

测量基本概念: 测量范围的表示: 下限值~上限值或者零点与量程。**灵敏度和分辨率:** 一般来说灵敏度高的分辨率也高。**LSB:** S 表示有意义, 至少应大于噪声。**最大引用误差:** 最大绝对误差/量程。**重复性:** 仪表不受随机因素影响的能力。**再现性:** 上升和下降曲线的最大差值, 稳定性的表现。**零点迁移和量程迁移:** 改变仪表的零点和量程, 以扩大仪表的通用性, 适应测量要求或者测量条件的变化。迁移量用量程的百分比表示。迁移后的标尺特性曲线为平移或者旋转后在原来的正方形中的部分。**误差不确定度: 约定真值:** 用标准的特定的方法确定的真值, 用来代替被测真值。**绝对误差=示值-约定真值。误差=系统误差+随机误差(还有粗大)。****准确度高:** 均值离真值近。**精密度高:** 曲线瘦(即方差小, 不确定度小)。**平均值的标准偏差(即 k=1 的 A 类不确定度)无偏估计:** $\sqrt{1/(n(n-1)) \sum (X_i - \bar{X})^2}$ 。**合成:** $r = \sigma_{XY}^2 / (\sigma_X \sigma_Y)$, $U^2(Y) = \sum (\partial f / \partial X_i)^2 U^2(X_i) + \sum (\partial f / \partial X_i)(\partial f / \partial X_j) U(X_i) U(X_j) r(X_i, X_j)$ **扩展不确定度:** kU 。系数 k: (0.6745,50%)-(1.68,27%)-(2.95,45%)-(3.99,73%)。**不确定度和准确度的关系:** $M = A + b \pm U$ 。

金属应变片: $R = \rho l / S$ 。测量时忽略电阻率的变化。应变灵敏度 $K \approx 1 + 2\gamma$ 。金属电阻丝的泊松比 $\gamma \approx 0.3 \sim 0.5$, K 大约为 2。 $K=R$ 的相对变化/ l 的相对变化。**接法:** 单桥 $e = 1/4 \Delta R_1 / R_1 E$ (非线性误差, 温度误差), 双桥: $1/2$ (有温度补偿, 灵敏, 线性好), 全桥(线性好, 温度补偿, 更灵敏): 1。注意上下反贴。应该在平衡点附近以减少非线性, 电桥下一级接输入阻抗很大的放大器。

差动结构功能特点: 消除共模干扰, 降低漂移, 提高灵敏度(2 倍)。测量参数反对成作用, 两个空间对称结构, 干扰或影响参数对称作用。

差动电容式位移检测: $C = \epsilon(S/d)$ 。 $C_2/C_1 = (d_0 + \Delta d)/(d_0 - \Delta d)$ 。采用共模输出就是 $(C_2 - C_1)/C_0 \approx 2\Delta d/d_0$ 忽略了 $\Delta d/d_0$ 的三阶以上高次项。而单电容仅 2 次。同步加算: 多次(2^n 次)采样的平均值, 去随机噪声。

电容式倾斜仪: 气泡进去以后介电常数变小, 所以相应的电容变小。

自感式差动位移传感器: $(L_2 - L_1)/L_0 \approx 2\Delta d/d_0$ 和 $\approx 2R\Delta\theta/d_0$ (角度测量)

电容三轴力传感器: 右 x, 下 y, $F_x(2-1), F_y(4-3), F_z(1+2+3+4)$ 。

LVDT: 实际结果与理想情况差距较大: 因为次级线圈不完全对称、铁芯磁化非线性等, 使产生零点残余电压和输出中的高次谐波、不同相。**特点:** 应用广泛。铁芯悬空, 无机械摩擦, 寿命长; 分辨率无限小(只有电路噪声和显示分辨率); 超出量程无损坏; 只对轴向敏感; 只有电磁耦合; 电磁感应不受环境影响;**相敏整流电路** (上图): 由交流获得直流。**零点残余原因:** 铁芯材料磁性不对称, 二次线圈相位特性不一致。**偏位式和零位式:** **偏位式**(用偏离原点的大小表示输出量)的缺点: 弹性材料特性随时间和温度变化; 有滞后和非线性特性。**零位式**(在零点平衡); 利用了其他精密量参数输出; (反馈)自动平衡原理, 所以说一般带反馈都是零位式。**微差式**(如天平): 粗调用零位, 细调用偏位。优点是小偏差不用反馈, 速度快。**转速 (机械方式):** 离心转速测量仪, 左右两个重锤的。

光电码盘: 绝对码盘: 编码, AD 转换。**增量码盘:** A, B, Z 三相。**光纤陀螺:** Sagnac 效应。(右图)**激光测速仪:** 每 10ms 发送一个脉冲, 计算接受回波的时间。门电路传输延迟是 1LSB。**相关: 自相关**研究信号或噪声的周期性;**互相关**研究两个信号在不同时刻取值的相关度, 用于测量时差(移动速度检测)。**加速度传感器:** 闭环(偏位式): $y = y_0 \sin(\omega t - \theta)$, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ 为振动物固有角频率。 $y_0/A = (\omega^2/\omega_0^2)/\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_0)^2}$ 此时灵敏度 和弹簧的 k 有关。① $\omega \gg \omega_0$, 支点位移检测; ② $\omega \ll \omega_0$, 支点加速度检测; ③ $\omega = \omega_0$, 支点速度检测。闭环(零位式)的时候 $k/S_d S_s S_f$ 分母很大, 所以这项被忽略, 灵敏度和 k 无关。**反射式光纤位移传感器:** 线性测量范围左右各有一个。要注意不要跨区。**光栅标尺位移传感器:** 主尺移动, 上下栅格相位差 1/4。栅距 P 一定, 小至微米级。上下波形 XOR 灵敏度 $\times 2$ 。再边沿触发再 $\times 2$ 。分辨正向的正交译码电路:**莫尔条纹标尺:** 栅距为 P, 两光栅微小角度 θ 。则条纹间距满足 $W \approx P/\theta$, 相当于放大了光栅间距。主尺向右水平移动, 条纹向上移动。(如果副光栅右倾斜)。**磁标尺位移传感器:** 分为动态磁头(有相对位移时输出感应电压, 否则输出 0), 静态磁头(激励和感应, 检测漏磁通过铁芯多少, 输出到位置)。两个输出信号相差四分之一相位。磁极距离 0.2mm, 标准测量不确定度 0.002mm, 则 AD 转换为 1:100。**激光扫描测长:** 标定方法与实际测量环境必须相同, 电机转速必须保证无差。

PSD: (Position Sensitive Device)。 $I_1(L + x) = I_2(L - x)$ 其中 x 是入射光的重心。

如何提高灵敏度: $S = LD/d$, 适当增大 D。**抗干扰的方法:** 发光调制, 接受解调。检测是否调制: 加一个扰动光就好。和 CCD 区别: CCD 是空间离散的, PSD 是空间连续的。**CCD: 和激光扫描测长仪**都适用于软质材料, 高温物体。图见补充。**同步加算:** 加算 N 次, 信号不变, 噪声的标准差(幅度)变为原来的 $1/\sqrt{N}$ 。**解调信号的处理方法: 目的:** 提高信噪比(信噪比为幅度比), 放大信号, 抑制噪声。**常用方法包括: 1. 同步积分:** $y = 1/T \int_{-T/2}^{T/2} x(\tau) \sin(2\pi f_s \tau) d\tau$ **2. 窄带滤波。****温标: 三要素:** 定义固定点, 内插仪器, 内插仪器。其中固定点是离散点。**经验温标:** 根据物体热胀冷缩现象制定的温标。如**摄氏温标**(水的沸点 100, 冰点 0, 中间 100 等分)。**华氏温标:** 冰点 32°F, 沸点 212°F, 中间 180 等分。国际温标根据卡诺循环原理建立, 实际难以实现。 **90 温标:** 定义固定点 17 个, 内插标准仪器, 内插

公式。热力学温度符号 $T(T_{90})$ 。单位开尔文。1K=水的三相点温度的 1/273.16。和摄氏温标的换算: $t = T - 273.15$ 。

接触式测温: 传感器和被测温度载体直接接触, 达到热平衡后具有相同的温度。传导换热, 对流换热。**非接触式测温:** 传感器不需和被测温度载体接触, 辐射换热。**接触式测温概述: 膨胀式:** $-100^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 左右。**热电式** (热电效应, 热电偶): $-200^\circ\text{C} \sim 1800^\circ\text{C}$ 左右, 分为 K 镍铬-镍硅 (铝)、N 镍铬硅-镍硅、E 镍铬-铜镍、T 铜-康铜、J 铁-康铜型等。**电阻式** (电阻传感器阻值随温度变化, 热电阻, 热敏电阻): $-200^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 左右。**集成半导体温度传感器** (半导体器件温度效应): $-50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 。**光纤** (光纤温度特性): 接触式非接触式之间。**膨胀式:** 双金属温度计, 玻璃液体温度计。**热电偶: 热电效应 (Seebeck 效应):** 两种不同导体 (或半导体) 连接成闭合回路时, 若两个节点温度不同, 则回路中将产生热势。**接触电势 Peltier 效应:** 不同导体接触时因电子密度不同发生扩散进而形成的电势差, 与接触点温度和材料有关。 $A+B-e_{AB}(T) = (kT/e) \ln(N_{AT}/N_{BT})$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$; **温差电势 Thomson 效应,** 同一导体因两端温度不同而产生的电势差, 与温差、导体材料有。 $T + T_0 -$, $e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$, σ_A : 汤姆逊系数。热电势中接触电势占主导地位。热电势大小与电极材料、冷热端温度有关。**热电偶实用定律:** ① 均质导体定则: 由同一种均质导体组成的闭合回路, 不论导体截面、长度及温度分布如何, 回路中无热电势产生。(热电势产生条件: 两种不同金属组成, 两个接点处温度不同); ② 中间导体定则: 在热电偶回路中接入中间导体后, 只要中间导体两端温度相同, 对热电偶回路总电势没有影响; ③ 中间温度定则: $E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$ 。**热电偶参比端温度处理:** ① 参比端恒温法 (冰点槽, 节点温度必须相同); ② 参比端温度测量计算法 (加上实际参比端温度查表后的电势, 再查表); ③ 补偿导线 (使用补偿导线时要注意型号及极性不能接反, 还要注意补偿导线和热电偶相连的两个节点温度相同 $E_{AB'B'A}(T_1, T_2, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0)$); ④ 补偿电桥法: 测得 $U = E(t, t_0) + 0.5I \cdot (R_{CM} - R_5)$ 。**热电堆:** 串联即为一个热电偶的 n 倍, 提高灵敏度; 并联热电势取平均值, 温度近似取平均值。**热电阻 RTD:** 金属导体电阻阻值随温度变化而变化 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 。**优点:** 稳定性高、互换性好、准确度高、高灵敏度、无需参比温度。**缺点:** ① 引线电阻的影响: 引线有阻值, 随环境温度变化, 影响可达 10% ~ 50%; ② 响应速度慢; ③ 自热问题: 热电阻测量需外加电源, 电流流过热电阻使其发热从而改变阻值。**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)。

热敏电阻: 由金属氧化物或半导体材料制成, 其电阻值随温度变化而变化。**特点:** 高灵敏度、阻值高 ($k\Omega \sim 100k\Omega$, 可忽略引线电阻带来的影响)、响应速度快 (小物理尺寸)、与温度成非线性关系 $R = R_0 e^{(1/T - 1/T_0)}$, R_0 对应 T_0 , 任取一组即可, T_0 一般为 25°C , β 常数, 与材料有关。温度系数: 负, 线性度: 强非线性 (热电阻为正, 线性)。**集成温度传感器:** 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。**特点:** 集成度高, 易于与其他电子电路连接、测温范围较低。 $V_{BE} = V_0 - (kT/e) \ln(A/I_c)$, A 与温度和晶体管几何结构有关的电流。如右图可消去 A, $\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = (kT/e) \ln N$ **小结: 热电偶: 优点-**无需电源, 简单, 便宜, 用途广泛, 测温范围大。**缺点-**非线性, 输出电压低, 需要查表, 最不稳定, 灵敏度最低。**热电阻: 优点-**最稳定, 最精确, 比热电偶线性度好。**缺点-**贵, 需要电流源, 灵敏度低, 阻值低(要考虑引线电阻), 电阻热效应。**热敏电阻: 优点-**高灵敏度, 高阻值, 响应速度快(物理尺寸小)。**缺点-**非线性, 测量范围小, 易碎, 需要电源, 电阻热效应。**集成: 优点-**线性度最好, 灵敏度最高, 便宜。**缺点-** $T < 200^\circ\text{C}$, 需要电源, 慢, 热效应, 可配置性低。**非接触式测温:** 辐射式 (利用普朗克定律, 光电高温计、比色温度计、辐射温度计): $400^\circ\text{C} \sim 3200^\circ\text{C}$ 左右。**辐射测温:** 具有一定温度的物体会向外辐射能量, 其辐射强度与物体温度有关, 通过测量辐射强度可以确定物体温度。自然界中所有物体对辐射都有吸收、透射或反射的能力, 如果某一物体在任何温度下, 均能全部吸收辐射到它上面的任何辐射能量, 则称此物体为**绝对黑体**。绝对黑体在任何温度下都能全部吸收辐射到其表面的全部辐射能, 同时它在任何一个温度上向外辐射的辐射出射度 (辐出度) 也最大; 其他物体的辐出度总小于绝对黑体。辐射系数 $\epsilon = 1 - \beta - \gamma$, β 为反射系数, γ 为透射系数。**普朗克定律 Planck:** 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系 $E_{\lambda} = c_1 / [\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)] (W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$, $c_1 = 3.74 \times 10^{-16} (W \cdot m^2)$ Planck 第一常数, $c_2 = 1.44 \times 10^{-2} (m \cdot K)$ Planck 第二常数。**维恩公式** $E_{\lambda} = (c_1/\lambda^5) (1/e^{c_2/\lambda T})$, λ 小。**瑞利-金斯公式** $E_{\lambda} = c_1 T / c_2 \lambda^4$, λ 大。**维恩位移公式** (Planck 定律分母对 λ 求导)。斯蒂芬-波尔兹曼定律: $E = \epsilon \sigma T^4 (W \cdot m^{-2})$, 黑体 ϵ 为 1。**表观温度:** 辐射测温仪表在使用前都用黑体炉进行标定, 其示值是按黑体温度刻度的。而实际使用时被测物体通常不为黑体。仪表显示的温度称为表观温度, 应根据被测物体的黑度系数 ϵ_λ 将其转化为实际温度。表观温度 < 真实温度: ① 光学高温计, 物体亮度 $B_\lambda = C_\epsilon \epsilon_\lambda \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$, 黑体亮度

公式。热力学温度符号 $T(T_{90})$ 。单位开尔文。1K=水的三相点温度的 1/273.16。和摄氏温标的换算: $t = T - 273.15$ 。

接触式测温: 传感器和被测温度载体直接接触, 达到热平衡后具有相同的温度。传导换热, 对流换热。**非接触式测温:** 传感器不需和被测温度载体接触, 辐射换热。**接触式测温概述: 膨胀式:** $-100^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 左右。**热电式** (热电效应, 热电偶): $-200^\circ\text{C} \sim 1800^\circ\text{C}$ 左右, 分为 K 镍铬-镍硅 (铝)、N 镍铬硅-镍硅、E 镍铬-铜镍、T 铜-康铜、J 铁-康铜型等。**电阻式** (电阻传感器阻值随温度变化, 热电阻, 热敏电阻): $-200^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 左右。**集成半导体温度传感器** (半导体器件温度效应): $-50^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 。**光纤** (光纤温度特性): 接触式非接触式之间。**膨胀式:** 双金属温度计, 玻璃液体温度计。

热电偶: 热电效应 (Seebeck 效应): 两种不同导体 (或半导体) 连接成闭合回路时, 若两个节点温度不同, 则回路中将产生热势。**接触电势 Peltier 效应:** 不同导体接触时因电子密度不同发生扩散进而形成的电势差, 与接触点温度和材料有关。 $A+B-e_{AB}(T) = (kT/e) \ln(N_{AT}/N_{BT})$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$; **温差电势 Thomson 效应,** 同一导体因两端温度不同而产生的电势差, 与温差、导体材料有。 $T + T_0 -$, $e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$, σ_A : 汤姆逊系数。热电势中接触电势占主导地位。热电势大小与电极材料、冷热端温度有关。**热电偶实用定律:** ① 均质导体定则: 由同一种均质导体组成的闭合回路, 不论导体截面、长度及温度分布如何, 回路中无热电势产生。(热电势产生条件: 两种不同金属组成, 两个接点处温度不同); ② 中间导体定则: 在热电偶回路中接入中间导体后, 只要中间导体两端温度相同, 对热电偶回路总电势没有影响; ③ 中间温度定则: $E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$ 。**热电偶参比端温度处理:** ① 参比端恒温法 (冰点槽, 节点温度必须相同); ② 参比端温度测量计算法 (加上实际参比端温度查表后的电势, 再查表); ③ 补偿导线 (使用补偿导线时要注意型号及极性不能接反, 还要注意补偿导线和热电偶相连的两个节点温度相同 $E_{AB'B'A}(T_1, T_2, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0)$); ④ 补偿电桥法: 测得 $U = E(t, t_0) + 0.5I \cdot (R_{CM} - R_5)$ 。**热电堆:** 串联即为一个热电偶的 n 倍, 提高灵敏度; 并联热电势取平均值, 温度近似取平均值。**热电阻 RTD:** 金属导体电阻阻值随温度变化而变化 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 。**优点:** 稳定性高、互换性好、准确度高、高灵敏度、无需参比温度。**缺点:** ① 引线电阻的影响: 引线有阻值, 随环境温度变化, 影响可达 10% ~ 50%; ② 响应速度慢; ③ 自热问题: 热电阻测量需外加电源, 电流流过热电阻使其发热从而改变阻值。**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)。

热敏电阻: 由金属氧化物或半导体材料制成, 其电阻值随温度变化而变化。**特点:** 高灵敏度、阻值高 ($k\Omega \sim 100k\Omega$, 可忽略引线电阻带来的影响)、响应速度快 (小物理尺寸)、与温度成非线性关系 $R = R_0 e^{(1/T - 1/T_0)}$, R_0 对应 T_0 , 任取一组即可, T_0 一般为 25°C , β 常数, 与材料有关。温度系数: 负, 线性度: 强非线性 (热电阻为正, 线性)。**集成温度传感器:** 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。**特点:** 集成度高, 易于与其他电子电路连接、测温范围较低。 $V_{BE} = V_0 - (kT/e) \ln(A/I_c)$, A 与温度和晶体管几何结构有关的电流。如右图可消去 A, $\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = (kT/e) \ln N$ **小结: 热电偶: 优点-**无需电源, 简单, 便宜, 用途广泛, 测温范围大。**缺点-**非线性, 输出电压低, 需要查表, 最不稳定, 灵敏度最低。**热电阻: 优点-**最稳定, 最精确, 比热电偶线性度好。**缺点-**贵, 需要电流源, 灵敏度低, 阻值低(要考虑引线电阻), 电阻热效应。**热敏电阻: 优点-**高灵敏度, 高阻值, 响应速度快(物理尺寸小)。**缺点-**非线性, 测量范围小, 易碎, 需要电源, 电阻热效应。**集成: 优点-**线性度最好, 灵敏度最高, 便宜。**缺点-** $T < 200^\circ\text{C}$, 需要电源, 慢, 热效应, 可配置性低。**非接触式测温:** 辐射式 (利用普朗克定律, 光电高温计、比色温度计、辐射温度计): $400^\circ\text{C} \sim 3200^\circ\text{C}$ 左右。**辐射测温:** 具有一定温度的物体会向外辐射能量, 其辐射强度与物体温度有关, 通过测量辐射强度可以确定物体温度。自然界中所有物体对辐射都有吸收、透射或反射的能力, 如果某一物体在任何温度下, 均能全部吸收辐射到它上面的任何辐射能量, 则称此物体为**绝对黑体**。绝对黑体在任何温度下都能全部吸收辐射到其表面的全部辐射能, 同时它在任何一个温度上向外辐射的辐射出射度 (辐出度) 也最大; 其他物体的辐出度总小于绝对黑体。辐射系数 $\epsilon = 1 - \beta - \gamma$, β 为反射系数, γ 为透射系数。**普朗克定律 Planck:** 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系 $E_{\lambda} = c_1 / [\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)] (W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$, $c_1 = 3.74 \times 10^{-16} (W \cdot m^2)$ Planck 第一常数, $c_2 = 1.44 \times 10^{-2} (m \cdot K)$ Planck 第二常数。**维恩公式** $E_{\lambda} = (c_1/\lambda^5) (1/e^{c_2/\lambda T})$, λ 小。**瑞利-金斯公式** $E_{\lambda} = c_1 T / c_2 \lambda^4$, λ 大。**维恩位移公式** (Planck 定律分母对 λ 求导)。斯蒂芬-波尔兹曼定律: $E = \epsilon \sigma T^4 (W \cdot m^{-2})$, 黑体 ϵ 为 1。**表观温度:** 辐射测温仪表在使用前都用黑体炉进行标定, 其示值是按黑体温度刻度的。而实际使用时被测物体通常不为黑体。仪表显示的温度称为表观温度, 应根据被测物体的黑度系数 ϵ_λ 将其转化为实际温度。表观温度 < 真实温度: ① 光学高温计, 物体亮度 $B_\lambda = C_\epsilon \epsilon_\lambda \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$, 黑体亮度

热电偶实用定律: ① 均质导体定则: 由同一种均质导体组成的闭合回路, 不论导体截面、长度及温度分布如何, 回路中无热电势产生。(热电势产生条件: 两种不同金属组成, 两个接点处温度不同); ② 中间导体定则: 在热电偶回路中接入中间导体后, 只要中间导体两端温度相同, 对热电偶回路总电势没有影响; ③ 中间温度定则: $E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$ 。**热电偶参比端温度处理:** ① 参比端恒温法 (冰点槽, 节点温度必须相同); ② 参比端温度测量计算法 (加上实际参比端温度查表后的电势, 再查表); ③ 补偿导线 (使用补偿导线时要注意型号及极性不能接反, 还要注意补偿导线和热电偶相连的两个节点温度相同 $E_{AB'B'A}(T_1, T_2, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0)$); ④ 补偿电桥法: 测得 $U = E(t, t_0) + 0.5I \cdot (R_{CM} - R_5)$ 。**热电堆:** 串联即为一个热电偶的 n 倍, 提高灵敏度; 并联热电势取平均值, 温度近似取平均值。**热电阻 RTD:** 金属导体电阻阻值随温度变化而变化 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 。**优点:** 稳定性高、互换性好、准确度高、高灵敏度、无需参比温度。**缺点:** ① 引线电阻的影响: 引线有阻值, 随环境温度变化, 影响可达 10% ~ 50%; ② 响应速度慢; ③ 自热问题: 热电阻测量需外加电源, 电流流过热电阻使其发热从而改变阻值。**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)。

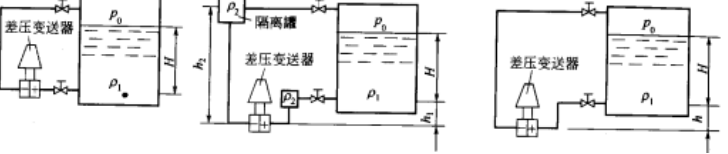
热敏电阻: 由金属氧化物或半导体材料制成, 其电阻值随温度变化而变化。**特点:** 高灵敏度、阻值高 ($k\Omega \sim 100k\Omega$, 可忽略引线电阻带来的影响)、响应速度快 (小物理尺寸)、与温度成非线性关系 $R = R_0 e^{(1/T - 1/T_0)}$, R_0 对应 T_0 , 任取一组即可, T_0 一般为 25°C , β 常数, 与材料有关。温度系数: 负, 线性度: 强非线性 (热电阻为正, 线性)。**集成温度传感器:** 利用半导体器件温度特性, 晶体管基极-发射极的正向压降随温度升高而降低。**特点:** 集成度高, 易于与其他电子电路连接、测温范围较低。 $V_{BE} = V_0 - (kT/e) \ln(A/I_c)$, A 与温度和晶体管几何结构有关的电流。如右图可消去 A, $\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = (kT/e) \ln N$ **小结: 热电偶: 优点-**无需电源, 简单, 便宜, 用途广泛, 测温范围大。**缺点-**非线性, 输出电压低, 需要查表, 最不稳定, 灵敏度最低。**热电阻: 优点-**最稳定, 最精确, 比热电偶线性度好。**缺点-**贵, 需要电流源, 灵敏度低, 阻值低(要考虑引线电阻), 电阻热效应。**热敏电阻: 优点-**高灵敏度, 高阻值, 响应速度快(物理尺寸小)。**缺点-**非线性, 测量范围小, 易碎, 需要电源, 电阻热效应。**集成: 优点-**线性度最好, 灵敏度最高, 便宜。**缺点-** $T < 200^\circ\text{C}$, 需要电源, 慢, 热效应, 可配置性低。**非接触式测温:** 辐射式 (利用普朗克定律, 光电高温计、比色温度计、辐射温度计): $400^\circ\text{C} \sim 3200^\circ\text{C}$ 左右。**辐射测温:** 具有一定温度的物体会向外辐射能量, 其辐射强度与物体温度有关, 通过测量辐射强度可以确定物体温度。自然界中所有物体对辐射都有吸收、透射或反射的能力, 如果某一物体在任何温度下, 均能全部吸收辐射到它上面的任何辐射能量, 则称此物体为**绝对黑体**。绝对黑体在任何温度下都能全部吸收辐射到其表面的全部辐射能, 同时它在任何一个温度上向外辐射的辐射出射度 (辐出度) 也最大; 其他物体的辐出度总小于绝对黑体。辐射系数 $\epsilon = 1 - \beta - \gamma$, β 为反射系数, γ 为透射系数。**普朗克定律 Planck:** 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系 $E_{\lambda} = c_1 / [\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)] (W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$, $c_1 = 3.74 \times 10^{-16} (W \cdot m^2)$ Planck 第一常数, $c_2 = 1.44 \times 10^{-2} (m \cdot K)$ Planck 第二常数。**维恩公式** $E_{\lambda} = (c_1/\lambda^5) (1/e^{c_2/\lambda T})$, λ 小。**瑞利-金斯公式** $E_{\lambda} = c_1 T / c_2 \lambda^4$, λ 大。**维恩位移公式** (Planck 定律分母对 λ 求导)。斯蒂芬-波尔兹曼定律: $E = \epsilon \sigma T^4 (W \cdot m^{-2})$, 黑体 ϵ 为 1。**表观温度:** 辐射测温仪表在使用前都用黑体炉进行标定, 其示值是按黑体温度刻度的。而实际使用时被测物体通常不为黑体。仪表显示的温度称为表观温度, 应根据被测物体的黑度系数 ϵ_λ 将其转化为实际温度。表观温度 < 真实温度: ① 光学高温计, 物体亮度 $B_\lambda = C_\epsilon \epsilon_\lambda \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$, 黑体亮度

热电偶实用定律: ① 均质导体定则: 由同一种均质导体组成的闭合回路, 不论导体截面、长度及温度分布如何, 回路中无热电势产生。(热电势产生条件: 两种不同金属组成, 两个接点处温度不同); ② 中间导体定则: 在热电偶回路中接入中间导体后, 只要中间导体两端温度相同, 对热电偶回路总电势没有影响; ③ 中间温度定则: $E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$ 。**热电偶参比端温度处理:** ① 参比端恒温法 (冰点槽, 节点温度必须相同); ② 参比端温度测量计算法 (加上实际参比端温度查表后的电势, 再查表); ③ 补偿导线 (使用补偿导线时要注意型号及极性不能接反, 还要注意补偿导线和热电偶相连的两个节点温度相同 $E_{AB'B'A}(T_1, T_2, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{A'B'}(T_2, T_0)$); ④ 补偿电桥法: 测得 $U = E(t, t_0) + 0.5I \cdot (R_{CM} - R_5)$ 。**热电堆:** 串联即为一个热电偶的 n 倍, 提高灵敏度; 并联热电势取平均值, 温度近似取平均值。**热电阻 RTD:** 金属导体电阻阻值随温度变化而变化 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 。**优点:** 稳定性高、互换性好、准确度高、高灵敏度、无需参比温度。**缺点:** ① 引线电阻的影响: 引线有阻值, 随环境温度变化, 影响可达 10% ~ 50%; ② 响应速度慢; ③ 自热问题: 热电阻测量需外加电源, 电流流过热电阻使其发热从而改变阻值。**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)。

热敏电阻: 由金属氧化物或半导体材料制成, 其电阻值随温度变化而变化。**特点:** 高灵敏度、阻值高 ($k\Omega \sim 100k\Omega$, 可忽略引线电阻带来的影响)、响应速度快 (小物理尺寸)、与温度成非线性关系 $R = R_0 e^{(1/T - 1/T_0)}$, R_0 对应 T_0 , 任取一组即可, T_0 一般为 25°C , β 常数, 与材料有关。温度系数: 负, 线性度: 强非线性 (热电阻为正, 线性)。**集成温度传感器:** 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。**特点:** 集成度高, 易于与其他电子电路连接、测温范围较低。 $V_{BE} = V_0 - (kT/e) \ln(A/I_c)$, A 与温度和晶体管几何结构有关的电流。如右图可消去 A, $\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = (kT/e) \ln N$ **小结: 热电偶: 优点-**无需电源, 简单, 便宜, 用途广泛, 测温范围大。**缺点-**非线性, 输出电压低, 需要查表, 最不稳定, 灵敏度最低。**热电阻: 优点-**最稳定, 最精确, 比热电偶线性度好。**缺点-**贵, 需要电流源, 灵敏度低, 阻值低(要考虑引线电阻), 电阻热效应。**热敏电阻: 优点-**高灵敏度, 高阻值, 响应速度快(物理尺寸小)。**缺点-**非线性, 测量范围小, 易碎, 需要电源, 电阻热效应。**集成: 优点-**线性度最好, 灵敏度最高, 便宜。**缺点-** $T < 200^\circ\text{C}$, 需要电源, 慢, 热效应, 可配置性低。**非接触式测温:** 辐射式 (利用普朗克定律, 光电高温计、比色温度计、辐射温度计): $400^\circ\text{C} \sim 3200^\circ\text{C}$ 左右。**辐射测温:** 具有一定温度的物体会向外辐射能量, 其辐射强度与物体温度有关, 通过测量辐射强度可以确定物体温度。自然界中所有物体对辐射都有吸收、透射或反射的能力, 如果某一物体在任何温度下, 均能全部吸收辐射到它上面的任何辐射能量, 则称此物体为**绝对黑体**。绝对黑体在任何温度下都能全部吸收辐射到其表面的全部辐射能, 同时它在任何一个温度上向外辐射的辐射出射度 (辐出度) 也最大; 其他物体的辐出度总小于绝对黑体。辐射系数 $\epsilon = 1 - \beta - \gamma$, β 为反射系数, γ 为透射系数。**普朗克定律 Planck:** 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系 $E_{\lambda} = c_1 / [\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)] (W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$, $c_1 = 3.74 \times 10^{-16} (W \cdot m^2)$ Planck 第一常数, $c_2 = 1.44 \times 10^{-2} (m \cdot K)$ Planck 第二常数。**维恩公式** $E_{\lambda} = (c_1/\lambda^5) (1/e^{c_2/\lambda T})$, λ 小。**瑞利-金斯公式** $E_{\lambda} = c_1 T / c_2 \lambda^4$, λ 大。**维恩位移公式** (Planck 定律分母对 λ 求导)。斯蒂芬-波尔兹曼定律: $E = \epsilon \sigma T^4 (W \cdot m^{-2})$, 黑体 ϵ 为 1。**表观温度:** 辐射测温仪表在使用前都用黑体炉进行标定, 其示值是按黑体温度刻度的。而实际使用时被测物体通常不为黑体。仪表显示的温度称为表观温度, 应根据被测物体的黑度系数 ϵ_λ 将其转化为实际温度。表观温度 < 真实温度: ① 光学高温计, 物体亮度 $B_\lambda = C_\epsilon \epsilon_\lambda \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$, 黑体亮度

光学高温计, 物体亮度 $B_\lambda = C_\epsilon \epsilon_\lambda \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T}$, 黑体亮度

$B_{0\lambda} = C_{c1}\lambda^{-5}e^{-c_2/\lambda T_L}$ ，故实际温度与真实温度存在关系
 $1/T_L - 1/T = \lambda/c_2 \ln 1/\varepsilon_\lambda$ ②比色（双色）温度计
 $1/T - 1/T_R = \ln(\varepsilon(\lambda_1, T)/\varepsilon(\lambda_2, T))/(c_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2))$, $\varepsilon(\lambda, T)$ 表示物体在 λ 时的光谱发射率③辐射温度计 $T = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon}$
压力测量： $1\text{atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa} = 1.01325\text{bar} = 1.03323\text{kgf/cm}^2 = 1.03323 \times 10^4 \text{mmHg} = 760\text{mmHg} = 14.696\text{lbf/in}^2$
重力平衡法：液柱式压力计：信号不易远传。 $\Delta p = \rho gh$ 。 **U-tube:** 参考点不固定。
Well-type: 参考点可近似认为固定，读数方便。 **斜管式：** $\Delta p = \rho g L \sin \theta$ 。参考点同样可近似认为固定，灵敏度更高。 **负荷式压力计：** **活塞式压力计：**精度高，常用于压力表校验 $\Delta p = mg/(\pi R_{cyl}^2)$ 。 cyl 指顶上的柱子。
机械力平衡法：将被测压力转化为一个集中力，然后用外力与之平衡，通过测量平衡时的外力从而测得被测压力。如力平衡式差压变送器。零位式。
弹性力平衡法：被测压力使得弹性元件变形，弹性形变产生的弹性力与被测压力平衡，通过测量弹性元件弹性形变的大小从而测得被测压力。在实际中使用最为广泛。
弹簧管压力计：测的是表压。其实所有仪器测的都是表压。
物性法：采用压电、压阻、光纤等传感器，将被测压力转化为其他物理量来测量。
物位测量基本概念：容器中液体或固体物料的表面位置，对应不同物料性质，分为液位(液体)、料位(固体)和界位(液-液或者液-固相界面)。
直读式：直观简单但信号不易远传。测量时阀门要打开。
静压式：原理：液体对容器底面产生的静压力与液位高度成正比。 **敞口容器：** **压力**表式。 **法兰式液位变送器：**使用于腐蚀性，有结晶颗粒，黏度大，易凝固的液体。
吹气式液位计：适用于深井。 **密闭容器：**图中差压变送器均为左负右正，左为零点无迁移，中为零点负迁移，右为零点正迁移。



浮力式：依据力平衡原理。 **直读式浮子液位计**， **舌簧式浮子液位计**， **浮筒式液位计** $cx_0 = mg - A\rho gH$ ， c 是弹簧弹性系数，弹簧拉伸状态。水面上升时 $c(x_0 - \Delta x) = mg - A\rho g(H + \Delta H - \Delta x)$ 。
电容式 $C = 2\pi\varepsilon L/\ln(D/d)$ 。 **波动的式：** **超声式**（包括左：气界式，右：液界式，超声波在气体里衰减厉害，在液体里易于传播，但液界式难于安装）、 **雷达式**（相位差）、 **核辐射式** $I = I_0 e^{-\mu H}$ 。 **机械式：** **音叉式料位计**（音叉接触料位时频率变化）， **重锤探测式料位计**（检测钢带力的突变）
流量测量：单位时间内流体（气体、液体或固体颗粒等）流经管道或设备某处横截面的数量。体积流量、质量流量、瞬时流量、累计流量。
粘度：粘滞力 $F = \mu Adu/dy$ ， μ 是动力粘度， A 是接触面积，
压缩系数： $k = -\Delta V/V \Delta P$ ，流体温度不变而所受压力变化时体积的相对变化率。
膨胀系数： $\beta = \Delta V/V \Delta T$ ，在一定的压力下流体温度变化时其体积的相对变化率。
雷诺数： $Re = \bar{u}\rho L/\mu = \bar{u}L/\nu$ ， μ 动力粘度， ν 运动粘度， L 特征长度管道直径。
层流： $u_x = u_{max}[1 - (r_x/R)^2]$ ； **湍流：** $u_x = u_{max}(1 - r_x/R)^{1/n}$
流体连续性方程： $\rho_1 \bar{u}_1 A_1 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2$ ，质量守恒
伯努利方程： $gz_1 + p_1/\rho + \bar{u}_1^2/2 = gz_2 + p_2/\rho + \bar{u}_2^2/2$ ，能量守恒
流量仪表的测量特性：流量范围：流量计可测的最大流量与最小流量的范围。量程：流量范围内最大流量与最小流量之差。 **量程比**（流量计的范围度）：最大流量与最小流量的比值。 **压力损失：**安装在流体流动管道上的流量计是一个阻力件，流量经过时会产生压力损失。仪表选型重要指标。压力损失小，流体能消耗小，输运流体的动力要求小，测量成本低。反之能耗大，经济效益相应降低。 **仪表系数**（仪表常数）：频率输出型流量计的重要参数之一，单位流体流过流量计输出的频率信号的脉冲数。
容积式流量计： **椭圆齿轮流量计**
 $q_v = 4nV_0$ ， V_0 是月牙容积， n 单位时间圈数。

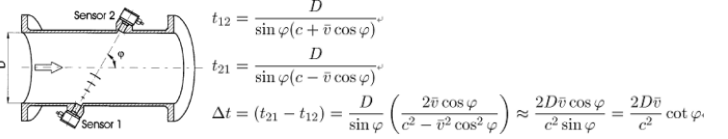


节流式流量计（差压式）：标准节流件：（压力损失）孔板>喷嘴>文丘利管 **非标准节流件：** V 锥等。 **公式推导：** Bernouli 方程： $p_1/\rho_1 + u_1^2/2 = p_2/\rho_2 + u_2^2/2$ 质量方程： $\rho_1 u_1 \pi D^2/4 = \rho_2 u_2 \pi D^2/4$ 。假设 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 于是可以消去 u_1 ，有 $u_2 = \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho(1 - (d_2/D)^4)}$ 。考虑节流过程中流体密度的变化而引入流束膨胀系数 ϵ 。 $q_v = \alpha \epsilon A \sqrt{2\Delta p/\rho_1}$ ， $q_m = \alpha \epsilon A \sqrt{2\rho_1 \Delta p}$ ， α 为流量系数，对照上式。 **节流装置的安装及取压：**节流件前后要求有一段足够长的直管段，取压通常取前 10D，后 5D。通常用角接取压或者法兰取压。 **V 锥节流：** 差压信号稳定，管道内不容易堵塞。
转子流量计(差压式)：流速不同，浮子的高度不同。同上， $q_v = \alpha A \sqrt{2\Delta p/\rho}$ ， α 流量系数， A 浮子与锥形管道间的环形流通面积。及浮子受力平衡： $\Delta p A_f = V_f(\rho_f - \rho)g$ $q_v = \alpha A \sqrt{2gV_f(\rho_f - \rho)/\rho A_f}$ 。对于小锥体，浮子与锥形管道间的环形流通面积满足 $A = c \cdot h$ 。代入上式即可。
转子流量计的刻度换算：出厂时以空气标定气体流量的仪表，以水标定液体流量的仪表。实际使用时应修正如下：液体- $q'_v = q_v \sqrt{(\rho_f - \rho')\rho/((\rho_f - \rho)\rho')}$ ，气体- $q'_v = q_v \sqrt{\rho/\rho'}$ 。因为 ρ_f 相对其他密度特别大。用水标定的测量酒精流量时，实际流量大于刻度示值。
弯管流量计：外侧压力大，内侧压力小，提供向心力。

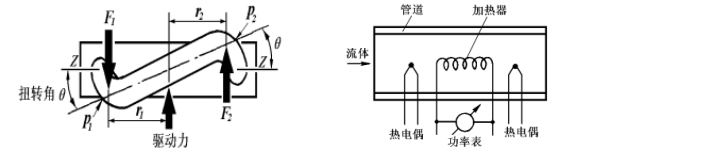
明渠流量测量： 就跟 **涡轮流量计(速度式)：**在一定范围，涡轮的转速与流体的平均流速成正比。通过磁电转换装置将涡轮转速变成电脉冲信号。由右图： $u_s = u \tan \theta$ 。 $u_s = \omega R$ 。 Z 为涡轮齿数，则 $f = nZ$ ，即可求得 $q_v = 2\pi A f/(Z \tan \theta) = f/\xi$ ， ξ 为仪表系数，单位次每升。



涡街流量计(速度式)： $q_v = (\pi D^2/4) \cdot f \cdot d(1 - 1.25d/D)/St = f/K$ 其中的 f 是漩涡产生的频率。 St 是斯特罗哈尔常数。 d 是漩涡发生体的特征尺寸。
电磁流量计(速度式)：原理：当被测导电液体在磁场中沿垂直于磁力线方向流动而切割磁力线时，在对称安装在流通管道两侧的电极上将产生感应电势，此电势与流速成正比。回电电磁定律 $E = Blv$ ，这里 $l = D$ 。从而 $q_v = Au = \pi D/(4B)E = E/k$
超声流量计(速度式)：时差法：① $\Delta t = t_2 - t_1 = L/(c - u) - L/(c + u) \approx 2Lu/c^2$ ② 如果知道准确的 t_1 和 t_2 ，则可以约掉声速(声速可能随环境变化)。推导如下：
 $t_1 = L/(c - u)$ ， $t_2 = L/(c + u) \Rightarrow u = L(t_2 - t_1)/(2t_1 t_2)$ 。 **时差的测量：**可以使用相关法，或者过零点法，或者标志点法。
频差法： $f_1 = (c + u)/L$ ， $f_2 = (c - u)/L$ $\Delta f = f_1 - f_2 = 2u/L \Rightarrow u = L \Delta f/2$
相差法：应用多普勒效应： $\Delta \phi = \omega \Delta t = 2\pi f \Delta t$ 且 $u = c^2/(\omega L) \cdot \Delta \phi$
作业中的超声流量计时差法：



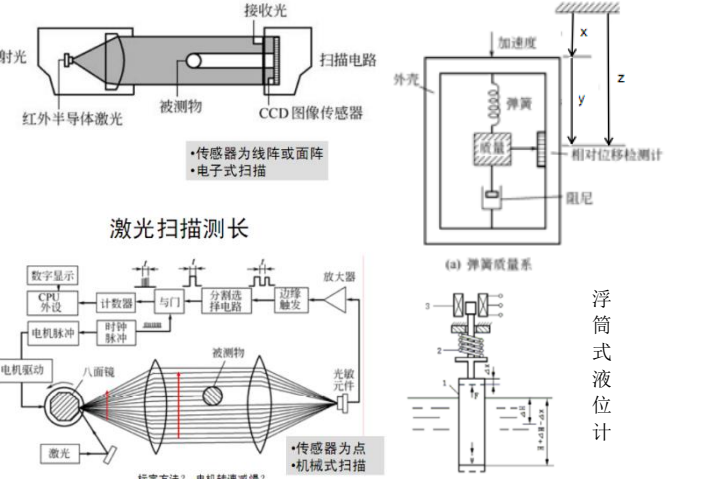
科氏力质量流量计(直接法)：利用流体在振动管中流动而产生与质量流量成正比的科氏力的原理来直接测量质量流量的仪表。 $q_m = K_s/(8r^2) \cdot \Delta t$ ，且 $\Delta t = 2r \sin \theta/u_p \approx 2r\theta/(\omega L)$ 。原理图如下：
热式质量流量计(直接法)：根据传热规律， $q_m = P/(C_p \Delta T)$



间接式质量流量计：需要了解差压 $\Delta p \sim \rho q_v^2$ ，而质量流量 $q_m = \rho q_v$ 。

思考题解答：力矩平衡式重量传感器用电流表示被测重量，电位平衡式温度传感器用电机角度表示被测温度。电位平衡式温度传感器的性能要求是：不超调，响应快，跟踪紧，分别对应仪表的：稳定性，响应速度和准确性/静态误差。

补充：



伺服式（闭环）加速度测量方法

