

1 基本概念&误差分析

• 李张硕 3220105765

• 复习题

• 1、查阅资料，了解中国的引力波计划。

- 中国的引力波计划主要包括以下几个项目：

- (1) “天琴计划”

- 牵头单位：中山大学
- 目标：在太空部署激光干涉仪，探测中低频引力波（频率范围：0.1 mHz - 1 Hz）。
- 计划阶段：
 - “天琴一号”技术验证卫星：于2019年12月成功发射，验证了关键技术。
 - “天琴二号”：计划进一步验证关键技术。
 - “天琴三号”：最终目标是发射三颗卫星组成等边三角形，形成空间引力波探测网络。
- 特点：与欧洲的LISA计划类似，但轨道设计不同，具有独特的科学目标。

- (2) “太极计划”

- 牵头单位：中国科学院
- 目标：在太空探测中低频引力波（频率范围：0.1 mHz - 1 Hz），与LISA计划频率范围相近。
- 计划阶段：
 - “太极一号”技术验证卫星：于2019年8月发射，成功验证了关键技术。
 - 后续计划：计划发射三颗卫星组成干涉仪，预计在2030年代实现科学探测。
- 特点：与欧洲LISA计划合作，同时保持独立研究能力。

- (3) 地面引力波探测

- 项目：中国还参与了地面引力波探测的研究，例如参与LIGO科学合作组织。
- 设施：中国正在建设自己的地面引力波探测设施，如阿里原初引力波探测计划（探测宇宙微波背景辐射中的引力波信号）。

• 2、什么是测量过程的三要素？

- 测量方法、测量单位和测量工具被称为**测量过程的三要素**

• 3、分析接触式测量和非接触测量的含义和优缺点。

- 接触测量法：测量仪表的传感器与被测对象接触，通过物理接触获取测量数据的测量方法
 - 例如：水银温度计测量温度时，感温包与被测对象接触

- 优点

- 精度高：由于直接接触，测量结果通常较为准确，尤其是在高精度测量中。
- 适用范围广：可用于多种形状和材质的物体测量。
- 稳定性好：受环境干扰较小，结果可靠。

- 缺点

- 可能损坏被测物体：易受被测介质腐蚀，对感温元件结构、性能要求苛刻。
- 测量速度慢：响应速度较慢（1~2min），可能会破坏温度场，不适于运动物体。

- 非接触测量法：仪表的传感器不直接与被测对象接触，通过光学、声学、电磁等方式获取测量数据的测量方法

- 例如：辐射温度计测量温度

- 优点

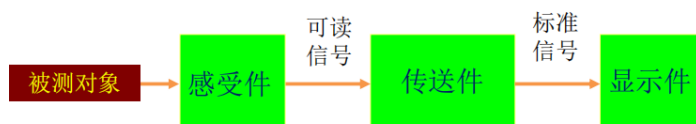
- 无接触损伤：不与被测物体接触，不改变被测物体的温度分布，热惯性小。
- 测量速度快：响应速度较快，约2~3s，可快速获取大量数据，适合自动化测量。

- 缺点

- 精度受环境影响：光线、温度、湿度等环境因素可能影响测量结果。
- 设备成本高：非接触测量仪器通常较为昂贵。
- 对表面特性敏感：透明、反光或粗糙表面可能影响测量效果。

- 4、测量仪表主要有哪三部分组成，各部分的作用是什么？

- 测量仪表主要由感受件、显示件、传送件组成



- 感受件：感受件直接与被测对象相联系，感受被测量的量值，并将感受到的被测量信号转换成相应的信号输出，也称为敏感元件、一次元件或发送器
- 显示件：仪表最终是通过显示件向观察者反映被测量的变化的
- 传送件：传送件的作用是将感受件输出的信号，根据显示件的要求，传送给显示件

- 5、有一支0.5级的温度计，测量范围是-100~550℃，已知其最大绝对误差为5℃。确定该温度计是否满足精度要求？

- 该温度计最大引用误差为 $5/(550+100)=0.76\%$ ，最大引用误差 $>0.5\%$ ，故该温度计不满足精度要求。

- 6、什么是测量的精密度、正确度和准确度？当正确度和精密度产生矛盾时，哪个更为重要？

- 正确度

- 对同一被测量进行多次测量，测量值偏离被测量真值的程度称为测量的正确度
- 它反映系统误差的影响，系统误差越小，正确度越高

- **精密度**

- 对同一被测量进行多次测量，测量值重复一致的程度，或者说测量值分布的密集程度，称为**测量的精密度**
- 它反映随机误差的影响，随机误差越小，精密度越高

- **准确度**

- **精密度与正确度的综合指标称为准确度**，或称精确度
- 它反映随机误差和系统误差的综合影响
- 精密度高的，正确度不一定高；正确度高的精密度不一定高；但准确度高的，则精密度与正确度都高

- 当正确度和精密度产生矛盾时，**正确度更为重要**。原因如下：

- **正确度**直接反映了测量结果与真值的一致性，是测量结果的核心价值所在。即使精密度高，如果正确度低，测量结果仍然是无意义的。
- **精密度**只是反映了测量结果的重复性，不能保证结果的真实性。

2 温度检测1

• 李张硕 3220105765

• 复习题

- 1、简述热电偶的均质导体定律、中间导体定律（及其两个推论）和中间温度定律。

- 均质导体定律

- 由同一均质导体（电子密度处处相等）组成的闭合回路中，不论导体的截面、长度以及温度分布如何，均不产生热电势
- 热电偶必须由两种不同性质的材料构成
- 由一种材料组成的闭合回路存在温差时，回路如产生热电势，说明该材料不纯，是不均匀的。据此，可以检查热电极材料的均匀性

- 中间导体定律

- 由不同材料组成的闭合回路中，若各种材料接触点的温度都相同，则回路中热电势的总和等于零

$$E_{ABC}(t, t) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t) + e_{CA}(t) = 0$$

- 推论一

- 在热电偶回路中接入第三种（或更多种）导体材料，只要接入的导体材料两端的温度相同，则对热电偶回路的热电势不产生影响

- 推论二

- 如果两种导体A、B对另一种参考导体C的热电势为已知，则这两种导体组成热电偶的热电势是它们对参考导体热电势的代数和。即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) + E_{CB}(t, t_0)$$

- 中间温度定律

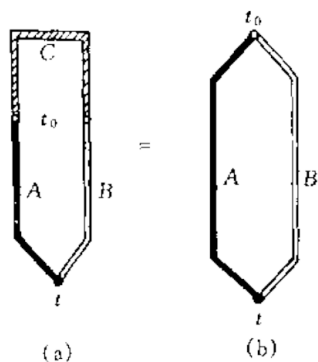
- 热电偶在两接点温度为 t_1 、 t_3 时的热电势等于该热电偶在两接点温度分别为 t_1 、 t_2 和 t_2 、 t_3 时相应热电势的代数和

$$E_{AB}(t_1, t_3) = E_{AB}(t_1, t_2) + E_{AB}(t_2, t_3)$$

- 2、请证明中间导体定律的两个推论。

- 推论一证明

$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$



- 根据中间导体定律，当温度 $t = t_0$ 时，回路中总热电势为零。

$$E_{ABC}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$$

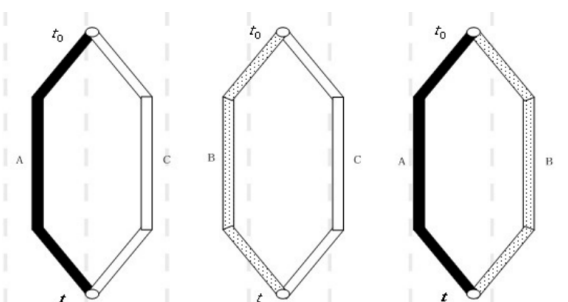
$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$$

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0)$$

$$E_{ABC}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

- 推论二证明

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) + E_{CB}(t, t_0)$$



$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0)$$

-

$$E_{AC}(t, t_0) = e_{AC}(t) - e_{AC}(t_0) \dots \dots \dots (1)$$

$$E_{BC}(t, t_0) = e_{BC}(t) - e_{BC}(t_0) \dots \dots \dots (2)$$

(1)式减 (2)式:

$$\begin{aligned} & E_{AC}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0) \\ &= e_{AC}(t) - e_{AC}(t_0) - e_{BC}(t) + e_{BC}(t_0) \\ &= [e_{AC}(t) - e_{BC}(t)] + [e_{BC}(t_0) - e_{AC}(t_0)] \\ &= e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \\ &= E_{AB}(t, t_0) \end{aligned}$$

- 3、一支镍铬—镍硅（K型）热电偶，在冷端温度为 20°C 时，测得热电势 $E(t, 20) = 32.001\text{mV}$ ，试求热电偶所测的实际温度 $t = ?$ 如果没有考虑冷端温度的补偿，其绝

对误差有多大？

- 查表得 $E(20, 0) = 0.798 \text{ mV}$
- 则 $E(t, 0) = E(t, 20) + E(20, 0) = 32.799 \text{ mV}$
- 查分度表求得 $t = 791.25^\circ\text{C}$
- 如果没有考虑冷端温度的补偿,用 $E(t, 20) = 30.001 \text{ mV}$ 直接查表得 $t' = 776.625^\circ\text{C}$
- 绝对误差为 $791.25^\circ\text{C} - 776.625^\circ\text{C} = 14.625^\circ\text{C}$

3 温度测量2

- 李张硕 3220105765

- 复习题

- 1.用分度号Cu100的铜电阻温度计测得发电机冷却水温度为56°C，但检定时确知铜热电阻的 $R_0 = 100.8\Omega$ ，电阻温度系数 $\alpha' = 4.29 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ，试求冷却水的实际温度

- 解：

测温时显示仪表按 $R_0 = 100\Omega$ ， $\alpha = 4.28 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ 分

度的， $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ ，故

$$100 \times (1 + 0.00428 \times 56)$$

$$= 100.8 \times (1 + 0.00429 \times t)$$

由此求得冷却水实际温度 $t = 53.6^\circ\text{C}$

- 2.已知某半导体热敏电阻在20°C时的阻值为100Ω，其电阻与温度斜率为 $dR/dt = -5.0\Omega/\text{K}$ 。试求：该热敏电阻在50°C时的阻值

- 解：

$$\begin{cases} R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \\ \frac{dR_T}{dT} = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \cdot \frac{-B}{T^2} = R_T \cdot \frac{-B}{T^2} \end{cases}$$

代入已知数据，即可求得A和B的值

$$A = 0.000043092 (\Omega); B = 4296.8 (\text{K})$$

再利用公式求得， R_T 在50°C(即50 + 273.15K)时的阻值为25.64 Ω

- 3.请根据管内流体温度测量误差的计算式，归纳出减少测温误差的主要措施

$$t_1 - t_g = \frac{t_g - t_3}{ch(b_1 L_1) \left[1 + \frac{b_1}{b_2} th(b_1 L_1) cth(b_2 L_2) \right]} \dots\dots\dots (1)$$

其中,

$$b_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 U_1}{\lambda_1 F_1}} \quad b_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2 U_2}{\lambda_2 F_2}}$$

式中 α_1, α_2 ——分别为管内、外介质对测温管之间的对流换热系数
 λ_1, λ_2 ——分别为管内外两段测温管的热导率, $\lambda_1 = \lambda_2$
 U_1, U_2 ——分别为 L_1 和 L_2 两段测温管的截面周长, $U_1 = U_2 = \pi d_1$
 F_1, F_2 ——分别为管内外两段测温管的截面积, $F_1 = F_2$
 L_1, L_2 ——分别为管内外测温管的长度

注: ch: 双曲余弦, $ch = (e^x + e^{-x})/2$, 单调递增
sh: 双曲正弦, $sh = (e^x - e^{-x})/2$, 单调递增
th: 双曲正切, $th = sh/ch$, 单调递增
cth: 双曲余切, $= 1/th$, 单调递减

- 管道中流体与管外介质的温度差 $t_g - t_3$ 越大, 测温误差越大。为了减小误差, 应该①把露出在管道外的测温管用保温材料包起来, 不仅使露出部分温度提高, 减小导热损失, 而且也使露出部分和外面介质的热交换减少, 换热系数 α_2 减小, 因此可以减小测温误差
- 当② L_1 (插到管道内介质部分测温管长度) 增加, 双曲余弦 $ch(b_1 L_1)$ 、双曲正切 $th(b_1 L_1)$ 都增加, 导热误差减小; 当③ L_2 (露在外的长度) 减小, 双曲余切 $cth(b_2 L_2)$ 增加, 测温误差也减小
- 当放热系数 α_1 增加, b_1 增加时, 误差减小。因此应该④把感受件放在流体速度最高的地方, 即管道中心
- 将测温管做成⑤外形细长而壁厚很薄的形状

增加 U_1/F_1 使 b_1 增加, 可以使误差减小。因为

$$U_1 = \pi d_1, F_1 = \frac{\pi(d_0 + d_1)}{2} \delta$$

式中 d_0 为测温管的内径,
 d_1 为测温管的外径, δ 为测温管壁厚, 如图所示)。
 所以要想增加 U_1/F_1 , 就应该使测温管的壁厚 δ 、外径 d_1 尽量减小, 也就是应将测温管做成外形细长而壁厚很薄的形状

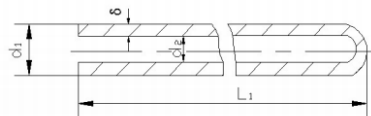


图6-3 测温管的尺寸

- 测温管材料的热导率 λ_1 小, 则 b_1 增加, 误差减小。因此测温管常⑥用导热性质不良的材料如陶瓷、不锈钢等来制造 (应该注意, 采用这类材料制造测温管使会增加导热阻力, 使动态测量误差增加)
- 至于减少 b_2 的问题, 关键在于使 α_2 变小, 方法是在⑦测温管的露出部分加绝热层
- 4.表面热电偶有哪四种焊接形式, 其导热误差的大小如何排序, 为什么?

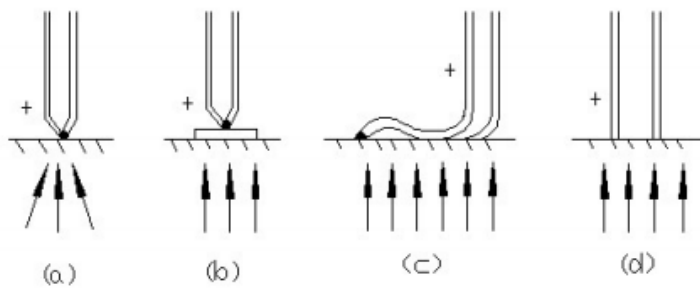


图6--6 表面热电偶的焊接形式
(a)球形焊 (b)交叉焊 (c)平行焊 (d)分立焊

- (a) 为点接触，即热电偶的热端**直接与被测表面相接触**
- (b) 为面接触，即先将**热电偶的热端与导热性能良好的金属片**（如铜片）焊在一起，然后使金属片与被测表面紧密接触
- (c) 为**等温线接触**，热电偶的热端与被测表面直接接触，热电极从热端引出时**沿表面等温线**敷设一段距离（**约50倍热电极直径**）后引出
- (d) 为**分立接触**，两热电极分别与被测表面接触，通过被测表面（仅对导体而言）**构成回路**
- 在相同的外界条件下，**(a) 的导热误差最大，(d) 次之，(b) 较小，(c) 的两热电极的散热量虽然也集中在一个较小的区域，但由于热电极已与被测表面等温敷设一段距离后才引出，散热量主要是由等温敷设段供给的，热端的温度梯度比另外三种形式的要小得多，所以 (c) 的热端散热量最小，测量准确度最高**
- 测量误差不仅与热电偶热端的接触形式有关，而且还与**被测表面的导热能力**有关

4 温度测量3

• 李张硕 3220105765

• 复习题

- 1. 测量锅炉过热器后面的烟气温度，温度计读数是 600°C ，附近冷表面的平均温度是 500°C ，烟气对测温管的对流放热系数是 $29.1\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ，测温管表面的辐射散热系数是 $4.65 \times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ，请计算实际的烟气温度和测量误差

- 解：

$$T_1 - T_g = -\frac{C_1}{\alpha} (T_1^4 - T_2^4)$$

已知

$$T_1 = 873\text{K}$$

$$T_2 = 773\text{K}$$

$$C_1 = 4.65 \times 10^{-8}\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$$

$$\alpha = 29.1\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$\text{代入上式得 } T_g = 1230.6\text{K} = 957.6^{\circ}\text{C}$$

$$T_g - T_1 = 357.6^{\circ}\text{C}$$

- 被测介质温度越高，误差也越大

- 2. 用双热电偶测量气流温度，已知 $d_1=0.4\text{mm}$ ， $d_2=0.2\text{mm}$ ，分别测得 $T'=1973\text{K}$ ， $T''=2053\text{K}$ ，求实际的气流温度

- 解： $d_1=0.4\text{mm}$ ， $d_2=0.2\text{mm}$ ， $T'=1973\text{K}$ ， $T''=2053\text{K}$ ，代入下式得 $T_g=2440.72\text{K}$

$$T_g = T'' + \frac{\sqrt{\frac{d_2}{d_1}} \left(\frac{T''}{T'} \right)^4 (T'' - T')}{1 - \sqrt{\frac{d_2}{d_1}} \left(\frac{T''}{T'} \right)^4}$$

- 3. 采用双色法进行测温，请推导实际温度 T 和比色温度 T_c 的关系

- 解：

若物体的温度为T，则

$$\frac{M_{\lambda_2}}{M_{\lambda_1}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_2} C_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T}}}{\varepsilon_{\lambda_1} C_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T}}}$$

求得：

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{M_{\lambda_2}}{M_{\lambda_1}} \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$$

$$\frac{M_{\lambda_1}}{M_{\lambda_2}}(T) = \frac{M_{0\lambda_1}}{M_{0\lambda_2}}(T_c)$$

实际温度 T 和比色温度 T_c 的关系：

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}$$

- T 为实际温度， T_c 为比色温度
- $\varepsilon_{\lambda_1}, \varepsilon_{\lambda_2}$ 为两波长下的发射率
- C_2 为普朗克第二辐射常数
- 对于**黑体和灰体**， $T = T_c$
- 对于**一般物体**， $T \neq T_c$ （多数金属： $T_c > T$ ；非金属： $T_c < T$ ）

5 压力测量&气体测量

• 李张硕 3220105765

• 复习题

• 1. 请简述压力测量的主要方法。

- 将压力或者差压信号变换为相应的信号显示并记录。
 - 液柱式压力计：将被测压力转换成液柱高度差进行测量（如U型管、斜管微压计）。
 - 弹性式压力计：通过弹性元件变形测量压力（如弹簧管、膜片）。
 - 压力传感器：将压力转换为电信号（如压阻式、压电式传感器）。
- 表压力（工程所用压力表指示值）
- 绝对压力=表压力+大气压力

• 2. 请简述液柱式压力计的主要分类和测量原理。

- 常用的液柱式压力计有：U型管压力计、单管式压力计、斜管式微压计
- 测量原理：根据液体静力学原理，被测压力与一定高度的工作液体产生重力相平衡，可将被测压力转换成液柱高度差进行测量

• 3. 请简述弹性式压力表的主要种类。

- 常见的测压用弹性元件有金属膜片式（包括膜盒式），波纹管式和弹簧管式三类
 - 金属膜片式（包括膜盒式）：金属膜片两边流体压力不等时，膜片产生位移、力或频率信号来测量微压或差压（平膜片、波纹膜片、膜盒）
 - 波纹管式：波纹管受轴向力或者内腔与周围介质的压力差时产生轴向位移测量中低压（有缝波纹管、无缝波纹管）
 - 弹簧管式：弹簧管自由端在压力作用下位移，通过传动放大机构带动指针移动，进行压力指示（C形或螺旋形弹簧管）

• 4. 请简述气体测量的主要方法。

- 气体检测方法
 - 连续式
 - 连续采样
 - 红外、紫外等光学测量方法（FTIR, NDIR）
 - 缺点：
 - 响应时间慢,需要预处理
 - 只能得到整个测量场内某一点的测量数据
 - 采样过程中易发生二次反应
 - 在线式

- 可调谐半导体激光吸收光谱技术 (TDLAS)

- 优点:

- 抗干扰 (其他气体以及粉尘颗粒)
- 测量结果为光路平均值
- 响应快
- 无需采样与预处理

- 间歇式

- 比色法,离子选择电极法, 色谱法

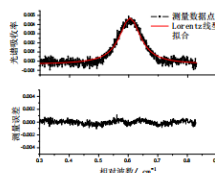
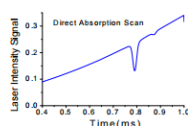
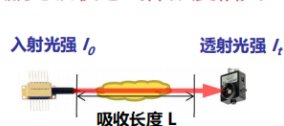
- 缺点:

- 对烟气进行人工取样只能单一成份地逐个进行检测分析, 分析费时, 效率低

• 5. TDLAS测量气体浓度的原理和优点。

- 测量原理: 基于Beer-Lambert定律, 通过激光被气体吸收后的强度变化计算浓度。公式如下图所示

激光吸收与气体浓度相关



Beer-Lambert 定律

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp(-PS(T)\phi XL)$$

I_t - 透射光强
 I_0 - 入射光强
 P - 气体压力
 $S(T)$ - 线强
 ϕ - 线形函数
 X - 气体浓度
 L - 路径长度

线形函数对整个频率范围的积分等于1:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi dv = 1$$

气体浓度可由下式计算得到:

$$X = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) dv}{PS(T)L}$$

- 优点:

- 迅速: 响应时间小于1ms, 可以实现实时测量
- 准确: 激光线宽15MHz (10^{-4} nm), 调谐范围30GHz (0.2nm)。气体吸收峰宽度通常小于10GHz, 可以有效避免其它气体吸收干扰
- 灵敏: 可以探测气体浓度极限为ppm或ppb量级
- 非接触式测量
- 可以实现在线监测
- 测量结果是路径平均值

6 流量&液位检测

• 李张硕 3220105765

• 复习题

• 1. 请简述流量测量的方法

- 按不同的测量原理，流量仪表可分为容积式、速度式（差压式单独列出）和质量式三类
 - 容积式流量测量方法**：通过测量单位时间内经仪表排出的流体的**固定容积 v 的数目**来测量流量
 - 速度式流量测量方法**：以**直接测量管道内流体流速 v** 作为流量测量的依据

测得管道截面上平均流速 \bar{v} ：则容积流量 $q_v = \bar{v}A$

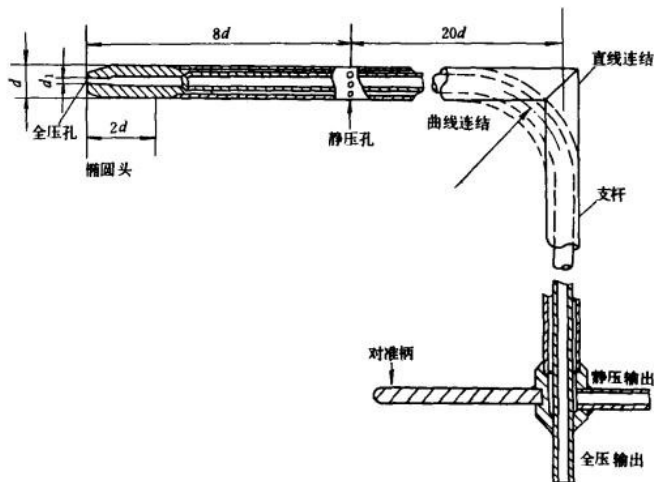
测得管道截面上某一点流速 v ：则流体体积流量 $q_v = KvA$ ， K 为截面上平均流速与被测点流速的比值，与管道内流速分布有关
 - 差压式流量测量方法**：差压流量计原理是**伯努利定律**，即通过**测量流体流动过程中产生的差压**来测量流速或流量
 - 差压产生的原因可能是**流体滞止**造成的，也可能是**流体通流截面改变**引起流速变化造成的
 - 质量式流量测量方法**：质量与流体密度有关，因此根据前述的体积流量计测量的信号计算质量流量，需要指定压力、温度等参数
 - 输出信号**不受流体压力、温度等参数改变引起的流体密度变化的影响**，测量准确度有很大的提高

• 2. 请简述容积式流量计的主要分类和测量原理

- 容积式流量计主要分为**椭圆齿轮流量计**、**腰轮流量计**、**刮板式流量计**
- 测量原理：
 - 椭圆齿轮流量计**：一对相互啮合的椭圆齿轮在流体差压作用下交替地相互带动绕各自轴旋转，**每转一周**，**排出四份**齿轮与仪表壳体之间形成的**月牙形空腔容积**的液体，只要测出**齿轮转速**就知道流体的容量流量
 - 腰轮流量计**：原理与椭圆齿轮流量计相同，只是两腰轮的转动是由壳体外同轴上的一对啮合齿轮相互带动的
 - 除能测量液体流量外，还能用于测量**气体流量**
 - 腰轮上没有齿，对**流体中的固体杂质**没有椭圆齿轮流量计那样敏感
 - 刮板式流量计**：工作原理是在流体差压作用下转子旋转，转子上有两对可以内外滑动的刮板，转子转动带动刮板的滚轮在中心静止凸轮的外缘上滚动，使刮板随转子转动

角度不同作内外滑动，转子每转一周就有四份由两片刮板与壳体之间的计量容积液体排出

• 3. 皮托管的结构和原理



• 结构：

- 皮托管由两根空心细管组成。一管孔口正对液流方向，而另一根管开口方向与液流方向垂直，在两细管上端用橡皮管分别与压差计的两根玻璃管相连接。
- 图示为具有椭圆头部的标准皮托管，它的头部廓形由两个1/4椭圆组成，两1/4椭圆相距为全压孔直径 d_1 。整个椭圆长轴为 $4d$ ，其中 d 为皮托管探头直径，因此椭圆短轴为 $d-d_1$ ，头部长为 $2d$ 。两皮托管直径不超过15mm。全压孔直径 d_1 应在 $0.1d-0.35d$ 之间。静压孔应在距离皮托管头部 $8d$ 处并沿探头圆周上等距离分布，静压孔数目不少于6个，孔径不得超过1mm。全部探头表面应光滑，全压孔轴线应与探头轴线同心。孔的边缘应尖锐，孔的直径至少应在长度 $1.5d$ 范围内不变化。

• 原理：皮托管利用流体的全压和静压之差——动压 Δp 测流速

- 稳定流动且滞止过程中没有流量损失，全压和静压取压口位于同一点上
 - 对于不可压缩性流体

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

- 对于可压缩性流体，则增加可压缩性校正系数 $1-\epsilon$

$$v = (1-\epsilon) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

- 推导：

在液体管道的某一截面处装有一个测压管和一根两端开口弯成直角的皮托管。将皮托管的一端正对着来流方向，另一端垂直向上，这时皮托管中上升的液柱比测压管内的液柱高 h 。这是由于当液流流到测速管入口前的A点处，液流受到阻挡，流速变为零，则在测速管入口形成一个**驻点A**。驻点A的压强 P_A 称为全压，在入口前同一水平流线未受扰动处（例如B点）的液体压强为 P_B ，速度为 v 。应用伯努利方程于同一流线上的B、A两点，则有

理想流体微元流束的伯努利方程

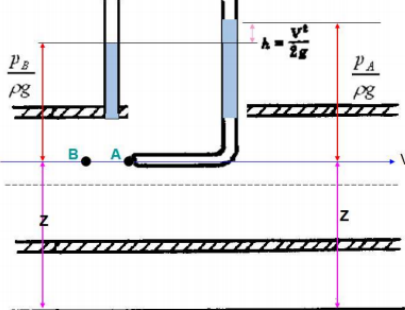
$$z + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = z + \frac{p_A}{\rho g} + 0$$

$$h = \frac{p_A}{\rho g} - \frac{p_B}{\rho g} = \frac{v^2}{2g}$$

$$\Delta p = \frac{\rho v^2}{2}$$

$$v = \sqrt{2 \frac{p_A - p_B}{\rho}} = \sqrt{2gh}$$

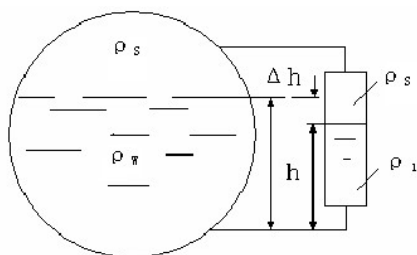
位势能+压强势能+动能



4. 主要的液位测量方法

• 云母水位计

- 如图所示，是一根连通管使用玻璃、云母等作为水位观察窗



- 利用**连通管原理**，通过透明窗口（云母或玻璃）**直接观察液位**，适用于高压环境（如锅炉汽包）
- **重量水位**：汽包中水容积内存在大量气泡，水容积中的水实际是汽水混合物，密度很难确定，且汽包内汽水界限不明显。将水位上、下联管间的测量段上的汽水混合物密度，折合成汽包工作压力下饱和水密度时相应的水位，称为重量水位

• 双色水位计

- 双色水位计是在云母水位计的基础上，辅以光学系统，利用光从空气进入蒸汽或水产生不同的**折射**，使汽水界面显示成**红、绿两色的分界面**（汽相显示红色，液相显示绿色），显示清晰，可用摄像方式传至控制室，在工业电视或DCS的DRT上显示

• 电接点水位计

- **蒸汽电阻大、水（含盐）电阻小**
- 筒壁为公共电极，以120°夹角布置与筒壁绝缘的电极
- 当汽包水位到达某一电极处，接通它与公共电极之间形成**电接点**，供远距离显示水位、报警，甚至为调节系统提供水位信号

7 电厂综合监测

• 李张硕 3220105765

• 复习题

• 1.请简述分散式控制系统（DCS）和烟尘烟气连续自动监测系统（CEMS）的功能和作用

• 分散式控制系统（DCS）：

• 由过程控制级和过程监控级组成的以通信网络为纽带的多级计算机系统，综合了计算机(Computer)、通讯(Communication)、显示(CRT)和控制(Control)等4C技术，其基本思想是分散控制、集中操作、分级管理、配置灵活、组态方便。

• 功能

• 分层架构：DCS基于“分散控制、集中操作、分级管理”理念，分为四级结构

• 现场级：传感器、变送器、执行器采集生产过程中的各种物理量并转换为电信号

• 控制级：包括现场控制站（接收由现场设备，如传感器、变送器传来的信号，按照一定的控制策略计算出所需的控制量，并送回到现场的执行器中去。可以同时完成连续控制、顺序控制或逻辑控制功能，也可能仅完成其中的一种）和数据采集站（接收由现场设备送来的信号，并对其进行一些必要的转换和处理之后送到分散型控制系统中的其它部分，主要是监控级设备中去。不直接完成控制功能）

• 监控级：操作员站（HMI）集中显示设备状态及报警信息，工程师站用于系统组态和调试，历史站保障数据完整性与可追溯性；计算站通过数据处理与算法优化提升电厂运行效率。

• 管理级：厂级管理计算机监测企业各部分的运行情况，利用历史数据和实时数据预测可能发生的各种情况，从企业全局利益出发辅助企业管理人员进行决策，帮助企业实现其规划目标

• 核心模块：

• 数据采集系统（DAS）：实时采集温度、压力、流量等参数

• 模拟量控制系统（MCS）：调节锅炉、汽轮机等关键设备

• 炉膛安全系统（FSSS）：保障燃烧安全，防止爆炸

• 冗余设计：容错网络和冗余硬件（电源、控制器）确保高可靠性

• 作用

• 提升效率：自动化控制降低煤耗和人工干预，减少人员浪费，优化机组运行效率

• 性能优化：系统通用性强、组态灵活、控制功能完善、数据处理方便、显示操作

集中、调试方便

- **安全保障**：通过FSSS等模块预防事故，增强系统安全性、可靠性
- **灵活扩展**：模块化设计支持火电、化工等行业复杂工艺的定制化需求和智能化改造

- **烟尘烟气连续自动监测系统（CEMS）**

- 该系统对**固定污染源颗粒物浓度和气态污染物浓度以及污染物排放总量**进行连续自动监测，并将监测数据和信息传送到环保主管部门，以确保排污企业污染物浓度和排放总量达标

- **功能**

- **主要监测对象**：

- **气态污染物**：SO₂、NO_x、CO等（采用红外光谱、紫外荧光法），主要对其进行排放浓度和排放量的计算，同时监测氧含量
 - **颗粒物**：浊度仪或光散射法测量浓度。
 - **烟气参数**：烟气流速（皮托管/超声波）、温度、压力、氧含量（氧化锆分析仪）、烟气湿度（电容式传感器）。

- **采样方式**：

- **抽取式CEMS**：

- 抽取式CEMS是直接从烟道或管道抽气、滤除颗粒物，将烟气送入分析仪的系统
 - **热-湿系统**：采用专用的加热采样探头将烟气从烟道中抽取出来，过滤后经过**伴热传输**，使烟气在传输中**不发生冷凝**，然后进入分析仪进行分析检测，适用于高湿度烟气（如垃圾焚烧），但维护复杂
 - **除湿系统**：通过**半导体制冷、机械制冷或渗透干燥器**处理样气，将烟气温度降到水蒸气露点温度以下，除去烟气中的水份，简化传输但可能损失部分污染物（如NH₃）

- **直接测量式CEMS**：

- **内置式**：**单端安装**（适用火电），易受水汽污染。
 - 传感器安装在探头端部，探头直接插入烟道，使用**电化学或光电传感器**，测量较小范围内污染物浓度（相当于**点测量**，如氧化锆法测量烟气含氧量）
 - **外置式**：**两端安装**（适用冶金），抗污染但受震动影响。
 - 传感器和探头直接安装在烟道或管道上，传感器发射一束光穿过烟道，利用**烟气的特征吸收光谱**进行分析测量，可以归为**线测量**

- **作用**：

- 为环保监管提供数据支持，助力企业达标排放。
 - 通过反馈控制优化燃烧过程，降低污染物生成。

- **2.请对老师上课内容和上课方式提出合理化建议**

- **课程内容建议**

- 可以提供DCS控制室实景视频、CEMS采样动画，辅助理解抽象概念
- 可以引入三维数字电厂平台（如课程提到的西门子虚拟检修系统），模拟DCS组态或CEMS故障排查

- **教学方式建议**

- 可以组织参观火电厂或环保监测站，实地观察DCS控制流程与CEMS运维，增强直观认知
- 可以邀请行业专家分享智能电厂落地经验，拓宽视野
- 可以在讲解技术难点（如氧化锆测氧原理）时，设置课堂讨论题进行现场讨论