

第七节 流速和流量的测量

一、毕托管

1、毕托管的测速原理

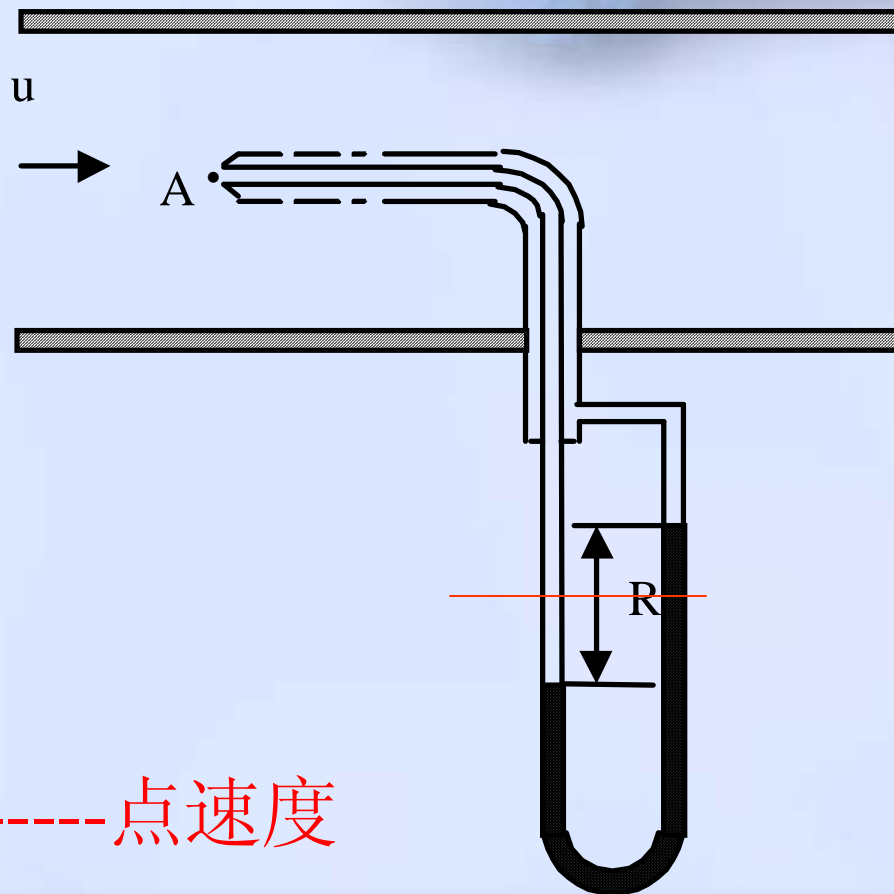
$$\frac{p_A}{\rho g} = \frac{p}{\rho g} + \frac{u_A^2}{2g}$$

$$p_A - p = R(\rho_i - \rho)g$$

$$\rightarrow \rho \frac{u_A^2}{2} = R(\rho_i - \rho)g$$

$$u_A = \sqrt{\frac{2gR(\rho_i - \rho)}{\rho}}$$

-----点速度



讨论：

(1) 皮托管测量流体的点速度，可测速度分布曲线；

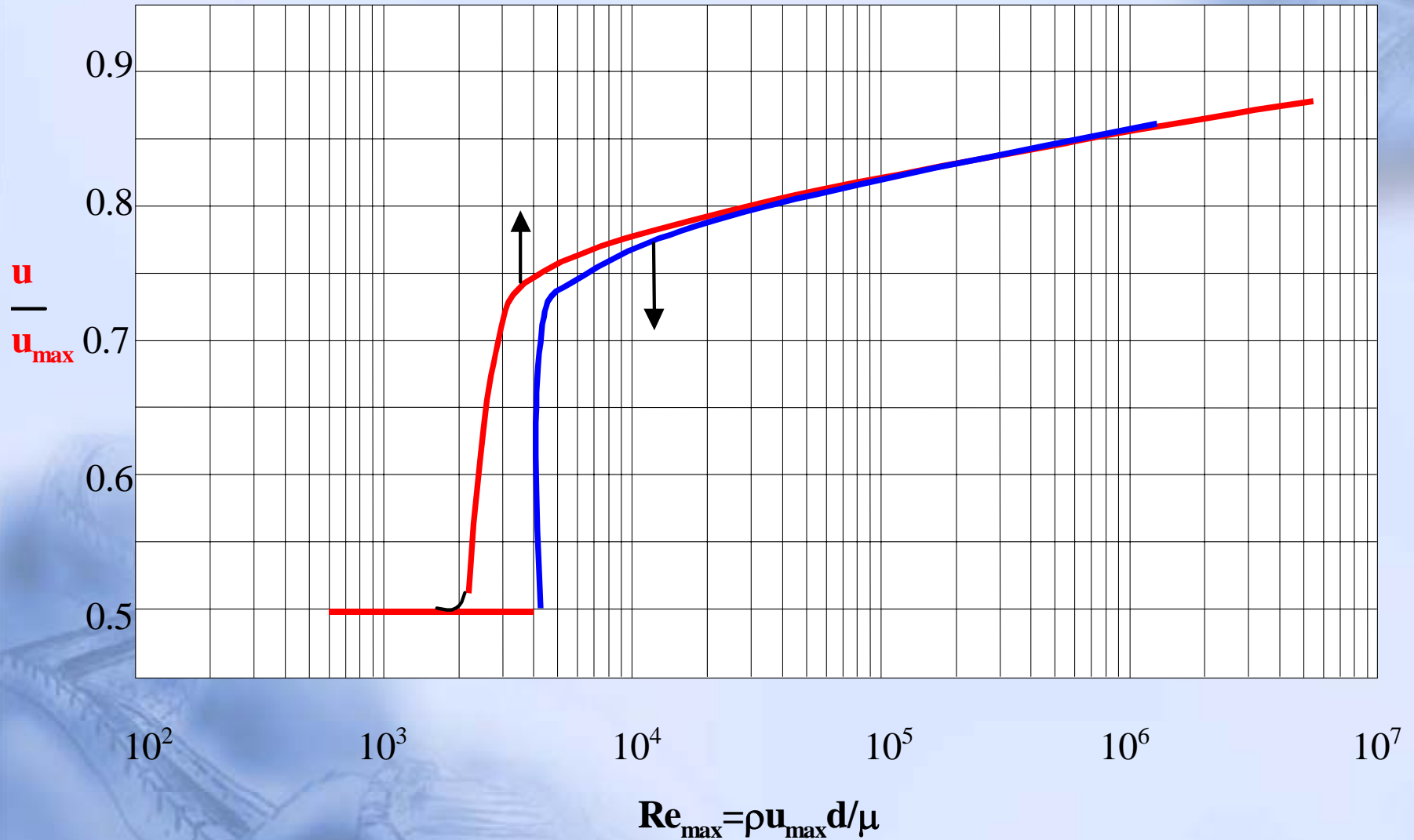
(2) 流量的求取：

- 由速度分布曲线积分 $V_S = \int u dA$

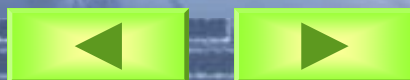
- 测管中心最大流速，由 $u/u_{\max} \sim Re_{\max}$ 求平均流速，再计算流量。



$$Re = \rho u d / \mu$$



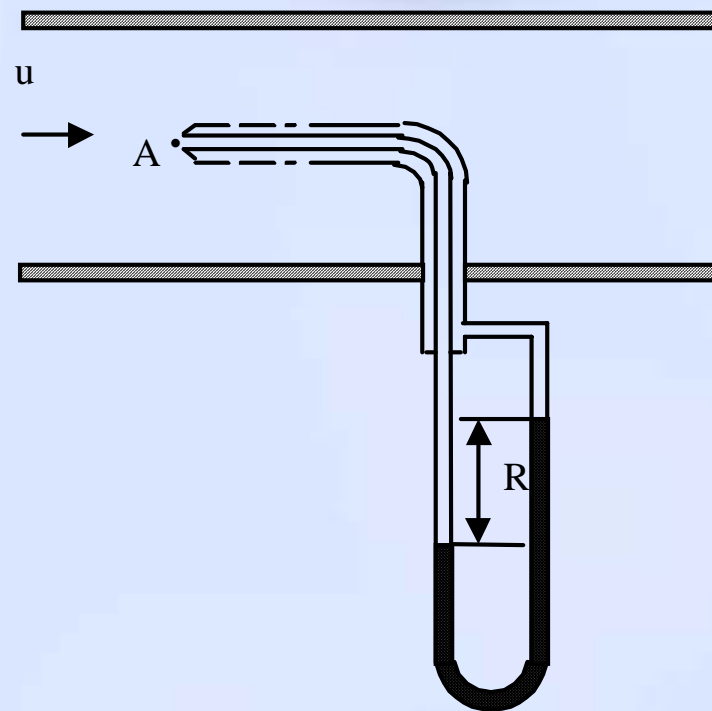
测 u_{max} → 平均速度 → 流量



2、测速管加工及使用注意事项

- 测速管的尺寸不可过大，一般测速管直径不应超过管道直径的 1/50。
- 测速管安装时，必须保证安装点位于充分发展流段，(必须保证测量点位于均匀流段)一般测量点的上、下游最好各有 50d 以上的直管段作为稳定段。
- 测速管管口截面要严格垂直于流动方向。

- 测气体时， $\rho_i \gg \rho \quad \therefore u = \sqrt{\frac{2gR\rho_i}{\rho}}$



测速管的优点:

结构简单、阻力小、使用方便，
尤其适用于测量气体管道内的流速。

缺点:

不能直接测出平均速度，
且压差计读数小，常须放大才能读得准确。



二、孔板流量计

1、结构与原理

两种取压方式：

(1)角接法

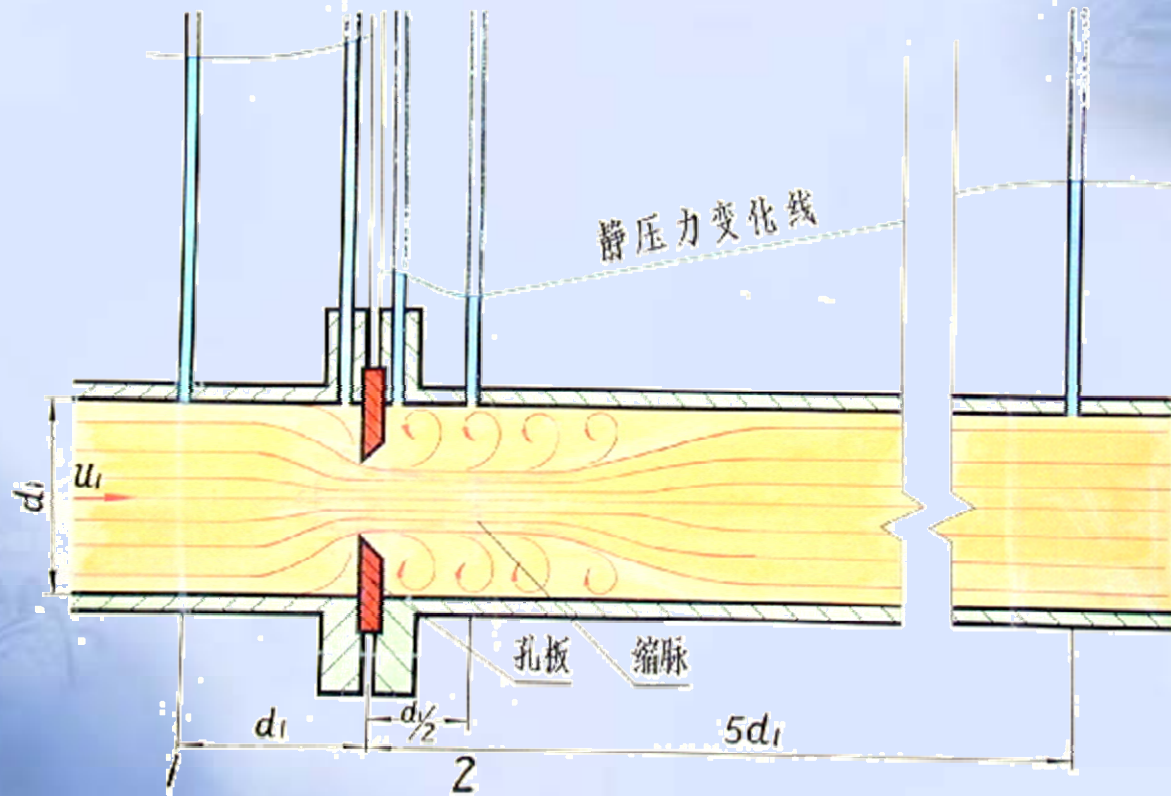
取压口在法兰上；

(2)径接法

上游取压口在距孔板1倍管径处，下游取压口在距孔板 $1/2$ 倍管径处。



孔板流速计及孔板后的压力变化



在1-1' 和2-2' 截面间列柏努利方程，暂不计能量损失

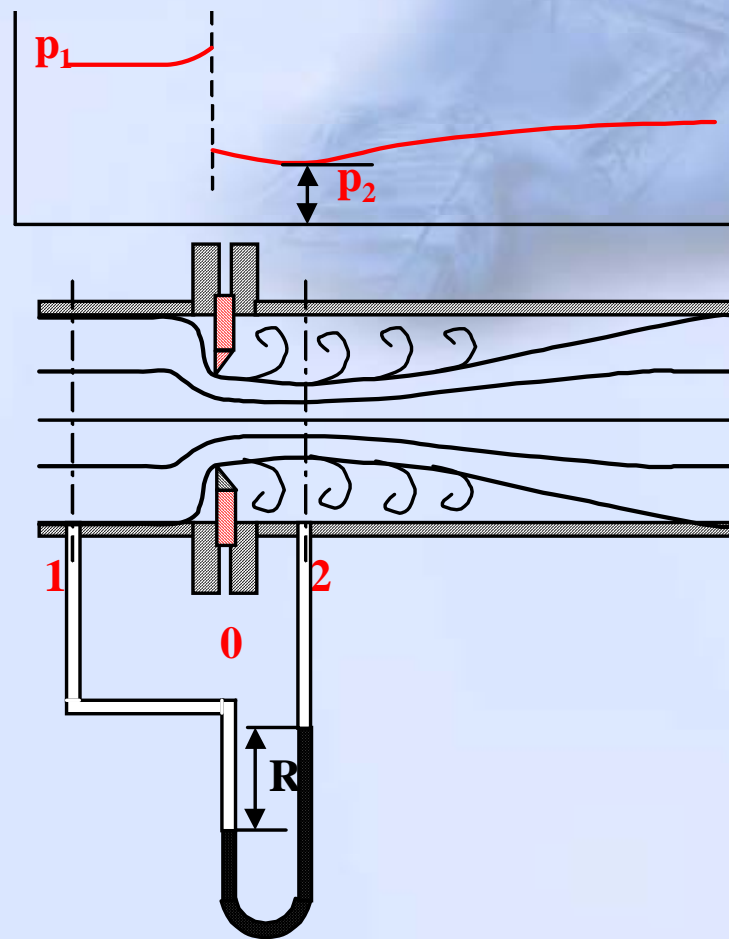
$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}u_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}u_2^2$$

变形得

$$\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = \frac{p_1 - p_2}{\rho}$$

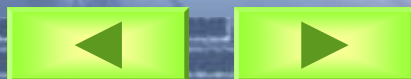
$$\sqrt{u_2^2 - u_1^2} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

- 问题：
- (1) 实际有能量损失；
 - (2) 缩脉处 A_2 未知。



孔板流量计

[视频](#)



解决方法：用孔口速度 u_0 替代缩脉处速度 u_2 ，并引入

校正系数 C_0 ：

$$\sqrt{u_0^2 - u_1^2} = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

由连续性方程 $u_1 = u_0 \frac{A_0}{A_1}$

$$u_0 = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

令 $C_0 = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}}$





则
$$u_0 = C_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$$u_0 = C_0 \sqrt{\frac{2Rg(\rho_0 - \rho)}{\rho}}$$

体积流量
$$V_s = u_0 A_0 = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2Rg(\rho_0 - \rho)}{\rho}}$$

质量流量
$$m_s = C_0 A_0 \sqrt{2Rg\rho(\rho_0 - \rho)}$$

C_0 ——流量系数（孔流系数）

A_0 ——孔面积。



讨论:

(1) 特点:

恒截面、变压差——差压式流量计

(2) 流量系数 C_0

对于取压方式、结构尺寸、加工状况均已规定的标准孔板:

$$C_0 = f\left(\text{Re}_d, \frac{A_0}{A_1}\right)$$

Re是以管道的内径 d_1 计算的雷诺数 $\text{Re}_d = \frac{d_1 \rho u_1}{\mu}$



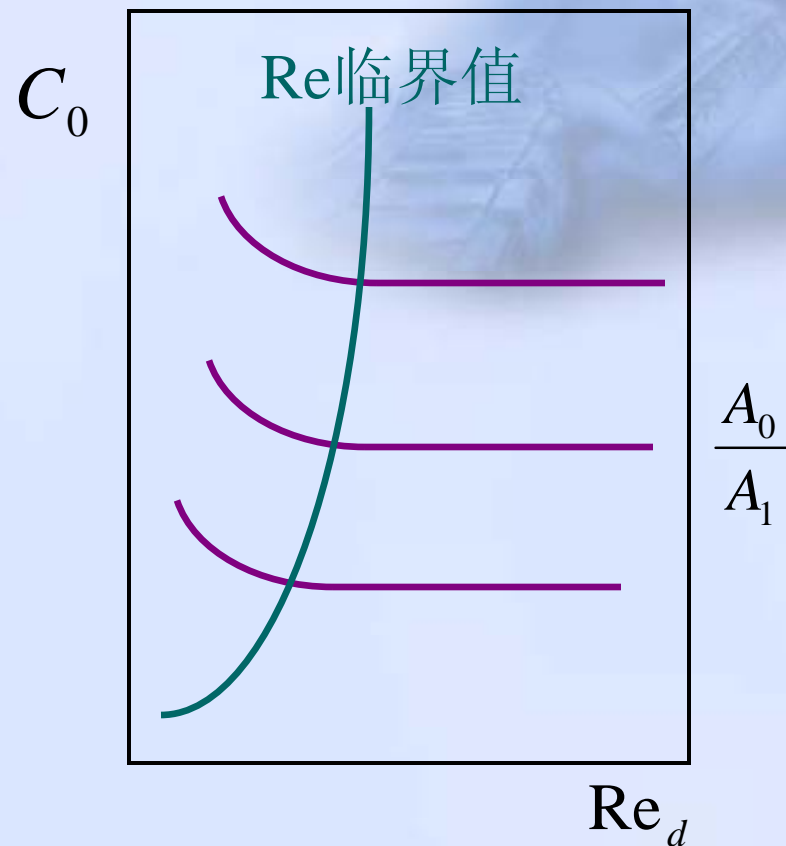
当 $Re > Re_{\text{临界}}$ 时,

$$C_0 = f\left(\frac{A_0}{A_1}\right)$$

一般 $C_0 = 0.6 \sim 0.7$

(3) 测量范围

$$V_s \propto \sqrt{R} \quad R \propto V_s^2$$



孔板流量计的测量范围受U形压差计量程决定。





2、安装及优缺点

- (1) 安装在稳定流段，上游 $l > 10d$ ，下游 $l > 5d$ ；
- (2) 结构简单，制造与安装方便；
- (3) 能量损失较大。

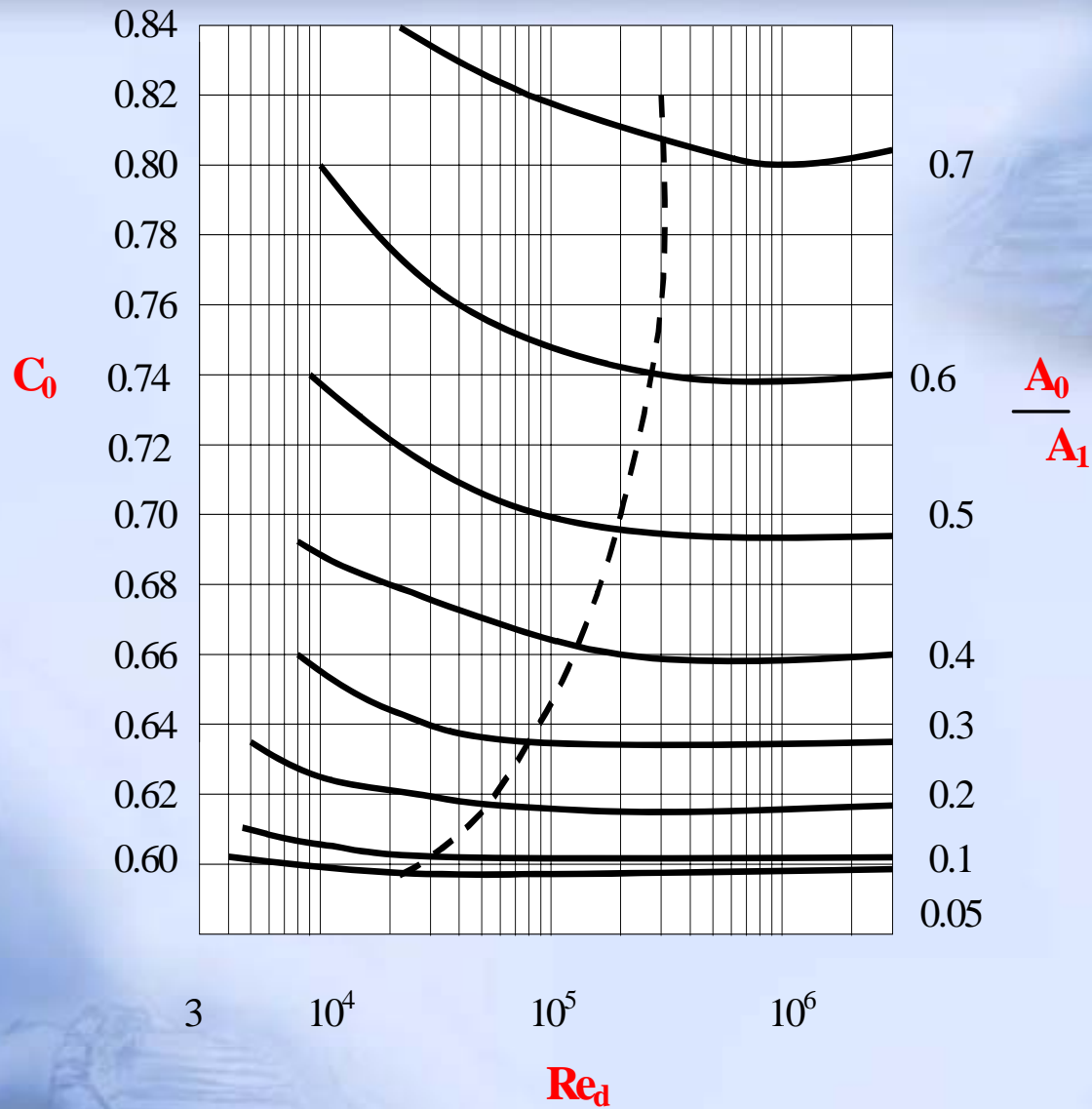
优点：构造简单，制造和安装都很方便

缺点：机械能损失（称之为永久损失）大

当 $d_0/d_1=0.2$ 时，永久损失约为测得压差的90%，常用的 $d_0/d_1=0.5$ 情形下，永久损失也有75%。

$$h_f = \zeta \cdot \frac{u_0^2}{2} \quad \zeta \approx 0.8$$

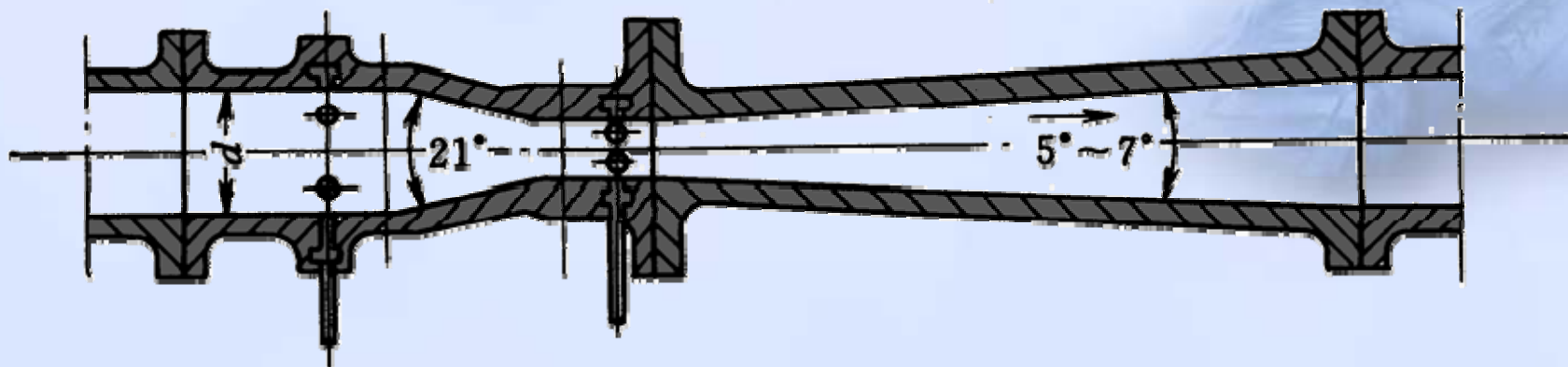




孔流系数 C_0 与 Re_d 及 $m (A_0/A_1)$ 的关系



三、文丘里流量计



收缩段锥角通常取 $15\sim 25^\circ$,

扩大段锥角要取得小些, 一般为 $5\sim 7^\circ$

$$q_V = u_0 A_0 = C_v A_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_i - \rho)}{\rho}}$$

C_v ——流量系数 ($0.98\sim 0.99$)

A_0 ——喉管处截面积



文丘里流量计的特点

- 属差压式流量计；
- 能量损失小，造价高。

缺点：加工比孔板复杂，因而造价高，且安装时需占去一定管长位置，

优点：其永久损失小，故尤其适用于低压气体的输送。

$$h_f = \zeta \cdot \frac{u_0^2}{2} \quad \zeta \approx 0.1$$

总结：变压头流量计的特点是

恒截面，变压头



四、转子流量计——变截面，恒压头

1. 结构

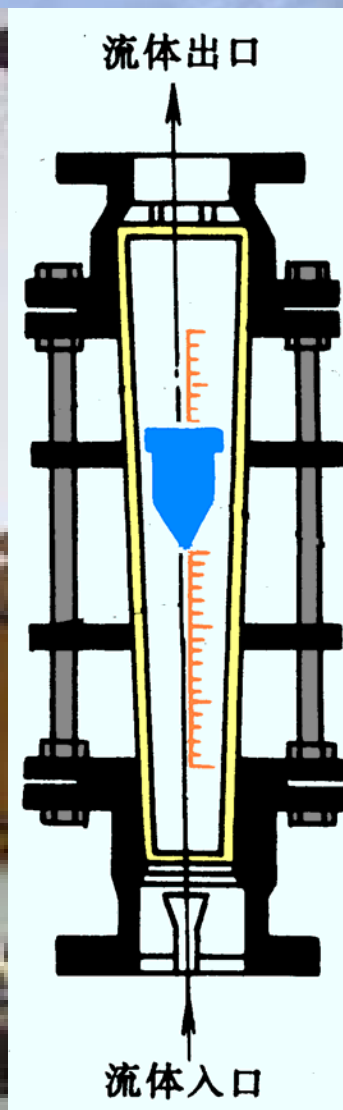
主要由微锥形管与转子两部分组成。

微锥形玻璃管，锥角约为 4° 左右

2. 测量原理：

从转子的悬浮高度来直接读取流量数值。其中转子的密度大于流体密度，即： $\rho_f > \rho$

转子（或称浮子）直径略小于玻璃管内径



3. 流量方程

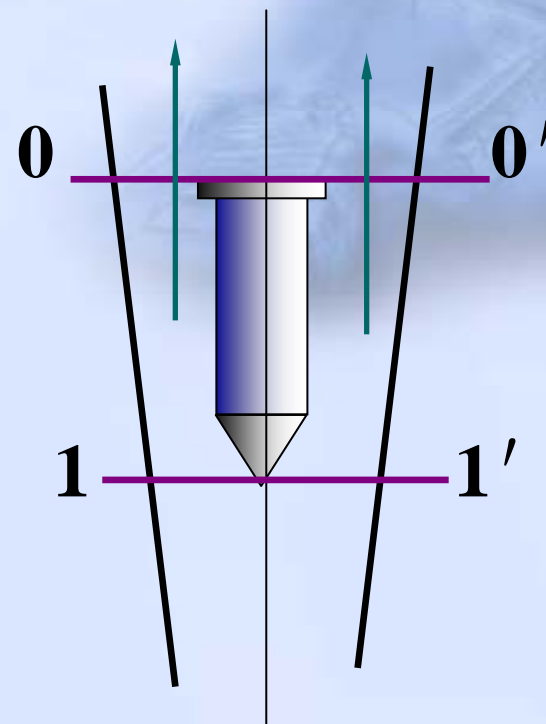
转子受力平衡:

$$(p_1 - p_0)A_f = \rho_f V_f g$$

在1-1' 和0-0' 截面间列
柏努利方程, 可得:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + z_1 g = \frac{p_0}{\rho} + \frac{u_0^2}{2} + z_0 g$$

$$p_1 - p_0 = (z_0 - z_1) \rho g + \frac{\rho}{2} (u_0^2 - u_1^2)$$





$$(p_1 - p_0)A_f = A_f(z_0 - z_1)\rho g + A_f \frac{\rho}{2}(u_0^2 - u_1^2)$$

$$\downarrow$$

$$V_f \rho g$$

流体的浮力

$$\downarrow$$

动能差

$$V_f(\rho_f - \rho)g = A_f \frac{\rho}{2}(u_0^2 - u_1^2)$$

由连续性方程

$$u_1 = u_0 \frac{A_0}{A_1}$$

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - (A_0/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2V_f(\rho_f - \rho)g}{\rho A_f}} = C_R \sqrt{\frac{2V_f(\rho_f - \rho)g}{\rho A_f}}$$

C_R ——流量系数





体积流量

$$q_V = C_R A_0 \sqrt{\frac{2(\rho_f - \rho)V_f g}{\rho A_f}}$$

讨论：

(1) 特点：

恒压差、恒流速、变截面——截面式流量计。

(2) 刻度换算

标定流体：20℃水（ $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ）

20℃、101.3kPa下空气（ $\rho = 1.2 \text{kg/m}^3$ ）



C_R 相同，同刻度时

$$\frac{q_{V,B}}{q_{V,A}} = \sqrt{\frac{\rho_A(\rho_f - \rho_B)}{\rho_B(\rho_f - \rho_A)}}$$

式中：1——标定流体；

2——被测流体。

气体转子流量计

$$\frac{q_{V,B}}{q_{V,A}} \approx \sqrt{\frac{\rho_A}{\rho_B}}$$



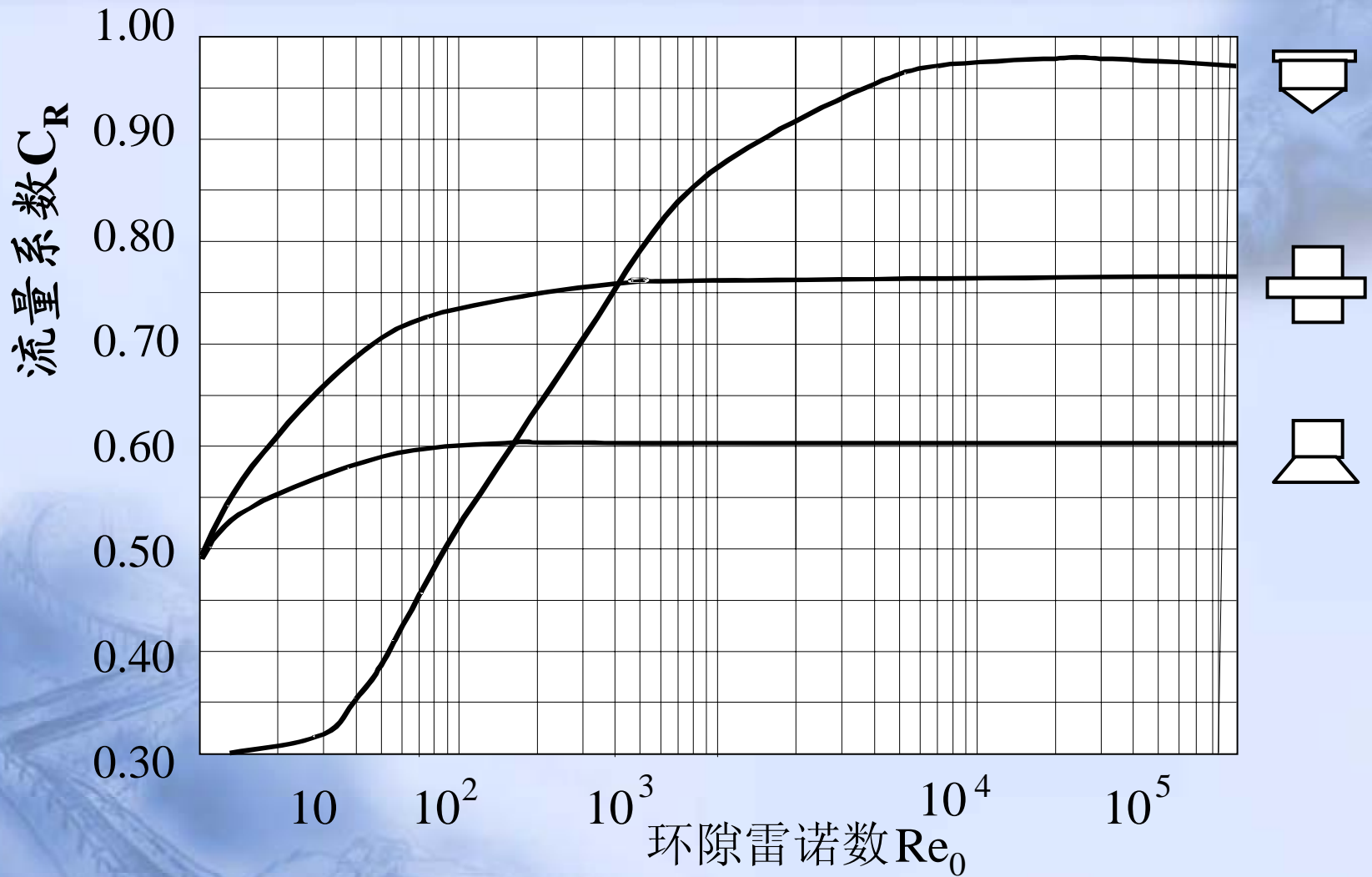


图1-58 转子流量计的流量系数 C_R



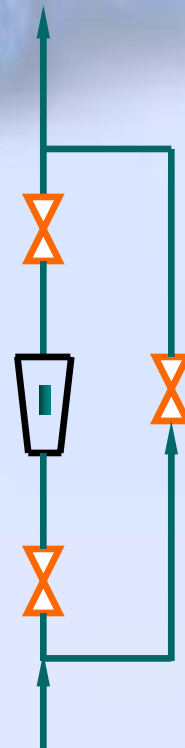
4. 转子流量计安装、使用中注意事项

转子流量计必须垂直安装，且应安装旁路以便于检修

优点：读取流量方便，流体阻力小，测量精确度高，能用于腐蚀性流体的测量；流量计前后无须保留稳定段。

缺点：玻璃管易碎，且不耐高温、高压。

$$q_V = C_R A_0 \sqrt{\frac{2V_f (\rho_f - \rho) g}{\rho A_f}}$$



本章结束

