仪表的分类

生产过程中需要检测的参数有:电工量(电压、电流、电功率、电阻、电感、电容、频率、磁场强度、磁通密度等);热工量(温度、压力、流量、物位等);机械量(位移、厚度、力、转矩、速度、振动等);物性与成分量(气体成分、液体成分、固体成分、浓度、粘度、粒度、浊度、密度、酸碱度等);状态量(机械运转状态、设备异常状态、仪表装置状态等)。

用作检测上述各种参数的检测仪表,可按下述方法进行分类:

1) 按被测量来分类有温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、机械量检测仪表以及过程分析仪表等;

2) 按测量原理来分类如电磁法检测、光学法检测、超声法检测、微波法检测、核辐射法检测、电化学分析等,以及一些专用的方法,如气相色谱分析、质谱分析等。

表4.1-1 常用检测方法分类

分类依据	名称	意 义	说 明
是否施加能量	主动式	测量过程中需要从外部向对象加能量	
	被动式	测量过程中无需由外部向对象加能量	
是否接触	接触式	检测元件与被测介质接触	对被测介质有干扰, 被测介质有特殊性时对检测元件要求高
	非接触式	检测元件与被测介质不接触	不干扰被测介质, 但易受外界干扰
测量方法	直读法	用仪表直接显示被测量的数值	操作简便, 迅速、精度低
	零值法	调节已知标准量, 使与被测量相平衡, 当平衡时(偏差指示为零), 即可用标准量的值表示被测量	精度高, 操作复杂, 速度慢, 且要求灵敏的指零仪表
	微差法	将数值接近被测量的标准量与被测量比较, 取得较小的差值, 然后用直读法测取差值, 则被测量等于已知标准与差值之和	差值足够小时, 精度可很高, 操作简便, 但设备复杂
	替代法	在测量装置上用已知量替代被测量后, 仍使测量装置恢复原来状态, 则此已知量即等于被测量值	精度高, 操作复杂
	计数法	用标准脉冲(或单位量值)的个数来表示被测量	测量精度高, 直观

2 测量误差理论

2.1 误差的概念

1) 误差

误差是指用于测量的仪器仪表不绝对准确、测量原理的局限、测量方法的不完善、外界干扰的存在以及测量人员的个人因素等原因, 使测量值与被测量的真值之间存在的差值。

2) 真值

一个严格定义的[变]量的理论值。一个量的真值是一个理想概念, 一般是无法得到的。

理论真值——理论上存在的真值, 如三角形三内角之和为 180° 等。

约定真值——为使用目的所采用的接近真值因而可代替真值的值。它与真值之差可忽略不计。实际测量中在没有系统误差的情况下足够多次的测量值之平均值称为约定真值。

相对真值——高一級标准器的误差只为低一级的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{20}$ 时, 可认为高一級

的标准器及仪表是低一级的相对真值。

3) 误差分类

依据对测量研究的需要, 对误差可按多种方法分类, 择要列于表4.1-2中。

2.2 误差理论与概率分布

系统误差应设法消除, 随机误差可研究其统计规律以缩小其影响, 属于粗大误差的测量值为坏值应予剔除。

1) 系统误差的消除

(1) 依据产生的原因, 从仪表原理和结构设计上、测量方法上予以避免。选用最合适的机理作检测基础; 设法提高对被测量的选择功能, 如加装选择环节(滤波、选频放大等), 用恒温恒压等限制造成误差的因素, 或使这些因素对称作用于仪表敏感元件而自相抵消等; 采用质量稳定的材料、合理的制造工艺; 使用零位、微差等测量方法。

(2) 依据误差的规律, 采用适当的测量方法。如替代法、抵消法(改变被测量极性作两次测量后取平均值)以消除定值系统误差; 用对称测量

表4.1-2 误差分类

分类依据	名称	意义	说明
误差数值表示	绝对误差	测量结果与真值之间的代数差	只能说明本身大小,不能作同类不同量程或不同类仪表间测量精度的比较
	相对误差	绝对误差与被测量之比	常用绝对误差与仪表示值之比表示
	引用误差	绝对误差与测量范围上限值、量程或标尺长度之比,以百分数表示	据此划分仪表的精度等级
误差的规律	系统误差	在相同条件下,多次测量同一被测[变]量的过程中出现的一种误差。它的绝对值和符号或者保持不变,或者在条件变化时按某一规律变化	产生原因,仪器仪表不良、检测原理近似、方法不妥善、定义不明确、工作环境变化、操作者个人习惯等。应据产生原因及其规律性加以避免或校正
	随机误差	在相同条件下,多次测量同一被测[变]量的过程中出现的一种误差,其误差绝对值和符号以不可预计的方式变化	由许多复杂因素微小变化的总和引起。在仪表设计、制造上减小一些微小因素(如摩擦、间隙、噪声)和利用统计规律适当增加测量次数来减小其影响
	粗大误差	显然与事实不符的误差,误差数值大,且无规律	外界重大干扰所引起,这类测量值一经发觉,应即剔除
与使用条件关系	基本误差	仪表在规定的参比工作条件下确定的误差	标准使用条件是指对影响测量的各种因素人为作出的规定值
	附加误差	仪表在偏离标准使用条件下使用时附加产生的误差	按具体条件分别定出相对误差数值
被测量变化的关系	静态误差	被测量缓慢变化或稳定不变时的误差	
	动态误差	被测量随时间变化过程中测量所附加的误差	由于仪表的动态品质所造成的
与被测量关系	定值误差	被测量变化而误差数值不变的误差	可以是系统误差也可能是随机误差
	累计误差	在仪表的量程范围内,其数值与被测量成正比例变化的误差	是仪表灵敏度变化及标准量变化所造成的误差

法(等间隔的对称测量,以中心对称的两次作平均)消除累计系统误差;用半周期偶次测量法(依据误差周期,经半个周期作一次测量后取平均)以消除周期性系统误差。

或者据系统误差大小用校正值来抵偿。

2) 随机误差的概率分布和表示法

(1) 随机误差的概率分布 在同一条件下,对一给定量的同一值进行多次测量中,某一测量值出现的次数与总次数之比,为此测量值的概率。若以 δ 代表随机误差值, $P(\delta_1 < \delta < \delta_1 + d\delta)$ 为误差值在 $\delta_1 \sim \delta_1 + d\delta$ 范围内的测量值出现的概率,则概率密度 $Y = P(\delta_1 < \delta < \delta_1 + d\delta) / d\delta$, 故而

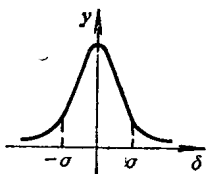
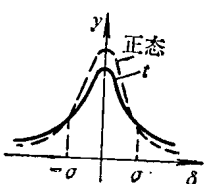
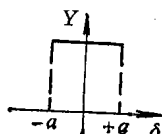
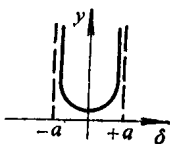
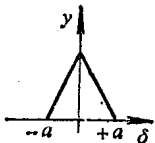
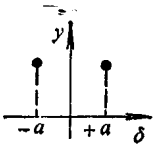
$$P(\delta_1 < \delta < \delta_1 + d\delta) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} y d\delta$$

随机误差的概率密度分布的型式如表4.1-3所列。

(2) 随机误差的表示法 在相同条件下, n 次测量同一被测[变]量的过程中出现的误差,所得随机误差忽大忽小,忽正忽负以不可预计的方式变化。其大小常用表4.1-4所列的参数表征。

3) 粗大误差的剔除准则 属于粗大误差的测量值(坏值),在测量过程中一经发现,应立即剔除,重新测量,但在数据处理时则按统计办法找出而后剔除,常用的剔除准则如表4.1-5所列。

表4.1-3 常见的随机误差概率分布

型式	图 形	公 式	均方误差① σ^2	置信系数② c	说 明
正态分布		$Y = (1/\sqrt{2\pi}\sigma)e^{-\delta^2/2\sigma^2} = \frac{h}{\sqrt{\pi}}e^{h^2\delta^2}$ h —精密指数($=\frac{\sigma}{\sqrt{2}}$)	σ^2	3~2.58	许多相互独立的、同等重要的因素微小变化共同作用造成的误差具有此种分布，大多数随机误差均可用此种分布
t 分布(取样分布)		$Y = \frac{\Gamma[(k+1)/2]}{\sqrt{k\pi} \Gamma(k/2)} (1+\delta^2/k)^{-(k+1)/2}$ $\Gamma(k/2)$ 、 $\Gamma[(k+1)/2]$ 为 Γ 函数 $\Gamma(\alpha)$ $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$	$\hat{\sigma}^2$	和测量次数 n 有关， n 为有限时的误差分布规律。当 $n \rightarrow \infty$ 时， t 分布以正态分布为极限 可据 k 查表(参考文献[2])	
均匀分布		$Y = \begin{cases} \frac{1}{2a}, & \delta \leq a \\ 0, & \delta > a \end{cases}$	$\frac{a^2}{3}$	$\sqrt{3}$	仪表中的摩擦、数字表灵敏限引起的量化误差、滑线电阻匝间的不连续、计算中的舍入误差等
反正弦分布		$Y = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{a^2-\delta^2}}, & \delta < a \\ 0, & \delta \geq a \end{cases}$	$\frac{a^2}{2}$	$\sqrt{2}$	仪表对正弦噪声的检测、仪表度盘偏心所导致的角度误差等
三角形分布		$Y = \begin{cases} \frac{a+\delta}{a^2}, & -a < \delta < 0 \\ \frac{a-\delta}{a^2}, & 0 < \delta < +a \end{cases}$	$\frac{a^2}{6}$	$\sqrt{6}$	电源电压的波动引起的仪表误差
两点分布		$P(-a) = P(a) = \frac{1}{2}$	a^2	1	传动机构的中间间隙等

① 均方误差 σ^2 ——随机误差以均方根表示的平方值(见表4.1-4)。② 置信系数 c ——人为取定随机误差极限值为均方误差 σ 的倍数(见表4.1-4)。

表4.1-4 随机误差的表示方法

表示法	公 式	说 明
平均误差 ρ_m	$\rho_m = \left(\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} \right) / n$	n 次测量值残差绝对值的平均值
极限误差 e (随机不确定度)	$e = \pm C\sigma$ (C —置信系数)	指人为规定概率达一定值(如95%, 99%等)时测量值所具有的最大随机误差, 此时的概率称置信概率
均方根误差 σ (根方差、中差、标准差)	定义: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - L)^2}{n}}$	测量次数 n 无限多时, 各测量值的随机误差的均方根值, 它不受误差正、负的影响, 对测量结果反映灵敏
	贝塞尔法: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$	n 有限时, 所得的 σ 记为 $\hat{\sigma}$, 为 σ 的估计值。当 $n \rightarrow \infty$ 时 $\hat{\sigma} \rightarrow \sigma$ 。使用广泛
	别捷斯法(绝对差法): $\sigma \approx K \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} }{\sqrt{n(n-1)}}$ 对正态分布 $K = \sqrt{\pi/2} \approx 5/4$	利用残差绝对值之和求取
	较差法 $\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - x_2)^2 + (x_3 - x_4)^2 + \cdots + (x_{n-1} - x_n)^2}{n}}$	对各类误差分布均可用, 且可克服测量中有发散性噪声影响
	极差法: $\sigma = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{d_n}$	为均方根差的无偏估计值, 不必求 $\bar{x}$ 值, 故计算简便、迅速 d_n 称极差系数, 据 n 查表决定 ^{〔2〕}
	最大绝对误差法: $\sigma = \frac{ x_{\max} - L }{K_n}$	在已知真值 L 时用, $1/K_n$ 据 n 查表决定(参考文献〔2〕)
算术平均值的 均方根误差 $\sigma_{\bar{x}}$	$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n}$	当以多次测量的算术平均值为测量结果时, 所具的随机误差, 此时测量结果表示为 $\bar{X} \pm C\sigma_{\bar{x}}$

表中符号含义:

 x_i ——测量值 ($i=1, 2, 3, \dots$) $x_{\max}, x_{\min}$ ——测量值中的最大值与最小值 L ——真值 $\bar{x}$ ——算术平均值 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ $x_i - \bar{x}$ ——测量值的残差(剩余误差) $x_i - L$ ——测量值的随机误差 n ——测量次数

表4.1-5 常用的坏值剔除准则

准则名称	公 式	说 明
拉依达准则 (3 σ 准则)	$ x_d - \bar{x} > 3\sigma$ 时, 测量值 x_d 判定为坏值	因随机误差在 $\pm 3\sigma$ 区间外的概率极小(对正态分布为0.3%) 使用方便, 要求高时可用 2σ
肖维勒准则	$ x_d - \bar{x} > \omega_n \sigma$ 时, 测量值 x_d 判定为坏值, 其中 ω_n 由下式决定: $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\omega_n\sigma}^{\omega_n\sigma} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta = 1 - \frac{1}{2n}$	因 $2n$ 次测量中残差为 $ x_d - \bar{x} $ 的只出现了一次或不到一次, 可见此残差很大, 故 x_d 可判定为坏值
格拉布斯准则	$ x_d - \bar{x} > \lambda(n, \alpha)\sigma$ 时, 测量值 x_d 判定为坏值	n 次测量中, 若置信概率为 $(1-\alpha)$, 则残差有限界为 $\lambda(n, \alpha)\sigma$, 超出者判定为坏值, $\lambda(n, \alpha)$ 由 n, α 查表得出(参考文献[2])
t 检验准则	$ x_d - \bar{x} > K(n, \alpha)\tilde{\sigma}$ 时, 测量值 x_d 判定为坏值, 其中 $\tilde{x}, \tilde{\sigma}$ 为不含可疑为坏值的 x_d 而得的平均值及根方差	因不带 x_d 求出的 $\tilde{\sigma}$, 保证了 $\tilde{\sigma}$ 的正确, $K(n, \alpha)$ 由次数 n 和置信概率 $1-\alpha$ 查表得出(参考文献[2])

2.3 误差传递和分配

因技术、经济条件限制, 有些被测量要用间接测量法即通过直接测量 n 个有关量后, 根据一定的函数关系而算出被测量。这样, 直接测量的误差将会传递给由计算而得的被测量。对于一个仪表, 也会因各组成环节的误差而使仪表的总输出示值有误差, 该误差是通过变换函数传递的。

上述情况的逆过程是根据总的误差要求, 如何把误差分配给各直接测量值或各组成环节。此外, 在设计测量方法时应考虑采用适当的函数关系, 以减少直接测量项(或环节), 并使每个项对总误差的影响最小或能彼此相消, 致使总误差最小。

1) 误差传递

(1) 系统误差传递

设测量的函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1-1)$$

式中 y ——被测量

x_i ——第 i 个直接测量值 ($i=1, 2, \dots, n$)

用泰劳级数展开, 并略去高阶微小项后, 得系统误差的传递公式

$$dy = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i \quad (4.1-2)$$

$$dy/y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{dx_i}{y} \quad (4.1-3)$$

式中 dy ——被测量的绝对误差

dy/y ——被测量的相对误差

dx_i ——第 i 个直接测量值的绝对误差, $i=1, 2, \dots, n$

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ——第 i 个直接测量值的影响系数, $i=1, 2, \dots, n$

(2) 随机误差传递

由 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 得出随机误差的传递公式为

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial f}{\partial x_j} \rho_{ij} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}} \quad (4.1-4)$$

式中 σ_y ——被测量的均方根误差

$\sigma_{x_i}, \sigma_{x_j}$ ——第 i, j 个直接测量值的均方根差

($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$)

$\frac{\partial f}{\partial x_i}, \frac{\partial f}{\partial x_j}$ ——第 i, j 个直接测量值的影响系

数

表4.1-6 误差合成方法

类型	方法	公 式	说 明
随机误差合成	方差求和	$\sigma_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j}$ 式中 σ_R——合成的均方根差 σ_i, σ_j——第<i>i</i>、<i>j</i>项均方根差 ρ_{ij}——σ_i、σ_j的相关系数	不论各单项随机误差的分布如何，只要能得到均方根差，均可用本法合成
	随机不确定度求和	$e_R = \pm C_R \sigma_R$ $= \pm C_R \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i}{C_i}\right)^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} \left(\frac{e_i}{C_i}\right) \left(\frac{e_j}{C_j}\right)}$ 式中 e_R, e_i, e_j——合成的及第<i>i</i>、<i>j</i>项极限误差 C_R, C_i, C_j——合成的及第<i>i</i>、<i>j</i>项随机误差置信系数	当<i>n</i>个单项均为正态分布时，合成亦是正态分布，取相同置信概率时，$C_R = C_i (i=1 \sim n)$ 当<i>n</i>个单项不全为正态分布时，理论上讲应求合成后的分布，再以与每单项相同的置信概率定<i>C_R</i>，但实际上<i>n</i>=4~6以上时，合成的分布近似为正态的
系统误差合成	代数求和法	$e_s = \sum_{l=1}^r e_{sl} = \sum_{l=1}^r C_{sl} \sigma_{sl}$ 式中 e_s——合成的系统误差极限误差 e_{sl}, σ_{sl}——第<i>l</i>项系统误差的极限误差及均方根误差 C_{sl}——第<i>l</i>项系统误差置信系数	若<i>r</i>项的符号均确知，则取代数求和，否则取绝对值求和较保险 当<i>r</i>较大时，结果与实际相差较大，但一般<i>r</i>不大，故以用本法较为合适
	方和根法	$e_s = \sqrt{\sum_{l=1}^r e_{sl}^2}$	系统误差不确定时用， <i>r</i> 较大时较接近实际情况，一般情况下偏小
	广义方和根法	$e_s = C_s \sigma_s = C_s \sqrt{\sum_{l=1}^r \sigma_{sl}^2}$ $= C_s \sqrt{\sum_{l=1}^r (\sigma_{sl}/C_{sl})^2}$	当<i>r</i>项均为正态分布时，合成亦为正态分布，取相同置信概率下$C_s = C_{sl} (l=1 \sim r)$ 当<i>r</i>项分布不同时，$C_{sl} (l=1 \sim r)$值以相同的置信概率，据各自的分布可查出 C_s，若<i>r</i>项差异不显著，则近似以正态分布定；若有特大项，则此项分布和正态分布取值的中间值
系统误差和随机误差合成	广义方和根法	$e_x = C_x \sigma_x$ $= C_x \sigma_x \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{e_{si}}{C_{si}}\right)^2 + \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j}$ 式中 e_x——合成误差的不确定度 C_x——合成误差的置信系数，求法和C_s类似	可用绝对值求和法、方和根法，但习惯上用广义方和根法。

ρ_{ij} ——误差 σ_{x_i} 和 σ_{x_j} 的相关系数，
若一个增大（或减小），另一个成比例地作相同变化时， $\rho_{ij} = 1$ ，为硬相关；反之，则 $\rho_{ij} = -1$ ，为负硬相关；一般各量相互独立无关，即 $\rho_{ij} = 0$

2) 误差分配

由式（4.1-2、3、4）知，从已知总误差来定出各直接测量量或各组成环节的误差，在数学上讲有无数解。因此一般总是先定下容易确定误差值的几项，余下的按均等分配原则分配，然后再作适当调整。调整中需注意：（1）技术上可能，经济上合算；（2）重视影响系数大的项，并充分利用影响系数的正负相消作用。最后要验算总误差是否超过给定值。

2.4 误差合成

一个检测系统在检测过程中会有多个系统误差和随机误差，它们对测量结果影响不同，因此要对这些单项误差合成成为总误差。在这里应注意：（1）不同类型误差，合成方法不同；（2）同类型误差

分布规律不同，合成方法不同；（3）系统误差的随机分布：通常系统误差按一定的函数规律变化，但当规律尚未确切掌握，其大小及符号只能作一定程度的估计；当数据来源于统计资料时，只能给出误差范围（系统误差的不确定度）；系统误差项目较多（6~10项以上），则每一项同时以最严重情况出现的机会较少，这些都要求按误差出现的统计分布规律来处理。

习惯上常用的误差合成方法列于表4.1-6中。

3 检测系统组成环节的一般特性

3.1 检测系统的组成及环节

检测系统或仪表总是由若干相互关联的具有一定功能的环节所组成，原理框图如图4.1-1所示，各环节的功能如表4.1-7所列。

各环节的具体功能虽然不同，但实质上都是信号变换，这种变换可以是信号物理性质的变化，也可能是同种性质的量的数量的增减。

就信号变换的作用而言，通常环节上的作用量有输入量 q_i 、输出量 q_o 及干扰信号 q_f ，如图

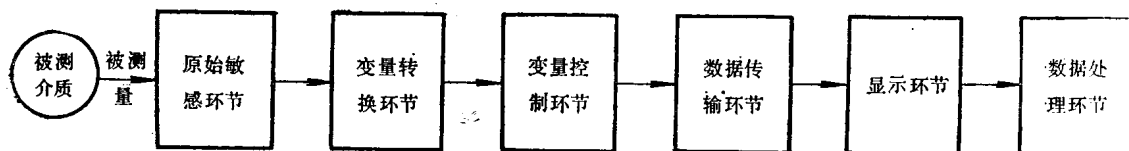


图4.1-1 检测系统结构原理框图

表 4.1-7 检测系统组成环节的功能

环 节	功 能
原始敏感环节	直接从被测介质获取有关被测量的信息，同时产生一个与被测量成一定函数关系并适于测量的输出量
变量转换环节	将原始敏感环节的输出作进一步变换
变量控制环节	保持变量物理性质不变的前提下，改变变量的数值
数据传输环节	将信号由一处传输至另一处
显示环节	将经变换的被测量显示出来，供观察
数据处理环节	对信号进行运算和加工处理

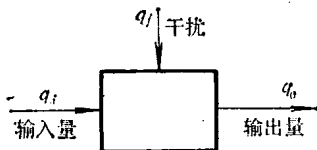


图4.1-2 环节上的作用量

4.1-2。

根据环节间相互连接方式的不同，检测系统或仪表可有串联式、并联式及反馈式三种类型。

各基本环节的一般特性包括：

1) 变换特性：描述环节本身的特性，通常用输入量 q_i 和输出量 q_o 之间的函数关系来表示。

2) 输入、输出特性: 描述环节在连接之中的相互影响。

3.2 变换特性

1) 变换函数

是描述变换特性的, 它指输出量 q_0 和输入量 q_i 在全部变化过程中的总的函数关系。可用如下数学方程表示

$$F[q_i, q_i^{(1)}, \dots, q_i^{(m)}; q_0, q_0^{(1)}, \dots, q_0^{(n)}; t] = 0 \quad (4.1-5)$$

式中 $q_i^{(m)}$ —— 输入量 q_i 的 m 阶导数, ($m=1, 2, \dots$)

$q_0^{(n)}$ —— 输出量 q_0 的 n 阶导数, ($n=1, 2, \dots$)

t —— 时间

2) 变换特性分类

(1) 动态特性(动态响应) 输入量为时间函数时的变换特性。在很多场合下, 环节可以被认为是一个线性系统, 故其动态特性可用线性微分方程描述:

$$a_m q_0^{(n)} + a_{m-1} q_0^{(n-1)} + \dots + a_1 q_0^{(1)} + a_0 q_0 = b_m q_i^{(m)} + b_{m-1} q_i^{(m-1)} + \dots + b_1 q_i^{(1)} + b_0 q_i \quad (4.1-6)$$

式中 a_n, b_m —— 均为系统系数, 为常数

动态特性亦可以传递函数描述。由调节原理知, 在初始值为零时, 环节的传递函数是输出、输入量 $q_0(t), q_i(t)$ 的拉氏变换 $Q_0(p), Q_i(p)$ 之比, 即

$$H(p) = \frac{Q_0(p)}{Q_i(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots} \quad (4.1-7)$$

此外, 还常用输入典型输入信号的方法来求得动态特性, 各种典型输入信号有正弦、单位阶跃、单位斜坡、单位冲激等。

就动态特性而言, 检测系统或仪表也常具有如自控系统中常具有的比例、积分、微分、振荡、非周期、滞后等等典型环节。

(2) 静态特性 输入量为 q_i 不随时间变化的静态信号, 或随时间很缓慢变化的准静态信号时的变换特性。因此公式(4.1-5)中 $q_i^{(1)} = q_i^{(2)} =$

$\dots q_i^{(m)} = 0; q_0^{(1)} = q_0^{(2)} = \dots = q_0^{(n)} = 0$, 故公式(4.1-5)变为

$$F(q_i, q_0) = 0 \quad (4.1-8)$$

如果不考虑环节有滞后、蠕变、弹性后效等欠缺, 通常环节的静态特性为非线性, 用下列代数方程表示:

$$q_0 = (S_0 + S_1 q_i + S_2 q_i^2 + \dots) q_i \quad (4.1-9)$$

式中 $S_1, S_2, \dots$ —— 系数

典型的静态特性曲线如图4.1-3所示, 图中除图a)为严格线性外, 其它均含有非线性分量, 图b)有偶次项分量, 图c)有奇次项分量, 图d)有偶次和奇次项分量。

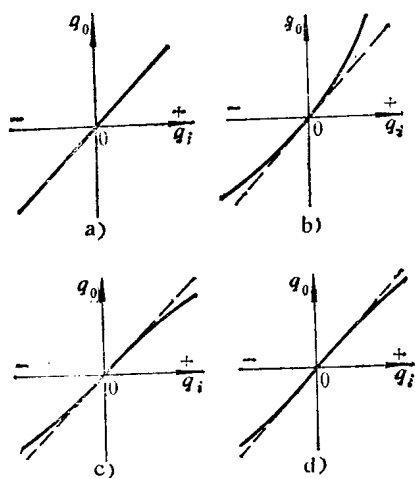


图4.1-3 静态特性曲线

$$a) q_0 = s_0 q_i \quad b) q_0 = s_0 q_i + s_1 q_i^2 + s_2 q_i^4 + \dots$$

$$c) q_0 = s_0 q_i + s_2 q_i^3 + s_4 q_i^5 + \dots \quad d) q_0 = s_0 q_i + s_1 q_i^2 + s_2 q_i^3 + \dots$$

静态特性曲线与某一参考直线的吻合程度称为线性度, 常用二者的最大偏差 B (以输出量的单位计算); 或 B 与最大输出范围 A 之比的百分数表示($B/A \times 100\%$), 如图4.1-4所示。

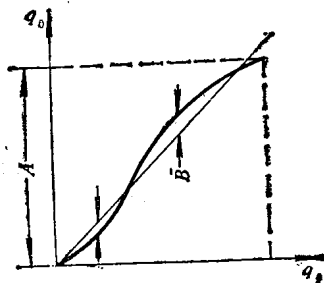


图4.1-4 线性度

表4.1-8 改善线性度降低线性误差的措施

措 施	举 例
降低变换灵敏度	热敏电阻串并联电阻网络
差动连接方式	双或四变换元件构成半桥或全桥, 差动变压器
非线性环节的相互校正	串联式的线性化器
反馈环节	反馈式的线性化器
缩小使用范围	半导体应变片, 电容、电感传感器
选择适当直线作为规定特性取代实际曲线	一般取使最大正、负偏差都能减至最小且相等的这条直线
选择与被测量成线性函数的参数作输出量	位移式电容传感器不以电容量的, 而以容抗作为反映位移量的输出量

如把理想的直线关系作为实际特性, 线性度就成线性误差。改善线性度, 降低线性误差的措施如表4.1-8所列。

3) 变换灵敏度

由单位输入量变化所引起的输出量变化, 称为变换灵敏度 S

$$S = \Delta q_o / \Delta q_i \quad (4.1-10)$$

式中 Δq_o —— 输出量的变化量

Δq_i —— 输入量的变化量

对动态特性, S 称为动态灵敏度, 是一个与频率 ω 有关的复数量 $S(j\omega)$, 它即是此环节的频率特性。

对静态特性, S 称为静态灵敏度, 是静态特性曲线的斜率, 可由公式(4.1-9)直接对 q_i 求导求得, 因而它取决于静态特性曲线的形状。

对严格线性的环节, 其静态灵敏度是一个常数, 对非线性的环节, 其静态灵敏度还取决于输入量 q_i 的值。

变换灵敏度是一个有量纲的量, 其量纲取决于输入量 q_i 和输出量 q_o 的量纲。

4) 变换误差

各环节在变换过程中, 实际得出的输出值 q_o' 总和理论值 q_o 有差别, 其差值 δ 称为变换误差, 稳态时的误差叫静态变换误差, 动态时的误差与静态误差的差值叫动态变换误差。引起误差的原因如表4.1-9所列。

5) 抗干扰的能力

干扰通常分为两部分:

(1) 环境影响 指来自环节外部的独立于被测量的因素, 如热(温度)、位置、震动、光、湿度、电场、磁场、电源电压、频率等。这些因素作用结果反映为变换灵敏度的变化。这时环节的真实变换灵敏度为

$$S_o = f(\theta, H, E, \dots) \quad (4.1-11)$$

式中 θ 、 H 、 E ……分别为温度、磁场、电场、……等干扰因素

上述诸因素构成环节工作时所经受的条件; 为了确定环节的性能而规定的工作条件范围, 称为参比工作条件。对于每个环节, 总希望其受环境的影响要小, 为此采用恒温、恒湿、防震、稳压、稳频、电磁屏蔽等措施来限制这些影响因素。

(2) 噪声 指与输入量一起作用在环节的

表4.1-9 产生变换误差的原因及消除方法

名 称	产 生 原 因	消 除 方 法
变换附加误差	由变换灵敏度的变化引起	1. 保守法: 恒温, 静电屏蔽, 磁屏蔽, 密封, 润滑等 2. 校正法: 串联校正
线性误差	由变换函数中的非线性项(高次项)所引起, 在动态时输出中出现新的频率分量	详见表4.1-8
频率失真	由变换函数中的微分项所引起的, 致使动态下某些频率分量被削弱, 或者使输出滞后于输入一个时间	1. 减小微分项的灵敏度 2. 加入校正环节, 串联校正 频率特性相乘; 并联校正则频率特性相加 3. 加入负反馈

输入端的那些不需要的、常常难于预料的成份。

在整个输入信号中,有用信号的功率与噪声功率之比称为信噪比,常用S/N (dB)表示,它标志着噪声对有用信号影响的大小。

根据干扰信号进入输入端的方式,分为串模干扰和共模干扰。串模干扰是出现在输入端子之间的干扰信号,由于存在串模电压所引起示值或输出信号的变化,以串模抑制比SMR标志;共模干扰是出现在输入端子和公共基准之间的干扰信号,由于存在共模电压所引起的示值或输出信号的变化,以共模抑制比CMRR来标志。

$$SMR = 20 \lg \frac{V_{nm}}{\Delta_n} (\text{dB}) \quad (4.1-12)$$

$$CMRR = 20 \lg \frac{|V_{cm}|}{|\Delta_{cm}|} (\text{dB}) \quad (4.1-13)$$

式中 V_{nm} , Δ_n ——串模信号峰值及由此产生的最大误差

V_{cm} , Δ_{cm} ——共模信号峰值及由此产生的最大误差

为了减少干扰信号,一般对一个环节或整个检测系统采用接地、屏蔽、浮置等措施。

3.3 输入、输出特性

在检测系统和仪表中,各环节是相互联系着,任一环节对其后级相当于信号源,对其前级又相当于负载。输入、输出特性是指环节在其输入端或输出端所表现的特性,它有输入、输出量的形式(电量或非电量)、量值变化范围(上、下限)以及前后级间相互影响与本级参数的关系等。

根据任一环节对前后级的作用,可以把它看成如图4.1-5所示的四端网络,输入量 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{I}_1$;输出

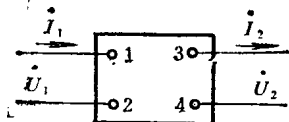


图4.1-5 四端网络

量 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{I}_2$, 其间满足方程

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (4.1-14)$$

式中 A 、 B 、 C 、 D ——为复常数, $AD - BC = 1$
其品质系数 k 为

$$k = \sqrt{\frac{Z_x}{Z_k}} = \sqrt{\frac{AD}{BC}} \quad (4.1-15)$$

式中 Z_x ——为1、2端开路 ($\dot{I}_1 = 0$) 由3、4端测得的阻抗(空载阻抗) $Z_x = -\frac{D}{C}$

Z_k ——为1、2端短路 ($\dot{U}_1 = 0$) 由3、4端测得的阻抗(短路阻抗) $Z_k = -\frac{B}{A}$

其特征阻抗为 Z_c 。

$$Z_c = \sqrt{Z_k \cdot Z_x} = \sqrt{-\frac{BD}{AC}} = k Z_k = \frac{1}{k} Z_x \quad (4.1-16)$$

其对功率变换的变换效率 η 为

$$\eta = \frac{|\dot{U}_1 \dot{I}_1|}{|\dot{U}_2 \dot{I}_2|} = \frac{\left| k - \frac{1}{k} \right|}{\left| a_c + \frac{1}{a_c} + k + \frac{1}{k} \right|} \quad (4.1-17)$$

式中 a_c ——为匹配程度, $a_c = \frac{Z_2}{Z_c}$

Z_2 ——为此四端网络的负载(即后级的输入阻抗)

环节用作阻抗变换时,其变换效率 η_z 有和 η 相似的结论

$$\eta_z = \frac{dZ_2/Z_2}{dZ_1/Z_1} = \frac{k - \frac{1}{k}}{a_c + \frac{1}{a_c} + k + \frac{1}{k}} \quad (4.1-18)$$

式中 Z_1 ——网络输入端阻抗 $Z_1 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$

Z_2 ——网络输出端阻抗 $Z_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$

dz_1/z_1 ——网络输入端阻抗的相对变化

dz_2/z_2 ——由 dz_1/z_1 引起的输出端阻抗相对变

化

从公式(4.1-17)及(4.1-18)知,一个环节的变换效率不仅和本身阻抗(由 k 表示)有关,还与环节之间匹配程度有关,当 $a_e = 1$ 时, η 达最大

$$\eta_{\max} = \frac{k-1}{k+1}。$$

由图4.1-6可见,若稍有失配($a_e = 1$ 附近), η 减少不多,且 k 愈高,这种减少愈小。

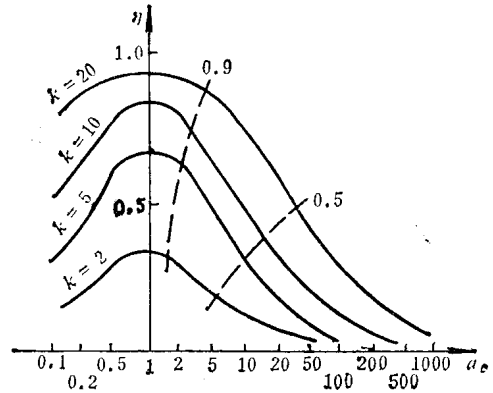


图4.1-6 网络变换效率与匹配程度之关系

第2章 电磁法检测

由于电量便于传递、转换、处理和显示,因此在工业检测中常把要测的非电量转换成电量。用电磁学中的一些效应和定律转换成的电工量常有:电阻、电容、电感、电势、电荷、电流以及磁通密度、磁场强度、磁导率等。为方便使用,常将上述电

量通过测量电路再转换成电势或电流。

1 电阻法检测

随非电量而变化的几类常用电阻,其规律如表4.2-1所示。由此,可将这些非电量转换成电量。

表4.2-1 几类常用电阻随非电量变化的规律

类别	基本公式	说明
导体电阻	$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4.2-1)$ 式中 R——电阻 Ω ρ——电阻率 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ l——导体长度 m S——导体截面 mm^2	常用的有: 1. 随l变化(变阻器);随S变化(碳堆电阻);随ρ、S、l变化(应变电阻) 2. 由温度引起ρ变化(热电阻)
半导体电阻	$\rho = \frac{1}{en\mu} \quad (4.2-2)$ 式中 ρ——半导体电阻率 $\Omega \cdot \text{cm}$ e——电子电量 C n——载流子浓度 $1/\text{cm}^3$ μ——迁移率 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	常用半导体电阻变化规律 热敏电阻: $R = ae^{-b/T}$ 压敏电阻: $\Delta R/R = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 + C_3 \varepsilon^3 + \dots$ 磁敏电阻: $\Delta \rho/\rho = A^2 \mu^2 B^2$ 光敏电阻: 和光通量, 光波长有关 气敏电阻: 和气体成份、浓度有关 湿敏电阻: 和湿度有关 (详见本篇第7章)

(续)

类别	基本公式	说明
电解质溶液电阻	$R = \frac{\delta L}{\lambda_t C S} 10^6 \quad (4.2-3)$ 式中 R——溶液电阻 Ω L——电极间距离 cm S——极板面积 cm^2 λ_t——温度为t时的当量电导 $\text{cm}^2/\Omega \cdot \text{mol}$ C——溶液浓度 mg/l δ——每克当量电解质克数 g/mol	式(4.2-3)仅适用于稀溶液,且未计电极极化和极间电容。对浓度稍高的溶液则各自有不同的规律曲线 (详见本篇第8章)

表中其它符号: ϵ ——应变变量; $\Delta R/R$ ——电阻相对变化; $\Delta \rho/\rho$ ——电导相对变化; a, b, A, C_1, C_2, C_3 ——与材料有关的常数; B ——磁通密度 G

1.1 利用导体电阻

如表4.2-1所示,可有被测量使导体 l 变化、 S 变化、或 ρ, l, S 变化三种。

1.1.1 利用长度 l 变化

由导线(或电阻丝)绕成的变阻器是利用与导线接触的电刷滑动,以改变接入电路的导线长度。一般随电刷滑动长度变化是均匀的,特殊需要可设计成不均匀的。

电刷滑动时,导线是一圈一圈被接入,故长度变化是不连续的,其与电刷滑动量 x 之间呈阶跃特性。若再考虑电刷有一定宽度 b ,其滑动中会同时接触几圈(由 b 与导线直径 $2R$ 之比决定,一般 $b/2R = 2 \sim 3$)而造成这些圈被短路,这样 $R=f(x)$ 的阶跃关系就较为复杂。因而限定了变阻器的静态灵敏度,而其动态灵敏度则由电刷的质量或转动惯量来决定。

1.1.2 利用截面积 S 变化

1) 为使变阻器的 $R=f(x)$ 特性满足特殊需要,可将其导线截面 S 设计成变化的,或虽均匀但在一定的分段上各自并联上不同的电阻 r_i 来满足要求。

2) 由炭片叠成的炭堆电阻是利用炭堆上所受压力 p 变化,造成炭片间接触面积 S 变化,引起阻值变化。亦因此,炭堆电阻阻值与压力的关系是非线性的,且有滞环(图4.2-1)。

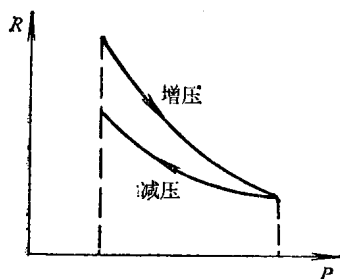


图4.2-1 炭堆电阻 $R=f(p)$ 特性

1.1.3 利用 ρ, s, l 变化的应变电阻

1) 作用原理 应变电阻由金属电阻丝(箔)构成,如图4.2-2所示,将其粘贴于弹性元件或试件上,在它们受力而变形时,由于应力 σ 的作用而使 ρ, s, l 均发生变化,造成电阻值变化,其大小为对公式(4.2-1)全微分:

$$dR/R = dl/l - ds/s + d\rho/\rho \quad (4.2-4)$$

式中第一、二项是导体的应变使 l, s 变化;第三项是压阻效应造成 ρ 变化。

2) 压阻效应 应力的作用,对于金属导体会影响其自由电子的数量和导电运动;对于半导体能使载流子浓度和平均迁移率发生变化,这些均造成其电阻率 ρ 的变化。

压阻效应常用压阻系数 π (m^2/N)表示

$$\pi = \frac{d\rho/\rho}{\sigma} \quad (4.2-5)$$

一般金属 π 是不大的,仅一些压敏导体在很高的压力(如 1000 kgf/cm^2 以上)才显出压阻现象;

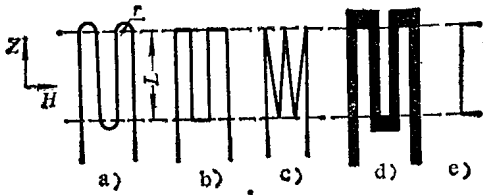


图4.2-2 金属应变电阻的几种形状
a) U型线栅丝式 b) H型线栅丝式 c) V型线栅丝式
d) 线栅箱式 e) 直线性

而一些半导体材料,在某一晶轴方向 π 可以很大,能使由此构成的半导体应变电阻对应力十分敏感(详见4.7.3节)。

3) 特性

(1) 直线式应变电阻阻值变化 $\frac{dR}{R}$ 与应变 e

关系

从式(4.1-4)知

$$\begin{aligned}\frac{dR}{R} &= \frac{dl}{l} \left(1 - \frac{ds/s}{dl/l} + \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \right) \\ &= (1 + 2\mu + \pi E)e\end{aligned}\quad (4.2-6)$$

式中 E ——杨氏模量 $E = \frac{\sigma}{e}$ N/m²

μ ——泊松系数。是横向应变和纵向应变之比,对圆截面 $\frac{ds/s}{dl/l} = -2\mu$

e ——纵向应变 dl/l

$$\text{令 } K_0 = \frac{dR/R}{e} = 1 + 2\mu + \pi E \quad (4.2-7)$$

常称 K_0 为应变电阻的相对灵敏度(应变灵敏度系数)。

(2) 横向效应及其影响

应变电阻除轴向基长 L 外,栅状电阻在横向总有围弯部分,因此即使只受单向拉伸作用,其应变除轴向伸长外(应变 ϵ_z),还有横向围弯部分的缩短(应变 ϵ_H)。此缩短对电阻变化起减小作用,因此会部分抵消轴向伸长而造成的电阻值增加,从而使栅状的灵敏度系数比直线状的要低。

横向效应可用横向效应系数 C 表示

$$C = \frac{K_H}{K_Z} \quad (4.2-8)$$

式中 K_H, K_Z ——是应变电阻的横向、轴向灵敏系数,是在特定的单向应变下(例如1000微应变)测出:

$$\begin{aligned}K_H &= \left(\frac{\Delta R/R}{\epsilon_H} \right)_{\epsilon_Z=0} \\ K_Z &= \left(\frac{\Delta R/R}{\epsilon_Z} \right)_{\epsilon_H=0}\end{aligned}\quad (4.2-9)$$

C 值与应变电阻构成的结构型式有关,基长短、段数又多的 C 值就较大,一般 $C = 3 \sim 5\%$,优质的可达0.3%。

通常按下述条件试验标定应变电阻的灵敏度系数 K : ①应变电阻贴于泊松系数 μ_0 之试验梁上; ②梁只受一维应力; ③应变电阻 Z 轴与应力方向平行。因此,若实际使用中不符合上条件,则会产生相对误差 ν 为:

$$\nu = \frac{C}{1 - C\mu_0} \left(\mu_0 + \frac{\epsilon_H}{\epsilon_Z} \right) \quad (4.2-10)$$

式中 C ——应变电阻的横向效应系数

ϵ_H, ϵ_Z ——应变电阻的横向、纵向应变

由式(4.2-10)知,应变电阻的粘贴方向及弹

性元件或试件的泊松系数(影响 $\frac{\epsilon_H}{\epsilon_Z}$ 值)和应变电

阻的横向效应(影响 C)均将会影响测量精度。

(3) 温度特性

贴于弹性元件或试件上的应变电阻,由于环境温度变化会引起阻值变化,其原因为①电阻丝材料的电阻温度系数 α (1/°C); ②电阻丝材料的线胀系数 β_s (1/°C)和弹性元件的 β_f (1/°C)不一而引起的附加应力。

在温度缓慢变化的均匀温度场中,上述影响可用应变电阻温度系数 α_t (1/°C)来表示

$$\alpha_t = \alpha + K_0(\beta_s - \beta_f) \quad (4.2-11)$$

由于应变电阻受应力作用时阻值相对变化是不大的(约小于0.5%),因此使用中必需采取温度补偿措施来消除温度影响。

(4) 频率特性

当弹性元件或试件受变化的应力作用时,由于应力传递需要时间,因此在弹性元件或试件中的应变,将呈波的形式,以 $V = \sqrt{E/\rho}$ (E 为材料纵向弹性模量、 ρ 为材料密度)速度传播,这样弹性元件或试件各点的应变不全相同。当受交变应力作