

第一章 流体流动

化学工程与工艺研究所

2009-4-26

1

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

1.1 流体静止的基本方程

1.1.1 密度 ρ

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{kg/m}^3 \text{ (SI制)}$$

$$\rho = f(p, t)$$

不可压缩流体: 压力改变时其密度随压力改变很小的流体。

可压缩流体: 压力改变时其密度随压力改变有显著变化的流体。

液体: $\rho = f(T)$ 不可压缩流体 (**Imcompressible Fluid**)

气体: $\rho = f(T, p)$ 可压缩流体 (**Compressible Fluid**)

注: 若在输送过程中压力改变不大, 气体也可按不可压缩流体来处理。

2009-4-26

2

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

理想气体的密度：标准状态（1atm，0℃）下每kmol气体的体积为22.4 m³，则其密度为

理想气体标准状态下的密度，kg/m³ $r_0 = \frac{M}{22.4}$ 气体的千摩尔质量 kg/kmol

理想气体T, p下的密度，kg/m³ $r = r_0 \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} = 0.1203 \frac{Mp}{T}$

或 $r = \frac{m}{V} = \frac{nM}{V} = \frac{pM}{RT}$

注：以上3式只适用于理想气体。

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

气体混合物:

$$r = j_1 r_1 + j_2 r_2 + \mathbf{L} + j_n r_n$$

体积分数, 理想气体混合物中其值与摩尔分率 x 相等

液体混合物:

质量分率

$$\frac{1}{r} = \frac{a_1}{r_1} + \frac{a_2}{r_2} + \mathbf{L} + \frac{a_n}{r_n}$$

比容: 单位质量物体的体积 u $u = \frac{1}{r}$ kg/m^3

比重: 某物质的密度对水 (标态下空气) 的密度之比 d

$$d_{\text{液体}} = \frac{r}{r_{4^\circ\text{CH}_2\text{O}}} \quad d_{\text{气体}} = \frac{r}{r_{\text{标态空气}}}$$

2009-4-26 记: 常温下水的密度 1000kg/m^3 , 标态下空气密度 1.293 kg/m^3 4

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

1.1.2 压力

1.1.2.1 压力的单位和定义

流体的压力 (p) 是流体垂直作用于单位面积上的力，严格地说应该称压强。称作用于整个面上的**力**为**总压力**。

$$p = \frac{P}{A}$$

压力 (小写) p = $\frac{P$ — 力 (大写) P }{ A — 面积}

$$[p] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$$

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

记：常见的压力单位及它们之间的换算关系

$$\begin{aligned} 1\text{atm} &= 101300\text{Pa} = 101.3\text{kPa} = 0.1013\text{MPa} \\ &= 10330\text{kgf/m}^2 = 1.033\text{kgf/cm}^2 \\ &= 10.33\text{mH}_2\text{O} \\ &= 760\text{mmHg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1\text{at} (\text{工程大气压}) &= 1\text{kgf/cm}^2 \\ &= 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 (\text{Pa}) \\ &= 10 \text{ mH}_2\text{O} \\ &= 735.6 \text{ mmHg} \end{aligned}$$

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

1.1.2.2 压力的表示方法 (压强的基准)

压强的大小常以两种不同的基准来表示：一是绝对真空，所测得的压强称为绝对压强；二是大气压强，所测得的压强称为表压或真空度。一般的测压表均是以大气压强为测量基准。

(1) 被测流体的压力 > 大气压

$$\text{表压} = \text{绝压} - \text{大气压}$$

$$\text{即 } p_m = p_{ab} - p_a$$

(2) 被测流体的压力 < 大气压

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝压} = -\text{表压}$$

$$\text{即 } p_{vac} = p_a - p_{ab} = -p_m$$

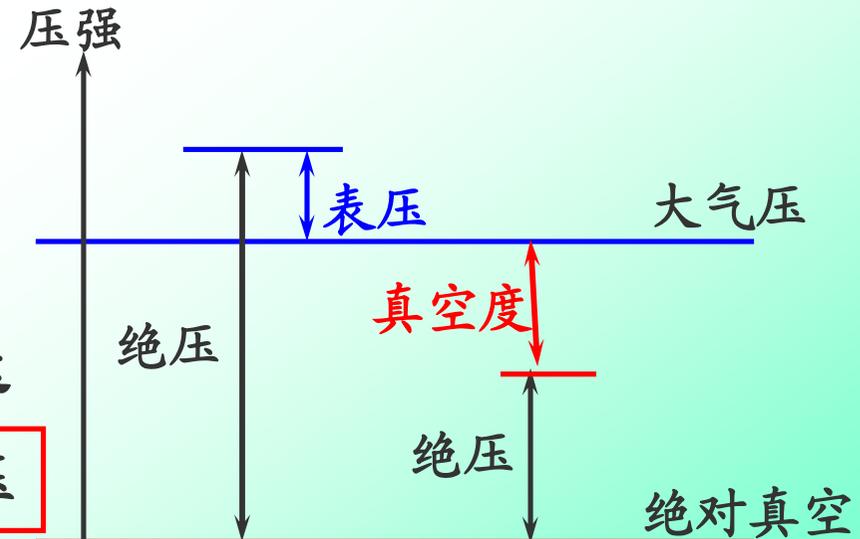


图1-8 压强的基准和度量

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

1.1.3 流体的静力平衡

静止流体内部任一点的压力称为该点流体的静压力，其特点为：

(1) 在静止流体中，空间各点的静压强的数值不同，但作用于某一点不同方向上的压强在数值上是相等的；

(2) 若通过该点指定一作用平面，则压力的方向垂直于此面；

(3) 在重力场中，同一水平面上各点的流体静压力相等，但随位置高低而变。

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

若 ρ 为常数

$$\frac{p}{r} + gz = \text{常数} \quad (1-4)$$

$$\frac{p_2 - p_1}{rg} = z_1 - z_2$$

或
$$p_2 = p_1 + rg(z_1 - z_2) \quad (1-5)$$

或
$$gz_1 + \frac{p_1}{r} = gz_2 + \frac{p_2}{r}$$

势能

以上三式都为流体静力学基本方程。

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

利用式 (1-5) 可以得到液体内部任一点的压力, 即

$$p = p_0 + \rho g (z_1 - z_2) = p_0 + \rho gh$$

p_0 液面处压力
 ρgh 与液面高度差

几点讨论:

- (1) p_0 一定, $h \uparrow$, $p \uparrow$;
- (2) p_0 改变, 液面上的压力变化会传递到液体内部;
- (3) $p_0=0$ (绝对真空), $p = \rho gh$;
- (4) 静止、连续的同一种流体 (ρ 为常数), 处于同一水平面 (即 h 相等) 则 p 相等, 这就是**等压面**。

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

1.1.4 流体静力平衡方程的应用（液柱压差计）

(1) 简单测压管

最简单的测压管如图所示。

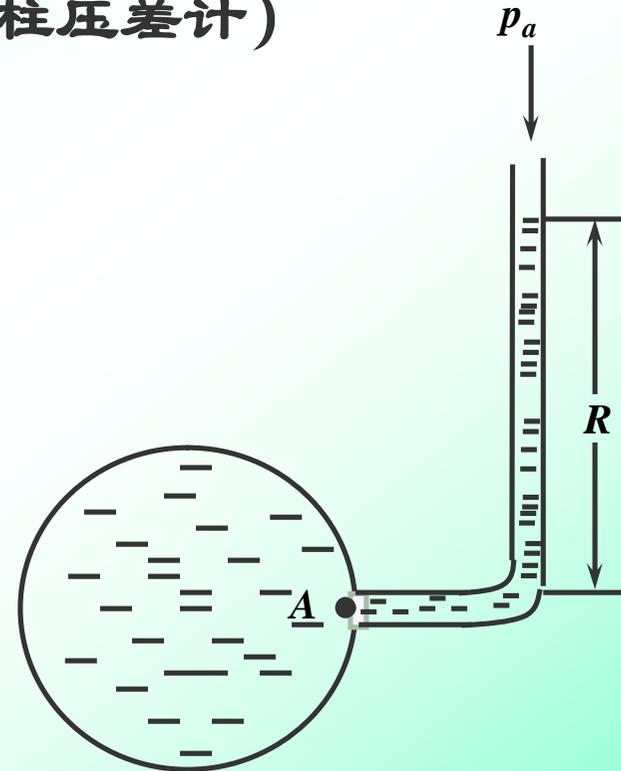
A点的**绝压**为： $p_A = p_a + Rrg$

A点的**表压**为： $p_A - p_a = Rrg$

缺点：

①只适用于高于大气压的液体压强的测定，不能适用于气体；

②若被测压强 p_A 过大，读数 R 也将过大，测压很不方便。反之，若 p_A 与大气压 p_a 过于接近， R 将很小，使测量误差增大。



简单测压管

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

(2) U形测压管

U形测压管如图所示。等压面在何处？

1-2面为等压面, $p_1 = p_2$

$$p_1 = p_A + rgh_1$$

$$p_2 = p_a + r_i gR$$

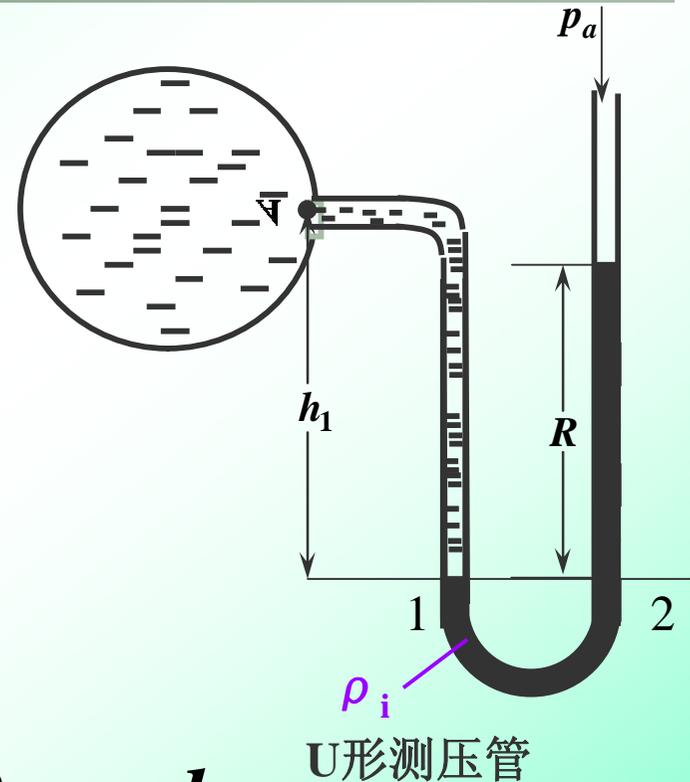
由此求得A点的绝压为

$$p_A = p_a + r_i gR - rgh_1$$

A点的表压为: $p_A - p_a = r_i gR - rgh_1$

若被测流体为气体, 因气体的密度 ρ 很小, 则由气柱 h_1 造成的静压 ρgh_1 可以忽略, 得A点的表压为

$$p_A - p_a = r_i gR$$

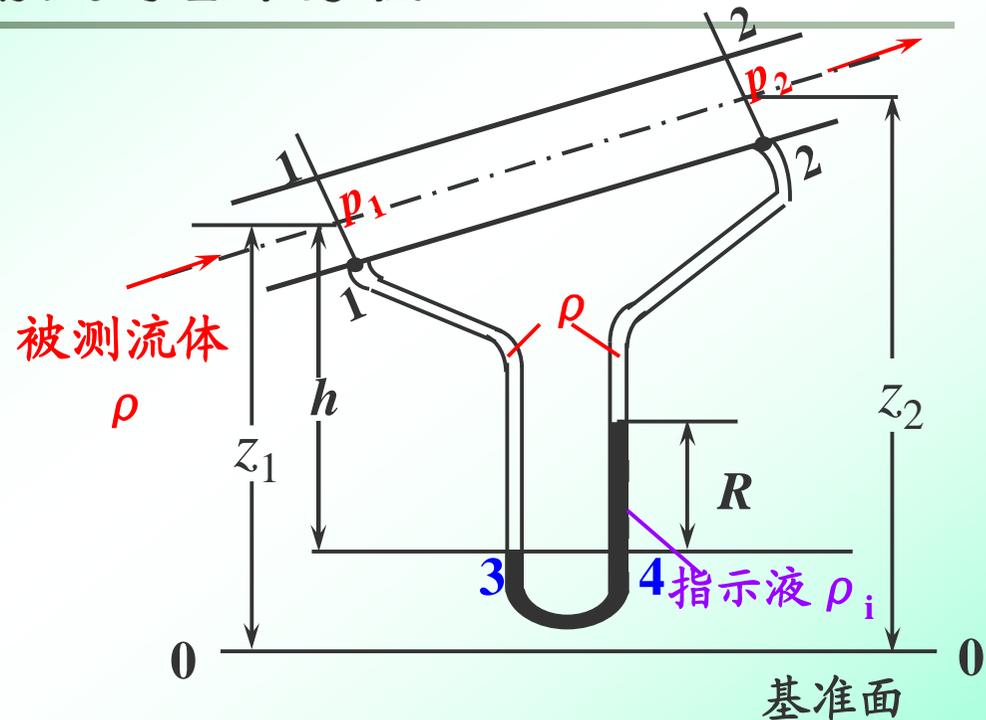


U形测压管

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

(3) U形压差计

U形压差计如图所示，将测压管的两端分别与测压口相连，可以测得两测压点之间的**压强差**或**虚拟压强差**，故称为压差计。
等压面在何处？



U形压差计

3-4面为等压面， $p_3 = p_4$

$$p_3 = p_1 + rgh$$

$$p_4 = p_2 + rg \left[(z_2 - z_1) + (h - R) \right] + r_i g R$$

$$(p_1 + rgz_1) - (p_2 + rgz_2) = (r_i - r)gR$$

上式表明，当压差计两端的流体相同且**两测压口不在等高面上**时，U形压差计测得的是两侧压口的**虚拟压强差**。

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

当被测管道水平放置时，两测压口处于等高面上， $z_1 = z_2$ ，U形压差计直接测得两点的压差，即

$$p_1 - p_2 = (r_i - r)gR$$

当测量气体时

$$p_1 - p_2 = r_i gR$$

对于一般情况即两测压口不在等高面上，压差应由下式计算

$$p_1 - p_2 = (r_i - r)gR + rg(z_2 - z_1)$$

对于同样的压差 $p_1 - p_2$ ，读数 R 与密度差 $(\rho_i - \rho)$ 有关，故应妥善选择指示液的密度 ρ_i ，使读数 R 在适宜的范围内。另外，所选的指示液应该与被测流体不互溶，常用的指示液有水银（汞）Hg，四氯化碳 CCl_4 等。

1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

$$p_1 - p_2 = (\rho_i - \rho)gR + \rho g(z_2 - z_1)$$

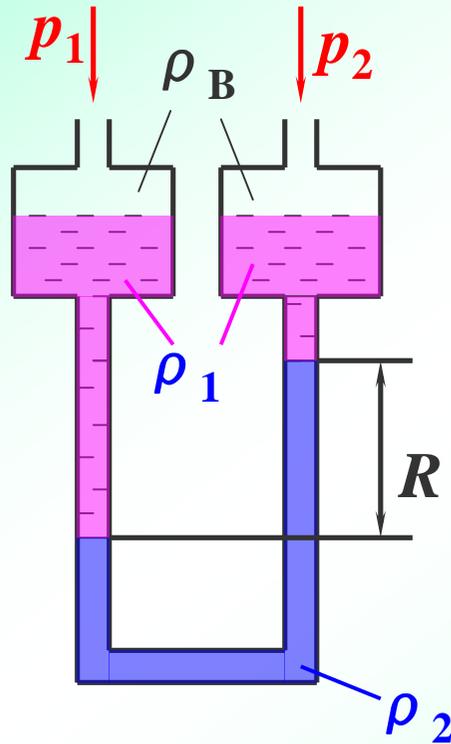
思考题:

- ①若压差小，读数 R 小，除了选择合适的指示液使 $(\rho_i - \rho)$ 减小、 R 增大外，还有什么方法使 R 增大？
- ②若指示液的密度 ρ_i 小于被测流体密度 ρ ，又该怎样测压差？

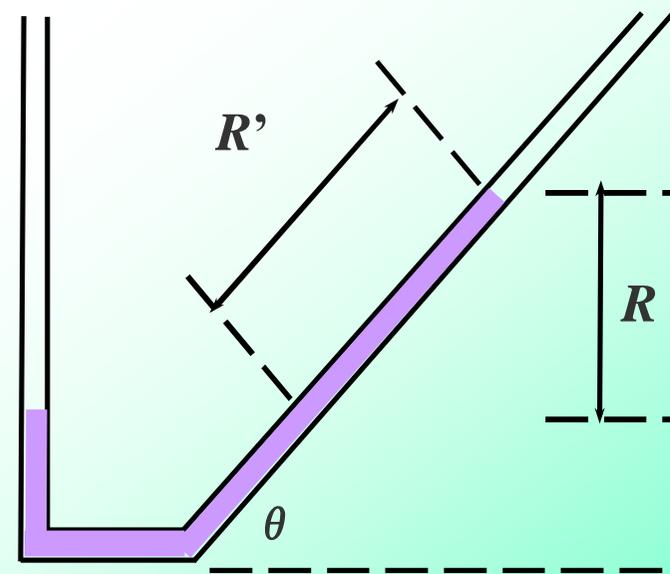
1 流体流动—1.1 流体静止的基本方程

(4) 双液体U管压差计

$$p_1 - p_2 = (r_2 - r_1)gR$$



微差压差计



倾斜液柱压差计
(Inclined manometer)

2009-4-26

16

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

1.2 流体流动的基本方程

1.2.1 概述

一、流量与流速

体积流量：流体单位时间流过管路任一截面的体积，

$$V_s = V / \theta \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

质量流量：流体单位时间流过管路任一截面的质量，

$$m_s = m / \theta \quad (\text{kg}/\text{s})$$

流速：工程上以体积流量除以管截面所得之商作为平均速度，简称流速，

$$u = V_s / A \quad (\text{m}/\text{s})$$

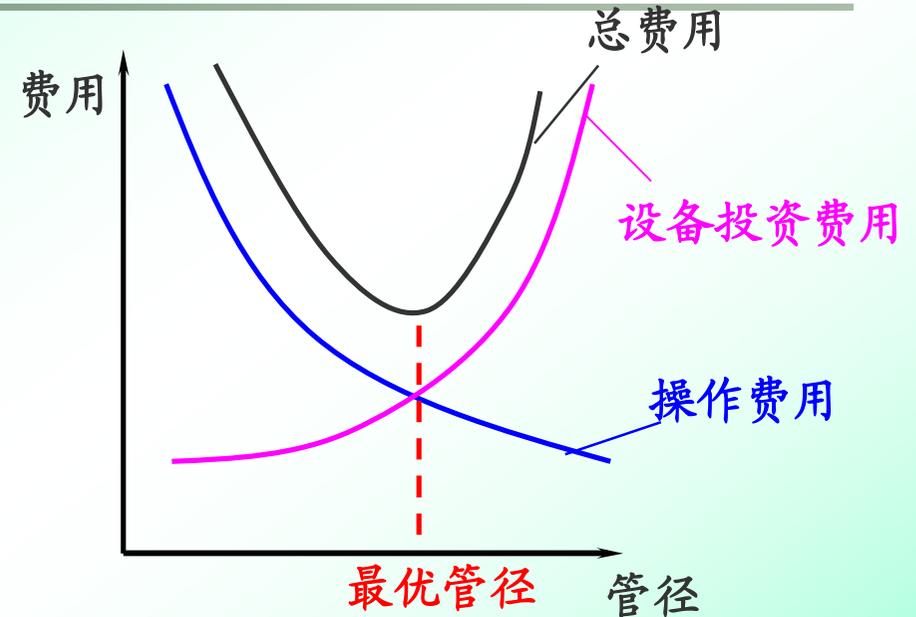
质量流速：质量流量除以管截面，

$$G = m_s / A = V_s \rho / A = u \rho \quad (\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

$$V_s = \frac{\rho}{4} d^2 u = 0.785 d^2 u$$

$$d = \sqrt{\frac{V_s}{0.785 u}}$$



$u \uparrow$, $d \downarrow$, 管内阻力 \uparrow , 能量消耗 \uparrow , 泵、风机设备操作费用 \uparrow ; 但 $d \downarrow$, 设备投资费用 \downarrow , 总费用有一最小值, 因此是个优化的问题。

经验值: 液体的流速 $0.5 \sim 3 \text{ m/s}$, 气体 $10 \sim 30 \text{ m/s}$

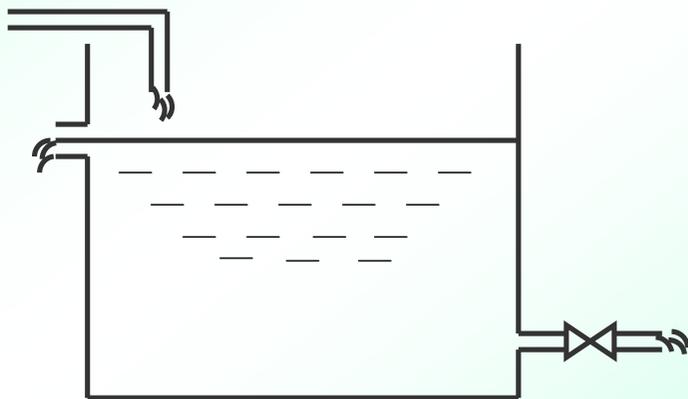
1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

二、稳定流动与不稳定流动

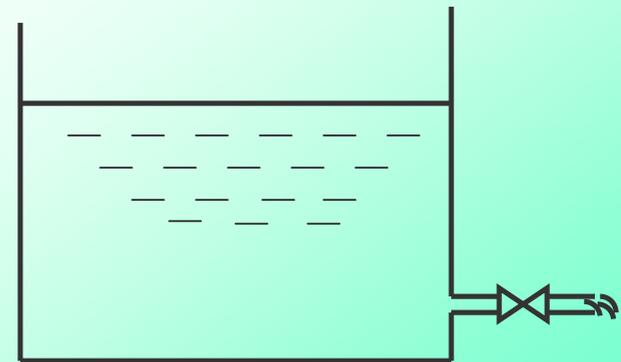
按照流体流动时的流速以及其他和流动有关的物理量（如压力、密度）是否随时间而变化，可将流体的流动分成：

稳定流动(Steady flow)：流速以及其他和流动有关的物理量不随时间而变的流动。

不稳定流动(Unsteady flow)：流速以及其他和流动有关的物理量随时间而变的流动。



稳定流动



不稳定流动

2009-4-26

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

三、总衡算

物料衡算

能量衡算

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

1.2.2 物料衡算——连续性方程（稳定流动）

$$m_{s1} = m_{s2}$$

即 $u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2$

若流体不可压缩 $\rho = \text{常数}$ ，则

$$uA = \text{常数}$$

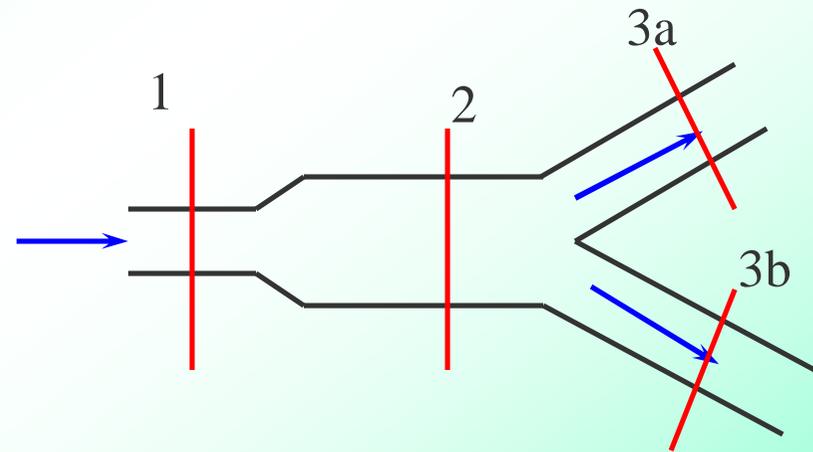


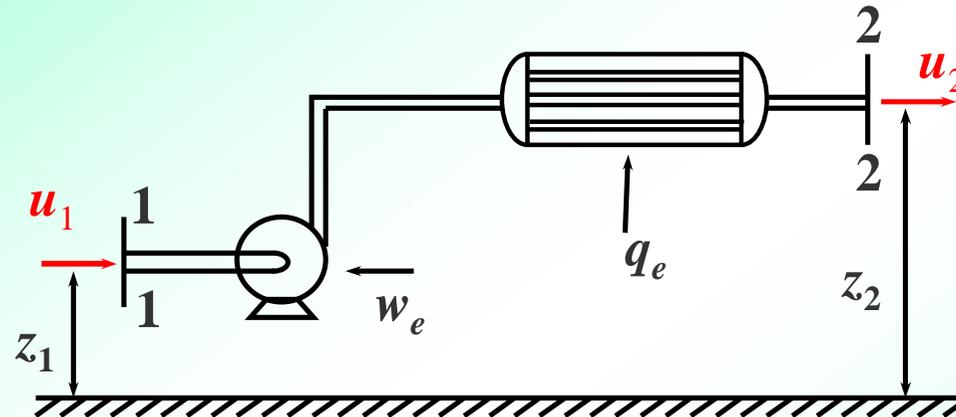
图 1-7

注： 圆形截面管道， $A=0.785d^2$ （截面积）， $u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2$

$A = \pi dL$ （外表面积）

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

1.2.3 稳定流动的总能量衡算



$$mU_1 + mgz_1 + \frac{1}{2}mu_1^2 + p_1V + mq_e + mw_e = mU_2 + mgz_2 + \frac{1}{2}mu_2^2 + p_2V$$

输入

输出

$$U_1 + gz_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} + q_e + w_e = U_2 + gz_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2}$$

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

$$U_1 + gz_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} + q_e + w_e = U_2 + gz_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2}$$

输入

输出

机械能：位能、动能、压力能、功，特点：在流体流动过程中可以相互转变，也可以变成热或流体的内能，还可以用于流体的输送；

内能、热：在流动系统内不能直接转变为用于输送流体的机械能。

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

1.2.4 机械能衡算——柏努利方程

(1) 柏努利方程

假设：①流体是不可压缩的， $\rho = \text{常数}$ ；

②流动系统中无热交换器， $q_e = 0$ ；

③流体温度不变， $U_1 = U_2$ 。

$$\frac{p_1}{r} + gz_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + w_e = \frac{p_2}{r} + gz_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \dot{a}w_f \quad (1-23)$$

阻力损失

即

$$gDz + \frac{1}{2}D(u^2) + \frac{Dp}{r} = w_e - \dot{a}w_f$$

以上两式为实际不可压缩流体稳定流动的机械能衡算式。
对于可压缩流体由于密度不为常数，所以不可用。

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

若流体为理想流体即流动过程中没有阻力的流体，
 $\sum w_f = 0$ ，且又无外功加入， $w_e = 0$ ，则

$$gz_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \frac{p_2}{\rho}$$

上式称为柏努利 (bernoulli) 方程 (理想流体)

(2) 柏努利方程的讨论

① 当流体处于静止状态又无外功加入时， $u_1 = u_2$ 、 $w_e = 0$ 、

$$\sum w_f = 0$$

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

静力学基本方程

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

② 柏努利方程式的物理意义

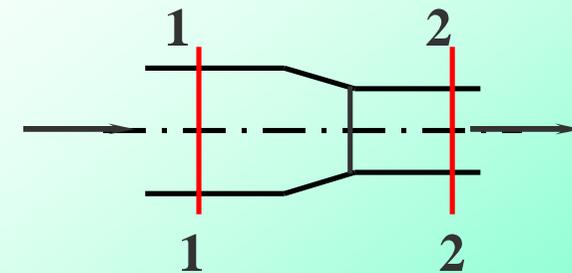
流体在流动中，若没有外功加入又没有能量消耗，如没有外功加入的理想流体则任一截面上的机械能总量 E 为常数，即

$$E = gz + \frac{1}{2}u^2 + \frac{p}{\rho} = \text{常数}$$

理想流体流动中各种形式的机械能可以相互转化。

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

则 u_1 、 u_2 、 p_1 、 p_2 的关系如何？



有外功加入又有能量消耗

$$DE = w_e - \dot{a} w_f$$

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

③ 有效功率

$$w_e m_s = N_e \text{—— 有效功率 (流体真正得到的功率)}$$

$\begin{matrix} \text{J/kg} & \text{kg/s} & \text{W} \\ \swarrow & \swarrow & \swarrow \\ w_e & m_s & N_e \end{matrix}$

外界输给电动机的功率 > 流体真正得到的功率

即 轴功率 N > 有效功率 N_e

效率 $h = \frac{N_e}{N} < 1 \longrightarrow N = \frac{N_e}{h}$

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

④ 衡算基准不同时的柏努利方程

i) 以单位重量流体为衡算基准

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + w_e = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \dot{a}w_f \quad \text{J/kg}$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{w_e}{g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{\dot{a}w_f}{g} \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{m/s}^2} = \frac{\text{J}}{\text{N}} = \text{m}$$

流体输送机械对每牛顿流体所做的功

令 $h_e = \frac{w_e}{g}, \quad \dot{a}h_f = \frac{\dot{a}w_f}{g}$

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + h_e = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \dot{a}h_f$$

压力头

位头

速度头

泵的扬程

压头损失

(静压头) (位压头) (动压头)

总压头

2009-4-20

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

ii) 以单位体积流体为衡算基准

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 + \frac{1}{2}u_1^2 + w_e = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 + \frac{1}{2}u_2^2 + \dot{a}w_f$$

J/kg

$$p_1 + \rho gz_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \underbrace{p_t}_{\text{全风压}} = p_2 + \rho gz_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \underbrace{\dot{a}Dp_f}_{\text{压力降 (阻力损失)}}$$

$\frac{\text{J}}{\text{kg}} \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$

注：柏努利方程是针对理想流体而又无外功加入时的以单位质量为衡算基准的机械能衡算式，实际流体的以单位质量为衡算基准的机械能衡算式我们称为**实际流体的柏努利方程**。

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

⑤ 对可压缩流体（如气体）

对可压缩流体，其 ρ 是随压力的变化而变化的，在流体输送过程中， p 是变化的，因此 ρ 也是变化的，但是对于**短距离输送**，可把 ρ 看作常数，或者当

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\% \text{ 时} \quad r_m = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

⑥ 不稳定流动

在工程实际中有时会遇到不稳定流动的状态，如开工阶段，此时可根据某个流动的瞬间列出物料衡算式（微分方程），然后进行积分。

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

(2) 柏努利方程的应用

例题1: 教材P21 例1-7 讲解

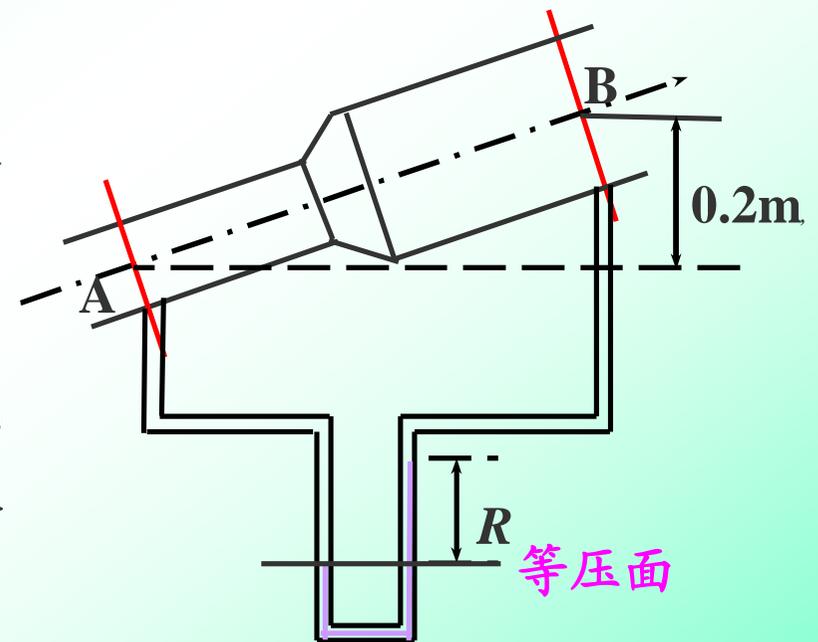
总结要点:

- (2) 确定上、下游截面, 明确衡算范围;
- (2) 定出基准水平面;
- (3) 列柏努利方程求解, 注意使用一致的单位。

1 流体流动—1.2 流体流动的基本方程

例题2 水以 $60\text{m}^3/\text{h}$ 的流量在一倾斜管中流过，此管的内径由 100mm 突然扩大到 200mm ，见附图。A、B两点的垂直距离为 0.2m 。在此两点间连接一U形压差计，指示液为四氯化碳，其密度为 $1630\text{kg}/\text{m}^3$ 。若忽略阻力损失，试求：（1）U形管两侧的指示液液面哪侧高，相差多少 mm ？

（2）若将上述扩大管道改为水平放置，压差计的读数有何变化？



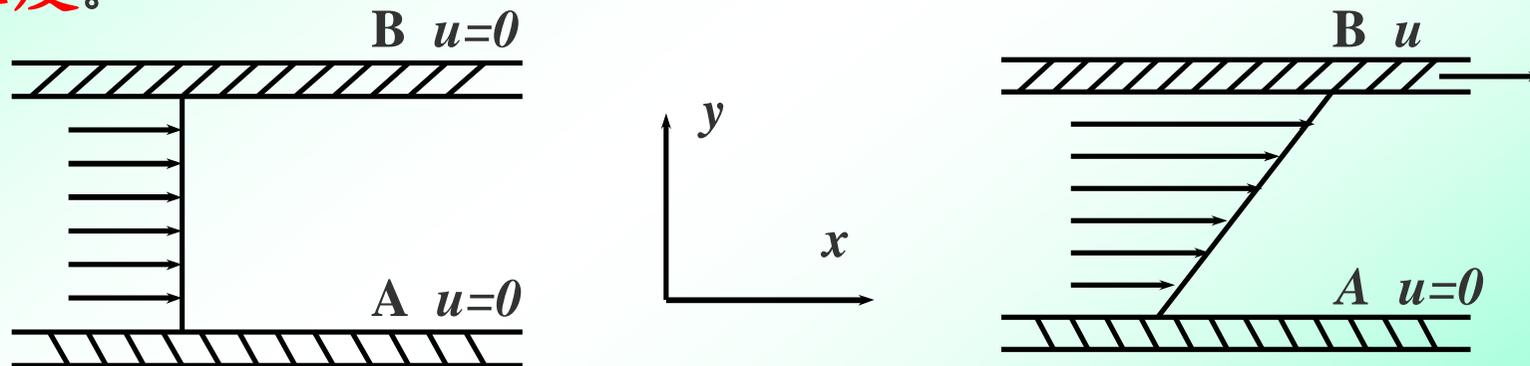
1 流体流动—1.3 流体流动现象

1.3 流体流动现象

1.3.1 粘度

(1) 牛顿粘性定律

影响流体流动时内摩擦大小的因素很多，其中属于物理性质方面的是流体的粘性。衡量流体粘性大小的物理量称为**粘度**。



$$t = m \frac{du}{dy} \quad (1-28)$$

2009-4-26 动力粘度简称粘度, Pa·s 速度梯度

1 流体流动—1.3 流体流动现象

牛顿粘性定律适用于**牛顿型流体**，即速度梯度与剪应力成线性关系；不符合牛顿粘性定律的流体称为**非牛顿型流体**。

动力粘度

$$[m] = \frac{[t]}{\frac{du}{dy}} = \frac{\text{N/m}^2}{\text{m/s}} = \frac{\text{N} \times \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \times \text{s}$$

1 流体流动—1.3 流体流动现象

(2) 粘度的单位

$$\text{SI制} \quad [m] = \frac{[t]}{\frac{\hat{e} \overline{d u} \hat{u}}{\hat{e} \overline{d y} \hat{u}}} = \frac{\text{N/m}^2}{\frac{\text{m/s}}{\text{m}}} = \frac{\text{N} \times \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \times \text{s}$$

$$\text{cgs制} \quad [m] = \frac{[t]}{\frac{\hat{e} \overline{d u} \hat{u}}{\hat{e} \overline{d y} \hat{u}}} = \frac{\text{dyn/cm}^2}{\text{cm/s}} \times \text{cm} = \frac{\text{dyn} \times \text{s}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{g}}{\text{cm} \times \text{s}} \circ \text{P} (\text{泊})$$

$$\text{cP} (\text{厘泊}) = 0.01 \text{P}, \quad 1 \text{Pa} \times \text{s} = 10 \text{P} = 1000 \text{cP}$$

$$\text{工程制} \quad 1 \text{kgf} \cdot \text{s/m}^2 = 9810 \text{cP}$$

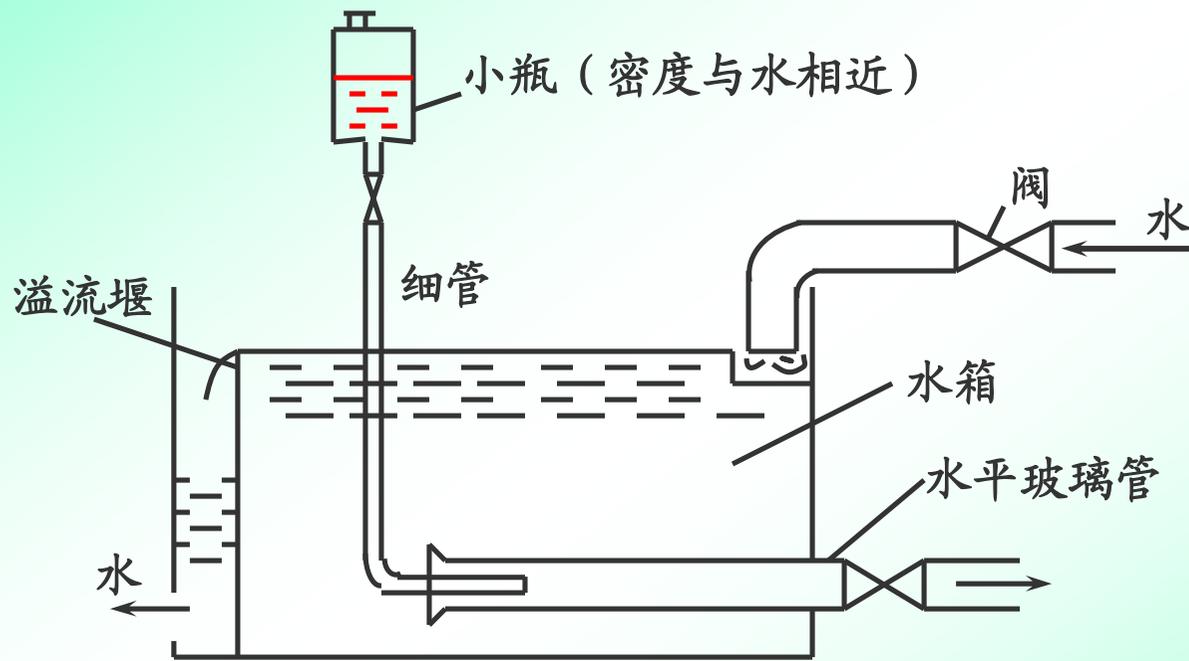
记: $m_{20^\circ \text{C}} = 1.005 \text{cP} = 10^{-3} \text{Pa} \times \text{s}$

2009-4-26

1 流体流动—1.3 流体流动现象

1.3.2 流动型态

(1) 雷诺实验



雷诺实验

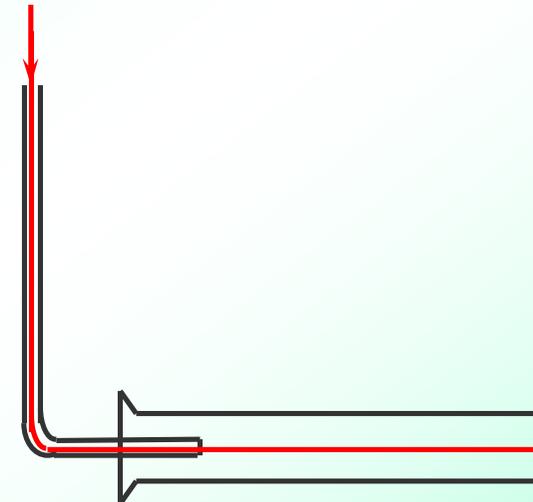


图 (a) 层流

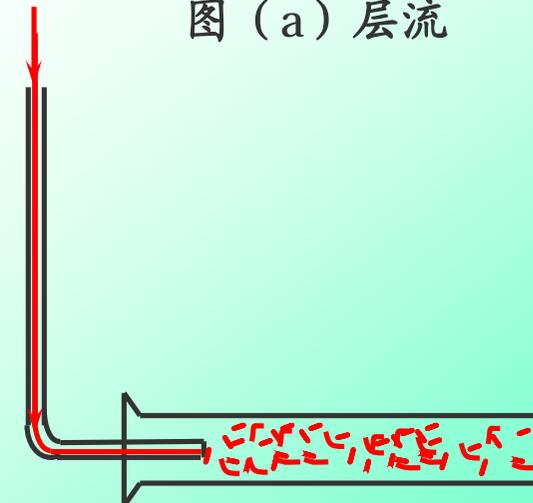


图 (b) 湍流

1 流体流动—1.3 流体流动现象

(2) 雷诺数

$$\text{Re} = \frac{du r}{m}$$

$$[\text{Re}] = \frac{[d][u][r]}{[m]} = \frac{\text{m} \times \text{m/s} \times \text{kg/m}^3}{\text{Pa} \times \text{s}} = \frac{\text{m} \times \text{m/s} \times \text{kg/m}^3}{\frac{\text{kg} \times \text{m/s}^2}{\text{m}^2} \times \text{s}} = \text{kg}^0 \times \text{m}^0 \times \text{s}^0$$

层流 (**Laminar Flow**) : $\text{Re} < 2000$;

湍流 (**Turbulent Flow**) : $\text{Re} > 4000$;

2000 < Re < 4000时, 有时出现层流, 有时出现湍流, 或者是二者交替出现, 为外界条件决定, 称为过渡区。

流型只有两种: **层流和湍流**。

1 流体流动—1.3 流体流动现象

雷诺数的物理意义

$$\text{Re} = \frac{d u r}{m} = \frac{(ru) \times u}{m \frac{u}{d}} = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}}$$

质量流速

$$\left[u^2 r \right] = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^3} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{m}^2} \quad \text{单位时间通过单位截面积的动量。}$$

$$\left[m \frac{u}{d} \right] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{m/s}}{\text{m}^2 \cdot \text{m}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{m}^2} \quad \text{单位面积上流体粘性力的大小}$$

当Re较大时，流体的惯性力大于粘性力，占主导地位，流体的湍动程度大，流体流动形态为湍流；而当Re较小时，流体的粘性力大于惯性力，占主导地位，流体的湍动程度小，流体流动状态为层流；即Re越大，流体湍动程度越大。

1 流体流动—1.3 流体流动现象

(3) 湍流的脉动现象和时均化

Ø 脉动现象

Ø 时均速度

Ø 脉动速度

1 流体流动—1.3 流体流动现象

1.3.3 管内流动的分析

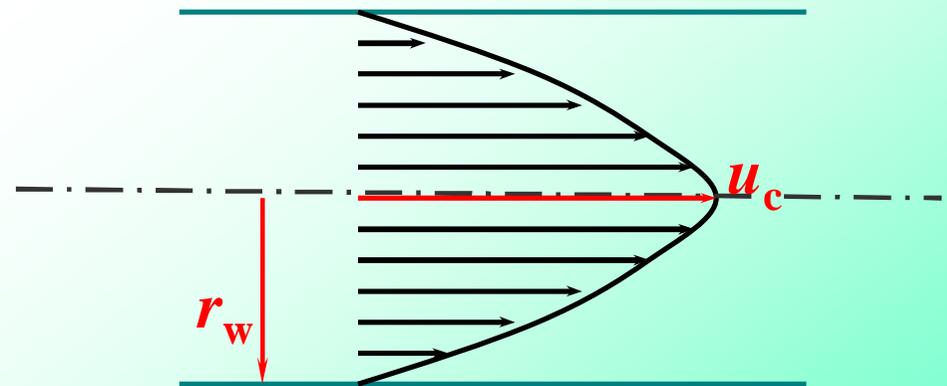
(1) 层流的速度分布与平均速度

层流时管内速度分布

$$u = u_c \left(1 - \frac{r^2}{r_w^2}\right)$$

平均速度

$$u = \frac{V_s}{\pi r_w^2} = \frac{1}{2} u_c$$

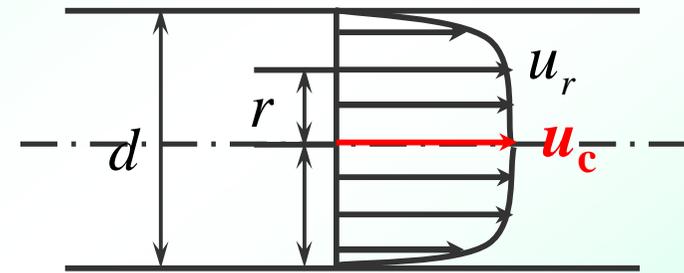


层流时的速度分布

1 流体流动—1.3 流体流动现象

(2) 湍流的速度分布与平均速度

$$\text{速度分布 } u = u_c \left[1 - \frac{r}{r_w} \right]^{\frac{1}{n}}$$



湍流时的速度分布

其中 $n = 6 \sim 10$ 与流体的流动状态有关， Re 越大， n 也越大。

$$4 \cdot 10^4 < Re < 1.1 \cdot 10^5 \text{ 时, } n = 6$$

$$1.1 \cdot 10^5 < Re < 3.2 \cdot 10^6 \text{ 时, } n = 7$$

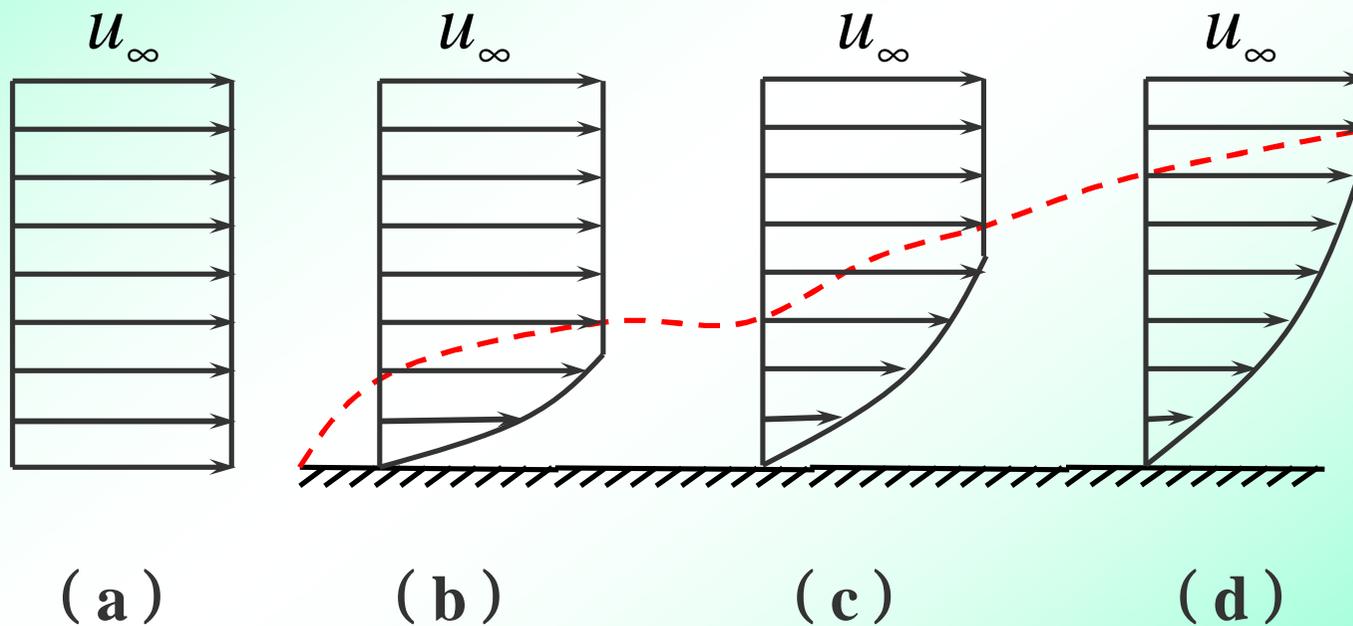
$$Re > 3.2 \cdot 10^6 \text{ 时, } n = 10$$

平均速度：当 $n = 7$ 时，积分得 $u = 0.817u_c$

1 流体流动—1.3 流体流动现象

1.3.4 边界层概念

(1) 边界层及其形成



平壁上边界层的形成

1 流体流动—1.3 流体流动现象

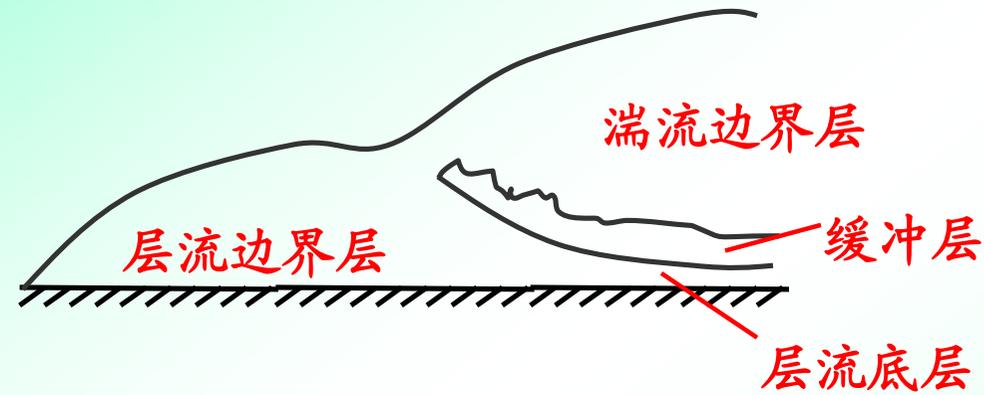


图1-23 层流边界层与湍流边界层

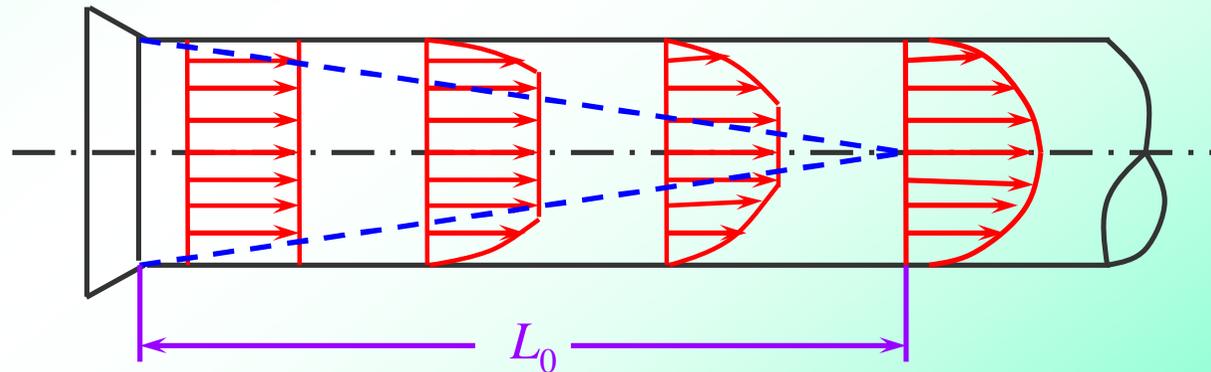


图1-24 管内边界层的形成及发展

1 流体流动—1.3 流体流动现象

(2) 边界层分离

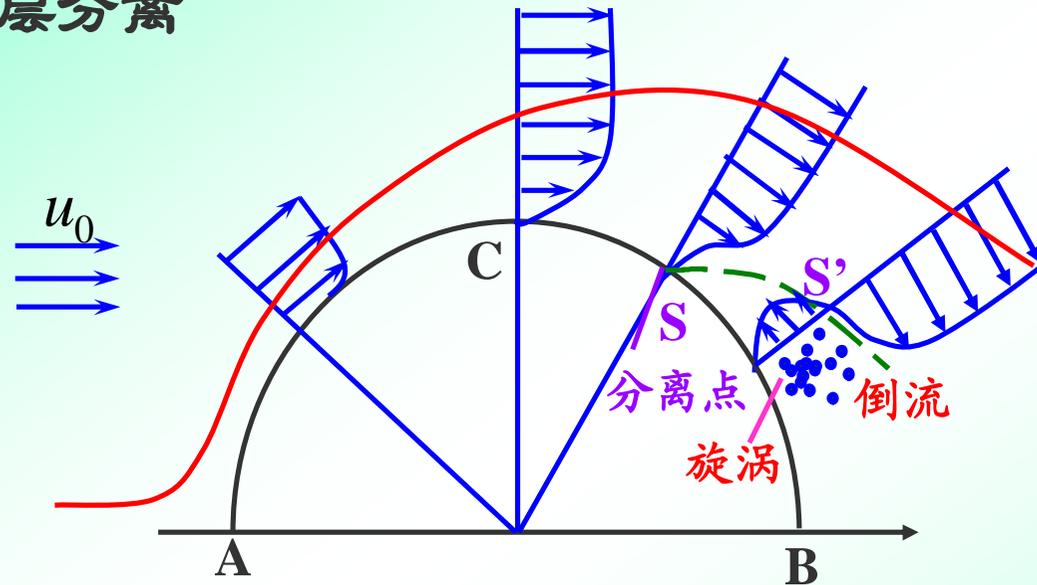


图1-25 边界层分离示意图

由上述可知:

- (1) 流道扩大时必造成逆压强梯度;
- (2) 逆压强梯度容易造成边界层的分离;
- (3) 边界层分离造成大量旋涡, 大大增加机械能消耗。

1 流体流动—1.3 流体流动现象

流体对球体或圆柱体的绕流会产生边界层分离现象，形成旋涡，造成机械能损耗，表现为流体的阻力损失增大。这种阻力称为**形体阻力**。而流体沿管道流过因速度梯度产生剪应力所引起的流动阻力称为**表皮阻力**（或**摩擦阻力**）。

若流体所经过的流道有弯曲、有突然扩大或缩小，流体流经管件、阀门等地方，同样会出现边界层分离，产生旋涡，引起能量损耗。故在流体输送中应设法避免或减轻边界层分离造成的阻力损失。但边界层分离对传热及混合，却有促进作用，有时也要加以利用。

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4 管内流动的阻力损失

直管阻力损失 (w_f)：流体流过直管造成的机械能损失称为直管阻力损失。

局部阻力损失 (w'_f)：流体流经管件（弯头、三通、阀门）造成的机械能损失称为局部阻力损失。

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.1 计算圆形直管阻力损失的通式

(1) 压力降——阻力损失的直观表现

$$-Dp = p_1 - p_2 = rw_f = Dp_f$$

因流动阻力而引起的压力降

问:上、下截面的压力差等于流体流动的阻力损失,此话对否?

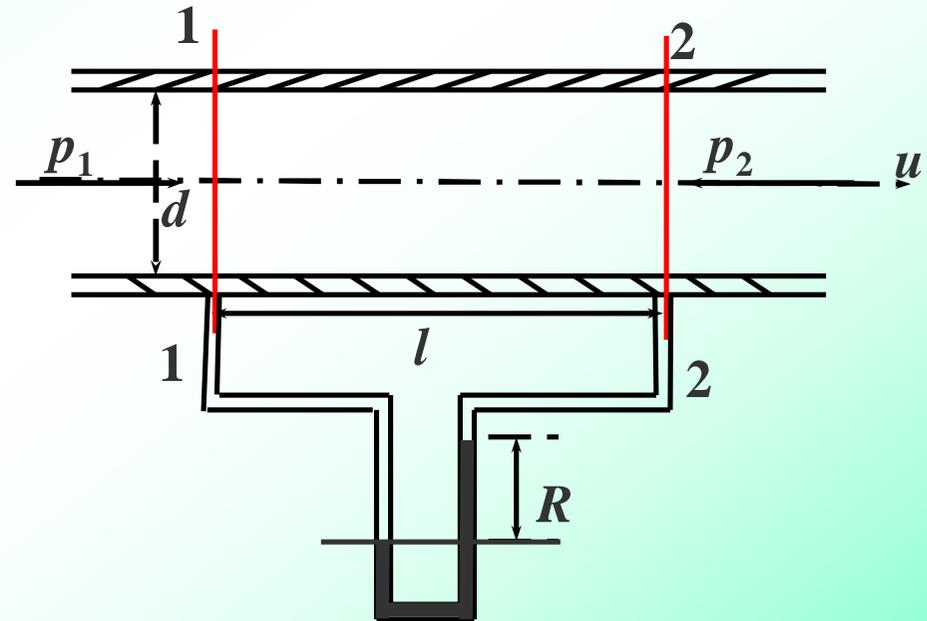


图1-26 流体流过水平直管时压力降

$$-Dp = -rw_e + rgDz_2 + \frac{r}{2} D(u)^2 + \dot{a} Dp_f$$

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

(2) 范宁公式与摩擦因数

范宁公式——计算圆形直管阻力损失的通式，对层流与湍流均适用。适用于不可压缩流体的稳定流动。

$$Dp_f = l \left(\frac{l}{d} \right) \frac{ru^2}{2} \quad \text{N/m}^2 \text{ 或 } \text{J/m}^3$$

$$w_f = l \left(\frac{l}{d} \right) \frac{u^2}{2} \quad \text{J/kg}$$

$$h_f = l \left(\frac{l}{d} \right) \frac{u^2}{2g} \quad \text{m 或 } \text{J/N}$$

注意：范宁公式是在水平等径直管的前提下导出的，此式对倾斜或垂直放置的管路是否适用？请思考。

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

摩擦因数 λ

应用范宁公式计算圆形直管的阻力损失，关键是要求出 λ 的值。要求 λ 的值首先应弄清楚哪些因素对 λ 有影响。

- ① 流型对 λ 的影响
- ② 管壁粗糙度对 λ 的影响

流体输送用的管道，按其材料的性质和加工情况分：

光滑管：玻璃管、黄铜管、塑料管

粗糙管：钢管、铸铁管、水泥管

绝对粗糙度 ε

相对粗糙度 ε/d

$$\lambda = f(\text{Re}, \varepsilon/d)$$

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.2 层流时的摩擦损失

(1) 哈根~泊谔叶 (Poiseuille) 方程——层流时的直管阻力计算式

$$Dp_f = \frac{32mlu}{d^2} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \frac{ru^2}{2}$$

哈根-泊谔叶方程

上式不管对水平、倾斜、垂直放置的直管均适用。

(2) 层流时摩擦因数 λ

范宁公式: $Dp_f = l \left(\frac{l}{d}\right) \frac{ru^2}{2}$

比较以上两式得 $\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{\frac{du\rho}{m}}$

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.3 湍流时的摩擦损失

由于湍流时情况复杂，流体质点的不规则运动与脉动，而且流体内部不断发生旋涡，剪应力比层流时大的多，此时 τ 不再服从粘性定律。

湍流时剪应力不仅与物性有关，还与流动状况有关；无法象层流一样从理论上推导阻力系数的数学表达式，必须用实验的方法来确定摩擦系数与雷诺数及相对粗糙度的关联式；其中非常重要的方法：因次分析法（基础是因次一致性原则和白金汉(Buckingham) π 定理）。

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.3.1 因次分析法——指导实验的研究方法

1.4.3.2 湍流时的摩擦因数 λ

用因次分析法得到无因次数群关系式:

$$\frac{Dp_f}{\rho u^2} = a \left(\frac{l}{d}\right) \left(\frac{du\rho}{m}\right)^{-e} \left(\frac{e}{d}\right)^f$$

将实验数据进行关联, 得到各种形式的 λ 的关联式:

(1) 光滑管 $\varepsilon = 0$, $\lambda = \varphi(Re)$

① 柏拉修斯 (Blasius) 公式

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

适用范围: $Re = 5000 \sim 10^5$ 光滑管。

2009-4-26

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

② 顾毓珍公式

$$l = 0.0056 + \frac{0.500}{Re^{0.32}}$$

适用范围： $Re = 3000 \sim 3 \times 10^6$ 光滑管。

③ 尼库拉则（**Nikuradse**）与卡门（**Karman**）公式

$$\frac{1}{\sqrt{l}} = 2 \log Re \sqrt{l} - 0.8$$

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

(2) 粗糙管

① 顾毓珍等公式

$$l = 0.01227 + 0.7543 / Re^{0.38}$$

适用范围： $Re = 3000 \sim 3 \times 10^6$ 粗糙管（内径为50~200mm的新钢管）。

② 柯尔布鲁克（Colebrook）公式

$$\frac{1}{\sqrt{l}} = 1.14 - 2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{d} + \frac{9.35}{Re \sqrt{l}} \right)$$

Colebrook方程是得到工程界普遍认可、适用范围广：

$$Re = 4 \times 10^3 \sim 10^8, \quad \epsilon / d = 5 \times 10^{-2} \sim 10^{-6}$$

③ 其它计算式（见教材）

2009-4-26

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.3.3 摩擦因数图 (Friction factor chart)

1944年莫狄 (Moody) 根据实验数据将圆管 λ 、 Re 、 ε/d 关系标绘在双对数坐标上, 以便查得摩擦系数, 如图1-27所示。

坐标:

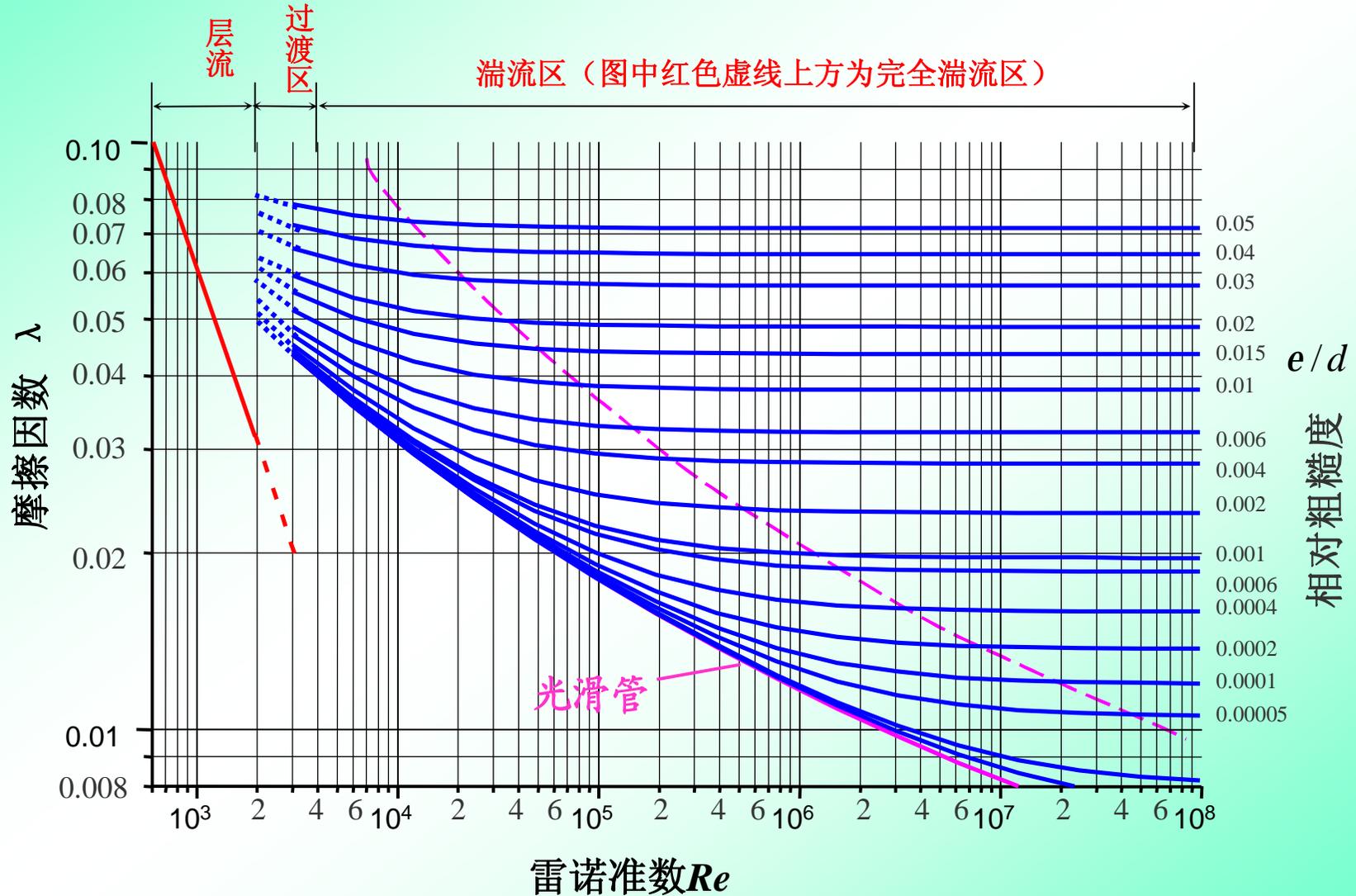
直角坐标;

单对数坐标: 其中一个坐标为对数坐标, 另一个为直角坐标;

双对数坐标: 两个坐标均为对数坐标。

本图为双对数坐标, 纵轴为摩擦系数, 横轴为雷诺数, 其刻度按坐标的对数值标绘的, 坐标上的刻度即为 λ 、 Re 的真实值; 其中曲线体现的是对数关系。

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失



2009-4-26

图1-27 摩擦因数 λ 与 Re 、 ϵ/d 的关系曲线

56

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.4 非圆形管内的摩擦损失

当量直径 d_e

对内径为 d ，长度为 l 圆形管路，其内部可供流体流过的体积为 $\pi d^2 l / 4$ ，其被流体润湿的内表面积为 $\pi d l$ ，则

$$d = 4 \cdot \frac{pd^2 L}{4pdL} = 4 \cdot \frac{pd^2}{pd}$$

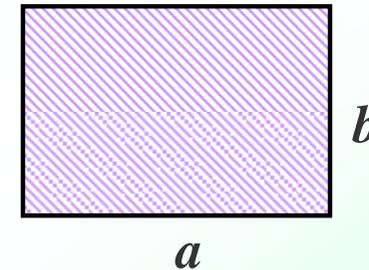
即四倍的流通截面积除以润湿周边；因此当量直径作类似的定义：

$$d_e = 4 \cdot \frac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边}}$$

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

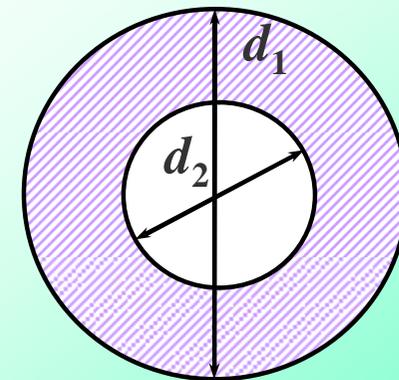
对于长为 a ，宽为 b 的矩形管道

$$d_e = 4 \cdot \frac{ab}{2(a+b)}$$



对于外管内径为 d_1 ，内管外径为 d_2 的
套管环隙：

$$d_e = 4 \cdot \frac{p(d_1^2 - d_2^2)/4}{p(d_1 + d_2)} = d_1 - d_2$$



1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

阻力计算

范宁公式仍可用，但式中及 Re 中的 d 必须以非圆形管道的当量直径 d_e 代替。即

$$\Delta p_f = l \left(\frac{l}{d_e} \right) \frac{\rho u^2}{2} \quad \text{N/m}^2 \text{ 或 } \text{J/m}^3$$

$$w_f = l \left(\frac{l}{d_e} \right) \frac{u^2}{2} \quad \text{J/kg}$$

$$h_f = l \left(\frac{l}{d_e} \right) \frac{u^2}{2g} \quad \text{J/N 或 m}$$

$$Re = \frac{d_e u \rho}{\mu}$$

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

① 湍流时

$$d_e \longrightarrow \frac{e}{d_e} \longrightarrow Re = \frac{d_e u r}{m} \longrightarrow l \longrightarrow Dp_f = l \frac{l}{d_e} \frac{ru^2}{2}$$

② 层流 $\lambda \neq 64/Re$

$$l = \frac{C}{Re} \quad Re = \frac{d_e u r}{m}$$

C 为常数，由管道截面形状决定：

套管环隙： $C = 96$

正方形截面： $C = 57$

长为 a ，宽为 b 的矩形截面： $b/a = 0.5$ 时， $C = 62$ ；

$b/a = 0.25$ 时， $C = 73$ ；

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.5 局部阻力损失

(1) 阻力系数

$$Dp_{\zeta} = z \frac{ru^2}{2} \quad \text{N/m}^2 \text{ 或 } \text{J/m}^3$$

$$w_{\zeta} = z \frac{u^2}{2} \quad \text{J/kg}$$

$$h_{\zeta} = z \frac{u^2}{2g} \quad \text{J/N 或 m}$$

注意：局部阻力系数通常由实验测定。不同的管件，其局部阻力系数不同；同一管件，在不同工作状态下（如阀门开度不同），其局部阻力系数也不相同。因局部阻力的形式

2009年4月26日 很多，常对 ζ 加注相应的下标。

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

① 突然扩大 ζ_e

$$Z_e = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

$$A_1/A_2=0, \zeta_e=1$$

$$A_1/A_2=0.5, \zeta_e=0.25$$

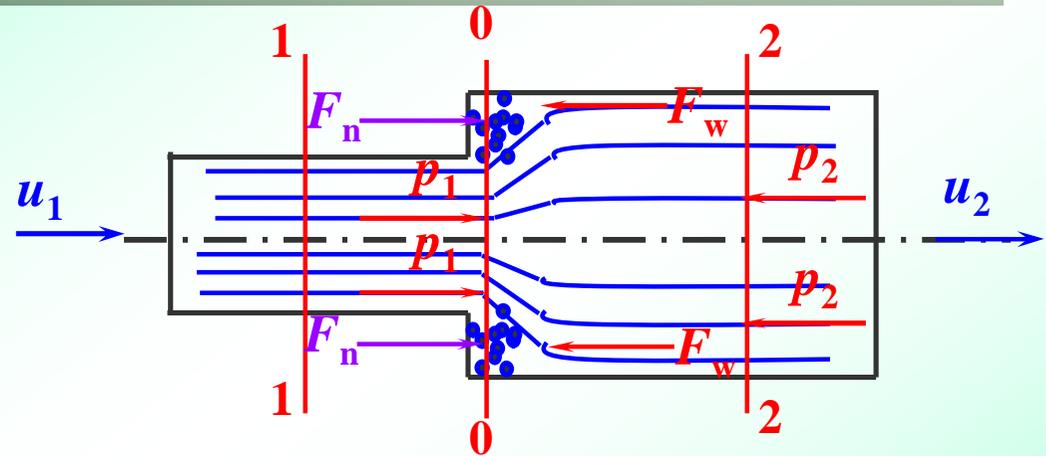


图1-29 突然扩大

② 突然缩小 ζ_c

$$Z_c = \left(\frac{A_2}{A_0} - 1\right)^2$$

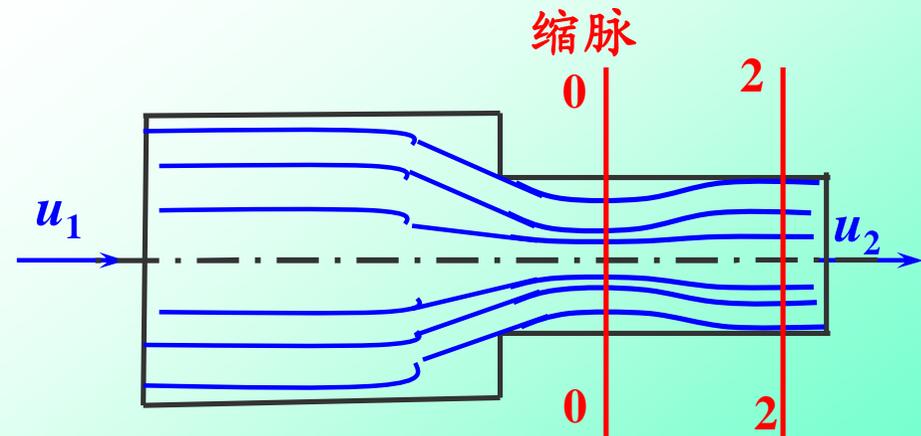


图1-30 突然缩小

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

③ 管出口 ζ_o 与管入口 ζ_i

$$\text{管出口: } z_o = 1 \quad (w\zeta_f)_o = z_o \frac{u^2}{2} = \frac{u^2}{2}$$

$$\text{管入口: } z_i = 0.5 \quad (w\zeta_f)_i = z_i \frac{u^2}{2} = 0.5 \frac{u^2}{2}$$

④ 管件与阀门

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

(2) 当量长度法

由直管阻力和局部阻力计算式比较可得：

$$z = l \frac{l}{d}$$

即任一管件的局部阻力与长度为的直管阻力大小相当，该长度称为当量长度，用 l_e 表示；由此把局部阻力转化成长度为 l_e 的直管的阻力；所以局部阻力的计算也可采用当量长度法：

$$Dp_f = l \frac{l_e}{d} \frac{ru^2}{2} \quad w_f = l \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2} \quad h_f = l \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2g}$$

1 流体流动—1.4 管内流动的阻力损失

1.4.6 管路总阻力损失的计算

管路总阻力包括直管阻力和局部阻力，而局部阻力则包括管路上所有的管件阻力的和，即：

$$\begin{aligned} \dot{a} w_f &= w_f + \dot{a} w_f^{\zeta} = \frac{\lambda}{\zeta} l \frac{\rho}{2} u^2 + \dot{a} z \frac{\rho}{2} u^2 \\ &= \frac{\lambda}{\zeta} l \frac{l + \dot{a} l_e}{d} \frac{\rho}{2} u^2 = \frac{\lambda}{\zeta} l \frac{l + \dot{a} l_e}{d} + \dot{a} z \frac{\rho}{2} u^2 \end{aligned}$$

$$\dot{a} Dp_f = Dp_f + \dot{a} Dp_f^{\zeta} \quad \dot{a} h_f = h_f + \dot{a} h_f^{\zeta}$$

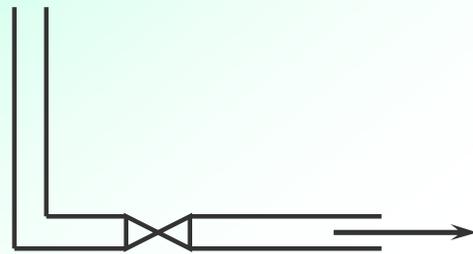
注意：以上各式适用于直径相同的管段或管路系统的计算，式中的流速是指管段或管路系统的流速。由于管径相同，所以流速可以按任一管截面计算。而柏努利方程中动能项中的流速是指相应的衡算截面处的流速。

1 流体流动—1.5 管路计算

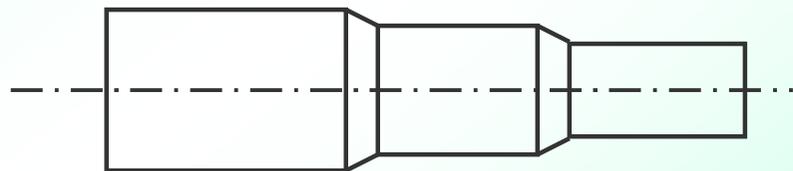
1.5 管路计算

1.5.1 简单管路的计算

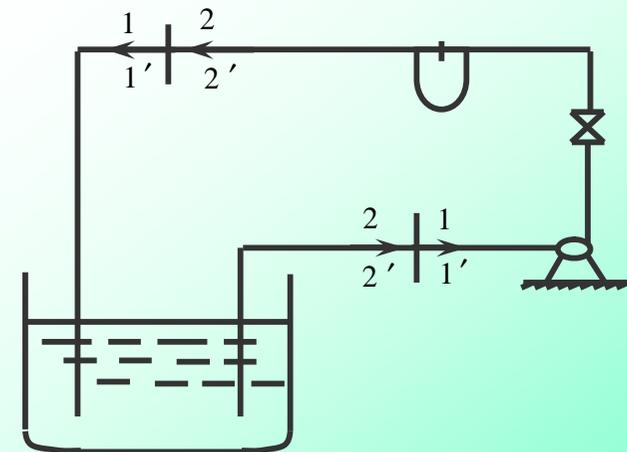
简单管路：没有分支或汇合的单一管路，包括：等径管路、不等径管路、循环管路。



等径管路



不等径管路



循环管路

2009-4-26

1 流体流动—1.5 管路计算

简单管路的特点:

① 通过各管段的质量流量不变, 对不可压缩流体则体积流量不变;

② 整个管路的阻力损失为各管段的阻力损失之和。

简单管路计算所用方程式有以下三个:

连续性方程式
$$V_s = \frac{\rho}{4} d^2 u \text{ 或 } \frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

机械能衡算式
$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + w_e = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum w_f$$

摩擦系数计算式(或图)
$$l = f\left(Re, \frac{e}{d}\right)$$

1 流体流动—1.5 管路计算

管路计算按其目的可分为设计型计算与操作型计算两类。不同类型的计算问题所给出的已知量不同，计算方法都是联立求解上述方程，但两类计算问题有各自的特点。

① 简单管路的设计型计算

设计型计算是给定输送任务，要求设计经济上合理的管路。典型的设计型命题如下：

设计要求：为完成一定量的流体输送任务 V_s ，需设计经济上合理的管道尺寸（一般指管径 d ）及确定输送功率 N_e （或供液点的位能 z_1 或供液点压强 p_1 ）。

给定条件： V_s 、 l 、 z_1 、 p_1 、（若 w_e 为待求量）、 z_2 、 p_2 、 ε 、 $\Sigma \zeta$ （或 Σl_e ）等8个量。

对以上命题剩下的4个待求量是： d 、 u 、 w_e （或 N_e ）、 λ 。

1 流体流动—1.5 管路计算

② 简单管路的操作型计算

操作型计算问题是管路已定，要求核算在某给定条件下管路的输送能力或某项技术指标。这类问题的命题如下：

a、**给定条件**： d 、 l 、 $\Sigma \zeta$ (或 Σl_e)、 ε 、 z_1 、 z_2 、 p_1 、 p_2 、 w_e 等9个量；

计算目的：求输送量 V_s ；

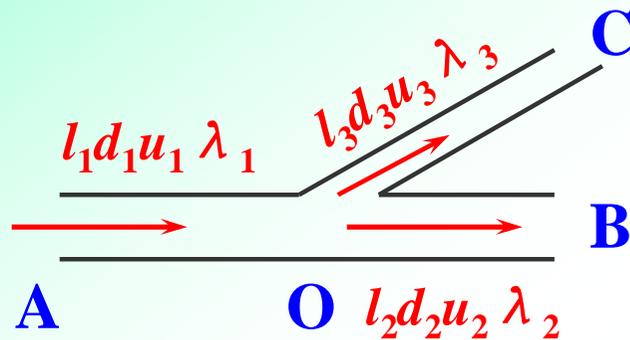
b、**给定条件**： d 、 l 、 $\Sigma \zeta$ (或 Σl_e)、 z_2 、 p_2 、 V_s 及 z_1 、 p_1 、 w_e 三者中的二个量，共9个量；

计算目的：求 z_1 、 p_1 、 w_e 三者中的一个量。

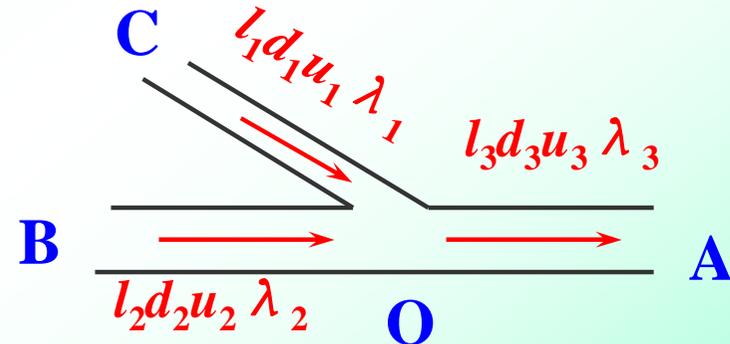
1 流体流动—1.5 管路计算

1.5.2 复杂管路的计算

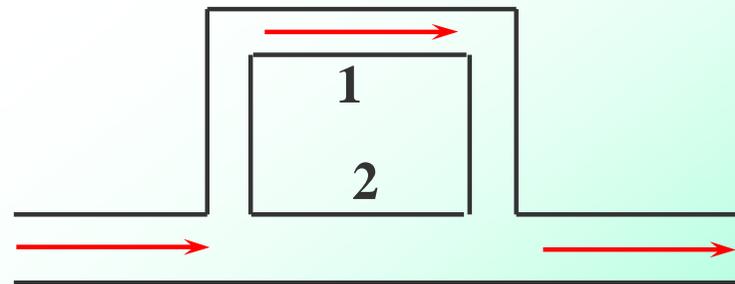
具有分支或汇合的管路叫**复杂管路**，常见的复杂管路有分支管路、汇合管路和并联管路三种。



分支管路



汇合管路



并联管路

1 流体流动—1.5 管路计算

(1) 分支与汇合管路

特点:

① 流量

不管是分支管路还是汇合管路，对于稳定流动，总管流量等于各支管流量的和，即

$$V_{sA} = V_{sB} + V_{sC}$$

$$d_A^2 u_A = d_B^2 u_B + d_C^2 u_C$$

② 分支点或汇合点O处的总机械能 E_O

工程上对较长的管路 ($l/d > 1000$) 常认为三通局部阻力相对于直管沿程阻力而言很小可以忽略，跨过O点进行计算。

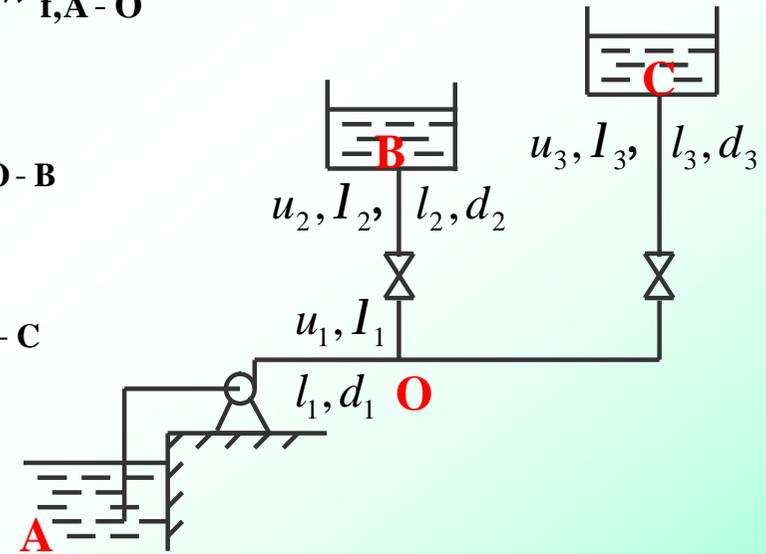
1 流体流动—1.5 管路计算

$$gz_A + \frac{p_A}{r} + \frac{u_A^2}{2} + w_e = gz_O + \frac{p_O}{r} + \frac{u_O^2}{2} + Sw_{f,A-O}$$

$$E_O = gz_O + \frac{p_O}{r} + \frac{u_O^2}{2} = gz_B + \frac{p_B}{r} + \frac{u_B^2}{2} + Sw_{f,O-B}$$

$$= gz_C + \frac{p_C}{r} + \frac{u_C^2}{2} + Sw_{f,O-C}$$

对于分支或汇合管路，无论各支管内的流量是否相等，在分支点O处的总机械能为定值。



分支管路示意图

$$gz_A + \frac{p_A}{r} + \frac{u_A^2}{2} + w_e = E_O + Sw_{f,A-O} = gz_B + \frac{p_B}{r} + \frac{u_B^2}{2} + Sw_{f,A-O} + Sw_{f,O-B}$$

$$= gz_C + \frac{p_C}{r} + \frac{u_C^2}{2} + Sw_{f,A-O} + Sw_{f,O-C}$$

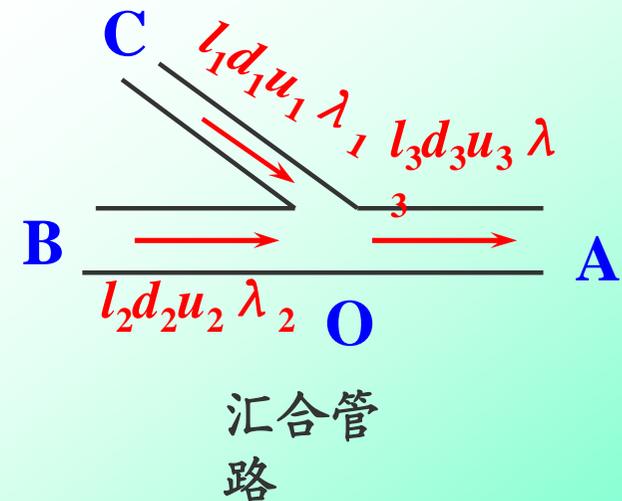
1 流体流动—1.5 管路计算

对于汇合管路，同样可以根据汇合点处的总机械能为定值进行分析。

$$E_O + w_e = gz_A + \frac{p_A}{r} + \frac{u_A^2}{2} + Sw_{f,A-O}$$

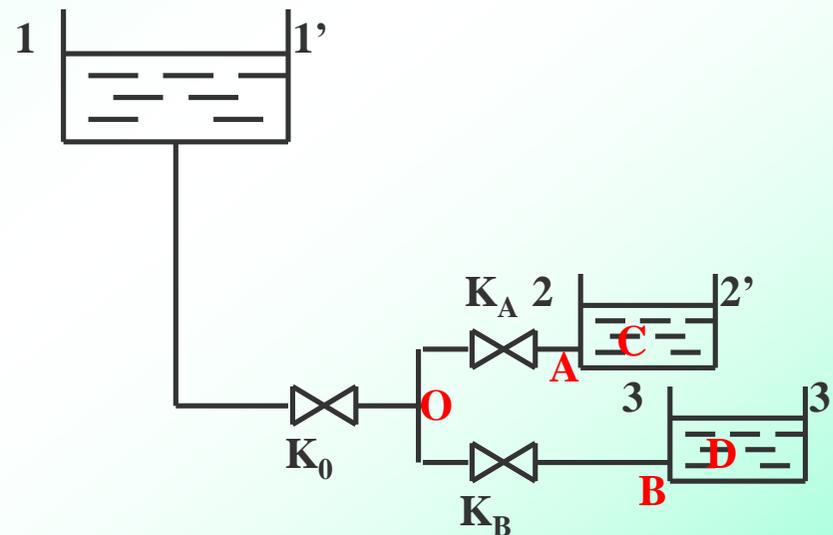
$$gz_B + \frac{p_B}{r} + \frac{u_B^2}{2} + w_e = E_O + Sw_{f,B-O}$$

$$gz_C + \frac{p_C}{r} + \frac{u_C^2}{2} + w_e = E_O + Sw_{f,O-C}$$



1 流体流动—1.5 管路计算

例题 如图所示，一高位槽通过一总管及两支管A、B分别向水槽C、D供水。假设总管和支管上的阀门 K_O 、 K_A 、 K_B 均处在全开状态，三个水槽液面保持恒定。试分析，当将阀门 K_A 关小时，总管和支管的流量及分支点前O处的压力如何变化？



1 流体流动—1.5 管路计算

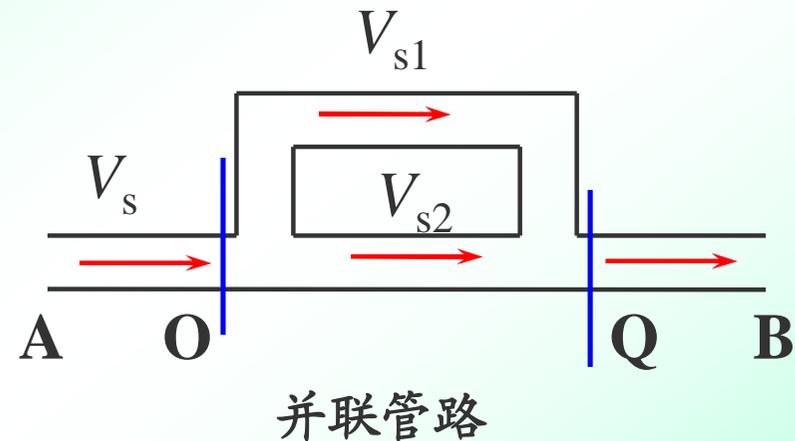
(2) 并联管路

特点:

① 主管的流量等于并联的各支管流量之和

$$V_s = V_{s1} + V_{s2}$$

$$d^2 u = d_1^2 u_1 + d_2^2 u_2$$



② 各支管的阻力损失相等。

对总管 (O到Q) $gz_0 + \frac{p_0}{r} + \frac{u_0^2}{2} = gz_Q + \frac{p_Q}{r} + \frac{u_Q^2}{2} + Sw_{f,0-Q}$

对支管1 (O→1→Q) $gz_0 + \frac{p_0}{r} + \frac{u_0^2}{2} = gz_Q + \frac{p_Q}{r} + \frac{u_Q^2}{2} + Sw_{f1}$

对支管2 (O→2→Q) $gz_0 + \frac{p_0}{r} + \frac{u_0^2}{2} = gz_Q + \frac{p_Q}{r} + \frac{u_Q^2}{2} + Sw_{f2}$

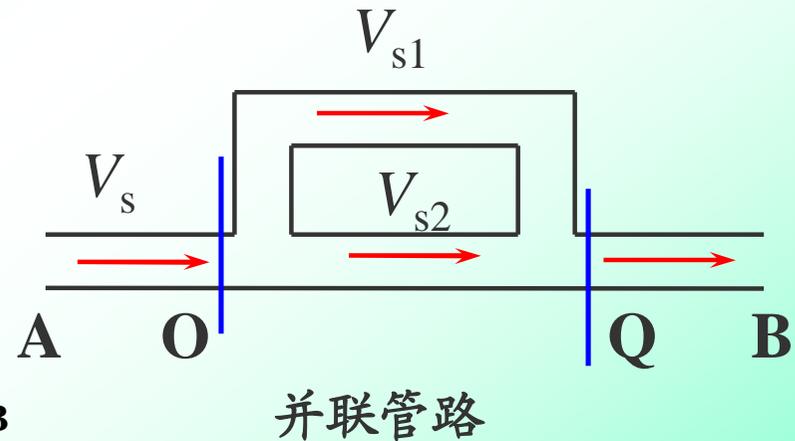
1 流体流动—1.5 管路计算

$$Sw_{fO} = Sw_{f1} = Sw_{f2} = g(z_O - z_Q) + \frac{p_O - p_Q}{r} + \frac{u_O^2 - u_Q^2}{2}$$

如果O、Q点在同一水平面上，O、Q处管径相等，有：

$$Sw_{f1} = Sw_{f2} = \frac{p_O - p_Q}{r}$$

如在图中由A截面到B截面列柏努利方程，方程中总阻力为



$$Sw_{f,A-B} = Sw_{f,A-O} + Sw_{f,O-Q} + Sw_{f,Q-B}$$

$$= Sw_{f,A-O} + Sw_{f,1} + Sw_{f,Q-B}$$

$$= Sw_{f,A-O} + Sw_{f,2} + Sw_{f,Q-B}$$

$$\neq Sw_{f,A-O} + Sw_{f,1} + Sw_{f,2} + Sw_{f,Q-B}$$

2009-4-26

76

1 流体流动—1.5 管路计算

如果并联管路中有 n 个支路，用角码 i 表示任一支路，则阻力损失可以写作：

$$Sw_{fi} = l_i \frac{l_i}{d_i} \frac{u_i^2}{2} \quad (l_i \text{包括局部阻力的当量长度})$$

流体在各支管中的流量是如何分配呢？

$$V_{si} = \frac{p\sqrt{2}}{4} \sqrt{\frac{d_i^5 Sw_{fi}}{l_i l_i}} = 1.11 \sqrt{\frac{d_i^5 Sw_{fi}}{l_i l_i}}$$

$$V_{s1} : V_{s2} : \dots : V_{sn} = \sqrt{\frac{d_1^5}{l_1 l_1}} : \sqrt{\frac{d_2^5}{l_2 l_2}} : \dots : \sqrt{\frac{d_n^5}{l_n l_n}}$$

同时应有

$$V_s = V_{s1} + V_{s2} + \dots + V_{sn}$$

1 流体流动—1.5 管路计算

复杂管路计算的注意事项:

① 在设计计算分支管路所需的能量时，为了保证将流体输送至需用能量最大的支管，就需要按照耗用能量最大的那支管路计算。通常是由最远的支管开始，由远及近，依次进行各支管的计算。如在按已知的流量和管路计算出的能量不等时，应取能量最大的为依据。这样确定的能量对需要能量较小的支路而言太大，此时可通过该支路上的阀门进行调节，让多余的能量消耗在阀门上。

② 在计算管路的总阻力时，如果管路上有并联管段存在，则总阻力损失应为主管部分与并联部分的阻力损失和。在计算并联管段的阻力时，只需考虑其中任一管段的阻力即可，**绝不能将并联的各段阻力全部加在一起作为并联管段的阻力。**

2009-4-26

78

1 流体流动—1.6 流量测量

1.6 流量测量

1.6.1 皮托管——测速管

(1) 结构原理

内管相当于一个冲压管，内管传递的是A点的冲压头，即

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

通过侧壁小孔从外管传递出的是B点的静压头

$$h_B = \frac{p_B}{\rho g} = \frac{p}{\rho g} \quad \rightarrow \quad h_A - h_B = \frac{p_A - p_B}{\rho g} = \frac{u_r^2}{2g}$$

$$\rightarrow u_r = \sqrt{2g(h_A - h_B)} = \sqrt{2(p_A - p_B) / \rho}$$

$$p_A - p_B = (r_i - r)gR$$

$$u_r = \sqrt{\frac{2(r_i - r)gR}{\rho}}$$

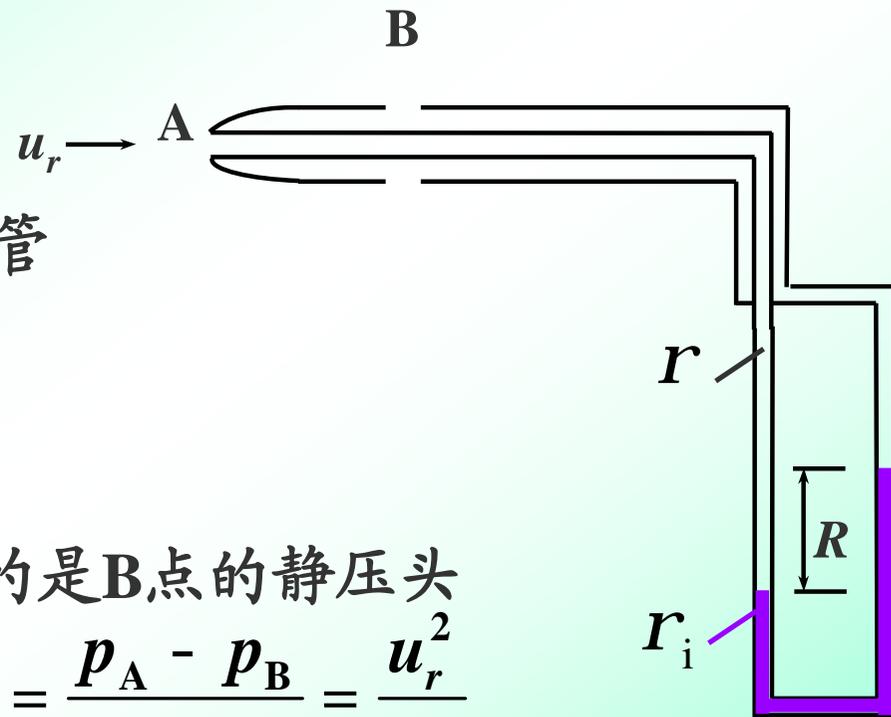


图1-37 测速管

1 流体流动—1.6 流量测量

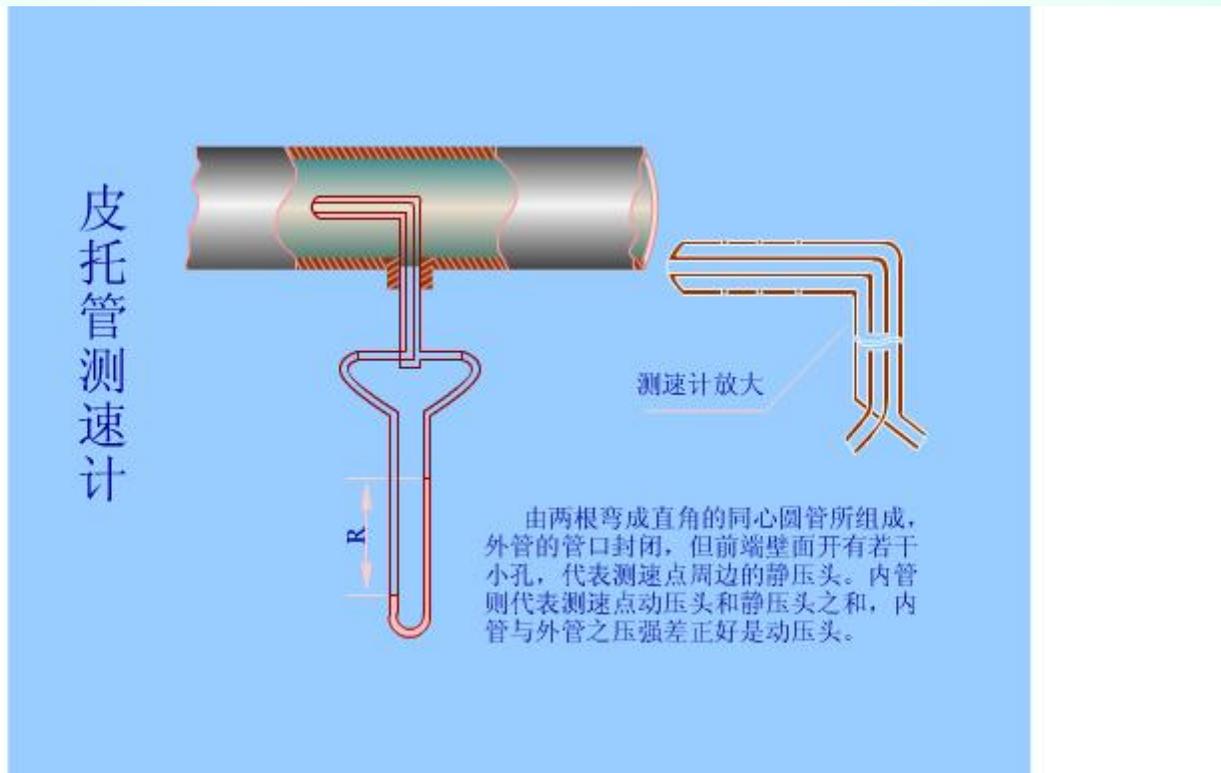
(2) 平均速度 u 的测定

测速管所测的是管道截面上某一点的轴向速度 u_r 。若要测定截面上的平均速度，应测定管中心至管壁若干点的速度，然后用积分法求其平均值。若已知管截面上的速度分布规律，也可根据管中心的速度与平均速度的关系求出平均速度。 u/u_c 与管内 Re 的大小有关，如图1-38所示。若要求平均速度，可将皮托管放在管道中心线上 ($r = 0$)，测出最大流速 u_c ，求出 $Re_{\max} = du_c \rho / \mu$ ，查图1-38，求出 u/u_c 再求出 u 。

1 流体流动—1.6 流量测量

(3) 皮托管的安装

- ① 测量点应取在充分发展了的流动管段，保证位于均匀流段，即测量点距管口或转弯处 $l/L_0 > 50d$ 。
- ② 应与流动方向平行安置，保证管口截面**严格垂直**于流动方向。
- ③ 测速管外径 $d_0 < d/50$ 。



2009-4-26

1 流体流动—1.6 流量测量

(4) 皮托管的优、缺点

优点：误差小，与实际值的误差一般可在1%以内；阻力小，适于测量大直径气体管道内的流速。

缺点：不能直接测出平均速度，压差读数小，常要放大才读得准确。

1 流体流动—1.6 流量测量

1.6.2 孔板流量计

(1) 测量原理

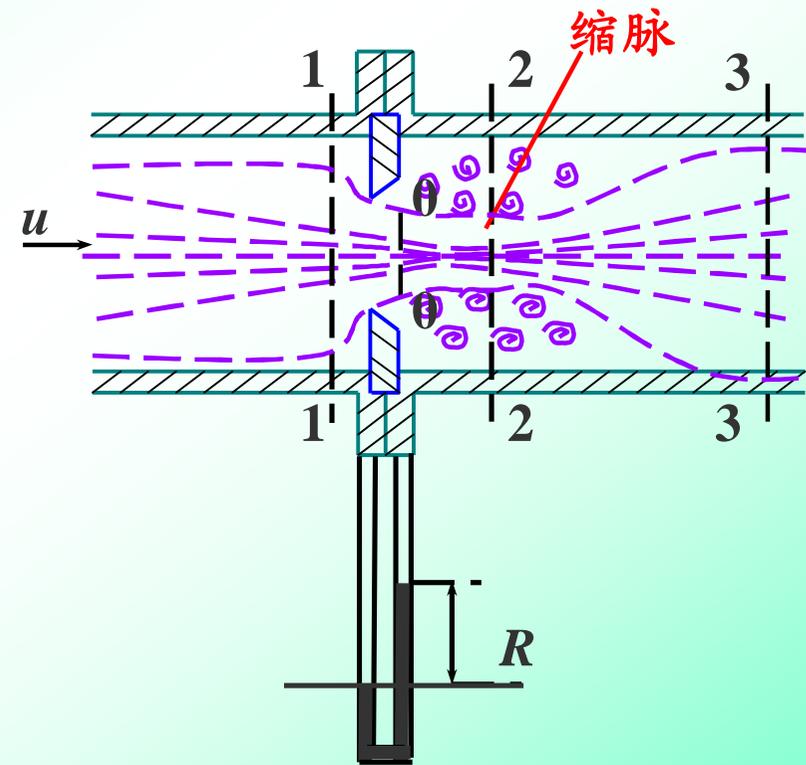
在管道内插入一片与管轴线垂直且中央开圆孔的金属板，就构成了孔板流量计，如图所示。**注**：板上的孔要精细加工，安装时从前到后逐渐扩大，孔的中心位于管道中心线上，其侧边与管轴成 45° 角，称为**锐孔**。

1 流体流动—1.6 流量测量

由1→2, $u \uparrow, p \downarrow$

由2→3, $u \downarrow, p \uparrow$

流体通过孔板后，流速可回到原来的值，即流经孔板前后流速不变，但静压却没有恢复到孔板前（截面1处）的数值，流体在流经孔板克服流动阻力和孔板的局部阻力所产生的压降无法复原，这部分压降称为**永久压力降**。



孔板流量计

1 流体流动—1.6 流量测量

孔板流量计正是利用流体通过孔板时流股截面变化引起动能与静压能的转化，由测量静压能的变化来确定流量。那么静压能变化如何测量？主要有两种方法。

角接法：测压口在孔板两侧，尽可能接近孔板，通常在法兰上。

径接法：两测压口分别在孔板上游1倍管径处和下游0.5倍管径处。

1 流体流动—1.6 流量测量

忽略流体从截面1-1流动至孔口0-0的阻力损失，根据柏努利方程有：

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

$u_1 A_1 = u_0 A_0$ 

$$\frac{p_1 - p_0}{\rho g} = \frac{u_0^2 - u_1^2}{2g} = \frac{u_0^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2 \right]$$

 $u_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{\rho}}$

1 流体流动—1.6 流量测量

考虑到两取压口之间有阻力损失，将上式右边加一校正系数 C_D

$$u_0 = \frac{C_D}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{r}} \circ C_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{r}}$$

孔流系数

$$u_0 = C_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{r}}$$

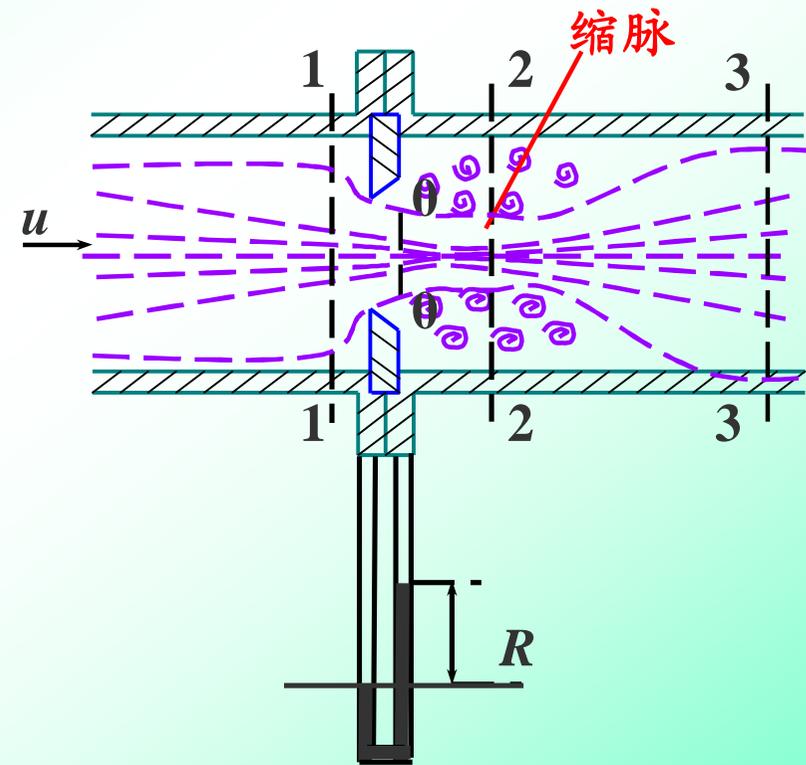
$$V_s = V_{s0} = u_0 A_0 = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_0)}{r}}$$

1 流体流动—1.6 流量测量

若采用正U型管压差计测量压差，则：

$$u_0 = C_0 \sqrt{\frac{2(r_i - r)gR}{r}}$$

$$V_s = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2(r_i - r)gR}{r}}$$



孔板流量计

1 流体流动—1.6 流量测量

C_0 与哪些因素有关?

C_0 主要取决于管道流动的 Re_1 和面积比 m 、测压方式、孔口形状、加工光洁度、孔板厚度和管壁粗糙度也对 C_0 有影响。对以上情况都规定的标准孔板, $C_0 = f(Re_1, m)$, 其关系由实验测定。

$$Re_1 = \frac{d_1 u_1 r}{m} \text{ 不是 } Re_0 = \frac{d_0 u_0 r}{m}$$

如图所示为标准孔板（角接法）的 C_0 曲线，此图为单对数坐标图。

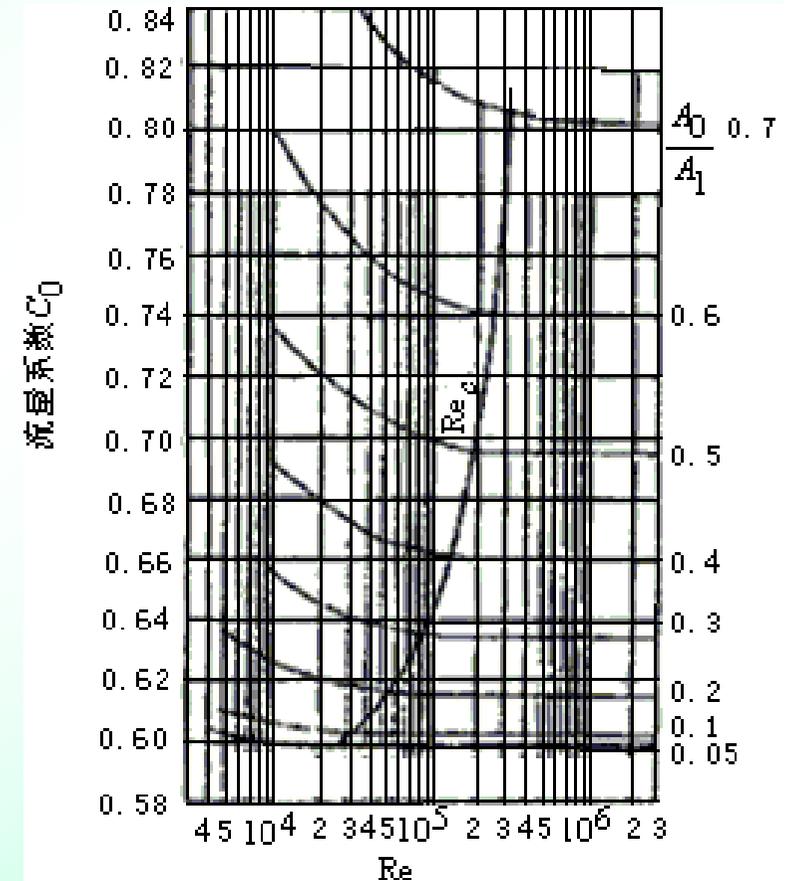


图1-51 孔板流量计的 C_0 与 Re 、 $\frac{A_0}{A_1}$ 的关系

1 流体流动—1.6 流量测量

在图中 Re 极限允许线右端， C_0 不再随 Re_1 而变，成为一个仅决定于 m 的常数。选用孔板流量计时应尽量使常用流量时的 Re_1 数在该范围内，此时 $V_S \propto R^{0.5}$ 。由图查出 C_0 代入 V_S 计算式求 V_S 。

若 C_0 与 V_S 即与 Re_1 有关，必须用试差法求 V_S 。

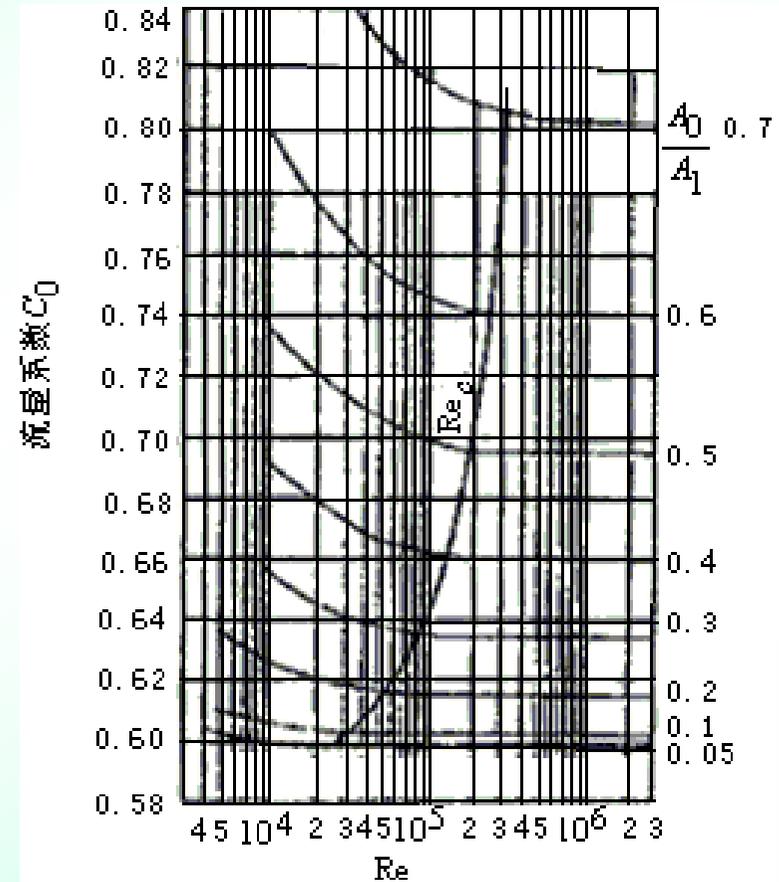


图1-51 孔板流量计的 C_0 与 Re 、 $\frac{A_0}{A_1}$ 的关系

1 流体流动—1.6 流量测量

(2) 孔板流量计的安装和阻力损失

① 孔板流量计安装时，在上游和下游必须分别有（15~40） d 和 $5d$ 的直管距离。

② 孔板流量计的缺点是阻力损失大。这一阻力损失是由于流体与孔板的摩擦阻力，尤其是缩脉后流道突然扩大形成大量旋涡造成的。 $\Delta p_{f,0}$ 可写成

$$\Delta p_{f,0} = \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^2\right](p_1 - p_0) = \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^2\right](r_i - r) gR$$

$d_0/d_1 \downarrow$ 及 $(p_1 - p_0) \uparrow$ 时， $\Delta p_{f,0}$ 愈大。

$d_0/d_1 \downarrow$ 即 $m \downarrow$ ，则 $C_0 \downarrow$ ， $R \uparrow$ ，读数准确，但 $u_0 \uparrow$ ， $\Delta p_{f,0} \uparrow$ ；

$d_0/d_1 \uparrow$ ， $m \uparrow$ ， $C_0 \uparrow$ ， $R \downarrow$ ，读数不准确， $u_0 \downarrow$ ， $\Delta p_{f,0} \downarrow$ 。

选用孔板的中心问题是选择适当面积比 m ，兼顾适宜读数

200和 $4\Delta p_{f,0}$ 。

1 流体流动—1.6 流量测量

1.6.3 文丘里管

将测量管段制成如图所示的**渐缩渐扩管**，避免了突然缩小和突然扩大，阻力损失大大降低。这种管称为**文丘里管**。在距文丘里管开始收缩处之前至少 $1/2$ 管径处设为上游取压口，下游取压口通常设在文氏喉（最小截面）附近，两取压口连接U压差计，就构成**文丘里流量计**。

1 流体流动—1.6 流量测量

文丘里管收缩角通常为 $15^\circ\sim 25^\circ$ ，扩大角一般为 $5^\circ\sim 7^\circ$ 。由于它的渐缩渐扩结构使流体流速改变时不形成旋涡，故阻力小，永久压力降仅占压差读数的10%左右。将孔板流量计的流量计算式中 C_0 改为文丘里管的流量系数 C_V ，即可用于文丘里管的流量计算：

$$V_s = u_0 A_0 = C_V A_0 \sqrt{\frac{2gR(r_i - r)}{r}}$$

式中 C_V 为文丘里管的流量系数， C_V 约为0.98~0.99； A_0 为文丘里管喉部面积， m^2 ； u_0 为喉孔流速， m/s 。

由于阻力损失小，相同压差读数下文丘里管的流量比孔板大，它对测量含有固体颗粒的液体也较孔板合用。其缺点是加工较难、精度要求高，因而造价高，安装时需占去一定管长位置。

2009-4-26

93

1 流体流动—1.6 流量测量

孔板流量计和文丘里流量计均是**恒截面变压差**（变阻力）流量计。变阻力流量计是人为设置一阻力构件（如孔板），造成局部阻力（压降），利用能量守恒原理及连续性方程关联此压降与流速乃至流量的关系。下面介绍另一种**恒压差变截面**的流量计——转子流量计。

1 流体流动—1.6 流量测量

1.6.4 变截面流量计——转子流量计

(1) 转子流量计的工作原理

主体是一倒锥形玻璃管，锥角约 4° 左右。

1 流体流动—1.6 流量测量

如右图所示，当转子处于平衡位置时，流体作用于转子的力应达到平衡，即

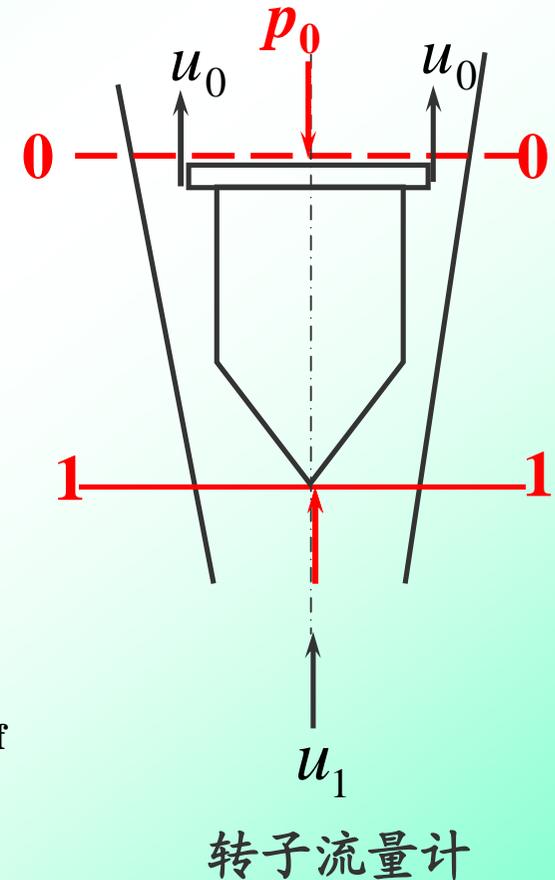
$$(p_1 - p_0)A_f = V_f r_f g$$

在1-1与0-0截面间列机械能恒算式得

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

$$(p_1 - p_0) A_f = \underbrace{rg (z_0 - z_1) A_f}_{\text{浮力}} + \underbrace{\frac{r}{2}(u_0^2 - u_1^2) A_f}_{\text{升力}}$$

$$\longrightarrow \frac{r}{2}(u_0^2 - u_1^2) A_f = \underbrace{V_f (r_f - r) g}_{\text{净重力}}$$



1 流体流动—1.6 流量测量

$$u_0 A_0 = u_1 A_1 \quad \frac{r}{2} u_0^2 \left[1 - \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2 \right] = V_f (r_f - r) g$$

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

考虑到转子的形状不是圆柱体且存在阻力损失，引入校正系数，并与前面的系数合并为系数 C_R （流量系数），上式变为

$$u_0 = C_R \sqrt{\frac{2V_f (r_f - r) g}{A_f r}}$$

流量 $V_s = u_0 A_0 = C_R A_0 \sqrt{\frac{2V_f (r_f - r) g}{A_f r}}$

1 流体流动—1.6 流量测量

$$\text{流量} \quad V_s = u_0 A_0 = C_R A_0 \sqrt{\frac{2V_f (r_f - r) g}{A_f r}}$$

式中 C_R 与那些因素有关呢？ C_R 与转子形状、流动阻力即环隙雷诺数 $Re_0 = du_0 \rho / \mu$ 有关。

转子的形状有不同，在读数时，应读转子的哪个位置呢？

最大截面处。

1 流体流动—1.6 流量测量

(2) 转子流量计的特点——恒压差、变截面（恒流速）

因 V_f 、 A_f 、 ρ_f 、 g 一定， $p_1 - p_0$ 一定，恒压差成立。但流量 V_s 不同时，转子停留位置改变（变截面），环隙面积改变（因为是锥形玻璃管），若 $V_s \uparrow$ ，环隙面积 \uparrow ，环隙流速 u_0 基本不变（恒流速）。转子流量计恒压差、变截面（恒流速）的这一特点导致的后果是

$$w_f = Z \frac{u_0^2}{2} = \text{常数}$$

即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测量流量范围变化较宽的场所。

1 流体流动—1.6 流量测量

(3) 转子流量计的刻度换算

转子流量计在出厂前，不是提供流量系数 C_R 而是直接用 20°C 的水（测量液体的转子流量计）或 20°C 、 1atm 的空气（测量气体的转子流量计）进行标定，将流量值刻于玻璃管上。实际使用时，若被测流体与上述条件不符时，应做刻度换算。如何进行换算呢？

$$\frac{V_s \dot{C}}{V_s} = \sqrt{\frac{r(r_f - r\dot{C})}{r\dot{C}(r_f - r)}} \quad \frac{m_s \dot{C}}{m_s} = \sqrt{\frac{r\dot{C}(r_f - r\dot{C})}{r(r_f - r)}}$$

思考题：转子 V_f 、 A_f 不变， ρ_f 变，刻度如何换算？

例题：教材P66 例1-24