

●基本概念。灵敏度 $S = \Delta y / \Delta x$ ，分辨率=能分辨的最小输入
二者都描述测量的灵敏程度，但关注重点不一样(模拟/数字)。
多个仪表首尾串联，其总灵敏度是各仪表灵敏度的乘积。

线性度:完全线性时应有灵敏度 $S = const$

安全火花型防爆仪表:两线制 4~20mA DC 传输标准

准确度 δ : 测量准确值(测量平均值 A) 偏离真值 A_0 的程度

精确(密)度 σ : 测量值的分散程度。不确定度: 表示测量结果的不可信程度(分散程度)，不反映测量结果与真值接近的程度。
用测量平均值的标准偏差来表示，或=标准偏差的倍数或置信区间的半宽度。

零点迁移/量程迁移: 需要对仪表的零点调节和量程调节

精度等级: 0.5 级 = 基本误差不超过量程的 $\pm 0.5\%$

最大误差不超过量程的 0.5%

绝对误差: 测量值-真值(有正负)，相对误差: 绝对误差/真值

误差=系统+随机。设给定系统误差=- Δ ，则测量值应补偿 Δ

关系: 测量值 $M = A$ 测量平均值 + δ 准确度 $\pm U$ 不确定度

准确度 $\delta = A - A_0$, 精确(密)度(标准差) $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - A)^2}$

误差传递: $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, x_i 相互独立，标准偏差 σ_i

$$\text{则总标准差 } \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2}$$

不确定度: A 类 $U_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (M_i - A)^2}$, $A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i$

U_A 是测量结果平均值的标准偏差，有 $n-1$ 个自由度。

另: 真值 A_0 的无偏估计 = A 。

$$\text{实验标准偏差的无偏估计} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (M_i - A)^2}$$

$$\text{总体标准偏差(偏离真值的程度)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - A_0)^2}$$

B 类: 设测量结果平均分布在 $[A - \delta, A + \delta]$ ，则 $U_B = \delta / \sqrt{3}$

相对不确定度: $U_r = U / A \times 100\%$ A 为真值。

扩展不确定度 $U = z U_0$: 置信区间 $[A - U, A + U]$ ，或记 $A \pm U$

给定置信概率 $\phi(z)$ ，查表得置信系数 z ，置信水平 = $1 - \phi(z)$

U_0 为 A 类或 B 类标准不确定度。

tor Z	0.00	0.50	0.6745	0.7979	1.00	1.96	2.00	3.00	∞
概率密度 $\phi(z)$	0.3989	0.3521	0.3177	0.2901	0.2420	0.0584	0.054	0.0044	0.00
置信概率 $\Phi(z)$	0.0000	0.3829	0.5000	0.5751	0.6827	0.9500	0.9545	0.9973	1.0000

●位移测量。金属应变片: 泊松比 $\nu \approx 0.3 \sim 0.5$ ，应变 $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$

$$\text{应变系数 } K = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta l}{l} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho} / \varepsilon, \text{ 一般 } \approx 2.$$

应变片桥路连接方法:

■ 1 片 R_1 单臂: 非线性误差, 电源, 温度

初始时电桥平衡:

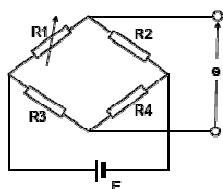
$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4 = n$$

R_1 发生变化:

$$\varepsilon = \frac{R_1 - R_0}{R_0} = \frac{R_1}{R_0} - 1 = n \frac{R_2}{R_4} - 1 = n \frac{R_2}{R_4} - 1$$

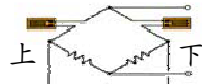
$$\varepsilon = \frac{n \Delta R_1}{(1+n) R_1} \approx \frac{n \Delta R_1}{R_1} \quad (1+n) R_1 \approx R_1$$

$n=1$ 灵敏度最高



■ 2 片 R_1 (上) R_2 (下)半桥: 线性, 温度补偿, 灵敏*2

$$e \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} E$$



■ 4 片 R_1 (上) R_2 (下)全桥: 线性, 温度补偿, 灵敏*4

$$e \approx \frac{\Delta R_1}{R_1} E$$



差动检测结构: 消除共模干扰, 降低漂移, 提高灵敏度

[例]: 比较变极距电容式位移传感器和具有差动结构的电容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差动结构明显改善了线性灵敏度, 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线性灵敏度, 消除共模干扰, 降低漂移等。(分类: 变极距式, 变面积式, 变电介质式...)

[例]: 证明差动电容位移传感器的线性度和灵敏度>变极距式

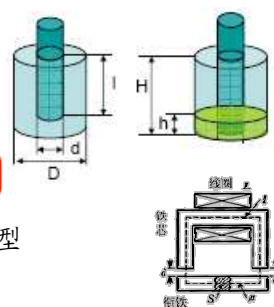
$$\text{差动: } \frac{C_2}{C_1} = \frac{d_0 + \Delta d}{d_0 - \Delta d}, \quad \frac{\Delta C}{C} = 2 \frac{\Delta d}{d_0} [1 + \left(\frac{\Delta d}{d_0}\right)^2 + \dots]$$

$$\text{单电容: } \frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d}{d} \left(1 - \frac{\Delta d}{d} + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 - \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^3 + \dots\right) \text{ 分析阶次}$$

[例]: 同心圆筒型电容器:

$$\text{位移测量: } C = \frac{\varepsilon l}{\log(D/d)}$$

$$\text{物位测量: } C = \frac{\varepsilon_2 h + \varepsilon_1 (H - h)}{\log(D/d)}$$

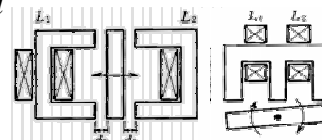


差动检测电路: 脉宽输出型, 幅值输出型

自感式位移传感器: 电感 $L \approx \frac{N^2 \mu_0 S}{2d}$, μ_0 气隙导磁率很小

自感式差动位移传感器:

$$(1) \frac{\Delta L}{L_0} \approx 2 \frac{\Delta d}{d_0}, (2) 2 \frac{R \Delta \theta}{d_0}$$

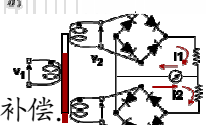


差动变压器 LVDT: 互感式位移传感器

零点时相位发生翻转(相敏检波电路)

电路: 交流变直流(差动全波整流), 残余电压补偿。

优势: 无机械磨损; 分辨率无限小; 铁心移动超出量程也无损坏; 只对轴向敏感, 对径向不敏感; 铁心和线框之间可以是高压高温液体; 电磁感应不受环境湿度和污染物的影响。(电容对介质敏感, 光电传感器对灰尘敏感。)



偏位式检测: 通过偏移零点的大小反应被测量的大小。

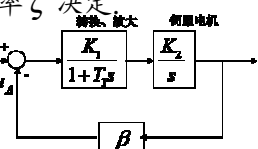
零位式检测: 具有自平衡结构, 通过使纠正偏移所付出的代价反应被测量的大小。

[例]: 力矩平衡式重量传感器用(电流)参数表示被测重量

电位平衡式温度传感器用(电机角度)参数表示被测温度

[例]: 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, 准确性/静态误差。由系统的自由震动频率 ω_0 , 衰减率 ζ 决定

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_1 K_2 \beta}{T_1}}, \quad \zeta = \frac{1}{2\sqrt{K_1 K_2 \beta T_1}}$$



加速度检测: 质量块 m 弹簧 k 阻尼 c 外壳支点振动 $x=A\sin\omega t$

开环: 牛顿 $m\frac{d^2(y+x)}{dt^2} = -c\frac{dy}{dt} - ky$, 固有频率 $\omega_n = \sqrt{k/m}$

[弹簧测力-偏位式] 衰减比 $\zeta = c/(2m\omega_n)$ 一般为 0.4~0.8.

结论: $y = \frac{A(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + (2\zeta\frac{\omega}{\omega_n})^2}} \sin(\omega t - \phi), \tan\phi = \frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}}{1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2}}$

$\omega \gg \omega_n$ 时, $y = -A\sin\omega \cdot t$, 支点位移检测

$\omega \ll \omega_n$ 时, $y = A(\omega/\omega_n)^2 \sin\omega \cdot t$, 支点**加速度**检测

$\omega \approx \omega_n$ 时, 支点速度检测.

闭环伺服[零位式]: 固有频率 $\omega_n = \sqrt{(S+k)/m}$, $S = S_d S_s S_f$

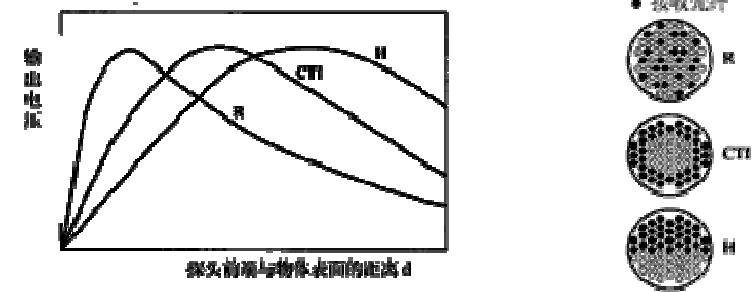
输出灵敏度: $S_{U_o} = \frac{U_o}{\ddot{x}} = -\frac{mR}{S_f} \times [\frac{1}{1+k/S}]$, 其中[]可忽略

[例]: 叉指式硅微加速度传感器: 采用闭环反馈力平衡技术;
1.保持极板在中间位置平衡, 2.消除横梁非线性 and 老化的影响

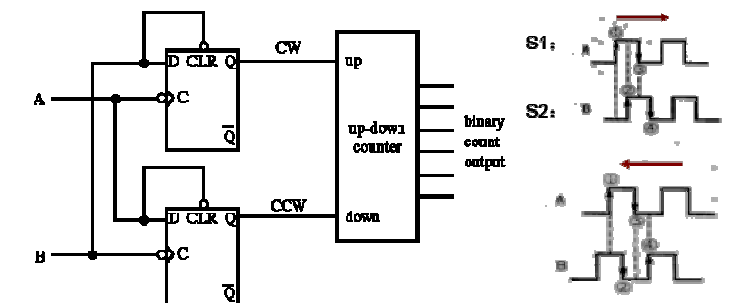
[例]: 加速度检测的基础是 (位移) 检测。加速度检测系统是 (质量, 弹簧, 阻尼) 的二阶系统。当 (被测频率 ω) 远小于 (固有震动频率 ω_n) 的条件下, 二阶系统的位移相当于加速度。

[例]: 用固有频率为 2000Hz, 衰减比为 0.5 的加速度检测仪, 分别检测 1200Hz 的振动加速度和 400Hz 的振动加速度, 比较两种情况下加速度检测的系统误差的大小。 ????

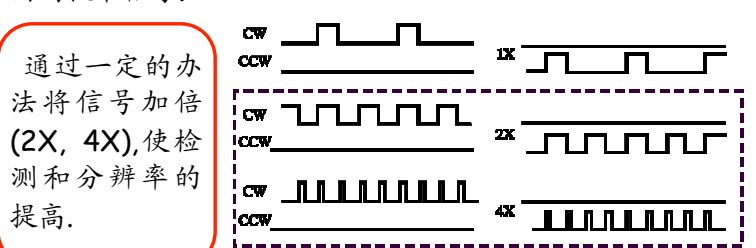
光纤位移检测: 选择两个线形区域测量.



光栅标尺位移传感器: 栅距 P 一定, 小至微米级
输出信号为平滑的三角波. 上下栅格相位差 $1/4$ 栅距
鉴相判断移动方向, 正向和反向分别计数, 正反向译码电路



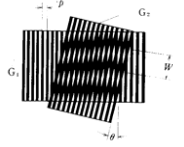
通过 D 触发器产生正向和反向的技术信号.



通过一定的办法将信号加倍 (2X, 4X), 使检测和分辨率的提高.

莫尔条纹标尺: 两光栅成微小角度 θ .

条纹间距 $W \approx P/\theta$ 放大



[例]: 相对 $G1$ (水平), $G2$ 右倾斜 θ :
若 $G1$ 向右水平移动, 则条纹向上移动

激光扫描与 CCD 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; CCD 图像扫描测长是扫描光电阵列元件的信号输出

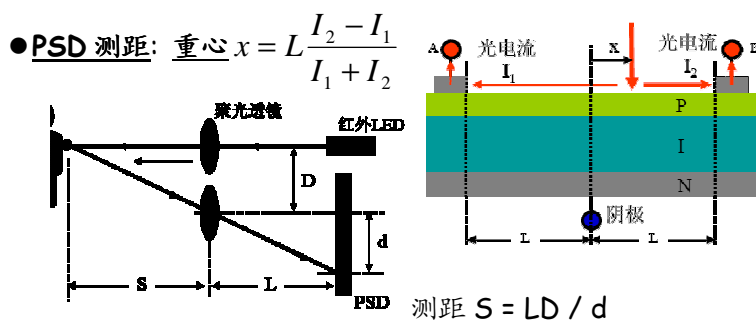
[例]: 反射式光纤位移传感器的位移特性由上升下降两段组成非单调性变化, 为什么: **过近时** 反射光被阻挡, **过远时** 强度低.

[例]: 光栅标尺由栅距同为 P 的 (主尺) 和 (副尺光栅) 构成. 光电传感器检测透过两窗口的光强, 理想输出波形是 (三角) 波形. **A** 相和 **B** 相传感器空间相距 ($1/4$) 个栅距, 输出信号相差 ($\pi/2$) rad. (四分之一周期)

[例]: 车床上的活动部件来回不确定地滑动, 为检测部件绝对位置, 需要同时检测 (移动大小) 和 (方向)

[例]: 利用 D 触发器和 A、B 相传感器脉冲输出, 设计鉴向电路, 并绘制鉴向时序图. 为得到栅距 $1/2$ 倍和 $1/4$ 倍的测量分辨率, 应如何设计电路. (利用 A、B 波型的相位差, 器件方法多可将分辨率提高 4 倍)

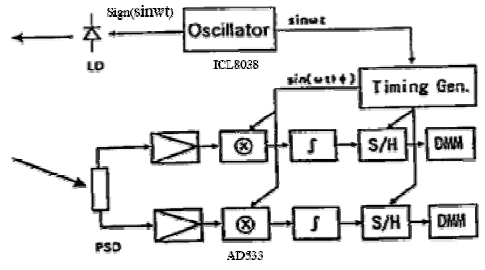
[例]: 设动态磁栅标尺的磁极距离为 0.2mm, 磁标尺总长为 3m, 位移测量的标准测量不确定度为 0.002mm. 问传感器输出电压的分辨率至少应为多少 Vpp, 才能达到 0.002mm 的测量不确定度 ($V_{pp}/50$)



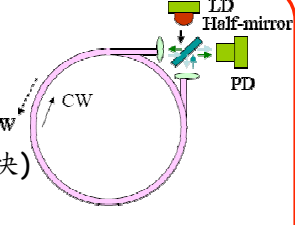
- 1) 测量 d 是光线重心. 2) 适当增大 D 可增加灵敏度.
 - 3) 抗干扰的措施: ① 提高 SN (信噪) 比: 放大信号 (利用红外 LED 增加发光强度), 抑制噪声 (远离或不正对干扰光). ② 调制发光, 同步积分解调.
- 外加干扰, 观察输出是否改变, 可判断器件是否有抗扰装置.

- **同步积分**: 输入 $x(t) = A\sin(2\pi f_s t + \theta_s) + B\sin(2\pi f_n t + \theta_n)$
其中前半部分 f_s 为信号频率, 后半部分 f_n 为噪声频率.
同步积分 $y(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) \sin(2\pi f_s \tau) d\tau$, 注意频率为 f_s
结果 $y(t) \approx \frac{A}{2} \cos \theta_s$ 为直流信号, $x(t)$ 中只有 **同频同相** 保留
- ② 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 \rightarrow 求相角 θ_s . (相位差测量)
 - 主动改变角 \rightarrow 调出最大输出 \rightarrow 求 A . (微弱信号检测)

[例]: N 个信号进行同步加算, 其信噪比 SN 变为原来的 (\sqrt{N}) .



- **速度测量**:
 1. 离心转速测量仪: 机械方式
 2. 光电耦合器(透射型/反射型) + 光电码盘: 输出脉冲信号
 - 绝对码盘 \rightarrow 转速, 转角, 转向
二进制编码/循环编码(每次只改变一位)
 - 增量码盘 \rightarrow (单相)转速; (ABZ 三相)转速, 转角, 转向
 3. 光纤陀螺(Sagnac 效应):
 - $\omega = 0$: 顺时针 = 逆时针环路
干涉条纹的光强不变化.
 - $\omega > 0$: 设为[顺时针旋转], 则 CCW
- CCW 逆时针: 路径变短(速度变快)



$$t_{CCW} = \frac{\pi D - \frac{D}{2} \omega t_{CCW}}{c/n} = \frac{\pi D}{c/n + \omega D/2}$$

$$t_{CW} = \frac{\pi D + \frac{D}{2} \omega t_{CW}}{c/n} = \frac{\pi D}{c/n - \omega D/2}$$

$$\phi_s = N 2\pi \frac{c}{\lambda} (t_{CW} - t_{CCW}) = \frac{2\pi^2 L D}{c \lambda} \omega$$

- 4. 基于脉冲飞越时间(FlightTime)的速度测量: $V = \frac{L}{\Delta t} - c$
时间差的测量: 差小, 不容易分辨,
频率计数: 周期性, 累积计数
需要高频时钟
- 5. 相关法与相关函数: 一/两个随机过程在相隔 τ 的两不同时刻取值相关程度[自: 信号或噪声的周期性/互: 移动速度检测]
 - 互相关函数: $R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) y(t + \tau) dt$
(均值 $\bar{x} = E(x(t))$, 均方值 $\psi^2 = E(x^2(t))$, 方差 $\sigma^2 = \psi^2 - \bar{x}^2$)
 - 自相关性质: 偶函数, 最大值 $\max[R_{xx}] = R_{xx}(0) = \psi^2$
最小值 $\min[R_{xx}] = R_{xx}(\infty) = \bar{x}^2$, 周期 T 信号的自相关 $= T$

- **温度测量**: 衡量冷热程度(宏观). 分子平均动能大小(微观).
 - 温标: 三要素: **定义固定点, 内插公式, 内插仪器**
 - 摄氏经验温标** t_c : 冰点 $0^\circ C$, 沸点 $100^\circ C$ ($t_f = 1.8t_c + 32$)
 - 华氏经验温标** t_f : 冰点 $32^\circ F$, 沸点 $212^\circ F$ 中间180等分
 - 国际温标 ITS-90**: $T(T_{90}): 1K = \text{水三相点温度} / 273.16$
(定义固定点 17 个, 内插公式, 内插仪器)
 - 国际摄氏温度**: $t(t_{90}): t = T - 273.15$ 单位 $^\circ C$
(水的三相点[固、液、气三相共存] $= 0.01^\circ C / 611.73 Pa$)
 - **接触式**测温: (传导换热、对流换热)
 - 膨胀式温度计: 双金属温度计, 玻璃液体温度计
 - 热电偶: 两种不同导体(半导体)连接成闭合回路时, 若两个结点温度不同, 则回路中将产生热电势.

热电偶 - 热电效应(Seebeck), T 为国际温标(K)???还是 C	
特点	结构简单、廉价、测温范围宽、性能稳定、输出为电信号(易于处理和远传)、有足够精度
接触电势	导体 A, B 结点在温度 T 时形成的接触电动势 $e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}}$ 电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19} C$ 波尔兹曼 $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$. 电子密度 N
温差电势	导体 A 两端温度为 T, T_0 时形成的温差电动势 $e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT$ 汤姆逊系数 σ_A : 导体 A 两端的温度差为 $1^\circ C$ 时所产生的温差电动势.
总效应	$E_{AB}(T, T_0)$ $E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad [\text{主导作用}]$ $- e_A(T, T_0) + e_B(T, T_0)$
实用定律	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 同一种均质导体 组成闭合回路不产生热电势 ➢ 热电势产生条件: 两不同金属, 两接点温度不同 ➢ 热电势大小和电极粗细、长短 无关. ➢ 中间导体定则: 接入中间导体后, 只要中间导体两端温度相同, 对热电偶回路总热电势没有影响. $E_{AB}(T_1, T_3) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3)$
温度补偿	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 参比端恒温法. (冰点槽) 参比端恒为 $0^\circ C$ ➢ 参比端温度测量计算法: 测量参比端温度 T_0. 补偿 $E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, 0)$. ➢ 补偿导线: 引入与材料 A, B 同样特性的材料 A', B' (补偿导线). $E_{AB}(T_2, T_0) = E_{A'B'}(T_2, T_0)$ 则 $E_{AB}(T_1, T_0) = E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_0)$ <p>注: 补偿导线 不能够 消除参比端温度的影响.</p>

自动补偿-热电组电桥法.

温度补偿	► 补偿电桥法 : 通过热敏电阻补偿 0 点
一般取 $I=0.5\text{mA}$	
自动补偿 不能 完全消除冷端温度变化的影响	$U = e(t, t_0) + IR_{CM} - IR_5, R_1 = R_2 \gg \text{other}$ 热敏 $R_{CM}(t_0) = R_5(1 + \alpha \cdot t_0)$, 在 0°C 时桥平衡 平衡要求 $IR_5\alpha \cdot t_0 = e(t_0, 0)$, 则有 $U = e(t, 0)$ 计算 R_5 : 给定 t_0 的波动区间 Δt_0 , \rightarrow 查表得 Δe 则 $\Delta e = IR_5\alpha\Delta t_0$, 则 $R_{CM}(t_0) = R_5(1 + \alpha \cdot t_0)$
因为热电偶是非线性的. 而热电组是线性的.	
串/并联	► 串联 : 热电堆 ($U_\Sigma = NU_0$ 增加灵敏度) ► 并联 : 得到热电势平均值.

■ 热电组(RTD): 金属导体电阻阻值随温度变化而变化.

特点	稳定性高、互换性好、准确度高、高灵敏度、无需参比温度.
测温原理	$R_t = R_0(1 + \alpha t)$, 正温度系数 $\alpha > 0$
桥式测量	 $V_0 = \frac{V_b}{4} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$ $\frac{V_b}{2} \left[\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right]$ $\frac{V_b}{2} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$ $V_b \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$ Linearity Error: 0.5%, 0.5%, 0, 0 (A) Single-Element Varying (B) Two-Element Varying (1) (C) Two-Element Varying (2) (D) All-Element Varying
实际问题	1. 引线电阻的影响: 引线也有阻值, 且随环境温度变化, 影响可达 10% 甚至 50%. 2. 响应速度慢; 3. 自热问题: 热电组测量需外加电源, 电流流过热电组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

[例]: 两线制接线分析. (PPT_Temp-P69)

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

OFFSET ERROR OVER TEMPERATURE = $+23\%\text{FS}$
GAIN ERROR OVER TEMPERATURE = $-0.26\%\text{FS}$

已知: 上半桥 $R_3 = R_4 = 350\Omega$, 下半桥(加补偿) $R_1 = 371\Omega$
引线 25°C 时 $R_{lead} = r_0 = 10.5\Omega$, 变化 $\Delta r = \alpha \times r_0 \Delta T$
电源 $E = 10\text{V}$, 热电阻变化范围 $R_2 = 350 \sim 353.5\Omega$
解: 1>. 当室温为 25°C 时. 输出 V_0 的零点 ($R_2 = 350\Omega$)

$$V_{OZ} = E \left(\frac{R_2 + 2r_0}{R_2 + 2r_0 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)_{R_2=350} = 0$$

同理输出 V_0 的最大值 $V_{OM} (R_2 = 353.5) = 23.45\text{mV}$
2>. 当室温为 35°C 时, $R_{lead} = r_0 + \Delta r = 10.904\Omega$, 则
零点漂移 $V_{OZ}' = 5.44\text{mV}$, 最值漂移 $V_{OM}' = 28.83\text{mV}$
则 **零点漂移比** $\eta_Z = (V_{OZ}' - V_{OZ}) / V_{OM} = 23\%$
量程漂移比 $\eta_M = [(V_{OM}' - V_{OZ}') - V_{OM}] / V_{OM} = -0.26\%$

[例]: 三线制接线分析. (PPT_Temp-P72)

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

OFFSET ERROR OVER TEMPERATURE = $0\%\text{FS}$
GAIN ERROR OVER TEMPERATURE = $-0.08\%\text{FS}$

解: 输出公式改变: $V_0(R_2) = E \left(\frac{R_2 + r_0}{R_2 + 2r_0 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_4} \right)$

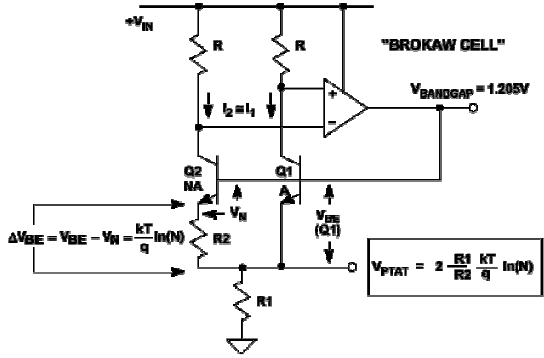
■ 热敏电阻(Thermistor): 金属氧化物或半导体材料制成

特点	廉价、高灵敏度、阻值高($\text{k}\Omega$ to $100\text{ k}\Omega$, 可忽略引线电阻带来的影响)、响应速度快(小物理尺寸)、与温度呈 非线性 关系.
测温原理	$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$, 负温度系数 < 0

■ 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 V_{BE} 随温度 T 升高而降低. $V_{BE} = V_0 - \frac{kT}{q} \ln \frac{A}{I_C}$ 多个时推导????? 当多个并联时, 有 $\Delta V_{BE} = V_{BE} - V_N = \frac{kT}{q} \ln N$
------	---

[例]: 分析"BROKAW CELL"工作原理 (PPT_Temp-P82)



解: R_2 上取得 $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln(N)$, 运放保证 $I_1 = I_2$?????

- > 非接触式测温: (辐射换热)
- @黑体: 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(简称辐出度)亦最大; 其它物体的辐出度总小于绝对黑体.
- @全辐射系数 $\varepsilon(T)$: 在温度 T 下某一物体在全波长范围的积分辐射出射度 $M(T)$ 与绝对黑体在全波长范围的积分辐射出射度 $M_0(T)$ 之比.
- @光谱(单色)辐射度 $\varepsilon(\lambda, T)$: 在温度 T 和某个波长 λ 下物体在此波长的光谱辐射出射度与黑体在此波长的光谱辐射出射度之比.
- @辐射系数 ε : $\varepsilon + \beta + \gamma = 1$, 反射系数 β , 透射系数 γ .
- @普朗克定律: 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系.

$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)}$, 单位 $(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$, c_1, c_2 为常数.

维恩(长波长) $E_{o\lambda} \approx \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}$, 瑞利金斯(短) $E_{o\lambda} \approx \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4}$

@黑体的全辐射定律: $E_o = \int_0^\infty E_{o\lambda} d\lambda = \sigma T^4$, $(W \cdot m^{-2})$

@对于一般物体: (ε 灰度) 有 $E_\lambda = \varepsilon_\lambda E_{o\lambda}$, 全辐射 $E = \varepsilon E_o$.

@表观温度: 辐射测温仪表在使用前都用黑体炉(模拟黑体)来进行标定, 其示值按黑体温度进行刻度. 而实际使用时被测物体通常均不为黑体, 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将其转化为实际温度.

■ 光学高温计(维恩): $\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda}$

■ 比色温度计: T_R 物体比色温度. $\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} = \frac{\ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}}{c_2 (\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2})}$

■ 辐射温度计 ($E = \varepsilon \sigma T^4$): T_p 表观温度, 则 $T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}$

[例]: 用全辐射法测量某金属温度, 在假设其全辐射系数为 0.82 的条件下得知被测温度为 1050°C, 现由其他方法得知其真实全辐射系数为 0.75, 求其真实温度 ($E = \varepsilon \sigma T^4$, 1352 °C)

[例]: 已知日地平均距离为 1.5×108km, 太阳常数(指平均日地距离时, 地球表面垂直于太阳辐射的单位面积上所接受的太阳辐射能)为 1353W/m2, 太阳半径为 6.96 ×108 m, 求太阳表面温度. (Answer: 5770 °K) ????

● 压力 p 测量: 压力单位换算表

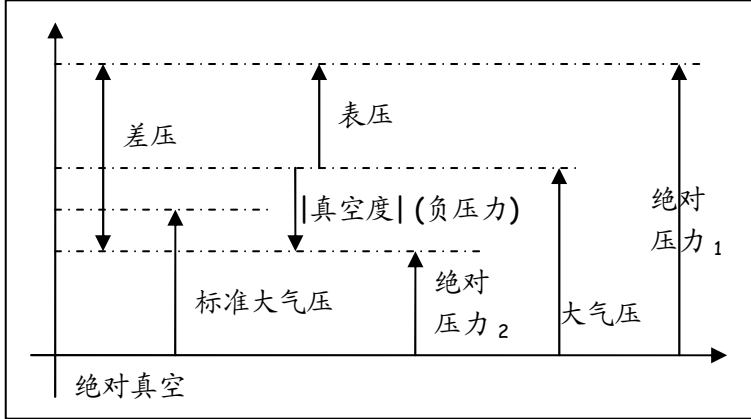
	Pa	bar	kgf/cm ²	atm	mmH ₂ O	mmHg
Pa	1	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0.102	0.0075
bar	10 ⁵	1	1.02	0.97	10.2	750
kgf/cm ²	~10 ⁵	0.98	1	0.97	10.00	735.6
atm	101.3	1.01	1.033	1	10.33	760
mmH ₂ O	9.8	10 ⁻⁴	0.0001	10 ⁻⁴	1	0.074
mmHg	133.3	10 ⁻³	0.0014	10 ⁻³	13.595	1

@压力表示方法: 表压力: 压力测量仪表中的敏感元件通常处于大气中, 所测压力为绝对压力与大气压的差, 称为表压.

真空度: 当绝对压力小于大气压时, 表压为负值, 其绝对值为真空度.

标准大气压: 把 0°C 时, 水银比重 13.5951 克/厘米 3, 重力加速度 980.665 厘米/秒 2, 北纬 45 度海面的大气压定义为 1 个标准大气压.

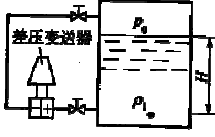
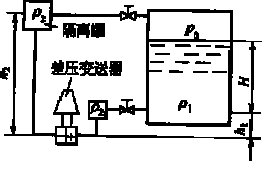
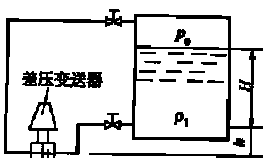
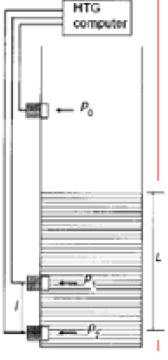

绝对压力: 被测介质作用于容器表面积的全部压力, 以绝对真空作为基准所表示的压力



@压力测量:

a.重力平衡法	
a1.液柱式压力计 ρ_x 为被测气体密度. ρ_0 为便准液密度.	
特点	被测压力和一定高度的液体产生的重力相平衡, 简单、直观、价格低廉、信号不易远传.
U 型管	$\rho_x < \rho_0$, $\Delta p = \rho_0 g h$
斜管	$\rho_x < \rho_0$, θ 固定, $\Delta p = \rho_0 g h = \rho_0 g L \sin \theta$
a2.活塞式压力计	
特点	基于重力平衡原理, 被测压力与活塞及活塞上承载的砝码重量相平衡, 精度高、常用于压力表校验
b.机械力平衡法 --如力平衡式差压变送器.	
特点	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.
c.弹性力平衡法	
特点	被测压力使得弹性元件产生形变, 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. 在实际中使用最广泛
弹性元件	弹簧管("C"型单圈式, 盘式, 螺旋式) - 测表压力 波纹管, 平膜片, 波纹膜片, 膜盒.
d.物性法	
特点	采用压电、压阻、光纤等传感器, 将被测压力转换为其他物理量来测量.
分类	应变式, 压阻式, 电容式, 电感式, 压电式

●物位测量:

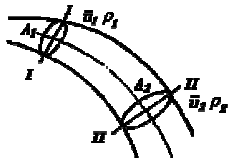
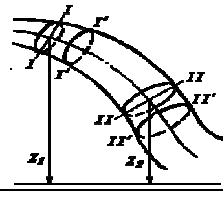
分类	液位(液体),料位(固体),界位(液—液或液—固界面)
a.直读式	
特点	直观、简单、但信号不易远传
b.静压式 (可用于敞口容器) 测压差 $\Delta p = p_+ - p_-$	
特点	液体对容器底面产生的静压力与液位高度成正比,通过测容器中液体的压力即可测算出液位高度.
零点 <u>无迁移</u>	$p_+ = \rho_1 g H + p_0$ $p_- = p_0$ $\Delta p = p_+ - p_- = \rho_1 g H$ 
零点 <u>负迁移</u>	$p_+ = \rho_1 g H + \rho_2 g h_1 + p_0$ $p_- = \rho_2 g h_2 + p_0$ $\Delta p = \rho_1 g H - \rho_2 g (h_2 - h_1)$ (h_1, h_2 隔离液 p_2 高度) 
零点 <u>正迁移</u>	$p_+ = \rho_1 g H + \rho_1 g h + p_0$ $p_- = p_0$ $\Delta p = \rho_1 g H + \rho_1 g h$ 差压变送器低于液罐底部 
[例]	测量 3 个压力 p_0 、 p_1 、 p_2 来获得液位高度 L , 用于测量 p_1 、 p_2 的压力变送器间的距离 l 已知. $L = \frac{p_2 - p_0}{p_2 - p_1} l$  优点:无需考虑被测液体的密度.
c.浮力式	
特点	依据力平衡原理,通常借助浮子一类的悬浮物,浮子做成空心刚体,使它在平衡时能够浮于液面.当液位高度发生变化时,浮子就会跟随液面上下移动.因此测出浮子的位移就可知液位变化量.浮子式液位计按浮子形状不同,可分为浮子式、浮筒式等等;按机构不同可分为钢带式、杠杆式等.
分类	直读式浮子液位计, 舌簧管式浮子液位计.
浮筒式	根据 $k(x_0 + \Delta x) = mg - A\rho g(H + \Delta H - \Delta x)$ $\Delta H = \left(1 + \frac{k}{A\rho g}\right) \Delta x$ 其中 k 弹簧, A 浮筒底面积
电容式	$C = C(L) = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln(D/d)}$ L 相对高, ϵ 液体介电常数. D/d 内外径 

d.波动式 (超声式, 雷达式, 核辐射式)	
超声式	气界式: 安装方便, 但信号衰减较大. 液界式: 信号衰减小, 但需要安装在容器底部. $L = 0.5c\Delta t$, c 为声速
雷达式	发射波和回波之间产生一个相位差, 相位差通过傅立叶形成一个频谱, 频谱与距离呈一个线性的关系
辐射式	入射强度 I_0 , 出射 $I = I_0 e^{-\mu H}$, μ 为吸收系数

$$\text{得 } H = H(I) = \frac{1}{\mu} (\ln I_0 - \ln I)$$

e.机械式 (音叉式料位计, 重锤探测式料位计)
d.物位开关 非连续测量, 只关心物位于某设定值的关系

●流量测量

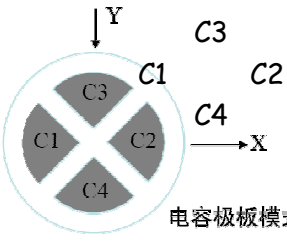
概念	$\int u dA$ 平均(体积)流速 $\bar{u} = \frac{q_V}{A} = \frac{A}{A}$, 单位 m/s 瞬时体积流量 $q_V = \frac{dV}{dt} = \bar{u} A$, 单位 m^3/s 瞬时质量流量 $q_m = \frac{dM}{dt} = \rho \bar{u} A = \rho q_V$, kg/s 累计流量 $Q_V = \int q_V dt$, $Q_m = \int q_m dt$ 黏滞力 $F = \mu A \frac{du}{dy}$, μ 动力黏度 垂直于速度方向的速度梯度 压缩系数 $k = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P}$ 温度不变而压力变化 膨胀系数 $\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T}$ 压力不变而温度变化
定理	➤ 流速分布, a 平流 $u_x = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r_x}{R}\right)^2\right]$ b 湍流 $u_x = u_{\max} \left[1 - \frac{r_x}{R}\right]^{1/n}$, n 根据雷诺数变化 ➤ 流体连续性方程(质量守恒) $\rho_1 \bar{u}_1 A_1 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2$  ➤ 伯努利方程(能量守恒)  $gZ_1 + \frac{p}{\rho} + \frac{\bar{u}_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{u}_2^2}{2}$

[例]: 电容式三维力传感器: [将力、力矩转换为静电容量]

$F_x: (C2-C1), F_y: (C4-C3), F_z: (C1+C2+C3+C4)$

$C = \epsilon \frac{S}{d}$

电容 - 》 时钟芯片 - 》 脉冲
宽 - 》 RC 电路 - 》 电压



电容极板模式

[例]: 书上的三线制

●流量测量方法: 体积流量/质量流量

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。压力损失的大小是流量仪表选型的一个重要技术指标。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。反之则能耗大, 经济效益相应降低。
------	---

仪表系数	(仪表常数), 是 频率输出型 流量计的重要参数之一-单位流体流过流量计时输出的 频率信号脉冲数 。
------	--

a.容积式流量计

特点	两个齿轮旋转方向相反. $q_v = 4nV_0$
----	---------------------------

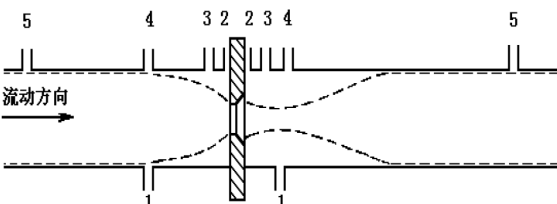
b.差压式流量计 -- b1 节流式

节流件	压力损失 : 孔板 > 喷嘴 > 文丘利管。
-----	-------------------------------

原理	$\begin{cases} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2} \\ \rho_1 u_1 \frac{\pi D^2}{4} = \rho_2 u_2 \frac{\pi d_2^2}{4} \end{cases}, \text{ 设 } \rho_1 = \rho_2 = \rho$ 得 $u_2 = \frac{1}{\sqrt{1-(d_2/D)^4}} \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1-p_2)}$ 有 $q_v = u_2 A_2, q_m = \rho q_v$, 其中 $A_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2$
----	--

修正	<p>➢ 实际采用某种取压方式所得到的压差 Δp 来代替 $p_1 - p_2$ 的值。孔板开孔直径 d 代替 d_2。</p> <p>记 $\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-(d_2/D)^4}}$, 有 $q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$ (A 为板孔开孔面积) $q_m = \alpha A \sqrt{2\rho \Delta p}$</p> <p>➢ 对于可压缩流体, 引入流束膨胀系数 ϵ 修正 $q_v' = \epsilon q_v, q_m' = \epsilon q_m$</p>
----	---

强调	测量非线性 $q_v \propto \sqrt{\Delta p}$
----	-------------------------------------

安装	<p>②直管段要求: 节流件前后要求有一段足够长的直管段, 通常取节流件前 10D, 节流件后 5D;</p> <p>②取压方式:</p>  <p>1-1-理论取压; 2-2-角接取压; 3-3-法兰取压; 4-4-径距取压; 5-5-损失取压</p>
----	---

b.差压式 -- b2. V-Cone 流量计

特点	差压信号稳定, 管道内不容易堵塞 由于应用中出现事故, 现较少使用
----	--------------------------------------

b.差压式 -- b3. 转子流量计

计算	<p>由通用公式 $q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$, α 流量系数</p> <p>且 $\Delta p A_f = V_f (\rho_f - \rho) g$, (下标 f 表浮子)</p> <p>有 $q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2g V_f (\rho_f - \rho)}{\rho A_f}}$, ($A_f$ 浮子截面积)</p> <p>A 浮子(转子)与锥形管间的环形流通面积</p>
----	--

强调	转子流量计是一种非通用性仪表, 出厂时其刻度在工业标准状态下 以空气/水标定 流量的仪表。 实际使用时若被测介质不是水或空气, 则流量计的
----	---

	指示值与实际流量值之间存在差别, 必须对流量指示值进行修正, 修正方法: (ρ' 表示被测对象密度)
--	--

气体 $q_v' = q_v \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}}$, 液体 $q_v' = q_v \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho')\rho}{(\rho_f - \rho)\rho'}}$

安装	只能纵向安装。
----	---------

【例】	出厂时以水标定的测量液体流量用转子流量计, 当实际用于测量酒精($\rho < \text{水}$)流量时, 其实际流量比刻度指示值大, 即读数偏小
-----	--

b.差压式流量计 -- b3 其他流量计

其他	弯管流量计 (外高压 P_1 , 内低压 P_2), 靶式流量计
----	---------------------------------------

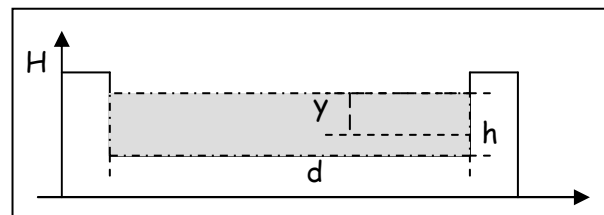
c.明渠流流量测量 (明渠: 非满管状态流动的水路)

分类	堰法, 测流槽法, 流速-水位计算法, 电磁流量计法
----	----------------------------

原理	流量与 水位高度 成函数关系 $Q = Q(h)$
----	----------------------------------

对高度积分 $Q = \int v dA = \int_0^h v(y) d(y) dy$.

$h+0+v_{Top}^2/2g = (h-y)+0+v^2/2g$ 得 $v(y) = \sqrt{2gy}$



d.速度式 -- d1.涡轮流量计

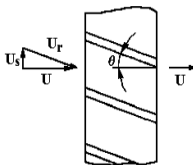
原理	在一定范围内, 涡轮的转速与流体的平均流速成正比, 通过磁电转换装置将涡轮转速变成电脉冲信号, 从而推导出被测流体的流量
----	--

$u_s = u \tan \theta = \omega R$

涡轮转速 $n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{u \tan \theta}{2\pi R}$

频率 $f = nZ$, Z 为涡轮齿数

流量 $q_v = uA = \frac{2\pi RA}{Z \tan \theta} f = \frac{f}{\xi}$, [ξ 仪表常数]



d.速度式 -- d2.涡街流量计

原理	②在均匀流动的流体中, 垂直地插入一个柱体, 称为漩涡发生体, 则在该漩涡发生体两侧会产生旋转方向相反、交替出现的漩涡, 并随着流体流动, 在下游形成两列不对称的漩涡列, 称之为“卡门涡街”
----	---

②涡街频率 f 与流体流速 u 有关: 常数 $St = \frac{fmd}{u}$

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

其中 d 为漩涡发生体的特征尺寸。 [k 仪表常数]

d.速度式 -- d3.电磁流量计

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
----	---

计算	$q_v = \frac{1}{4} \pi D^2 u = \frac{\pi D}{4B} E = \frac{E}{k}$, 其中 B 磁感应强度 D 管道内径, u 流体平均流速, E 感应电势
----	---

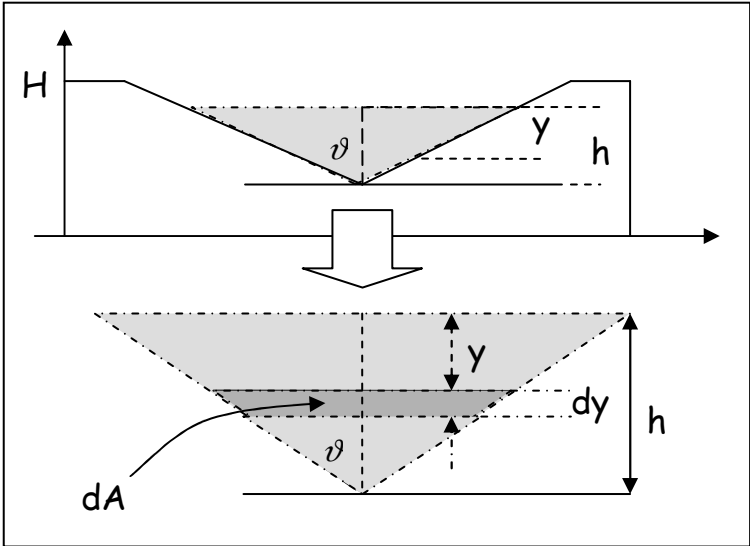
d.速度式 -- d4.超声流量计

原理	由于流体流动的影响, 2 束超声波传播速度不同, 通过测量他们间的时间差、频率差、相位差等可以推出流体平均流速进而得知流体流量
----	---

时差法 $\Delta t = t_2 - t_1$	<p> $t_1 = \frac{L}{c+u}$: 按顺流方向, 超声波到达接收器时间 $t_2 = \frac{L}{c-u}$: 按逆流方向, 超声波到达接收器时间 所以 $u \approx \frac{c^2 \Delta t}{2L}$, 缺点: 声速 c 受流体温度粘度影响 </p>
频差法	$f_1 = \frac{1}{t_1}, f_2 = \frac{1}{t_2}, \Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2u}{L}, u = \frac{L}{2} \Delta f$
相差法	$\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1 = \omega \Delta t = 2\pi f \Delta t, u = \frac{c^2}{4\pi f L} \Delta \phi$
e.直接法 -- e1.科氏力流量计	
原理	利用流体在振动管中流动而产生与质量流量成正比的科里奥利力的原理来直接测量 质量流量 .
计算	$q_m = \frac{K_s}{8r^2} \Delta t$, 其中 $\Delta t = \frac{2r \sin \theta}{u_p} = \frac{2r \theta}{\omega L}$
测时差	K_s 为震动管弹性模量, ω 为驱动震动的角速度.
e.直接法 -- e2.热式质量流量计	
原理	根据传热规律: 功率守恒
计算 测温差	$q_m = \frac{P}{c_p \Delta T}$, c_p 定压比热容, ΔT 温差
f.间接式质量流量计 -- f1.节流式流量计 + 密度计	
原理	<p> $q_m = \rho q_v = \sqrt{\rho \cdot \rho q_v^2}$ </p>
f.间接式质量流量计 -- f2.体积流量计 + 密度计	
原理	<p> $q_m = \rho q_v$ </p>

f.间接式质量流量计 -- f3.体积流量计 + 体积流量计	
原理	<p> $q_m = \rho q_v = \rho q_v^2 / q_v$ </p>

【例】: 明渠流流量测量 , V 型明渠.



由 $h+0+v_{Top}^2/2g=(h-y)+0+v^2/2g$, 且顶端 $v_{Top}=0$

得 $v(y)=\sqrt{2gy}$. 又有 $dA=2dy\times(h-y)\tan\vartheta$, 则

$$\begin{aligned}
 Q &= \int v dA = \int_0^h v(y) 2(h-y) \tan \vartheta dy = \int_0^h 2\sqrt{2gy}(h-y) \tan \vartheta dy \\
 &= 2\sqrt{2g} \tan \vartheta \int_0^h h y^{\frac{1}{2}} - y^{\frac{3}{2}} dy = \sqrt{2g} \tan \vartheta \left[\frac{2}{3} h y^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{5} y^{\frac{5}{2}} \right]_0^h \\
 &= 2\sqrt{2g} \tan \vartheta \cdot h^{\frac{5}{2}} \left[\frac{2}{3} - \frac{2}{5} \right] \\
 &= \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \vartheta \cdot h^{\frac{5}{2}}
 \end{aligned}$$

(???此结论有待同志们认证...)

@附加内容:

备注: 连续多于 1 个的问号表示有疑问, 可搜索问号定位表明**【例】** 为例题或思考题, 答案仅供参考.
 打印时建议旋转成 pdf, 然后使用 4 页/面+双面.

End.