

经验温标: (关系:  $t_{\text{C}} = 1.8t_{\text{F}} + 32$ )

\*摄氏温标: 冰点  $0^{\circ}\text{C}$ , 沸点  $100^{\circ}\text{C}$ , 中间 100 等分

\*华氏温标: 冰点  $32^{\circ}\text{F}$ , 沸点  $212^{\circ}\text{F}$ , 中间 180 等分

国际温标: 热力学温标:  $T = 273.15 + t_{\text{C}}$

ITS-90 (90 温标): 水的三相点温度为  $0.01^{\circ}\text{C}$

$T(273.15\text{K})$  = 水的三相点温度的  $1/273.15$

国际摄氏温度:  $t(t_{\text{C}}) = T - 273.15$

导体 A、B 结在温度  $T$  时形成的接触电势:

$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}}$$

$e_{AB}(T)$  —— 导体 A、B 结在温度  $T$  时形成的接触电势;  
 $e$  —— 单位电荷,  $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ;  
 $k$  —— 波尔兹曼常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ;  
 $N_{AT}, N_{BT}$  —— 导体 A、B 在温度为  $T$  时的电子密度。

导体 A 两端温度为  $T, T_0$  时形成的温差电势:

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$$

$e_A(T, T_0)$  —— 导体 A 两端温度为  $T, T_0$  时形成的温差电势;  
 $T, T_0$  —— 高低端的绝对温度;  
 $\sigma_A$  —— 汤姆逊系数, 表示导体 A 两端的温度差为  $1^{\circ}\text{C}$  时所产生温差电势, 例如在  $0^{\circ}\text{C}$  时, 铜的  $\sigma = 2 \mu\text{V/}^{\circ}\text{C}$ 。

当在原来热电偶回路中分别引入与导体材料 A、B 同样热电特性的材料 A'、B' (如图) 即引入所谓补偿导线时, 当  $E_{AA'}(T_2) = E_{BB'}(T_2)$ , 则回路总电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T_1, T_0) + E_{AA'}(T_2, T_1) + E_{BB'}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_0)$$

只要  $T_1, T_0$  不变, 接入 A'、B' 后不管接点温度  $T_2$  如何变化, 都不影响总电势。这便是引入补偿导线原理。

热端 冷端

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) - e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0)$$

$$= \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} + \int_{T_0}^T (-\sigma_A + \sigma_B) dT$$

$N_{AT}, N_{AT0}$  —— 导体 A 在结点温度为  $T$  和  $T_0$  时的电子密度;  
 $N_{BT}, N_{BT0}$  —— 导体 B 在结点温度为  $T$  和  $T_0$  时的电子密度;  
 $\sigma_A, \sigma_B$  —— 导体 A 和 B 的汤姆逊系数。

条件: 两种不同的导体连成闭合回路, 两个接点存在温差。

中间温度定理:  $E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$

采用补偿导线将参比端移动到满足  $T_0$  (通常为环境温度) 处, 测量  $T_0$  后可以根据中间温度定理来计算热电势

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$$

热电偶输出电势 测量  $T_0$  后查表求得

热电阻测温的接线方式

2线制: 受引线电阻影响严重。

3线制: 基本可以消除引线电阻影响。

4线制: 可以完全消除引线电阻影响。

Constant Current 4-wire circuit

100 FEET, 30 GAUGE COPPER WIRE = 10.5  $\Omega$  @ 25 $^{\circ}\text{C}$   
 $\text{TC} = 0.385\%/^{\circ}\text{C}$   
 ASSUME  $+10^{\circ}\text{C}$  TEMPERATURE CHANGE  
 NUMBERS IN ( ) ARE @  $+35^{\circ}\text{C}$

Temperature at 25 $^{\circ}\text{C}$ :

$$R_2: \text{varying from } 350 \Omega \text{ to } 353.5 \Omega, \text{ full scale } 1\%$$

$$R_1 = 371 \Omega, R_3 = 350 \Omega, R_{\text{ind}} = r = 10.5 \Omega, V_s = 10\text{V}$$

Offset:  $V_o = V_s \cdot \left( \frac{R_2 + 2r}{R_2 + 2r + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_1 \rightarrow 350} = 0$

FS:  $V_o = V_s \cdot \left( \frac{R_2 + 2r}{R_2 + 2r + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_1 \rightarrow 353.5} = 23.45\text{mV}$

Temperature at 35 $^{\circ}\text{C}$ :  $\Delta r = 10.5 \times 0.385\% \times 10 = 0.404 \Omega$

Offset:  $V_o = V_s \cdot \left( \frac{R_2 + 2(r + \Delta r)}{R_2 + 2(r + \Delta r) + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_1 \rightarrow 350} = 5.44\text{mV}$

FS:  $V_o = V_s \cdot \left( \frac{R_2 + 2(r + \Delta r)}{R_2 + 2(r + \Delta r) + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_1 \rightarrow 353.5} = 28.83\text{mV}$

Gain error:  $-0.26\%$  full scale  $\left( \frac{28.83 - 23.45}{23.45} \right)$

斯特藩-波尔兹曼定律: 黑体的全辐射力

$$E_o = \int_0^{\infty} E_{o\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$$

热电阻值:  $R = R_0 \exp[\beta(1/T - 1/T_0)]$

$R_0$  = 参考温度  $T_0$  时的阻值

$T$  = 被测温度 ( $T_0$  一般为  $25^{\circ}\text{C}$ )

$\beta$  = 常数 (与电阻材料有关)

热电阻相对温度系数  $\alpha = (R_{100}/R_0 - 1)/100$

$R_{100}, R_0$  分别为在  $100^{\circ}\text{C}$  和  $0^{\circ}\text{C}$  时的电阻值

例如: 铂电阻  $R_t = R_0(1 + \alpha t)$

辐射能量的分配:

$$1 = \frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_D}{Q} + \frac{Q_R}{Q} = \alpha + \tau + \rho$$

$\alpha$  吸收率,  $\tau$  透射率,  $\rho$  反射率

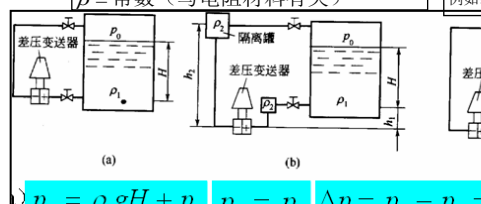
比色 (双色) 温度计 辐射温度计

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} = \frac{\ln \frac{\epsilon_{\lambda_1} r}{\epsilon_{\lambda_2} r}}{c_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

$$T = T_R \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon}}$$

$T$ : 物体的真实温度  
 $T_R$ : 物体的比色温度  
 $\epsilon, \epsilon_r$ : 物体在  $\lambda_1$  时的黑度系数

集成温度传感器测温原理: 利用半导体器件温度特性, 晶体管基极-发射极的正向压降随温度升高而降低。



Planck's Law: 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系

$$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

$c_1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$   
 $c_2 = 1.44 \times 10^{-2} \text{ (m} \cdot \text{K)}$

维恩公式 (波长较大时) 瑞利-金斯公式 (波长较小时)

$$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} \quad E_{o\lambda} = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4}$$

伯努利方程 (Bernoulli Equation)

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

H 渠顶与上游水面的距离 ( $p_1 = p_2 = 0$ )

h 堰后离原始液面的深度 (此处流速为  $v_2$ )

明渠方程:  $gH + 0.5v_1^2 = g(H - h) + 0.5v_2^2$

$\Rightarrow$  流速  $v_2 = \sqrt{2gh + v_1^2} \approx \sqrt{2gh}$

体积流量:  $Q = \int v_2 dA = 0.667 \sqrt{2g} L H^{1.5}$

三角形:  $Q = (8/15) \sqrt{2g} \tan(0.5\theta) H^{2.5}$

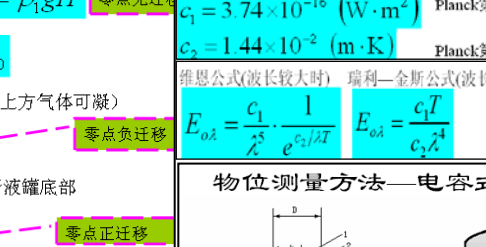
卡门涡街流量计: 内置电阻丝测频率

h1、h2 —— 差压变送器引压管中隔离液高度; (液罐上方气体可凝)

$\Delta p = p_+ - p_- = \rho_1 g H + \rho_2 g (h_1 - h_2)$  零点负迁移

差压变送器安装低于液罐底部

$\Delta p = p_+ - p_- = \rho_1 g H + \rho_1 g h$  零点正迁移



卡门涡街流量计: 内置电阻丝测频率

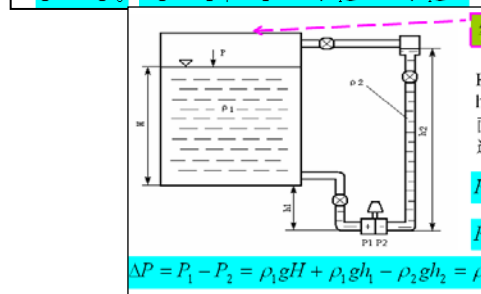
$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2}$$

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$$

界面 2 处平均流速:  $u_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (d/D)^4}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$

体积流量:  $q_v = u_2 A_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (d/D)^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$

质量流量:  $q_m = \rho u_2 A_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - (d/D)^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)}$



物位测量方法——浮力式

$$c(x_0 - \Delta x) = mg - A \rho g (H + \Delta H - \Delta x)$$

$$\Delta H = \left( 1 + \frac{c}{A \rho g} \right) \Delta x$$

浮筒式液位计

1-浮筒; 2-弹簧; 3-差动变压器

速度式—电磁流量计

B: 为磁感应强度, D: 管道内径

$u$ : 流体平均流速, E: 感应电势

$$q_v = \frac{1}{4} \pi D^2 u = \frac{\pi D}{4B} E = \frac{E}{k}$$

速度式—涡街流量计

f: 漩涡产生的频率,  $St = \frac{f \cdot m \cdot d}{u}$

$u$ : 流体流速, St: 斯特罗哈尔数

d: 漩涡发生体的特征尺寸,

$$q_v = \bar{u} A = \frac{\pi D^2 f d}{4 St} \left( 1 - 1.25 \frac{d}{D} \right) = \frac{f}{K}$$

速度式—电磁流量计

B: 为磁感应强度, D: 管道内径

$u$ : 流体平均流速, E: 感应电势

$$q_v = \frac{1}{4} \pi D^2 u = \frac{\pi D}{4B} E = \frac{E}{k}$$

速度式—涡街流量计

f: 漩涡产生的频率,  $St = \frac{f \cdot m \cdot d}{u}$

$u$ : 流体流速, St: 斯特罗哈尔数

d: 漩涡发生体的特征尺寸,

$$q_v = \bar{u} A = \frac{\pi D^2 f d}{4 St} \left( 1 - 1.25 \frac{d}{D} \right) = \frac{f}{K}$$

转子流量计:

$$q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

$$\Delta p A_f = V_f (\rho_f - \rho) g$$

速度式—超声流量计

时差法

t1-按顺流方向, 超声波到达接收器时间

t2-按逆流方向, 超声波到达接收器时间

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lu}{c^2} \quad u = \frac{c^2 \Delta t}{2L} \quad c \gg u$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L}{c - u} - \frac{L}{c + u} = \frac{2Lu}{c^2 - u^2} \approx \frac{2Lu}{c^2}$$

量程=测量上限-测量下限，灵敏度=ΔY/ΔU  
 分辨率是仪表输出能响应和分辨的最小输入量。  
 关系：分辨率是灵敏度的一种反映，一般说仪表的灵敏度高，其分辨率也高。  
 多个仪表首尾串联，其总灵敏度是各仪表灵敏度的乘积。  
 综合评价仪表的可靠性：有效度=  $\frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均无故障修复时间}}$   
 准确度：测量准确值偏离真值的程度；精确度：测量值的分散程度。  
 测量不确定度：用测量平均值的标准偏差来表示，也可以用标准偏差的倍数或置信区间的半宽度。

设传感器A和传感器B处所观测到的离散信号序列分别为  $f_A(i\Delta t)$ ,  $f_B(i\Delta t)$  其中  $(i=0,1,2,\dots,n-1)$   
 求两信号的互相关函数值，注意标出函数取值范围和取平均的数值个数。  

$$R_{xx}(k\Delta t) = \begin{cases} \frac{1}{n-k} \sum_{i=0}^{n-k} f_A(i\Delta t) \cdot f_B((i+k)\Delta t), & 0 \leq k \leq n-1 \\ \frac{1}{n+k} \sum_{i=-k}^{n-1} f_A(i\Delta t) \cdot f_B((i+k)\Delta t), & -n+1 \leq k \leq 0 \end{cases}$$

### 测量不确定度的评定方法

相同条件下，对被测量X进行n次重复测量，得测量值  $X_i$ ，求其平均值

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

A类标准不确定度

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

A类标准不确定度的自由度 n-1  
 (自由度是标准不确定度的不确定度)

### 激光扫描与 CCD 的异同

都适用于软质材料、高温物体等外径的检测；**区别**：激光扫描测长只有一个光电元件，需要机械式扫描投影光线；而 CCD 图像扫描测长是扫描光电阵列元件的信号输出。

平均值A就是真值A<sub>0</sub>的无偏估计  
 标准偏差的无偏估计：称为实验标准偏差 也称贝塞尔公式

$$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (M_i - A)^2}$$

### 同心圆筒形电容器

位移测量

$$C = \frac{\epsilon d}{\log(D/d)}$$

电容式物位计

$$C = \frac{\epsilon_2 h + \epsilon_1 (H-h)}{\log(D/d)}$$

极板间介质的介电常数  
 ε<sub>1</sub>：真空为1  
 ε<sub>2</sub>：油为4.5，水为78

间接检测量Y与互相独立的直接检测量  $X_1, X_2, \dots$  有关系  $Y = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_n)$   
 $X_1, X_2, \dots$  的标准偏差为  $\sigma_1, \sigma_2, \dots$ ，求Y的标准偏差  $\sigma_Y$

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{d\varphi}{dx_1}\right)_0^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{d\varphi}{dx_2}\right)_0^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{d\varphi}{dx_n}\right)_0^2 \sigma_n^2}$$

泰勒级数展开  $Y = Y_0 + \left(\frac{d\varphi}{dx_1}\right)_0 x_1 + \left(\frac{d\varphi}{dx_2}\right)_0 x_2 + \dots + \left(\frac{d\varphi}{dx_n}\right)_0 x_n$

当  $Y = a_1 X_1 \pm a_2 X_2 \pm \dots \pm a_n X_n + k$  时，则有

$$\sigma_Y^2 = a_1^2 \sigma_1^2 + a_2^2 \sigma_2^2 + \dots + a_n^2 \sigma_n^2$$

### 正反方向的检测和分辨率的提高

图例展示了不同频率下的波形，以及相关的电路原理图。

电路原理图：包含比较器、计数器、译码器等元件。

### PSD三角测量

已知焦距L和基线长D  
 PSD输出漫反射光点的位置d  
 求距离S ( $S=LD/d$ )  
 为了提高测距精度，应如何设计D? (适当增大D)  
 抗干扰光措施? (调制解调)

图例展示了三角测量的几何关系和PSD传感器的结构。

相关函数：  $R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau)dt$   
 自相关：一个随机过程在相隔τ的两个不同时刻取值的相关程度；分析传感器输出信号的规律性→信号与噪声的周期性。  
 互相关：两个随机过程在相隔τ的两个不同时刻取值的相关程度；分析传感器输出信号的相似性→移动速度检测。

应变灵敏系数为2.1，电阻为120Ω的应变片，在发生应变为150μ ε 时，求电阻的变化量。当使用4枚该应变片做悬臂梁的振动检测时，可获得的最大灵敏度是仅使用1枚时的灵敏度的多少倍?

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho} / \epsilon$$

2.1\*150\*10<sup>-6</sup>\*120=37.8mΩ  
 使用4枚应变片，并进行合理配置，可以获得1枚时的四倍灵敏度。  
 配置方法。。。

总体标准偏差：偏离真值的程度  $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_0)^2}$   
 实验标准偏差：偏离平均值的程度  $\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$   
 测量结果平均值的标准偏差： $\sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$   
 A类标准不确定度

### 光纤陀螺原理--Sagnac效应

图例展示了Sagnac效应的原理，包括光路长度差、相位差等。

当ω=0时，顺时针环路和逆时针环路的路径长相同，干涉条纹的光强不变化。  
 当ω≠0，转过一定角度时，到达光电传感器的两束光的相位差：  

$$\varphi_s = N2\pi \frac{C}{\lambda} (t_{CW} - t_{CCW}) \rightarrow \varphi_s = \frac{2\pi n^2 L D}{C \lambda} \omega$$

### 直接法—科氏力流量计

图例展示了科氏力流量计的结构和原理。

$$q_m = \frac{K_s}{8r^2} \Delta t$$

弹性模量

$$\Delta t = \frac{2rs \sin \theta}{u_p} = \frac{2r\theta}{\omega L}$$

角速度

### 直接法—热式质量流量计

图例展示了热式质量流量计的结构和原理。

$$q_m = \frac{P}{c_p \Delta T}$$

功率

定压比热

温差

### 比较输出电压对于应变的灵敏度

图例展示了不同桥路结构的灵敏度比较。

$$e = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} E$$

$$e = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} \frac{E}{\frac{R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_2} + \frac{R_3}{R_3} + \frac{R_4}{R_4}}$$

$$e = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) E$$

### 比较变极距电容式位移传感器和具有差动结构的电容式位移传感器的测量输入输出特性，简述差动结构具有哪些优势：

①变极距电容式位移传感器：电容极距与电容大小成反比，双曲线关系；②差动电容式位移传感器：差动电容与位移在零点近旁呈线性关系；③差动结构明显改善线性灵敏度，另外因静电力、温度变化、电源变化等环境条件引起的误差也因差动结构的抵消作用而大幅减少；④差动结构具有对于环境参数的对称结构，同时具有对于被测参数的反对称结构；⑤差动结构的作用是提高了线性灵敏度，消除共模干扰，降低漂移。

### 接受信号与发光信号同步积分结果：

\*输出直流成分、与发光信号同频率同相成分的大小成比例；\*A不变→求sita角(相位差测量)；\*主动改变sita角→调出最大直流→求A(微弱信号检测)。  
 如何判断 PSD 中有无调制解调：\*调制解调的作用是抗干扰光影响；\*施加干扰光，观察输出信号是否有变化；\*无变化，则说明有调制解调处理在内。  
 如何鉴别增量码盘的转向：  
 • 正转时，A相超前B相1/4周期；  
 • 反转时，A相滞后B相1/4周期；  
 (利用D触发器)  $y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \cdot \sin 2\pi f_c \tau d\tau$   
 • A相上升触发时，B相为L，则Q为L，即止转；  
 • A相上升触发时，B相为H，则Q为H，即反转。