

●基本概念: 灵敏度  $S = \Delta y / \Delta x$ , 分辨率=能分辨的最小输入  
二者都描述测量仪的灵敏度,但关于数字不一样(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  $S = \text{const}$   
安全火花型防爆仪表: 两线制 4~20mA DC 传输标准  
准确度  $\delta$ : 测量准确值(测量平均值  $A_0$ ) 偏离真值  $A_0$  的程度  
精确(密度)  $\sigma$ : 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), 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 = 基本误差不得超过量程的  $\pm 0.5\%$   
最大误差不得超过量程的 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  $-\Delta$ , 则测量值应补偿  $\Delta$   
关系: 测量值  $M = A$  测量平均值  $+\delta$  准确度  $\pm U$  不确定度  
准确度  $\delta = A - A_0$ , 精确(密度) (标准差)  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i - A_0}$   
误差传递:  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x_i$  相互独立, 标准偏差  $\sigma_i$   
则总标准差  $\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\frac{\partial f}{\partial x_i})^2 \sigma_i^2}$   
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  $= A$ .

实验标准偏差的无偏估计:  $\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (M_i - A)^2}$   
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  $p(\%)$ , 查表得置信系数  $z$ , 置信水平  $= 1 - p(\%)$   
 $U_0$  为 A 类或 B 类标准不确定度.

●位移测量, 金属应变片: 泊松比  $\nu=0.3-0.5$ , 应变量  $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$

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

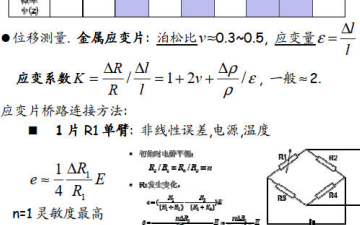
应变片桥路连接方法:

- 1片 R1 单臂: 非线性误差, 电源, 温度

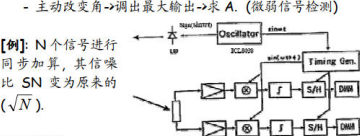
$\epsilon = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} E$

$n=1$  灵敏度最高

1-10	0.02	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
电阻温度系数	0.3959	0.3521	0.3177	0.2901	0.2648	0.2424	0.2244	0.2104	0.2000
灵敏度	0.0000	0.3820	0.3600	0.3391	0.3191	0.2991	0.2800	0.2644	0.2500



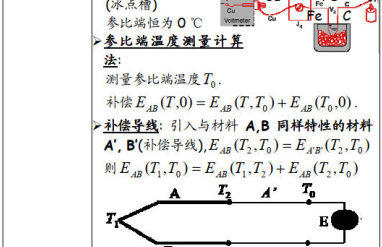
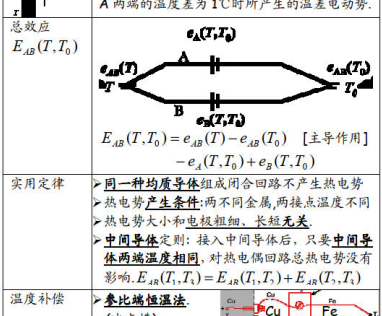
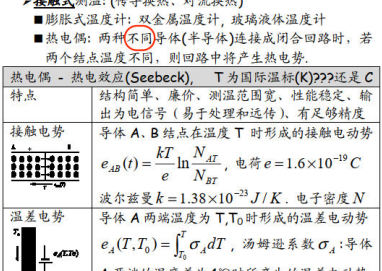
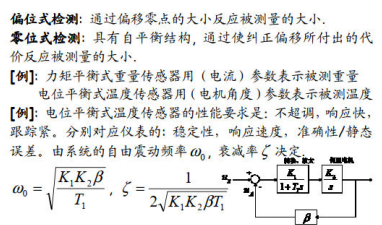
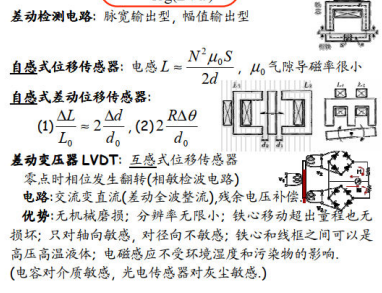
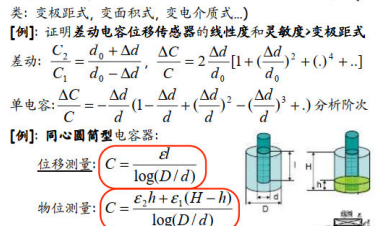
●同步积分: 输入  $x(t) = A \sin(2\pi f_s t + \theta_s) + B \sin(2\pi f_n t + \theta_n)$   
其中前半部分  $f_s$  为信号频率, 后半部分  $f_n$  为噪声频率.  
同步积分  $y(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi f_s t) dt$ , 注意频率为  $f_s$ .  
结果  $y(t) = \frac{A}{2} \cos \theta_s$  为直流信号,  $x(t)$  中只有同频同相保留  
②输出直流成分, 与发光信号同频率同相成分的大小比例.  
- A 不变  $\rightarrow$  求相角  $\theta_s$  (相位误差)  
- 主动改变角  $\rightarrow$  调出最大输出  $\rightarrow$  求 A. (微弱信号检测)



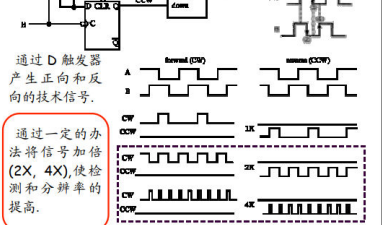
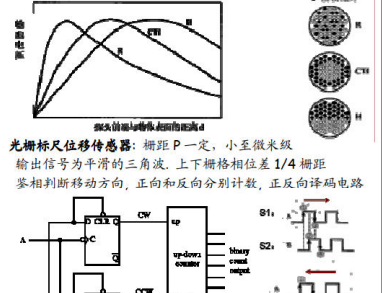
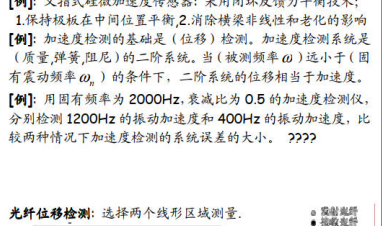
●速度测量:  
1. 离心转速测量仪: 机械方式  
2. 光电组合器 (透射型/反射型) + 光电码盘: 输出脉冲信号  
- 绝对码盘  $\rightarrow$  转速, 转角, 转向  
- 增量码盘  $\rightarrow$  单(相)转速; (ABZ 三相) 转速, 转角, 转向  
3. 光纤陀螺 (Sagnac 效应):  
 $\omega = 0$ : 顺时针  $\rightarrow$  逆时针环路  
干涉条纹的光强不变化.  
 $\omega > 0$ : 设为 [顺时针] 旋转, 则  $CCW$   
-  $CCW$  逆时针: 路径变短 (速度变快)  
 $t_{CCW} = \frac{\pi D}{c/n} \frac{D}{c/n} = \frac{\pi D^2}{c/n}$   
 $t_{CW} = \frac{\pi D}{c/n} \frac{D}{c/n} = \frac{\pi D^2}{c/n}$   
-  $CW$  顺时针: 路径变长 (速度变慢), 折射率  $n$ , 匝数  $N$   
 $t_{CW} = \frac{\pi D}{c/n} \frac{D}{c/n} = \frac{\pi D^2}{c/n}$   
到达光电传感器的两束光的相位差  $\phi_s$  满足:  
 $\phi_s = N 2\pi \frac{c}{\omega} (t_{CW} - t_{CCW}) = \frac{2\pi m^2 L D}{c \lambda} \omega$   
相位测量精确度需要达到这一微小相位.  
增加匝数  $N$  和直径  $D$  都可以提高灵敏度.

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  $\tau$  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]  
 $\rightarrow$  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  $\bar{y^2} = E(x^2(t))$ , 方差  $\sigma^2 = \bar{y^2} - \bar{x}^2$ )  
 $\rightarrow$  自相关性质: 偶函数, 最大值  $\max[R_{xx}] = R_{xx}(0) = \bar{x^2}$   
最小值  $\min[R_{xx}] = R_{xx}(\infty) = \bar{x}^2$ , 周期  $T$  信号的自相关  $= T$

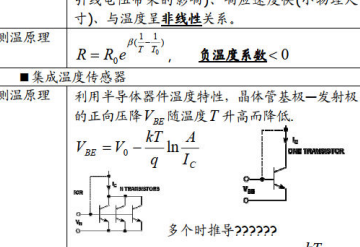
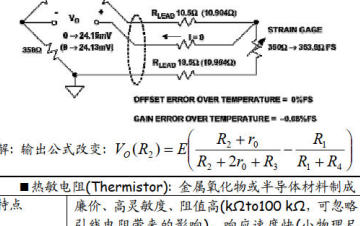
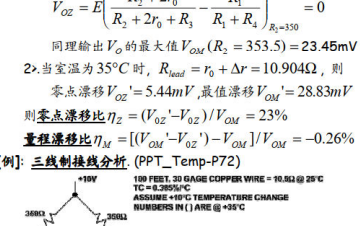
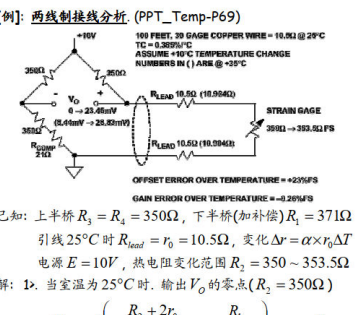
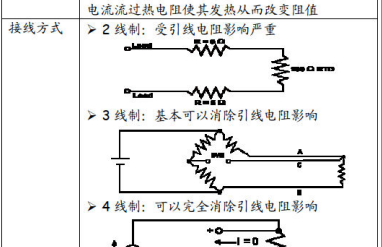
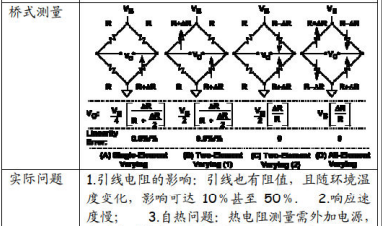
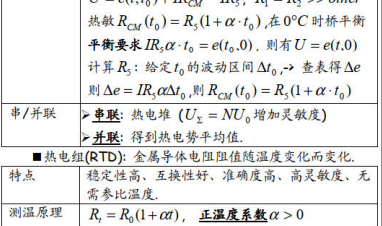
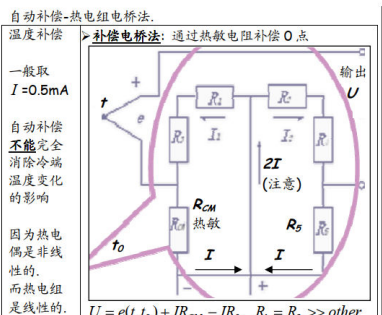
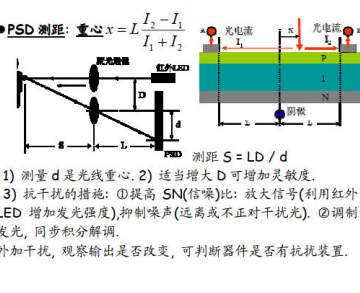
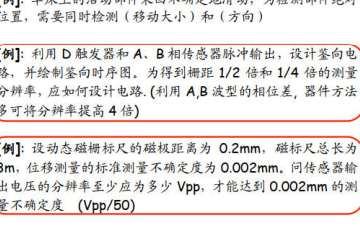
■ 2片 R1(R2)F 半桥: 线性, 温度补偿, 灵敏  $\times 2$   
 $\epsilon = \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} E$   
■ 4片 R14(R23)F 全桥: 线性, 温度补偿, 灵敏  $\times 4$   
 $\epsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1} E$   
差动检测结构: 消除共模干扰, 降低漂移, 提高灵敏度  
【例】: 比较变极距电容式位移传感器和具有差动结构的电容式传感器的测量输入输出特性. 简述差动结构具有哪些优势:  
①变极距电容式位移传感器: 电容极距与电容大小成反比, 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附近呈线性关系; ③差动结构明显改善非线性灵敏度, 另外因静电电力、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, 同时具有对于被测量参数的反对称结构; 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, 变介电质式...)



加速度检测: 质量块  $m$  弹簧  $k$  阻尼  $c$  外壳差振动  $x = A \sin \omega t$   
开环: 牛顿  $m \frac{d^2(x+y)}{dt^2} = -c \frac{dy}{dt} - ky$ , 固有频率  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$   
【弹簧测力-偏位式】衰减比  $\zeta = c/(2m\omega_0)$  一般为  $0.4 \sim 0.8$ .  
结论:  $y = \frac{A(\omega/\omega_0)^2}{\sqrt{(1 - (\omega/\omega_0)^2)^2 + (2\zeta \omega/\omega_0)^2}} \sin(\omega t - \phi)$ ,  $\tan \phi = \frac{2\zeta \omega/\omega_0}{1 - (\omega/\omega_0)^2}$   
 $\omega \gg \omega_0$  时,  $y = -A \sin \omega t$ , 支点位检测  
 $\omega \ll \omega_0$  时,  $y = A(\omega/\omega_0)^2 \sin \omega t$ , 支点加速度检测  
 $\omega = \omega_0$  时, 支点速度检测.  
闭环伺服 [零位式]: 固有频率  $\omega_0 = \sqrt{(S+k)/m}$ ,  $S = S_1 S_2 S_f$   
输出灵敏度:  $S_{y_0} = \frac{U_0}{x} = \frac{mR}{S} \times \left[ \frac{1}{1+k/S} \right]$ , 其中  $[ ]$  可忽略

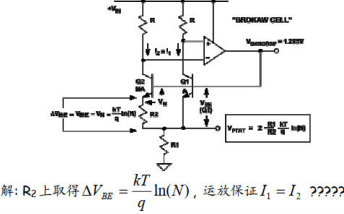


莫尔条纹原理: 两光栅微小角度  $\theta$ . 条纹间距  $W \approx P/\theta$  放大  
【例】: 相对  $G1$  (水平),  $G2$  右倾斜  $\theta$ :  
若  $G1$  向右水平移动, 则条纹向上移动  
激光扫描与 CCD 协同: 都适用于软质材料, 高温物体外径的检测. 区别: 激光扫描测长只有一个光电元件, 需要机械式扫描投影光线; CCD 图像扫描测长是扫描光电阵列的信号输出  
【例】: 反射式光纤位移传感器的位移特性由上升下降两段组成非单调性变化, 为什么? 过近时反射光被阻挡, 过远时强度低.





【例】分析“BROKAW CELL”工作原理 (PPT\_Temp-P82)



解: R2上取得  $\Delta V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln(N)$ , 远放保证  $I_1 = I_2$  ?????

➢非接触式测温:(辐射换热)

①**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。

②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(简称辐射度)亦最大;其它物体的辐射出射度总小于绝对黑体。

③**全辐射系数**  $\epsilon(T)$ : 在温度 T 下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 Mo(T)之比。

④**光谱(单色)辐射度**  $\epsilon(\lambda, T)$ : 在温度 T 和某个波长  $\lambda$  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。

⑤**辐射系数**  $\epsilon$ :  $\epsilon + \beta + \gamma = 1$ , 反射系数  $\beta$ , 透射系数  $\gamma$ 。

⑥**普朗克定律**: 黑体的单色辐射强度与波长及温度的关系。

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$
, 单位  $(W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1})$ ,  $C_1, C_2$  为常数。

**维恩(长波长)**  $E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}$ , **瑞利金斯(短)**  $E_{\lambda} = \frac{C_1 T}{\lambda^5}$

⑦**黑体的全辐射定律**:  $E_o = \int_0^\infty E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$ ,  $(W \cdot m^{-2})$

⑧**对于一般物体**( $E$  灰度): 有  $E_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} E_{o\lambda}$ , 全辐射  $E = \epsilon E_o$ 。

⑨**表观温度**: 辐射测温仪表在使用前都用黑体作(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,仅表示出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):  $\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)}$

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

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

【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( $E = \epsilon \sigma T^4$ , 1352 °C)

【例】: 已知日地平均距离为 1.5×10<sup>8</sup>m,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/m<sup>2</sup>, 太阳半径为 6.96×10<sup>8</sup> m, 求太阳表面温度。(Answer: 5770 °K) ????

●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,流体消耗小,输送流体的动力要求小,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,表示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: 孔板 > 喷嘴 > 文丘里管。

原理:  $\begin{cases} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2} \\ \rho_1 u_1^2 = \rho_2 u_2^2 \end{cases}$ , 设  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

$$\rho_1 \frac{\pi D^4}{4} = \rho_2 \frac{\pi d^4}{4}$$

$$\text{得 } u_2 = \sqrt{1 - (d_2/D)^4} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$

$$\text{有 } q_v = u_2 A_2, q_m = \rho q_v, \text{ 其中 } A_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2$$

修正: 实际采用某种取压方式所得到的压差  $\Delta p$  来代替  $p_1 - p_2$  的值。孔板开孔直径  $d$  代替  $d_2$ 。

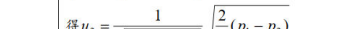
$$\text{记 } \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - (d_2/D)^4}}, \text{ 有 } q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

$$(A \text{ 为板孔开孔面积}) \quad q_m = \alpha A \sqrt{2\rho \Delta p}$$

➢ 对于可压缩流体,引入流束膨胀系数  $\epsilon$  修正  $q_v = \epsilon q_v, q_m = \epsilon q_m$

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

安装: ①直管段要求: 节流件前要求有一段足够长的直管段,通常要求节流件前 10D, 节流件后 5D; ②取压方式:



b.差压式 -- b2. V-Conc 流量计

特点: 差压信号稳定,管道内不容易堵塞

由于应用中出现问题,现较少使用

b.差压式 -- b3. 转子流量计

计算: 由通用公式  $q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$ ,  $\alpha$  流量系数

$$\text{且 } \Delta p_{A_f} = V_f (\rho_f - \rho) g, \text{ (下标 f 表示浮子)}$$

$$\text{有 } q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2g V_f (\rho_f - \rho)}{\rho A_f}}, \text{ (} A_f \text{ 浮子截面积)}$$

A 浮子(转子)与锥形管间的环形流通面积

转子流量计是一种通用性仪表,出厂时其刻度在工业标准状态下以空气/水标准流量的仪表。

实际使用时若被测介质不是水或空气,则流量计的

●压力 P 测量: 压力单位换算表

	Pa	bar	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmH <sub>2</sub> O	mmHg
Pa	1	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	0.102	0.0075
bar	10 <sup>5</sup>	1	1.02	0.97	10.0	750
kgf/cm <sup>2</sup>	~10 <sup>5</sup>	0.98	1	0.97	10.0	735.6
atm	101.3	1.01	1.033	1	10.33	760
mmH <sub>2</sub> O	9.8	10 <sup>-4</sup>	0.0001	10 <sup>-4</sup>	1	0.074
mmHg	133.3	10 <sup>-3</sup>	0.0014	10 <sup>-3</sup>	13.595	1

②**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之差, 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<sup>3</sup>, 重力加速度 980.665 厘米/秒<sup>2</sup> 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



③**压力测量**:

a.重力平衡法

a1.液柱式压力计  $\rho_f$  为被测气体密度,  $\rho_0$  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  $\rho_f < \rho_0, \Delta p = \rho_0 g h$

斜管  $\rho_f < \rho_0, \theta$  固定,  $\Delta p = \rho_0 g h \sin \theta$

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、常用于压力校验

b.机械式平衡法 -- 加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), 界面(液-液或液-固界面)

a.直接式

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  $\Delta p = p_1 - p_2$

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出液位高度。

零点  $p_1 = \rho_0 g H + p_0$

**无迁移**  $p_2 = p_0$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_0 g H$$

零点  $p_1 = \rho_0 g H + \rho_2 g h_1 + p_0$

**负迁移**  $p_2 = \rho_2 g h_2 + p_0$

$$\Delta p = \rho_0 g H - \rho_2 g (h_2 - h_1)$$

( $h_1, h_2$  隔离液  $p_2$  高度)

零点  $p_1 = \rho_0 g H + \rho_2 g h + p_0$

**正迁移**  $p_2 = p_0$

$$\Delta p = \rho_0 g H + \rho_2 g h$$

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。

$$L = \frac{p_2 - p_0}{\rho_2 - \rho_1} l$$

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。

直读式浮子液位计, 右簧管式浮子液位计。

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

$$C = C(L) = \frac{2\pi \epsilon L}{\ln(D/d)}$$

L 相对高,  $\epsilon$  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。

$$L = 0.5 c \Delta t, c \text{ 为声速}$$

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  $I = I_0 e^{-\mu x}$ ,  $\mu$  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

$$\text{平均(体积)流速 } \bar{u} = \frac{q_v}{A} = \frac{A}{A}, \text{ 单位 m/s}$$

$$\text{瞬时体积流量 } q_v = \frac{dV}{dt} = \bar{u} A, \text{ 单位 m}^3/\text{s}$$

$$\text{瞬时质量流量 } q_m = \frac{dM}{dt} = \rho \bar{u} A = \rho q_v, \text{ kg/s}$$

$$\text{累计流量 } Q_v = \int q_v dt, Q_m = \int q_m dt$$

$$\text{黏滞力 } F = \mu A \frac{du}{dy}, \mu \text{ 动力黏度}$$

垂直于速度方向的速度梯度

$$\text{压缩系数 } k = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad \text{温度不变而压力变化}$$

$$\text{膨胀系数 } \beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad \text{压力不变而温度变化}$$

定理

➢ 流速分布, a 平流  $u_s = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r_s}{R}\right)^2\right]$

b 满流  $u_s = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r_s}{R}\right)\right]^{1/n}$ , n 根据雷诺数变化

➢ 流体连续性方程(质量守恒)

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

伯努利方程(能量守恒)

$$g Z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{u}_1^2}{2} = g Z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{u}_2^2}{2}$$

【例】: 电容式三维力传感器: [将力、力矩转换为静电容]

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

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

电容 - 》时钟芯片 - 》脉冲

宽 - 》RC 电路 - 》电压



电容传感器模式

【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,流体消耗小,输送流体的动力要求小,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,表示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: 孔板 > 喷嘴 > 文丘里管。

原理:  $\begin{cases} \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2} \\ \rho_1 u_1^2 = \rho_2 u_2^2 \end{cases}$ , 设  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

$$\rho_1 \frac{\pi D^4}{4} = \rho_2 \frac{\pi d^4}{4}$$

$$\text{得 } u_2 = \sqrt{1 - (d_2/D)^4} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$

$$\text{有 } q_v = u_2 A_2, q_m = \rho q_v, \text{ 其中 } A_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2$$

修正: 实际采用某种取压方式所得到的压差  $\Delta p$  来代替  $p_1 - p_2$  的值。孔板开孔直径  $d$  代替  $d_2$ 。

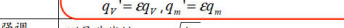
$$\text{记 } \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - (d_2/D)^4}}, \text{ 有 } q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

$$(A \text{ 为板孔开孔面积}) \quad q_m = \alpha A \sqrt{2\rho \Delta p}$$

➢ 对于可压缩流体,引入流束膨胀系数  $\epsilon$  修正  $q_v = \epsilon q_v, q_m = \epsilon q_m$

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

安装: ①直管段要求: 节流件前要求有一段足够长的直管段,通常要求节流件前 10D, 节流件后 5D; ②取压方式:



b.差压式 -- b2. V-Conc 流量计

特点: 差压信号稳定,管道内不容易堵塞

由于应用中出现问题,现较少使用

b.差压式 -- b3. 转子流量计

计算: 由通用公式  $q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$ ,  $\alpha$  流量系数

$$\text{且 } \Delta p_{A_f} = V_f (\rho_f - \rho) g, \text{ (下标 f 表示浮子)}$$

$$\text{有 } q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2g V_f (\rho_f - \rho)}{\rho A_f}}, \text{ (} A_f \text{ 浮子截面积)}$$

A 浮子(转子)与锥形管间的环形流通面积

转子流量计是一种通用性仪表,出厂时其刻度在工业标准状态下以空气/水标准流量的仪表。

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: ( $\rho'$  表示被测对象密度)

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

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( $\rho < \rho_{\text{水}}$ )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  $Q = Q(h)$

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

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



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

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

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

$$\text{频率 } f = nZ, Z \text{ 为涡轮齿数}$$

$$\text{流量 } q_v = uA = \frac{2\pi R A}{Z \tan \theta} f = \frac{f}{\xi}, \quad [\xi \text{ 仪表常数}]$$

d.速度式 -- d2.涡街流量计

原理: 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”

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

计算:  $q_v = \bar{u} A = \frac{\pi D^2}{4} \bar{u} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{f}{1.25 \frac{d}{D}} = \frac{f}{k}$