

# 第一章 测量误差分析

## 一、测量基本概念

绝对误差  $\delta = M - \mu$

相对误差  $\varepsilon = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% = \frac{M - \mu}{\mu} \times 100\%$

基本误差  $\varepsilon_b = \frac{\delta_{\max}}{L_m} \times 100\% = \frac{M - \mu}{L_m} \times 100\%$  **仪表质量的主要指标之一 注意分母是量程**

最好是使测量值落在仪表量程的三分之二左右。在测量过程中，决不允许测量值超过仪表的量程，否则，将导致仪表损坏或精度降低。

仪表的精确度

**允许误差：**基本误差不超过一规定值

**精度等级：**允许误差去掉百分号后的数值表示，并将其注明在表盘上。

一般工业仪表的精度等级应符合国家系列：0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0 和 5.0。如 0.5 级仪表表示允许误差 0.5%。一个量程为 100 °C 的 0.5 级测温仪表，其基本误差应 0.5%，即最大误差应 0.5 °C。此仪表刻度值不能大于 0.5 °C/格。

**分辨率：**在所测量量程时最小可检测到的信号变化量

例如：台仪表满量程时显示为 19999，而其最小可检测到的变化为 1 个末位字，在 200mV 量程下的分辨率则为  $200 \times 1 / 19999 = 0.01\text{mV}$ 。分辨率也经常表述为一个整数加一个分数的形式，如 5%。整数表示能显示 0-9 全部数字的位数，分数表示最高位能显示一个或多个非零数字，如 0, 1, (2)

**灵敏度：**最小量程下的最小变化量（有单位）

**准确度：**（读数\*a%+量程\*b%）或（读数的 ppm+量程的 ppm）

若 10 (V) 的误差为 5ppm，则实际误差值是  $10 \times 5 \times 10^{-6} = 50 \text{ u(V)}$

**测量误差：**数字电压表的固有误差用绝对误差  $\Delta$  表示，其表示方式有多种

$$\Delta U = \pm (a\%U_x + b\%U_m)$$

$$= \pm (a\%U_x + n \text{ 字})$$

相对误差：

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U_x} = \pm \left( a\% + b\% \frac{U_m}{U_x} \right)$$

**例：**用 4 ½ 位 1842DVM 测电压，读数为 1.5V，分别用 2V 档和 200V 档测量，已知：2V 档固有误差：±0.025%U<sub>x</sub> ±1 个字，200V 档固有误差：±0.03%U<sub>x</sub> ±1 个字  
**问：**两种情况下由固有误差引起的测量误差各为多少？

**解：**因 4 ½ 位 DVM 最大显示为 19999，所以 2V 和 200V 档的 ±1 个字分别代表：

$$d_2 = \pm \frac{2}{19999} = \pm 0.0001V \quad d_{200} = \pm \frac{200}{19999} = \pm 0.01V$$

$$\gamma_2 = \frac{\Delta U_2}{U} = \frac{\pm 0.025\%U_x \pm 0.0001}{1.5} = \pm 0.032\%$$

$$\gamma_{200} = \frac{\Delta U_{200}}{U} = \frac{\pm 0.03\%U_x \pm 0.01}{1.5} = \pm 0.03\% \pm 0.67\% = 0.70\%$$



**结论：**1.不同量程“±1 个字”误差对测结果不一样，测量时应尽量选择合适量程。同模拟电压表结论一致。

2.虽然 DVM 有 4 ½ 位分辨力，但不正确使用，则达不到应有的准确度。故分辨力高不等于准确度高。

分辨率不等于准确度实际上分辨力仅与仪表显示位数有关，而准确度则取决于 A/D 转换器等总误差。  
在设计上通常，分辨率应高于准确度，保证分辨力不会制约可获得的准确度，以保证从读数中检测出小的变化量

## 二、测量误差

### 误差分类

- (1) 系统误差：固定的因素造成的测量值的误差称系统误差；用准确度表示
- (2) 过失误差：由于测量者的过失或操作错误，仪器故障等所造成的巨大差错。一旦出现应从测定数据中剔除，可用莱伊特准则或格拉布斯准则来判断误差。

**莱伊特准则（在测量次数较少时，最好不用）：**

在一组测量值中，若某一测量值  $X_i$  与该组测量值的算术平均值  $M$  之差  $V_i$  大于三倍该组测量值的均方根误差  $\sigma$  时， $V_i$  为过失误差。 $X_i$  为错差(坏值)就予舍弃。

$$|V_i| = |X_i - M| > 3\sigma$$

舍去坏值后再次检验

**由表可得**

$$\bar{x} = 20.404$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.01496}{14}} = 0.033$$

$$3\sigma = 3 \times 0.033 = 0.099$$

**根据  $3\sigma$  准则，第八测得值的残余误差为：**

$$|v_8| = 0.104 > 0.099$$

**即它含有粗大误差，故将此测得值剔除。再根据剩下的14个测得值重新计算，得：**

$$\bar{x}' = 20.411$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i'^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.003374}{13}} = 0.016$$

**由表知，剩下的14个测得值的残余误差均满足  $|v_i| < 3\sigma'$ ，故可以认为这些测得值不再含有粗大误差。**

### 格拉布斯准则

剩余偏差  $d_i$  与包含可能坏值的均方根  $\sigma$  的比值： $d_i / \sigma > \lambda_n(\alpha)$  即认为是坏值。  
 $\alpha$  为置信概率，查  $\lambda_n(\alpha)$  数值表。

- (3) 随机误差：测试条件保持不变(同一个测量者、同一台测量仪器、相同的环境条件)，对同一物理量进行重复测量时，测量结果时正、时负、时大、时小的误差。用精密度表示
- (4) 精确度：表示综合误差的大小。

## 三、随机误差

服从正态分布规律：因此，可用  $\sigma$  来表征测量的精密度， $\sigma$  愈小，测量值之间的差异愈小，精密度愈高。

随机误差的规律和特性都是在测量次数  $n$  无限多的情况下得到的，而实际测量中，**测量次数  $n$  总是有限的**，一般说随机误差将增大，设有限次测量的算术平均值与实际真值的偏差为  $\delta_{\bar{x}}$ ，称算术平均值偏差。算术平均值标准误差与标准误差  $\sigma$  的关系为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

**标准误差计算：**

## 1) 贝塞尔法

$$\text{无限次测量均方根误差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

$$\text{有限次测量均方根误差 } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$

## 2) 最大偏差法 查表, 看 PPT

极限误差又称最大误差, 定义为均方根误差的三倍。  $\sigma_{\max} = 3\sigma$

## 四、误差综合

对测量结果的可信赖程度进行总的评价, 就必须对各种系统误差和随机误差进行合成, 用总不确定度  $U$  来表示, 它反映测量结果的总精确度, 通常  $U$  是指测量结果误差的上界限值, 即

$$|\Delta M| = |x - \mu| < U$$

总不确定是估算出来的一个总误差限。即估算值的可信概率, 称之为置信概率(置信度)或置信系数, 置信概率或置信系数可根据误差分布特性求出, 如根据误差正态分布

可求得其置信概率为 68.27%, 置信系数为 1, 置信概率为 95.45%, 置信系数为 2

置信概率为 99.73%, 置信系数为 3。

总不确定度包含了各种系统误差和随机误差, 要确定测定值的总不确定度, 既要对各误差进行合成, 又要对系统误差和随机误差进行总的合成。无论对哪种合成, 其方法一般有三种:

1. 代数合成法  
各误差代数和
2. 绝对值合成法: 已知各误差的大小, 但符号未知, 当误差项数较小时, 可用各误差的绝对值之和代表总误差, 加正负号
3. 方根合成法: 当误差项较多, 符号交错时, 用各误差平方和之根表示总误差较合理

$$\Delta = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}$$

常用第三种

测量结果的总不确定度  $U$ , 应是各系统误差和各随机误差的总合成, 以第三种方法计算, 则有

$$U = \pm Z \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma'_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\sigma_i)^2}$$

$Z$  为置信系数。

$$\text{近似计算方法 } U = \pm 3(\sigma'_\mu + \sigma_\mu)$$

## 五、误差传递

## 1. 和差关系的误差传递

$$\sigma_y^2 = \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2$$

测定值的和差函数的标准误差的平方, 为各测定值标准误差平方之和

## 2. 乘积函数的误差传递

$$y = x_1 \cdot x_2$$

$$\sigma_y^2 = x_1^2 \sigma_{x_2}^2 + x_2^2 \sigma_{x_1}^2$$

## 3. 一般情况

$$y = f(x_1, x_2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}$$

## 制冷与低温测试技术习题含解答

- 1、材料 R 的低温比热测量中，采用直流加热电阻法计算电功率。已得一组加热器的加热电流（mA）和加热电压（V）数据，用莱伊特准则剔除坏值，求功率测量标准误差。

I	100.4	100.3	100.4	100.3	100.5	100.4	100.08	100.8	100.4	100.3
	0.01	-0.09	0.01	-0.09	0.11	0.01	-0.31	0.41	0.01	-0.09
U	20.40	20.05	20.04	20.05	20.03	18.00	20.04	20.05	20.04	20.05
	0.52	0.17	0.16	0.17	0.15	-1.88	0.16	0.17	0.16	0.17

解：1) 先求测量的真值，即 10 次测量的平均值

对电流 I:

$$M_I = \frac{\sum_{i=1}^{10} I_i}{10} = 100.39,$$

则标准误差

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (I_i - M_I)^2}{10-1}} = 0.18$$

由莱伊特准则：

$$3\sigma_I = 0.54,$$

可知上述电流测量无坏值。

由格拉布斯准则：

$$K_G = \lambda(\alpha, n)\sigma = \lambda(0.01, 10)\sigma_I = 2.41 \times 0.18 = 0.44,$$

也可知上述电流测量无坏值。

由于  $\bar{\sigma}_I = \frac{\sigma_I}{\sqrt{n}} = \frac{0.18}{\sqrt{10}} = 0.058$  由标准误差求算术平均值误差

为此，电流测量结果可表示为：

正态分布：  $\mu_I = M_I \pm 3\bar{\sigma}_I = 100.39 \pm 0.17 \text{ mA}$ （置信度为 99.7%）

t 分布:  $\mu_I = M_I \pm 3.17\bar{\sigma}_I = 100.39 \pm 0.18 \text{ mA}$  (置信度为 99%)

对电压 U:

$$M_U = \frac{\sum_{i=1}^{10} U_i}{10} = 19.88,$$

则标准误差

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (U_i - M_U)^2}{10-1}} = 0.67$$

由莱伊特准则:

$$3\sigma_U = 2.01,$$

可知上述电压测量无坏值。

由格拉布斯准则:

$$K_G = \lambda(\alpha, n)\sigma = \lambda(0.01, 10)\sigma_I = 2.41 \times 0.67 = 1.61,$$

也可知上述电压值 18.00 是坏值, 需要予以剔除。

第二次计算,

$$M_U = \frac{\sum_{i=1}^9 U_i}{9} = 20.08,$$

则标准误差

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (U_i - M_U)^2}{9-1}} = 0.12$$

由莱伊特准则:

$$3\sigma_U = 0.36,$$

可知上述电压测量无坏值。

由格拉布斯准则:

$$K_G = \lambda(\alpha, n)\sigma = \lambda(0.01, 9)\sigma_I = 2.32 \times 0.12 = 0.27,$$

也可知上述电压值 20.40 是坏值, 需要予以剔除。

第三次计算,

$$M_U = \frac{\sum_{i=1}^8 U_i}{8} = 20.04,$$

则标准误差

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (U_i - M_U)^2}{8-1}} = 0.008$$

由莱伊特准则：

$$3\sigma_U = 0.024,$$

可知上述电压测量无坏值。

由格拉布斯准则：

$$K_G = \lambda(\alpha, n)\sigma = \lambda(0.01, 8)\sigma_I = 2.22 \times 0.008 = 0.019,$$

可知，此时上述电压值无异常数据。

$$\bar{\sigma}_U = \frac{\sigma_U}{\sqrt{n}} = \frac{0.008}{\sqrt{10}} = 0.003$$

为此，电压测量结果可表示为：

$$\text{正态分布： } \mu_U = M_U \pm 3\bar{\sigma}_U = 20.04 \pm 0.01 \text{ V (置信度为 99.7\%)} \\$$

$$\text{t 分布： } \mu_U = M_U \pm 3.36\bar{\sigma}_U = 20.04 \pm 0.01 \text{ V (置信度为 99\%)} \\$$

2) 因为功率  $P = U \times I$ ，功率测量的标准误差可由 1-39 得：

$$\sigma_P = \sqrt{M_I^2 \times \bar{\sigma}_U^2 + M_U^2 \times \bar{\sigma}_I^2} = \sqrt{100.39^2 \times 0.003^2 + 20.04^2 \times 0.058^2} \times 10^{-3} = 1.2007 \times 10^{-3}$$

$$M_P = M_I \times M_U = 100.39 \times 10^{-3} \times 20.04 = 2.0118 \text{ W}$$

测量结果用标准误差可表示为  $\mu_P = M_P \pm \sigma_P = 2.0118 \pm 0.0012 \text{ W}$  (置信度为 68.2%)

选用置信

2、功率测量用的电流表(0-0.5A)为 0.2 级，电压表(0-50V)为 0.2 级，功率测量结果。用置信概率为 99.7%总不确定度 ( $M \pm U$ ) 来表示。

解：系统误差为：

$$\text{仪表的基本误差分别为 } \delta_I = 0.5 \times 0.2\% = 0.001 \text{ A}, \quad \delta_U = 50 \times 0.2\% = 0.1 \text{ V}$$

置信系数由题可知为  $Z=3$ ，由  $\sigma' = \frac{e}{Z}$  (p15)，得  $\sigma' = \frac{e}{Z}$ ，

$$\text{所以， } \sigma'_I = \frac{0.001}{3}, \quad \sigma'_U = \frac{0.1}{3}$$

$$\sigma'_P = \sqrt{M_I^2 \times \sigma_U^2 + M_U^2 \times \sigma_I^2} = \sqrt{0.5^2 \times \left(\frac{0.1}{3}\right)^2 + 50^2 \times \left(\frac{0.001}{3}\right)^2} = 23.57 \times 10^{-3} \text{ M 用量}$$

程。得到系统误差。置信系数为 1

$$\text{总不确定度 } U: \quad U = \pm Z \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma'_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\sigma_i)^2} \quad (1-49)$$

$$\text{得 } U = \pm 3 \sqrt{(\sigma'_P)^2 + (\sigma_P)^2} = \pm 3 \sqrt{23.57^2 + 1.2^2} \times 10^{-3} = 0.0708$$

测量结果可表示为  $\mu_P = M_P \pm U = 2.0118 \pm 0.0708 \text{ W}$  (置信度为 99.7%)

先传递，求出功率的标准误差和系统误差，再根据置信系数综合。

## 第二章 温度

## 1. 气体温度计:

气体温度计的最主要优点是**直接给出热力学温度**，只要在两个已知温度下定标，其他温度均可测量其压力而得到。尤其是在 3.0K~24.5561K 之间温度，《ITS-90》规定作为**基准温度计**。

气体温度计能**测量很宽的温度范围**，不受磁场的影响，本身也不会发热。但它也有缺点，主要是**使用不方便**，测温包体积大，热容也大，压力计与温包之间用毛细管连接，平衡时间长(要数分钟)反应慢。

实用上，常用作**标定其他次级温度计的基准温度计使用**。

按照测量精度由低到高，温度计量体系可以分为三个层级。最低层级的是**应用级**，例如体温计和工业传感器。中间层级被称为**“标准”温度计**，可以为应用级温度计校准。最高层级则被称为**“基准”温度计**，它是具有最高准确度的测温装置，是温度量值体系的“源头”和“基石”，向下可以校准“标准”温度计，向外可以输出数据形成国际温标，是国家科技水平和综合国力的象征之一。

蒸汽压温度计:

纯物质的饱和蒸汽压  $P_v$  和温度之间具有一一对应的关系

氮、氢和氦的蒸汽压温度计灵敏度分别为 80、88、225 和 720 mmHg/K (见表 2-10)，如压力测量精确到 1mmHg，在液氮温度下可精确到 0.001K，因此**灵敏度高是蒸汽压温度计的一个优点**，另外，**蒸汽压温度计与气体温度计相比**，它的测温包可以做得小些，并且不必进行繁锁的各项修正。缺点是适用温区较窄，一般在液体三相点和正常沸点之间。

## 2. 电阻温度计

‘ITS-90’规定：铂电阻温度计为 13.8033K~961.78 摄氏度温区的标准测温仪器，随着温度的降低，铂电阻温度计电阻值和灵敏度不断减小，以致在 13.80K 以下不能作标准仪器应用，如改用**铑铁合金电阻温度计**，其下限可延伸到 0.1K，与之相反，**半导体温度计具有负的温度系数**，而且在一定温度范围内近似指数关系。它在低温下有高灵敏度。

电阻温度计的特点：测温精确度高、灵敏度高、稳定性好、信号输出大，便于测量和远传，和它配套的仪表也比较成熟，是目前温度测量中主要温度计。

金属电阻温度计:

### 1) 特点

通常可用马西森(Matthiessen)法则表示： $R = R_r + R_i(T)$

式中  $R_r$  为剩余电阻，导体中电子被杂质散射引起的，它和温度无关，决定于金属的纯度；

$R_i(T)$  为理想电阻，电子被晶格热振动散射引起的，它和温度有关。温度较高时，晶格振动大，散射电子能力大，电阻也大，

$$T > \theta_D / 2; \quad R \approx R_i(T) \propto T$$

$$T < \theta_D / 10; \quad R_i(T) \propto T^n \quad 2 < n < 5$$

在  $T$  为德拜温度  $\theta_D$  几十分之一的低温下，与  $T$  无关，只依赖于杂质和缺陷的种类和数量，可用来衡量金属的纯度。

电阻温度计的纯金属必须具备如下的性质：

- 较高温度时，电阻尽可能与温度成线性关系，这会使定标方程修正工作变得简单。



- 金属的德拜温度  $\theta_D$  尽可能低，以使在较低温度下仍有较高灵敏度。（铂的=225K，13K 附近  $\alpha$  大）
- 金属必须很纯，在很大温区范围内可消除杂质对  $R_r$  的影响。
- 必须有好的化学惰性和高的电阻稳定性，定标方程校正一次可以使用很久，且不受冷热反复的影响。（铂的物理化学稳定性很好）
- 易于机械加工，可以拉丝和绕成所需要的形状

**电阻的温度系数**，是指当温度每升高一度时，电阻增大的百分数。例如，铂的温度系数是  $0.00374/^\circ\text{C}$ 。它是一个百分数。在  $20^\circ\text{C}$  时，一个 1000 欧的铂电阻，当温度升高到  $21^\circ\text{C}$  时，

它的电阻将变化 3.74 欧姆，为 1003.74 欧。
$$\alpha = \frac{dR/R}{dT} = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

- ◆ **金属铂**满足了大部分的要求， $\theta_D=225\text{K}$ ，直到 13K 附近仍有较大的电阻温度系数，铂的纯度可达 99.999% 以上， $W(\text{Ga}) \geq 1.11807$ ，物理化学稳定性很好，因此国际权度大会决定采用铂电阻温度计作为标准的测温仪器之一。
- ◆ 钢的德拜温度为  $\theta_D=110\text{K}$ ，比铂要低得多，因此用超纯钢制成的温度计在低温下有高的灵敏度，这种温度计在 4.2-15K 范围内相对灵敏度比铂高十倍，可以用到金属钢超导转变温度 (3.4K) 附近。**在低温下钢的晶格振动相当平稳。钢有较低的德拜特性温度。钢可以得到很高的纯度。**可在 4.2~290K 的温度范围测量。由于钢的熔点为  $156.5985^\circ\text{C}$ ，所以对钢来说室温已经是相当高了。钢电阻温度计经过五次液氢 (或液氦) 至室温间的冷热循环后  $R(0^\circ\text{C})$  值就稳定了。尽管钢有质软、易变形、难以拉成细丝、晶体结构上有些各向异性等缺点，但仍具有作为温度计要求的复现性。钢作为测温元件还有一个严重的缺点，就是用同一轴钢丝制成的钢电阻温度计电阻值相差很大，因此不能普遍使用。钢电阻温度计只能用作工业上的测量，不可能作为标准温度计。
- ◆ 铜的德拜温度比较高 ( $\theta_D=310\text{K}$ )，也容易提纯，在室温下电阻温度系数也比较大，一般在  $-50^\circ\text{C}$  至  $+200^\circ\text{C}$  几乎成线性关系，价格便宜，工业和实验室用的铜电阻温度计已能测到  $-200^\circ\text{C}$ 。但在高温时易氧化，限制了较高温度下的使用，在低温下灵敏度较低、电阻率较小 ( $\rho=0.017\text{ mm}^2/\text{m}$ ) 要绕成一定值的电阻，体积较大。因此它的普通使用范围为  $-50^\circ\text{C} \sim +100^\circ\text{C}$ 。
- ◆ 在铈、铂等贵金属中加入微量的铁、钴等磁性金属，在极低温度下其电阻与温度关系会表现出与纯金属稍有不同的特性。微量杂质的作用使合金具有很大的正电阻温度系数。发现含 0.5% 原子比的铁的铈铁合金在 20K 以下一直到 0.3K 有很好的线性关系。因此，铈铁合金可以制成一种很有用的低温温度计，其使用范围从室温往下延伸至 0.5K。特别是在 0.5K 至 20K 的温度范围比铂电阻温度计优越。铈铁电阻温度计在低温工程和实验室中普遍使用。

**磁场对铈铁温度计影响较大。铈铁电阻温度计的长期稳定性较差。即使是用同一批材料做的两个温度计，其电阻比也不是完全相同的。**

- ◆ 而半导体温度计则相反，在一定温度范围内其值随温度的下降反而上升，近似地成指数关系，温度降低  $\alpha$  增大，并且电阻值大，易于测量，对测量仪表要求可以降低，因此，在 20K 以下半导体温度计用得比较广泛，另一个优点，**半导体温度计可以做得很小，热容也小**，最常用的要算**锗电阻温度计**了。锗电阻温度计使用范围从  $0.015\text{K} \sim 100\text{K}$  温区，在 10K 以下灵敏度很高，30-40K 以上灵敏度较低，30K 以上测温一般仍使用铂电阻温度计，锗电阻温度计电阻-温度关系很复杂但**重复性很好**，仔细研制的锗电阻温度计稳定性在 7mK 以内。**锗电阻温度计受磁场影响较大 (半导体温度计受磁场影响都较大!)**，由于温度计在低温下阻值大，测量时要注意测量电流引起温度计的自热，1K 时用 0.5 微安，20K 时用 100 微安 A，功率损耗在 10-7W 左右。



- ◆ **(重点)**严格地说,碳电阻不是半导体,但这种温度计具有半导体那样的**负温度系数**,实际上,石墨晶体具有很强的各向异性,沿六角轴方向上为导电性质差的金属,而垂直六角轴主向为半导体,碳电阻由微小石墨颗粒(200 目左右-200 颗/cm<sup>2</sup>)压紧后烧结而成,杂质以及颗粒间接触对温度计性质有很大影响,它的主要缺点是不稳定性,经过低温到高温冷热循环后,阻值会发生变化,下次使用应重新分度,但碳电阻有突出的优点,仍广泛地用于低温测量。虽然使用一次要校正一次,但它的 R-T 关系比较简单,只要校正 1 到 3 个点即可,对于 Allen-Bradley 碳电阻可用下式表示。

$$\log R + k / \log R = A + B/T$$

式中 K、A、B 可用氢沸点, 4He 和  $\lambda$  点

来确定,其精度可达 0.5%,受**磁场影响小,制作简单,但热导性差**,无线电的碳电阻元件常常封在磁壳里,不利于传热,我们可将它磨去,然后绕上绝缘铜线,并用漆固定,将铜线的一端焊到装置上,传热就会得到改善。

- ◆ **热敏电阻温度计**: 采用铜, 锰金属和各种过渡金属氧化物 (Mn Ni Cu Fe Co) 作原料在高温下烧结的**多晶半导体**; 低温用热敏电阻温度计**磁场灵敏度小,价格便宜,热接触较好,但复现性差,使用温区窄**。作控温和液面测量用。
- ◆ **Cernox 温度计**: Lakeshore 公司生产,对**磁场不敏感**,可以最低温度 0.1K,最高到室温,性能优于锗电阻温度计
- ◆ **负温度系数**: 碳玻璃, Cernox, 氧化铷, 碳电阻, 锗电阻, 热敏电阻 (低温下适用)
- ◆ **正温度系数**: 铂电阻, 铑铁电阻, 铂钴电阻
- ◆ **对磁场敏感**: 铑铁温度计; 锗电阻温度计; 半导体温度计
- ◆ **对磁场不敏感**: 碳电阻温度计, Cernox, 热敏电阻温度计, 气体温度计, 半导体二极管温度计, 电容温度计

## 2-3 热电偶温度计

原理: 塞贝克效应

T 越高, 接触电势越大。nA: 温度 T 时的电子密度两种导体自由电子密度的比值越大, 接触电势越大

温差电势: 当导线两端的温度不同时会产生热电势。设  $T > T_0$ , 则在导体两端之间的温差电动势

温差电势与接触电阻比小得多, 可以忽略不计。

- ◆ **均匀导体定律**: 有一种均匀介质组成的闭合回路各处温度不同也不会产生热电势。无论其截面积, 长度及其温度分布。

推论: 热电偶回路热电势的大小, 只与组成热电偶的材料和材料两端连接点处的温度有关, 与热电偶丝的直径、长度及沿程温度分布无关。

只有用两种不同性质的材料才能组成热电偶, 相同材料组成的闭合回路不会产生热电势

热电偶必须由两种不同性质的材料组成, 如果在温度梯度下一种材料组成的回路产生了热电势, 说明这种材料是不均匀的 (化学成分、组织结构、内应力或截面), 据此, 可以检查偶线材料的均匀性 (检查铜线的均匀性)

- ◆ **中间导体定律**: 在热电偶回路中插入第三种 (或多种) 均质材料, 只要所插入的材料两端连接点温度相同, 则所插入的第三种材料不影响原回路的热电势

推论: 仪表不影响结果, 不仅可以焊接, 也可以使用均匀导体连接。

- ◆ **中间温度定律：**两种不同材料 A 和 B 组成的热电偶回路，其接点温度分别为  $t$  和  $t_0$  时的热电势  $E_{AB}(t, t_0)$  等于热电偶在连接点温度为  $(t, t_n)$  和  $(t_n, t_0)$  时相应的热电势  $E_{AB}(t, t_n)$  和  $E_{AB}(t_n, t_0)$  的代数和，其中  $t_n$  为中间温度。
- ◆ **连接导体定律：**在热电偶回路中，如果热电偶的电极材料 A 和 B 分别与连接导线 A' 和 B' 相连接，各有关接点温度为  $t$ ， $t_n$  和  $t_0$ ，那么回路的总热电势等于热电偶两端处于  $t$  和  $t_n$  温度条件下的热电势  $E_{AB}(t, t_n)$  与连接导线 A' 和 B' 两端处于  $t_n$  和  $t_0$  温度条件的热电势  $E_{A'B'}(t_n, t_0)$  的代数和。

**中间温度定律和连接导体定律**是工业热电偶测温中应用补偿导线的理论依据。

热电偶的长度一般为几十厘米至一、二米，因而参考端离被测对象很近。补偿导线的作用是将热电偶的参考端延伸到远离热源或环境温度较恒定的地方，这是普通连接导线所做不到的。

好处：1 降低成本；2 改善热电偶的机械与物理性能。

- ◆ **标准电极定律：**两种导体 A、B 分别与参考电极 C（或称标准电极）组成热电偶，如果它们所产生的热电势为已知，那么，A 与 B 两热电极配对后的热电势可按下式求得：

大大简化选配工作。

热电偶测量回路：自己画一遍。

采用两只同型号的热电偶反向串联，同时配用相同的补偿导线，这时仪表就可测得两点的温差。

和差平均

热电偶参考点补偿:

1 冷端恒温补偿冰水混合物

2 参考端温度自动补偿

电桥自己分析画出

## ◆ 半导体二极管温度计：

原理：二极管正向电压随温度的降低而增加的原理。

优点：1、1-100K 的温度范围测量；2、和半导体温度计和电阻温度计相比，**受磁场影响小**；3、易得；4、价格便宜；

缺点：复现性差；体积大；不能做点的温度测量。

## ◆ 电容温度计

优点：对**磁场不敏感**，灵敏度高，自热效应小，响应时间快；机械性能好

缺点：稳定性不好；存在瞬时电容偏移。

## 2-5 温度计与温标

温度：国际单位制基本物理量之一，表征物体冷热程度的一个物理量，是物体内分子运动平均动能的量度。

温度只能借助测量物质的某些性质求得，这些随温度而变化的性质称为测温参数，具有这种测温参数的物质称为测温物质。

按热力学第零定律(热平衡定律)，任何与第三个物体处于热平衡的两个物体，它们之间也处于平衡，即这两个物体具有相同的温度，我们可以选择具有温度特性的物质作为热平衡中第三物质——温度计使用。

温标：温度的数值表示法，包含了如下的三部分内容：

- 1) **温标必须含有温度特性的测温元件——温度计**，
- 2) **温标必须包含一些参考点温度**，这是为了各国都能复现这温度点，常把某些纯物质特性温度，如凝固点、熔点、沸点、三相点相转变温度，定作固定点参考温度。只要纯度达到，其特性温度各地相差不大，而且都能复现。(标准的制定)
- 3) **温标的第三个要素是温度的数学表示法，即温度和参数关系式**，并按不同的温度计规定不同的测温单位，(即度的含义)。如气体温度计，测温单位是压力/K，可用 Pa/K 表示，电阻温度计用  $\Omega/K$  表示，热电偶温度计用 mV/K 表示。

热力学温标：由开尔文(Kelvin)根据热力学定律提出来的，因此又称开氏温标。是建立在卡诺循环基础上的理想温标。可由气体温度计来实现。国际权度大会规定，热力学温标为基本温标，热力学温度为 T，单位是开尔文(简称开)，符号 K，又规定热力学温标和一个定义固定点温度是水的三相点温度，为 273.16K，K 一度(T /K)等于三相点热力学温度的 1/273.16，把水三相点作为热力学温度的基本固定点是为了照顾摄氏温标的习惯。因此水的三相点为 0.01 摄氏度。

**温区及其标准温度计：(重点)****1) 0.65K 5.0K,  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  蒸气压温度计**

0.65K 3.2K,  $^3\text{He}$  蒸气压温度计；

ii) 1.25K 2.1768K ( $\lambda$  点),  $^4\text{He}$  蒸气压温度计；

iii) 2.1768K 5.0K  $^4\text{He}$  蒸气压温度计

这种温度计是一种在封闭的容器内存有气液两相系饱和蒸汽压的测温仪器，复现性为 (1-0.1) mK。

$^3\text{He}$  在 0.5K 时相应的压力为 100Pa，低于此压力时，因热分子压力的修正等原因引起的误差将大于 0.5mK。

**2) 3.0K 至氦三相点(24.5561K)，气体温度计**

在这个温度范围内， $T_{90}$  可由  $^3\text{He}$  或  $^4\text{He}$  **恒容气体温度计** 来确定，并且三个温度点标定，这三个温度点分别为氦三相点(24.5561K)，平衡氢三相点(13.8033K)以及 3~5K 之间一个温度点可由  $^3\text{He}$  或  $^4\text{He}$  蒸气压温度计来确定。

T90 的可靠性依赖于合理的设计和温泡中气体密度，通常能达到 0.1mK 准确度。3.0K-4.2K 之间使用  $^3\text{He}$  气体温度计和在 3.0-24.5561K 之间使用的  $^4\text{He}$  气体温度计时，必须考虑气体的非理想型

### 3) 平衡氢三相点 (13.8033K) 至银凝固点 (1234.93K)；

这个范围内“T90”的**标准测温工具铂电阻温度计**，它在确定一系列定义固定点，并使用偏差函数可以内插固定点以外的任何温度。

在 13.8033K - 1234.93K 温度范围内，没有一支单一铂电阻温度计能使用并保持高正确性，因此不同结构铂电阻温度计能适用于不同的温度范围

## 第三章 压力和真空的测量

### ◆ 电阻式压力变送器（出计算题）

原理：导体在机械变形时，电阻值发生变化，叫“应变效应”

$$R = \rho L / S$$

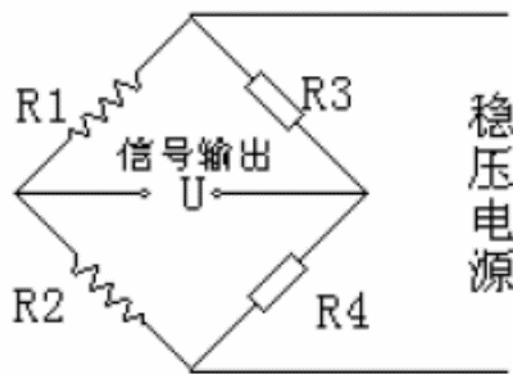
分类：金属应变片（丝式应变片）

膜片式应变片，金属材料或半导体材料制成膜片

箔式应变片，应变电阻用光刻技术分布于整个膜片上

半导体膜片，扩散型单晶硅感压电阻膜，硼杂质扩散在硅的深处，形成 P 型区（灵敏度系数 60-170，频率相应高，温度系数大）

有两种类型：一类是利用半导体材料的体电阻做成应变片，粘贴在测压的弹性元件或悬臂梁上，作为应变—电阻的交换元件，称为**粘贴型压阻式变送器**；另一类是在半导体材料的基片上用集成电路工艺扩散电阻，既作为压力测量敏感元件，又作为应变—电阻变换元件，称为**扩散型压阻式变送器**。由于所使用的半导体为单晶硅，所以也称为**扩散硅式变送器**。



低温下测量，注意电阻温度系数的影响！

原理：  $R_1 = R_2$

$\Delta R_1$  包含了压力和温度变化引起的电阻变化：

$\Delta R_2$  只包含了温度变化引起的电阻变化：

两者相减，最后只剩下压力引起的电阻变化。

$$U_0 = \frac{U_{AC}}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

### ◆ 真空计：三类真空计的测量范围

真空 — 压力低于一个大气压的负压，习惯上称为真空。

真空计 — 用来测量真空的仪器叫真空计。

真空计分两大类：

**绝对真空计：**直接测量气体的压强。如 U 型水银真空计；**压缩式真空计（麦氏真空计）。**

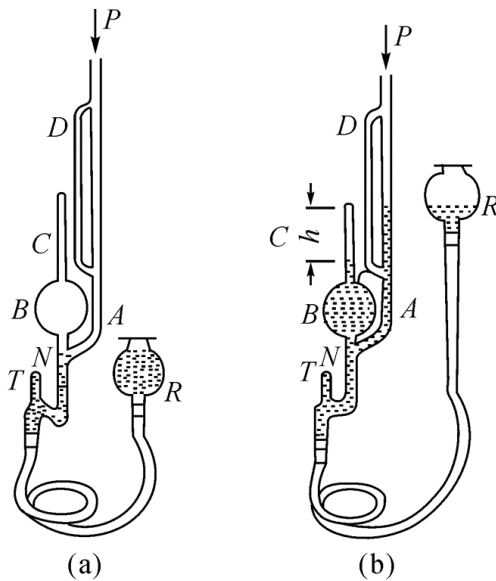
**相对真空计：**通过与压强有关的物理量来间接测量压强。如**热偶式真空计**；**电离式真空计**。

### 1、压缩式真空计：麦氏真空计

原理：被测气体进行压缩后仍符合波义耳定律，根据开闭管内汞柱高度及麦氏计的几何尺寸推算出被测气体的压强

#### 1) 结构

硬质玻璃吹制而成。



A 管是一根开管，与被测真空系统相连。

B 管为已知容积的玻璃泡。

C 管、D 管为相同内径的两根毛细管。

N 为 A 管及 B 管的交叉口

R 为汞贮存器，用橡皮管与 N 相连。

**T 为气阱，使橡皮管内可能存在的气泡不致升入 A 或 B 中。**

**故压缩式真空计的测量范围：10<sup>-1</sup>~10<sup>-6</sup> 托。1 托=133.3 帕**

### 2、热偶计—热电偶式真空计，用到电阻丝与流体传热能力的变化

在低压下，气体的导热性和压强有关。

压强高则真空度低，分子密度大，则气体的导热就好。

压强低则真空度就高，分子密度小，则气体的导热就差。

利用气体导热性与真空度有关的这一特性制成的真空计，称为热偶式真空计。

高真空区热偶式真空计不能测量

优点：

可以测量气体和蒸汽的压强；

把真空度转换为电信号，便于测量和控制。

缺点：1) 测量的真空度不高 (10<sup>-1</sup>~10<sup>-4</sup> torr)。

2) 怕振动。

### 3、电离式真空计

热阴极：10<sup>-3</sup>~10<sup>-8</sup> mmHg

测量高真空，不怕振动；气体电离与气体种类有关；气压高时，灯丝温度高，和元件会吸收气体；漏气时，灯丝烧坏。

冷阴极：当 <10<sup>-7</sup> torr，不稳定和不激发现象，因此测量范围：10<sup>-3</sup>~10<sup>-6</sup>mmHg



可连续测量真空度；不怕振动；不会有热阴极相关的缺点；

## 第四章 流量测量

要点：几种流量计压力损失对比；各类流量计测量原理；流量计的修正；少量气泡测量；科式流量计，科室里表达式

### ◆ 流量计分类：

差压式流量计：以流过不同横截面积的流道时的压降作为测量依据。孔板式、文氏管、平衡流量计

容积式流量计：以单位时间内所排出的流体的固定容积的数目作为测量依据。椭圆齿轮流量计、腰式流量计。

速度式流量计：以测量流体在管道内的流速作为测量依据来计算流量。涡轮流量计、电磁流量计、超声波流量计

### ◆ 容积式流量计，椭圆齿轮流量计。

原理：在压差作用下，两个椭圆形齿轮相互啮合，排出容积。可以直接通过减速齿轮带动仪表面板指针。也可以通过电磁装置变成电脉冲传给电磁计数器。

特点：1. 精度高，作为标准表；黏度小会有流体泄露，不建议测量液体；有允许的最低流量值；流量也不能过大；工作温度合适，不能有固体。

腰轮流量计：可测量气体

### ◆ 涡轮流量计

原理：流体冲击叶片时的作用力与流量，密度，速度成正比。推动涡轮旋转，感应线圈输出的脉冲频率与容积流量成线性关系。流量小，K 值小，流量大，K 值接近不变。

优点：能指示瞬时流量和累计流量；便于制成数字式仪表；测量精度高，刻度线性，反应快；**坚固耐用高温高压低温下使用。**

**缺点：**清洁度要求高，**低温时可能被冻住。**

**安装要求：**顺平垂直不可互换；前后必须是直管，前 15D，后 5D. 前方要装滤网。

**压力要大于一定的值；温度的影响热胀冷缩，注意水标定了液氮不能使用，夏冬季测量有误差。粘度越大，线性范围越小。**

### ◆ 电磁流量计：LD（**气泡小于 10%**）适用

原理：管道内部有一对电极；外部有一对磁极；导电的流体在磁场中做垂直方向的流动切割磁力线产生感应电动势。

优点：**压力损失小**，适用于有杂质和腐蚀性液体，不受流体物理性质影响；反应快，可测脉动流。

缺点：信号弱，**易受外界干扰**，复杂成本高；流体必须导电，可以测液氮和水

### ◆ 超声波流量计：

原理：超声波在流体中运动时，会携带流体流速的信息，对收到的超声波信号进行分析计算，可以检测流速。**由于水和低温流体声速  $c$  的不同，超声波流量计不能通用，需要重新标定。**

优点：**压力损失小，对流速无影响，能穿透金属**；应用范围广；线性关系，便于刻度和小流量测量、；会受气体杂音干扰；结构复杂，成本高；**难以测量低温流体，低温流体真空。**

**传播速度差法：**测量超声波脉冲在顺流和逆流传播过程中的速度之差，得到被测流体的流速。根据测量的物理量的不同，分为：

时差法(测量顺、逆流传播时由于超声波传播速度不同而引起的时间差)、

相差法(测量超声波在顺、逆流中传播的相位差)

频差法(测量顺、逆流情况下超声脉冲的循环频率差)。

- ◆ 速度头流量计：皮托管，利用压差测中心速度。

安装：测量点应位于均匀流段，上、下游各有 50d 直管距离。皮托管管口截面严格垂直于流动方向（<16 度）总压孔直径不能小于 1mm。只能测量单相流体。

- ◆ 靶式流量计：高粘度，低雷诺数。

测量元件是垂直于流量方向的靶的圆板，通过测量施加在靶子上的力实现流量测量

- ◆ 转子流量计：恒压差变截面，利用压差与浮力平衡得到流量与转子高度的关系。

优点：量程比（10:1）比差压式（3:1）大，量程较大；压降小；反应快；必须垂直安装；可测量腐蚀性介质流量。

缺点：不耐压；不能粘附污垢；非标准化仪表，单独标定（水，标准状态下测量）；不能测高粘度；不能测脉动量。

### 密度修正；液体介质种类修正

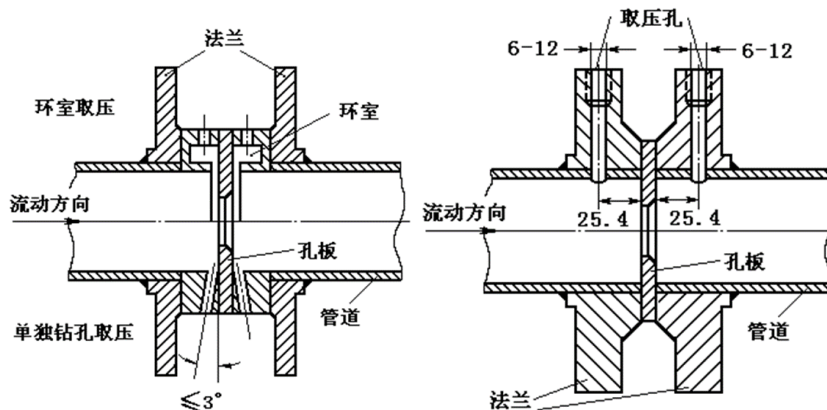
- ◆ 涡街流量计：

原理：当旋涡在圆柱体下游侧产生时，出于升力的作用，使得圆柱体下方的压力比上方高一些，圆柱体下方的流体在上下压力差的作用下，从圆柱体下方导压孔进入空腔，通过隔板中央部分的小孔，流过铂电阻丝，从上方导压孔流出。如果将铂电阻丝加热到高于流体温度的某温度值，则当流体流过铂电阻丝时，就会带走热量，改变其温度，也即改变其电阻值。当圆柱体上方产生一个旋涡时，则流体从上导压孔进入，由下导压孔流出，又一次通过铂电阻丝，又改变一次它的电阻值。由此可知：电阻值变化与流动变化相对应，也既与旋涡的频率相对应。所以，可由检测铂电阻丝电阻变化频率得到涡频率，进而得到流量值。

- ◆ 孔板流量计—节流式流量计

原理：利用流体经过节流装置后的压力差实现流量测量。

取压方法：理论取压（1D，未定）、角接取压（广泛采用）、法兰取压（其次广泛，25.4mm）、径距取压（1D，0.5D）、损失取压。法兰取压简单但精度低于角接取压。



- ◆ 文丘里流量计：差压式流量计；能量损失小，造价高，压损低

- ◆ 平衡器流量计：

优点：精度好；压损低；直管段短，上游 2D，下游 2D

- ◆ 科里奥利质量流量计

原理：当一个位于旋转系的质点作朝向或者离开旋转中心的运动时，将产生一个惯性力。

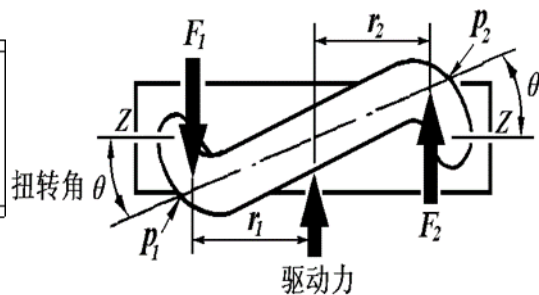
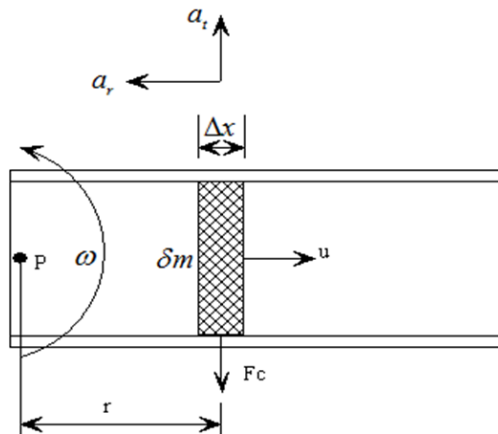
1、法向加速度  $a_r = \omega^2 r$  (向心加速度), 方向指向 P 点

2、切向加速度  $a_t = 2\omega u$  (科里奥利加速度), 方向与  $a_r$  垂直。为了平衡科里奥利加速度  $a_t$ ,

需在  $a_t$  方向加一个大小等于  $2\omega u \delta m$  的力, (来自管道壁面)。反作用于管道壁面的力就是流体施加在管道上的科里奥利力  $F_c = 2\omega u \delta m$ 。

$$\Delta F_c = 2\omega u \rho A \Delta x$$

$$\Delta F_c = 2\omega q_m \Delta x$$



U形管的振动可视为O-O为轴的瞬时转动, 转动角速度为 $\omega$ , 若流体质量为 $m$ , 则其上所作用的科里奥利力为

$$F = 2m\omega \times u$$

式中 $F$ ,  $\omega$ ,  $u$ , 均为矢量, 是按正弦规律变化的。

U形管所受扭矩为  $M = F_1 r_1 + F_2 r_2 = 2Fr = 4m\omega ur$

$$r_1 = r_2 = r$$

$$F_1 = F_2 = F = |F|$$

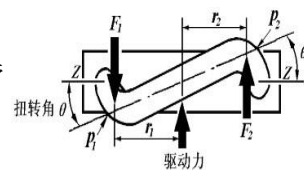
因为质量流量和流速可分别写为:  $q_m = m/t$   $u = L/t$

$$M = 4\omega r L q_m$$

设U型管的扭转弹性模量为 $K_s$ , 在扭转力 $M$ 作用下, U形管产生扭转角 $\theta$ , 故有:

$$M = K_s \theta$$

$$\text{由上两式得 } q_m = \frac{K_s \theta}{4\omega r L} \quad (1)$$



U型管在振过程中,  $\theta$ 角是不断变化的, 并在管端越过振动中心位置Z-Z时达到最大, 若流量稳定, 则最大角 $\theta_{max}$ 是不变。由于 $\theta$ 角的存在, 两直端P1,P2将不能同时越过中心位置Z-Z, 而存在时间差 $\Delta t$ ,

$$\Delta t = \frac{2r \sin \theta}{u_p} = \frac{2r \theta}{\omega L} \Rightarrow \theta = \frac{\omega L}{2r} \Delta t \quad (2) \quad q_m = \frac{K_s}{8r^2} \Delta t$$

#### ◆ 两相流 (10%气泡)

当液体中含有少量 (一般体积含量 $<10\%$ ) 气体时, 气体在液体中的分布呈微小气泡状, 这时, 电磁流量计仍能正常工作, 只是所测得的为气液混合物的体积流量。

科式流量计: 1%无明显影响

超声流量计: 测量性能差

## 变液位流量计

## ◆ 低温流体测量:

孔板: 应用最多, 可靠性高

涡街: 压力损失小, 容易累计计算

涡轮: 用涡轮流量计测量极低温流体时, 最容易发生的故障是因仪表的压力损失而引起的急剧蒸发。间断使用: 仪表容量的 70% 一下; 连续使用 50%。

科式流量计: 精度最高

介电常数法测体积含量。

## 第五章 液位的测量

## ● 差压式液面计(汉普逊液面计)

原理: 利用贮槽中的液体和气体密度不同而形成压力差, 这种差值与液体的高度成正比。

应用场合: 液化器和大中型固定低温液体贮槽中常用

注意点: 差压液面计的垂直液相管内不能积存液体

优点: 结构简单; 连续指示液面高度; 采用不同密度的指示液, 改变指示液高度

缺点: 漏热较大, 有时气液两细管会冻结; 贮液槽压力过高会使压力计中指示液冲出, 只适合液化和分离设备或低温贮槽。测量动态液面变化, 误差较大

## ● 电阻式液面计:

原理: 通过测量浸在被测流体中加热丝电阻值的大小, 来决定液位的高度。用一小电流对电阻液位计进行加热, 则电阻丝温度升高;  $T_{\text{电阻丝}} > T_{\text{流体}}$ , 则电阻丝要放热; 由于液体的换热系数  $>$  蒸汽的换热系数, 所以, 同一电阻丝在汽相部分和在液相部分的温度不同, 从而电阻丝在汽液中的电阻也不同, 则容器中的液面与电阻存在函数关系。

液位高, 电阻小, 液位低, 电阻大

## ● 超导式液面计(电阻式液面计的一种) 目前只能测量低温液体液位。

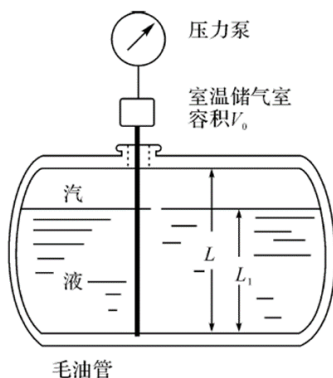
原理: 根据超导材料在低于临界温度时其阻值为零, 在高于临界温度时其电阻值恢复正常的原理制成液面计。

注意点: 超导线的选择: 选择超导线的临界温度力求做到远离被测液体温度(依变与被测液体来选择超导线材料)。避免液面波动影响测量误差。

## ● 电容式液面计

原理: 即利用传感元件(同心圆柱)在液体与蒸汽中介电常数不同的原理

## ● 热力学液面计: 当液体蒸发时, 其体积发生很大的变化, 从而产生压力的变化。



气体的总质量

$$m = m_l + m_g + m_0 = \rho_l V_l + \rho_g V_g + \rho_0 V_0$$

$$\text{也可写成: } m = \rho_l A_L L_l + \rho_g A_L L_g + \rho_0 V_0 =$$

$$A_L [(\rho_l - \rho_g) L_l + \rho_g L] + \rho_0 V_0$$

$$L = L_l + L_g$$

毛细管的总长,

浙江大学能源学院 —制冷与低温测试技术—

$$\frac{L_l}{L} = \frac{\left[ \frac{(m - \rho_0 V_0)}{A_l L} \right] - \rho_g}{\rho_l - \rho_g}$$

2) 毛细管内液相和气相的状态方程式:

$$P = Z \rho R T$$

$Z$  — 超压缩性系数      总质量:

$$Z = f(P, T) \quad m = \frac{P_0 V_0}{Z' R T_0} \left( 1 + \frac{A_0 L}{V_0} \right)$$

上页      下页

浙江大学能源学院 —制冷与低温测试技术—

3) 将压力 $P$ 代入上式的 $\rho$ 可得:

$$\frac{L_l}{L} = \frac{\left( \frac{m R T_l}{A_l L P} \right) - \left( V_0 - \frac{T_l}{Z_0 T_0 A_l L} \right) - \left( \frac{T_l}{Z_g T_g} \right)}{\frac{1}{Z_l} - \frac{T_l}{Z_g T_g}}$$

上式中, 液体温度 $T_l$  已知, 压力 $P$ 由压力计读取  
 $m$ 、 $R$ 、 $A_l$ 、 $L$  已知, 超压缩系数也能查到,  
 故液面高度 $L_l$  可求得。

上页      下页

注意点: 压力表内的压力不能低于贮槽内液体沸点对应的饱和压力, 否则毛细管气体不能冷凝, 液面计不能正常工作。也不能超过临界压力

灵敏度: 由于压缩系数 $Z$ 是压力的函数, 导致理论表达复杂。

制作的液面计要进行标定工作

● 其他方法:

1、**称重法**: 液氢的计量还是称重法

2、**浮力法**: 一般采用薄壁不锈钢管充以液化温度比被测液体更低的气体, 如测量液氢, 充以氦气, 也可密闭泡沫塑料作浮子。

3、**热传导法**: 对敞口杜瓦容器中的液氮液面测量, 常可用一根导热较差的塑料杆(如聚四氟乙烯)插入颈管内, 由于液体的热导率大于气体热导率, 浸在液体中的塑料杆温度很快降低, 而在汽相中杆子温度下降不多, 使杆在液体和气体中温度不同, 等几分钟把杆子暴露在空气中, 由于杆子冷, 空气中水汽杆子上凝结霜并有明显的分界面, 浸在液体中的杆子霜层厚度未浸入液体中的杆子霜层很薄甚至无霜, 由此可非常直观和方便地决定液面的高度。只能用于敞口容器

4、**喷液法**: 用一根不锈钢管(或管插入杜瓦瓶, 当不锈钢管口接触液体时马上使液体汽化, 这部分汽化的气体夹着小液滴从管口喷出。管子上提时, 喷液停止, 往下浸入液面, 喷液又发生, 非常灵敏。适用于敞口容器。

## 基于 ECT 技术的低温流体相分布反演成像理论与方法

原理: (多电极电容传感器) 电容层析成像法根据被测物质各相具有不同的介电常数, 当各相组分分布或浓度分布发生变化时, 将引起混合流体等价介电常数发生变化, 从而使测量电极对间的电容值发生变化, 在此基础上, 利用相应的图像重建算法重建被测物场的介电分布图, 从而“看到”容器内的相含率、相分布。

研究意义: 非侵入、非接触; 结构简单, 可靠性高, 成本低廉; 根据不同算法求到相分布及相含率, 二者可并行求解; 测量速率取决于电容采样速率及不同算法求解速度, 可达到 1KHz 以上; 弱电系统, 环境友好, 对人无害

- B——铂铑 30-铂铑 6
- R——铂铑 13-铂
- S——铂铑 10-铂
- K——镍铬-镍硅
- E——镍铬-铜镍 (康铜)
- J——铁-铜镍 (康铜)
- T——铜-康铜 (在低温下标准化) 导体均匀与否检测方法: 将线两端接在微伏计上, 让线逐段经过液氮槽, 微伏计上示数不超过两微伏, 即可认为均匀。