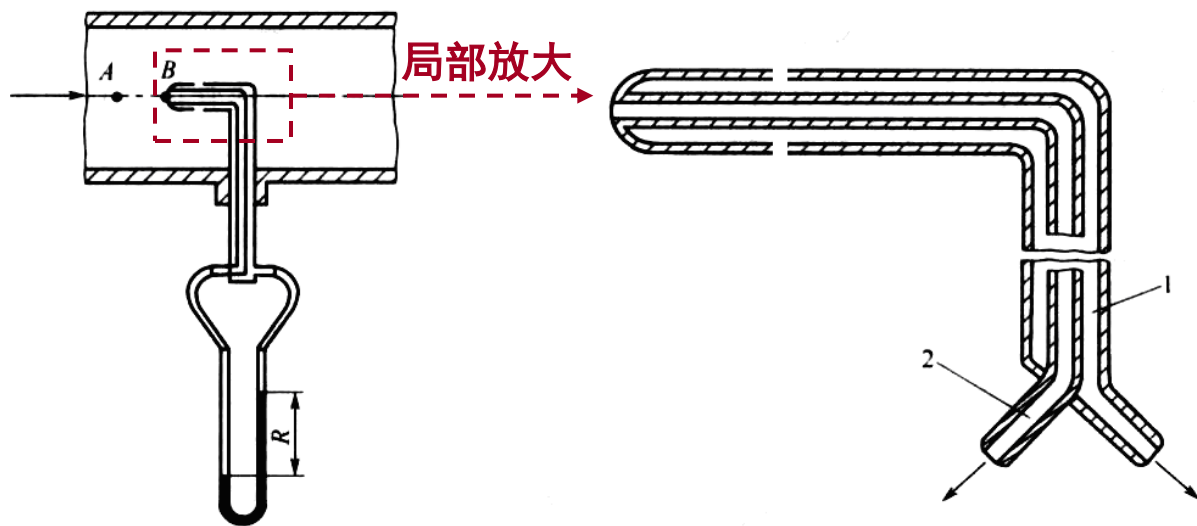


## 流速和流量的测定

### 测速管 [皮托管]

测量管路中流体的点速度，通常用于气体流速的测定。由两根弯成直角的同心套管所组成。外管的管口是封闭的，在外管前端壁面四周开有若干测压小孔，内管的开口端测定停滞点的动压头和静压头之和，称为冲压头。



## 毕托管与点速度

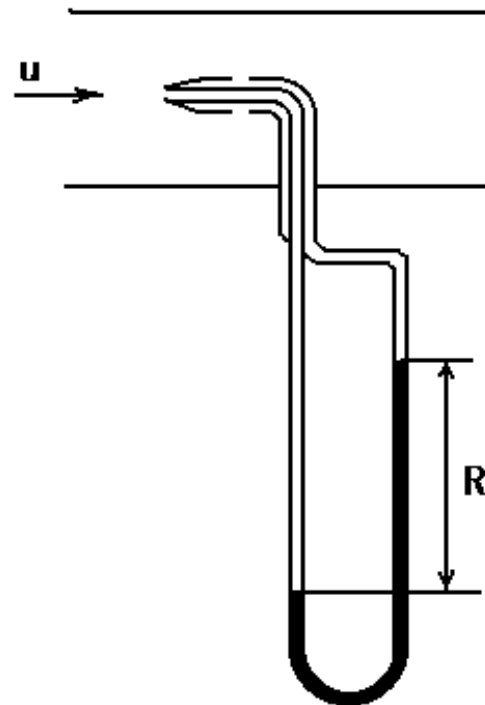
冲压头  $H_A = \frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g}$

静压头  $H_B = \frac{p}{\rho g}$

U型管压差计所测得的压头之差  $H_A - H_B = \frac{u^2}{2g}$

A点流速  $u_A = \sqrt{2g(H_A - H_B)} = \sqrt{2(p_A - p_B) / \rho}$

$$u_A = \sqrt{\frac{2R(\rho' - \rho)g}{\rho}}$$



## 毕托管安装与应用

---

**毕托管的测速原理：**机械能转换与静力学原理。

**毕托管的安装要点：**

- 保证测量点位于均匀流股；
- 保证毕托管口截面严格垂直于流动方向；
- 毕托管直径应小于管径的 $1/50$ 。

**毕托管的应用：**

测点速度，从而可得沿截面的速度分布。

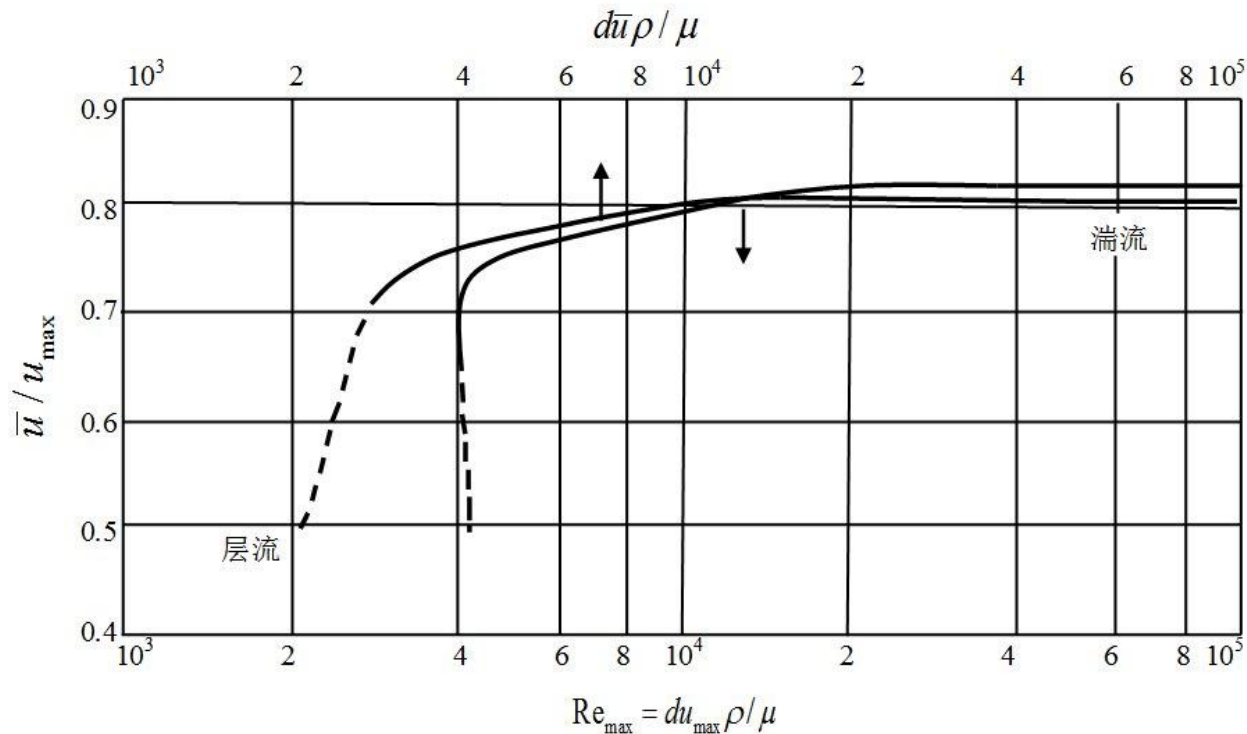
常用于测管中心的最大流速，然后根据最大流速与平均速度的关系，求平均速度，进而求流量。

**毕托管的特点：**

- 流动阻力小，适用于测量大直径管路中的气体流速；
- 不能直接测出平均流速，且压差读数较小，常需配用微差压差计。不能用于含固体杂质的流体。

# 毕托管与点速度

$$u_{\max} = \sqrt{\frac{2R(\rho' - \rho)g}{\rho}}$$



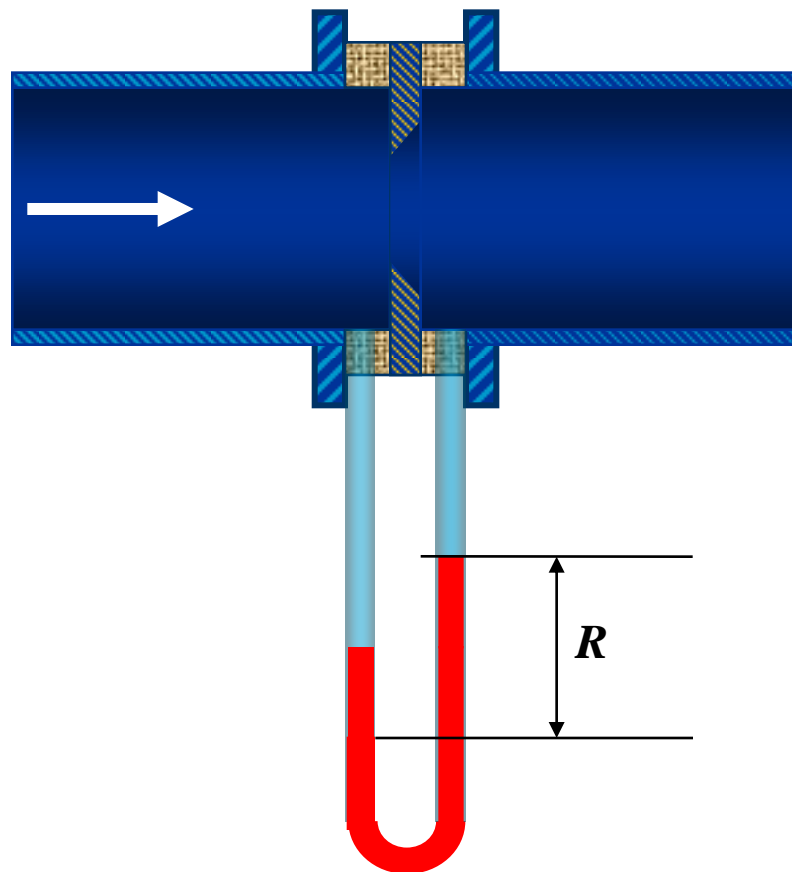
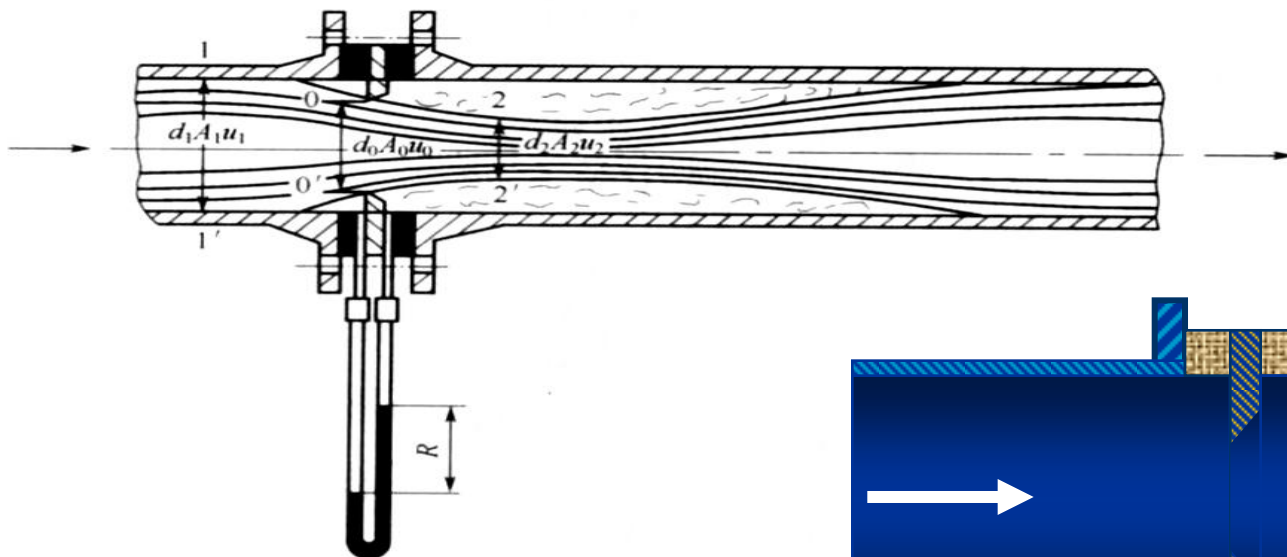
## 例1-19解题思路

$$q_m \leftarrow \bar{u} \leftarrow \frac{\bar{u}}{u_{\max}} \leftarrow Re_{\max} \leftarrow u_{\max} = \sqrt{\frac{2gR(\rho' - \rho)}{\rho}} \leftarrow \rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{P}{P_0}$$



# 孔板流量计

利用孔板两侧压力差测定流体的流量



分析处理方法:

- 1.按 $\mu=0$ 处理
- 2.考虑 $\mu \neq 0$ 的情况
- 3.考虑取压方法的影响

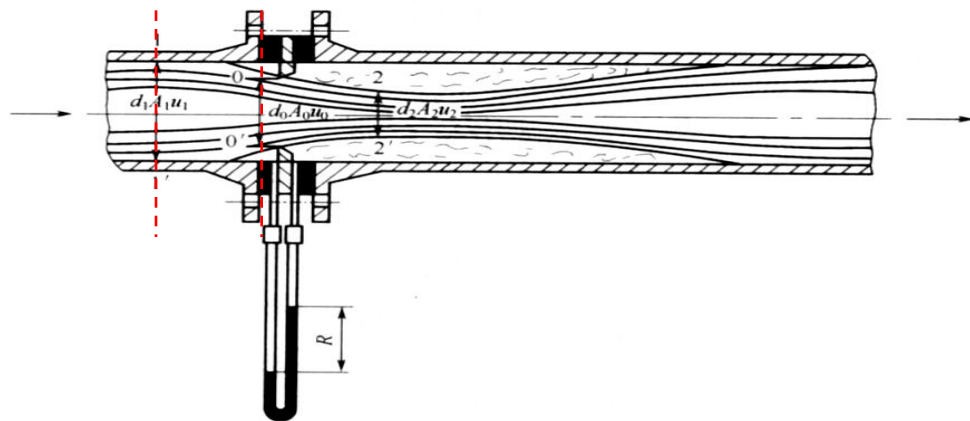
# 孔板流量计

暂不考虑两截面间的能量损失，在1-1与0-0之间列柏努利方程

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_0 + \frac{u_0^2}{2} + \frac{p_0}{\rho}$$

对于水平管 $z_1=z_0$

$$\sqrt{u_0^2 - u_1^2} = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho}}$$



校正因忽略能量损失所引起的误差，引进校正系数 $C_1$

$$\sqrt{u_0^2 - u_1^2} = C_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho}}$$

以**角接取压法**所测得的孔板前后压力差( $p_a-p_b$ )代替上式中的( $p_1-p_0$ ),并引入另一校正系数 $C_2$

$$\sqrt{u_0^2 - u_1^2} = C_1 C_2 \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}}$$

## 孔板流量计

以 $A_1$ 和 $A_0$ 分别表示管道与锐孔的截面积，对不可压缩流体，应用连续性方程

$$u_1 = u_0 \left( \frac{A_0}{A_1} \right)$$

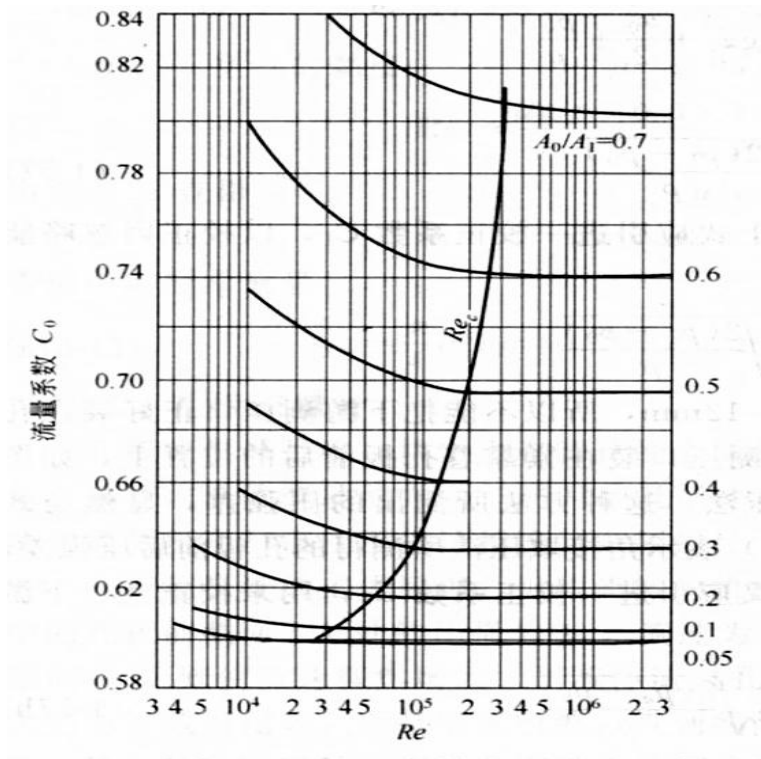
$$u_0 = \frac{C_1 C_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}} \quad \xrightarrow{C_0 = \frac{C_1 C_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}}} \quad u_0 = C_0 \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}}$$

$$q_m = C_0 A_0 \sqrt{2Rg\rho(\rho' - \rho)} \quad \xleftarrow{q_v = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2Rg(\rho' - \rho)}{\rho}}} \quad \xleftarrow{U} \quad q_v = A_0 u_0 = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2(p_a - p_b)}{\rho}}$$

$C_0$ 称为流量系数或孔流系数，只能通过实验测得。对于测压方式、结构尺寸、加工状况等均已规定的标准孔板，流量系数是 $Re$ 和面积比的函数  $C_0 = f(Re, A_0 / A_1)$

$$Re = d_1 u_1 \rho / \mu$$

# 孔板流量计



当 $Re$ 超过某限度值 $Re_c$ 时, $C_0$ 不再随 $Re$ 而变,成为一个仅决定于 $A_0/A_1$ 的常数。孔板流量计的测量范围最好落 $C_0$ 为常数的区域。设计合理的孔板流量计, $C_0$ 值约在0.6~0.7之间。



## 孔板流量计的安装

---

**测量原理：**机械能守恒

**安装：**其上、下游应分别有 $(15\sim 40)d$ 和 $10d$ 的直管距离

**特点：**孔板流量计制造简单，应用广泛。当流量较大时，可通过更换孔板调整测量条件。主要缺点是能量损失较大， $A_0/A_1$ 越小，能量损失越大；锐孔边缘容易腐蚀和磨损，需要定期校正。

\*流体在孔板前后的压力差，分别由流速改变和局部阻力所造成，其阻力部分为永久性能量损失。

## 孔板流量计的设计

### 例1-20

用 $\phi 159\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ 的钢管输送 $20^\circ\text{C}$ 的水，已知流量范围为 $50 \sim 200\text{m}^3/\text{h}$ 。采用水银压差计，并假定读数误差为 $1\text{mm}$ 。试设计一孔板流量计，要求在最低流量时，由读数造成的误差不大于 $5\%$ ，且阻力损失应尽可能小。

$$q_{v\max} = \frac{200}{3600} = 0.056\text{m}^3/\text{s}$$

$$q_{v\min} = \frac{50}{3600} = 0.014\text{m}^3/\text{s} \quad \longrightarrow \quad \text{Re}_{\min} = \frac{q_{v\min}}{\frac{\pi}{4}d^2} \times \frac{d\rho}{\mu} = \frac{4 \times 1000 \times 0.014}{3.14 \times 0.15 \times 0.001} = 1.19 \times 10^5$$

选 $A_0/A_1=0.3$ ，由图1-31 查得， $C_0=0.632$

$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{d_0^2}{d_1^2} \quad \longrightarrow \quad d_0 = \sqrt{\frac{A_0}{A_1}} d_1 = \sqrt{0.3} \times 0.15 = 0.082\text{m} \quad \longrightarrow \quad A_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 = 0.785 \times 0.082^2 = 0.00528\text{m}^2$$

由式 (1-71a) 可求得最大流量的压差计读数 $R_{\max}$ 为

$$R_{\max} = \frac{q_{v\max}^2}{C_0^2 A_0^2 2g \left( \frac{\rho' - \rho}{\rho} \right)} = \frac{0.056^2}{(0.632)^2 \times (0.00528)^2 \times 19.62 \times 12.6} = 1.14\text{m}$$

由计算的 $R_{max}$ 可知，选 $A_0/A_1=0.3$ 时，孔板阻力损失较大，U形压差计需要很高且读数不方便，必须重选孔板。

从图1-31查得在 $Re_{min}=1.19 \times 10^5$ 条件下， $C_0$ 为常数的 $A_0/A_1$ 最大值为0.5。故取 $A_0/A_1=0.5$ 进行检验，步骤同上。

$$A_0/A_1 = 0.5, Re_{min} = 1.19 \times 10^5 \text{ 时, } C_0 = 0.695$$

$$d_0 = \sqrt{0.5 \times 0.15} = 0.106m \longrightarrow A_0 = 0.785 \times 0.106^2 = 0.00883m^2$$

$$R_{max} = \frac{0.056^2}{(0.695)^2 \times (0.00883)^2 \times 19.62 \times 12.6} = 0.34m$$

$$R_{min} = \frac{0.014^2}{(0.695)^2 \times (0.00883)^2 \times 19.62 \times 12.6} = 0.021m$$

$$\frac{\pm 0.001}{0.021} = \pm 4.76\%$$

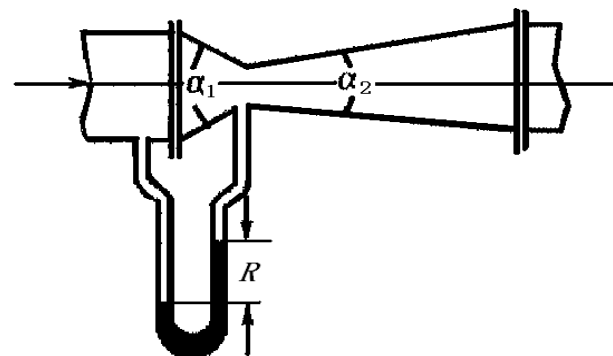
可见，取 $A_0/A_1=0.5$ 的孔板，在最大流量时，压差计读数比较合适，而在最小流量时，压差计读数又能满足题中所给误差不大于5%的要求，所以锐孔直径为0.106 m的孔板适用。

## 文丘里流量计

**文丘里流量计**一是孔板流量计的改进，以减少能耗

为了避免流量计过长，文丘里管的收缩角 $\alpha_1$ 可取得大些，一般 $15\sim 20^\circ$ ；扩大角 $\alpha_2$ 取得小些，一般为 $5\sim 7^\circ$

$$q_v = C_v A_0 \sqrt{\frac{2Rg(\rho_A - \rho)}{\rho}}$$



$C_v$ 为流量系数，其值可由实验测定或从手册中查得。

湍流时，一般可取0.98（ $d=50\sim 200\text{mm}$ 的管）或0.99（ $d>200\text{mm}$ ）；

$A_0$ 为喉管处的截面积； $\rho_A$ 和 $\rho$ 分别为指示液和被测液的密度。

**安装：**上游的测压点距管径开始收缩处的距离至少应为 $d_0/2$ ，下游的测压口则设在喉管处。

**优点：**能耗少，大多用于低压气体的输送；

**缺点：**各部分尺寸要求严格，需要精加工，造价较高，且安装时占据较长的管长，更换不如孔板流量计那样方便。

## 孔板、文丘里流量计比较

阻力损失：**孔板流量计**的缺点是阻力损失大。

阻力损失可写成

$$h_f = \zeta \frac{u_0^2}{2} = \zeta C_0^2 \frac{Rg(\rho_i - \rho)}{\rho} \dots\dots\dots \zeta \approx 0.8$$

上式表明阻力损失正比于差压计读数R，说明读数R是以机械能损失为代价取得的。

因此，选用孔板流量计的中心问题是选择适当的面积比以平衡读数R和阻力损失。

**文丘里流量计**是孔板流量计的改进，以减少能耗。

$$h_f = \zeta \frac{u_0^2}{2} \quad \zeta \approx 0.2$$

**孔板流量计：结构简单，阻力损失较大；**

**文丘里流量计：阻力损失较小，造价较高**

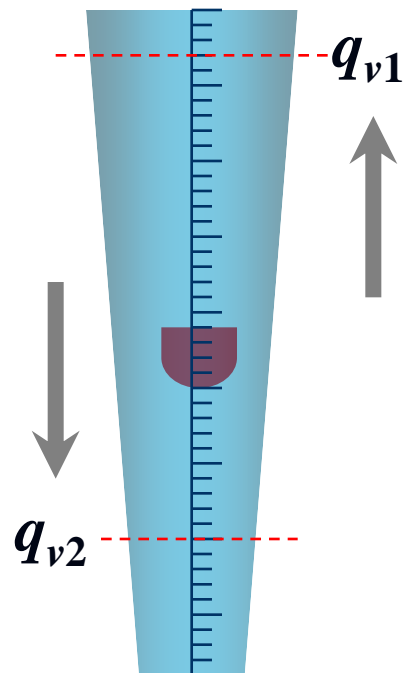
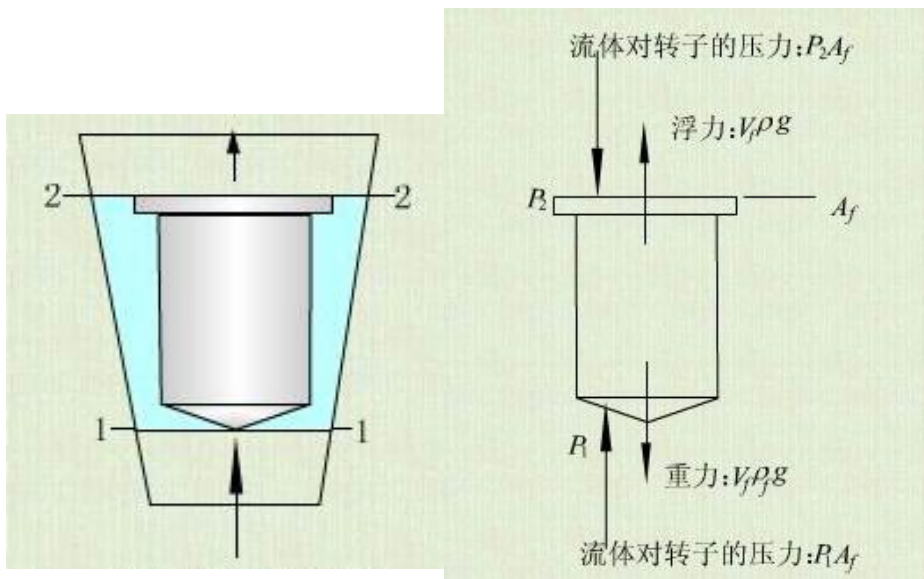
## 转子流量计

构造：垂直锥形玻璃管、转子

工作原理：能量守恒与转换、力的平衡

当转子处于平衡态时，流体作用于转子的力应与转子的净重力相等：

$$(p_1 - p_2)A_f = V_f \rho_f g - V_f \rho g$$



## 转子流量计

---

$$\Delta P = \frac{V_f g(\rho_f - \rho)}{A_f}$$

当用固定的转子流量计测量某流体的流量时，式中 $V_f$ 、 $A_f$ 、 $\rho_f$ 、 $\rho$ 均为定值，所以 $\Delta p$ 亦为恒定，与流量大小无关

当转子稳定于某位置时，环隙面积为固定值，因此，流体流经环隙的流量与压力差的关系可借流体通过孔板流量计锐孔的情形进行描述，即

$$q_v = C_R A_R \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = C_R A_R \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho)}{A_f \rho}}$$

当 $Re \geq 10^4$ 时， $C_R$  (流量系数，与 $Re$ 数及转子的形状有关，由实验测定) 约为一常数， $C_R \approx 0.98$ 。

## 转子流量计

---

对于某一转子流量计，如果在流量的测量范围内，流量系数 $C_R$ 为一常时，则流量仅随环隙面积 $A_R$ 而变。

$\Delta P$ 是一个恒定值而与流量无关，因此转子流量计为**恒压差、恒流速、变截面**的截面式流量计，转子在锥形管内的位置越高，环隙面积 $A_R$ 就越大，流量也就越大。即流量与转子所处的位置的高度成正比，因而可用转子所处位置高低来反映流量的大小。

相比较而言，孔板流量计、文丘里流量计则是：**恒截面、变压差、变流速**的压差式流量计。



## 转子流量计的应用

**转子流量计的刻度：与被测流体的密度有关**

用20℃水和20℃、1大气压下的空气进行实际流量的标定，并将流量数值刻在玻璃管上。在流量计使用时，若流体的种类与标定时的不符，需要对原有的刻度加以校正。

假定标定液体与待测液体的流量系数 $C_R$ 相等，即忽略黏度变化的影响，在同一刻度之下，两种液体的流量关系为：

$$\frac{q_{v2}}{q_{v1}} = \sqrt{\frac{\rho_1(\rho_f - \rho_2)}{\rho_2(\rho_f - \rho_1)}}$$

对于气体，在同一刻度之下，两种气体的流量关系为

$$\frac{q_{vg2}}{q_{vg1}} = \sqrt{\frac{\rho_{g,1}(\rho_f - \rho_{g2})}{\rho_{g,2}(\rho_f - \rho_{g1})}} \xrightarrow{\text{简化}} \frac{q_{vg2}}{q_{vg1}} = \sqrt{\frac{\rho_{g,1}}{\rho_{g,2}}}$$

## 转子流量计的特点

---

转子形状的选择着眼于促使边界层脱体,以便在较小 $Re$ 时即出现高度湍流,使 $C_R$ 为一常数。

当转子流量计的结构与被测流体均已定的条件下,转子流量计的永久阻力损失不随流量而变,因而转子流量计常用于流量范围较宽の場合。

**优点:** 读取流量方便,测量精度高,能量损失很小,测量范围宽,可用于腐蚀性流体的测量,流量计前后无须保留稳定段。

**缺点:** 流量计管壁大多为玻璃制品,不能经受高温和高压,一般不能超过 $120^{\circ}\text{C}$ 和 $392\sim 490\text{kPa}$ ,在安装使用过程中也容易破碎,且要求垂直安装。