1　概述

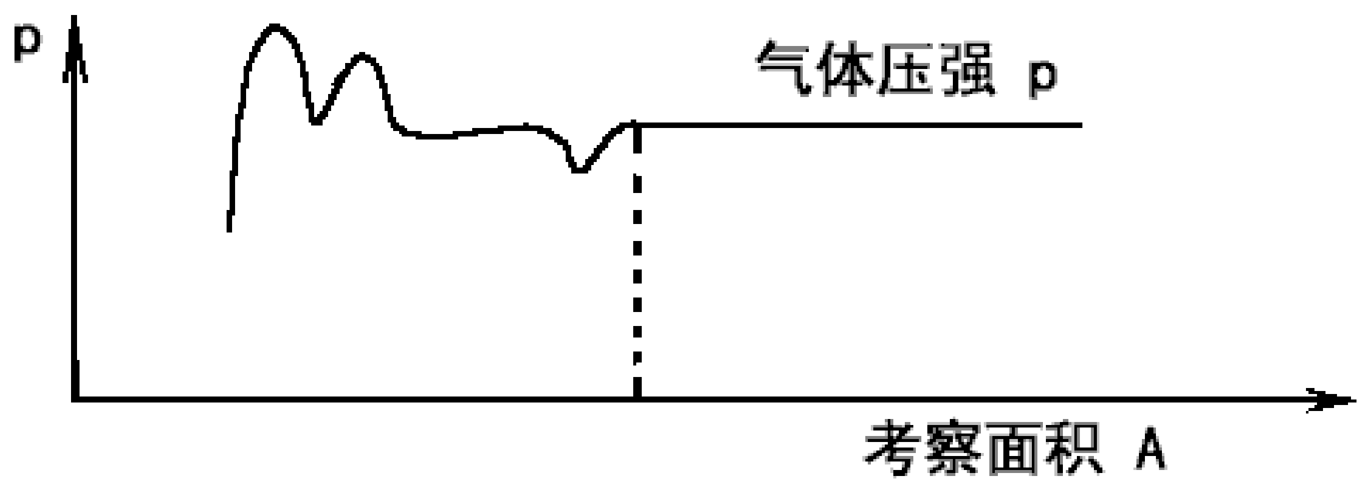
1.1　流体流动的考察方法

1.1.1 连续性假定

固体力学：考察对象---单个固体，离散介质

流体力学：考察对象---无数质点，连续介质

例如点压强的考察 p（正压力/面积）



质点---含有大量分子的流体微团，其尺寸远小于设备尺寸、远大于分子平均自由程

可能性：1mm^{3}常温常压气体含2.5×10^{15}个分子，分子平均自由程为0.1μm量级

连续性假定---流体是由无数质点组成的，彼此间没有间隙，完全充满所占空间的连续介质

目的：可用微积分和连续函数来描述流体的各种参数

1.1.2 考察方法——拉格朗日法和欧拉法

拉格朗日法——选定流体质点，跟踪观察描述运动参数

欧拉法——固定空间位置，考察经过此地的流体运动参数

轨线与流线的区别

轨线是同一流体质点在不同时刻所占空间位置的连线

流线是同一瞬时不同流体质点的速度方向连线

系统与控制体的区别

系统是包含众多流体质点的集合，与外界无质量交换

控制体是作考察对象的某一固定空间体积，与外界可有质量交换

化工原理关心设备中发生的事情，较多采用欧拉法

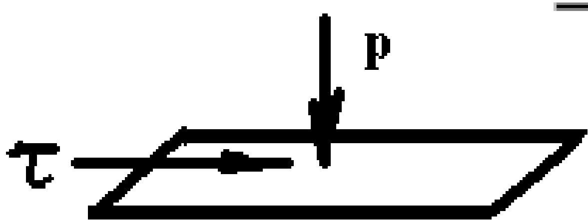
1.2 流体受力

1.2.1 体积力：作用于体积中的各个部位，力的大小与体积（质量）有关。

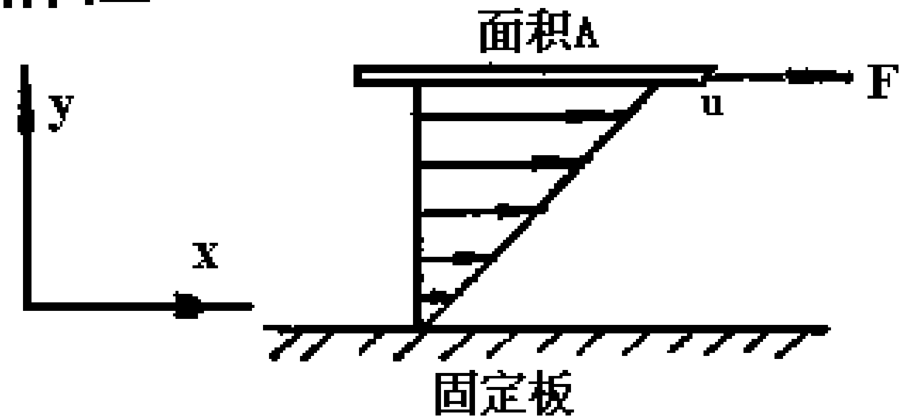
如：重力，惯性力，离心力

1.2.2 表面力：分解成---垂直于作用面—压力p

---平行于作用面---剪切力τ



1.2.3 流体粘性



$$\frac{F}{A}=\tau$$

粘性的物理本质---分子间引力和分子热运动、碰撞

牛顿粘性定律 $\tau=\mu\frac{du}{dy}$

表明①流体受剪切力必定运动

②牛顿型流体与非牛顿型流体的区别

μ=f（物性，温度） t↑， $\mu_{气}$↑， $\mu_{液}$↓

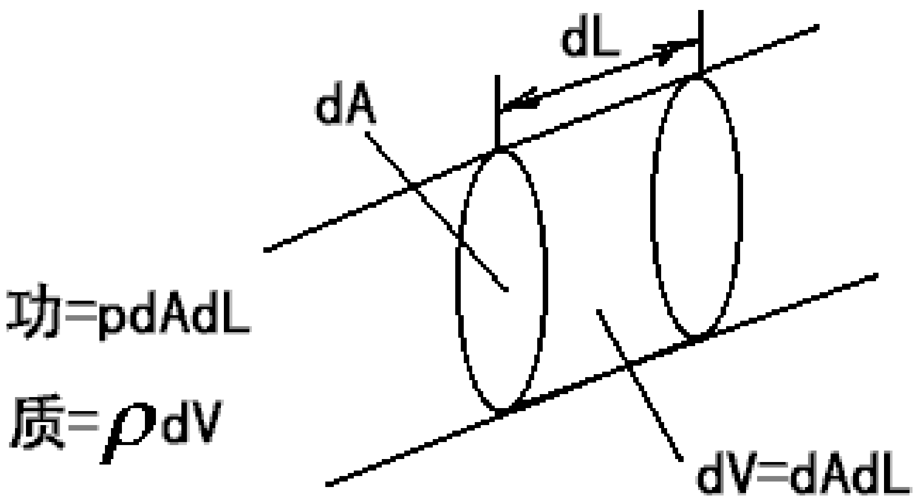
理想流体假定 μ=0

1.3 流体流动的机械能

$\frac{u^2}{2}$ 为单位质量流体的动能 $(=\frac{m\frac{u^2}{2}}{m})$

gz 为单位质量流体的位能 $(=\frac{mgz}{m})$

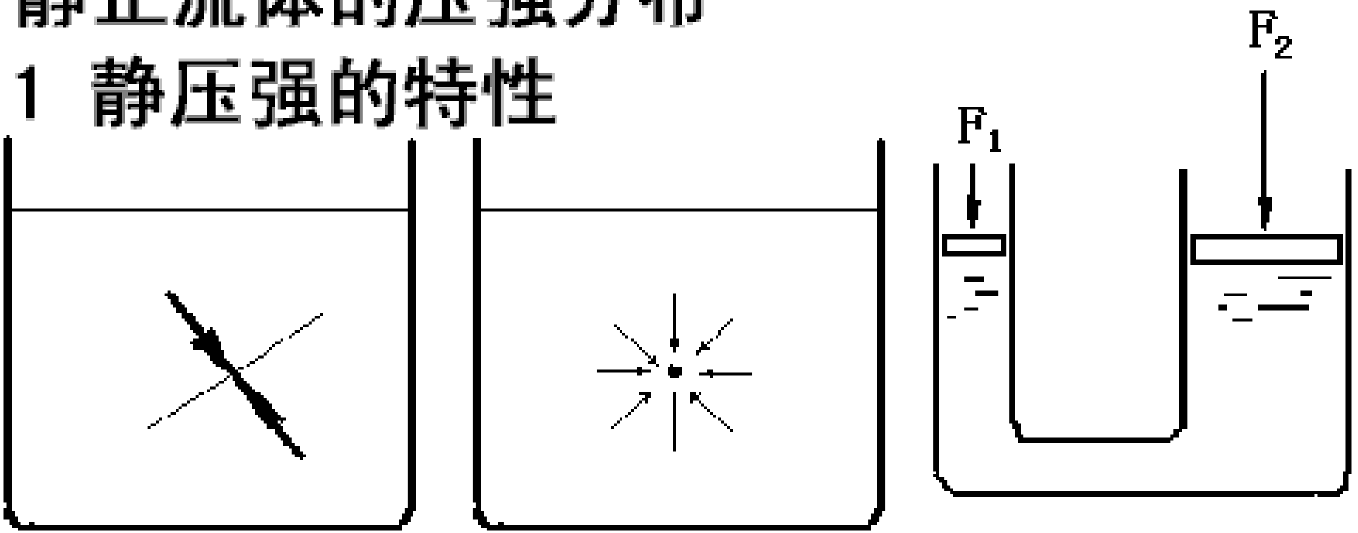
$\frac{p}{\rho}$ 为单位质量流体的压强能 $(=\frac{pdAdl}{\rho dV})$



2 流体静力学

2.1 静止流体的压强分布

2.1.1 静压强的特性

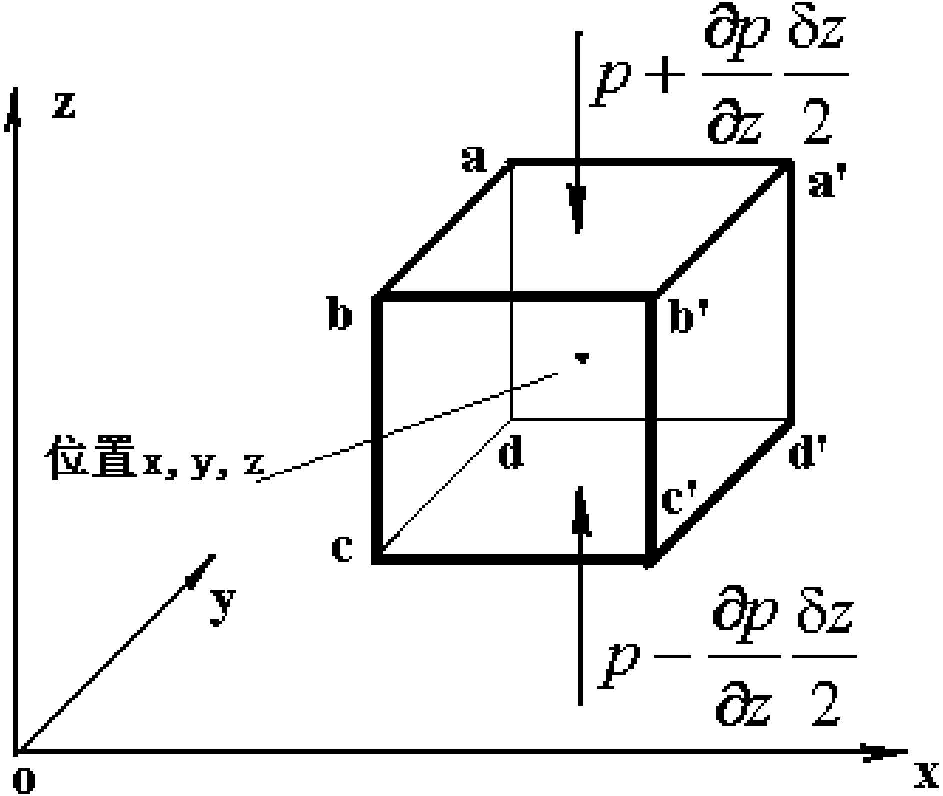


① 静止流体中任意界面上只受到大小相等方向相反的压力

② 作用于任意点所有不同方位的静压强在数值上相等

③ 压强各向传递

2.1.2 取控制体作力衡算



体积力 ZρdV

$$dV=\delta x\delta y\delta z$$

$$Z\rho dV+\left[\left(p+\frac{\partial p}{\partial z}\frac{\delta z}{2}\right)-\left(p-\frac{\partial p}{\partial z}\frac{\delta z}{2}\right)\right]\delta x\delta y=0$$

$$Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}=0\ ,$$

同样 $X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}=0,\ Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}=0$

2.1.3 结合本过程特点解微分方程

重力场 $X=0,\ Y=0,\ Z=-g$

因 $\frac{\partial p}{\partial x}=0,\ \frac{\partial p}{\partial y}=0$ 则 $-g-\frac{1}{\rho}\frac{dp}{dz}=0$

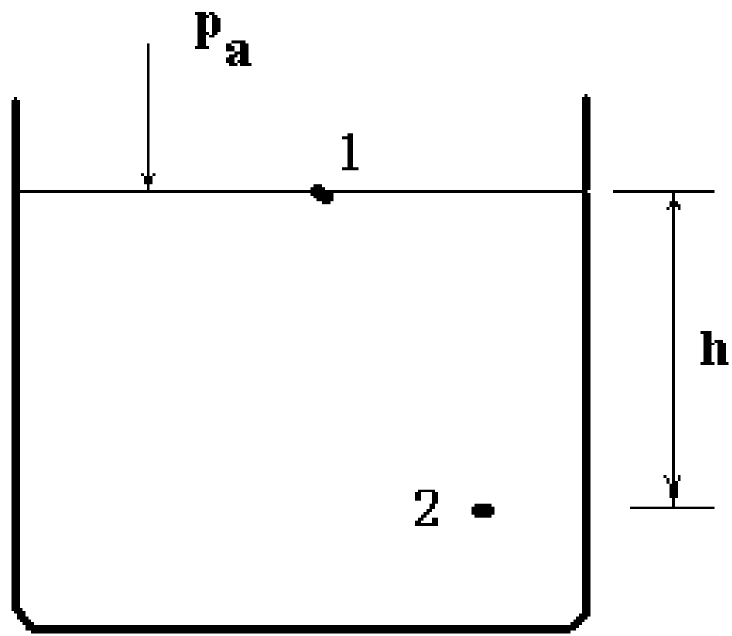
积分得 $p+\rho gz=$ 常数

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

$$p_2+\rho g z_2=p_a+\rho g z_1$$

$$p_2=p_a+\rho g\left(z_1-z_2\right)$$

$$=p_a+\rho g h$$



分析方法

①取控制体

②作力衡算

③结合本过程的特点，解微分方程

2.1.4 静力学方程应用条件

①同种流体且不可压缩(气体高差不大时仍可用)

②静止(或等速直线运动的流体横截面---均匀流)

③重力场

④单连通

2.2 流体的总势能

总势能 $\dfrac{\mathcal{P}}{\rho}=\dfrac{p}{\rho}+gz$ (压强能与位能之和)

虚拟压强 $\mathcal{P}=p+\rho gz$

2.3 压强的表示方法

2.3.1 单位： $N/m^2 = Pa,\quad 10^6\,Pa = 1MPa$

流体柱高度（ $p = \rho g h$ ）

$$1atm = 1.013\times10^5\,Pa = 760mmHg$$

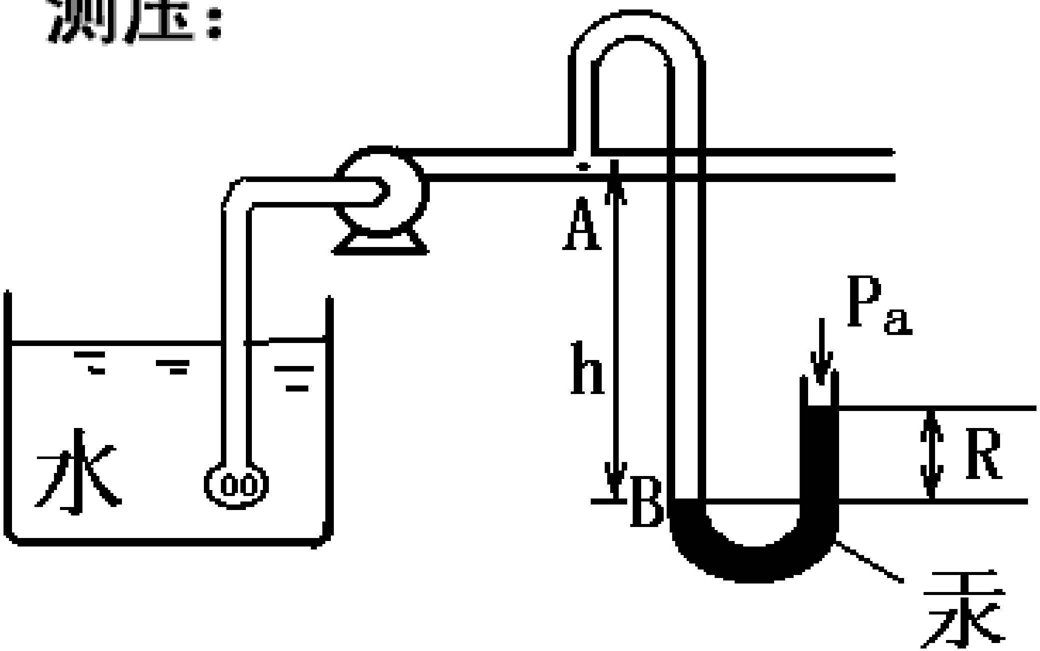
$$= 10.33mH_2O$$

2.3.2 基准： 表压=绝对压-大气压

真空度=大气压-绝对压

2.4 静力学方程的工程应用

2.4.1 测压：



已知：R=180mm, h=500mm

求：p_A=?（绝压），（表压）

解： $p_B = pa + \rho_{汞} gR$

$p_B = p_A + \rho_{水} gh$

$p_A = pa + \rho_{汞} gR - \rho_{水} gh$

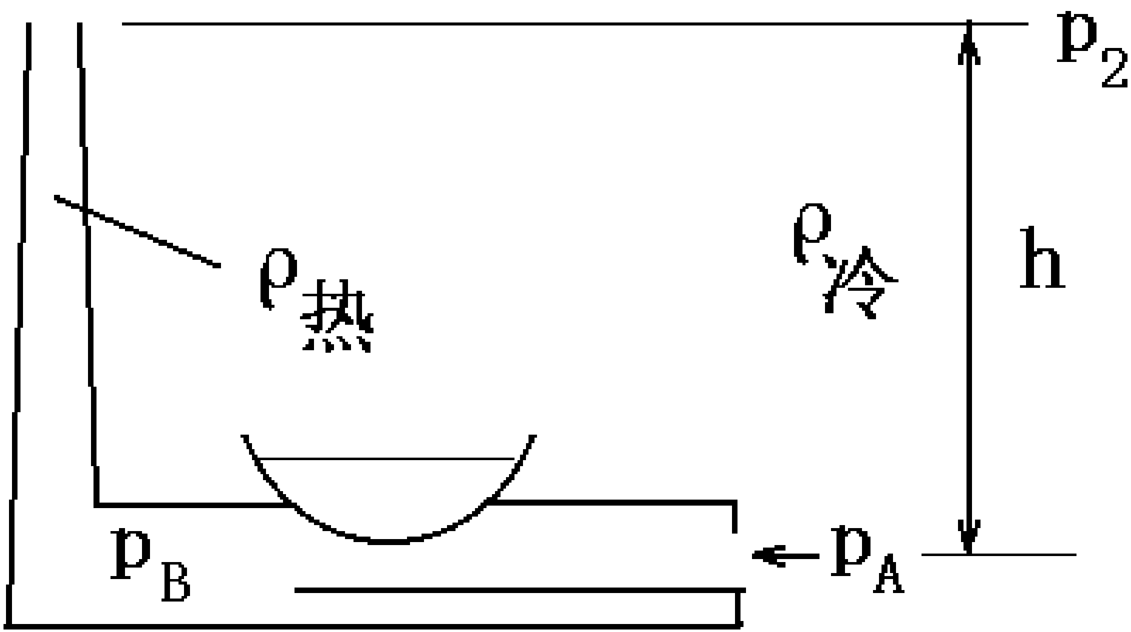
$= 1.013 \times 10^5 + 13600 \times 9.81 \times 0.18 - 1000 \times 9.81 \times 0.5$

$= 1.204 \times 10^5$ Pa（绝压）

$p_A = 1.204 \times 10^5 - 1.013 \times 10^5$

$= 1.91 \times 10^4$ Pa（表压）

2.4.2 烟囱拔烟：

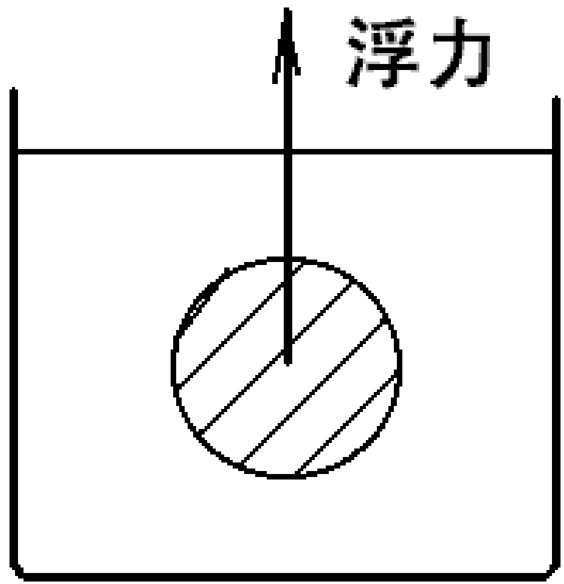


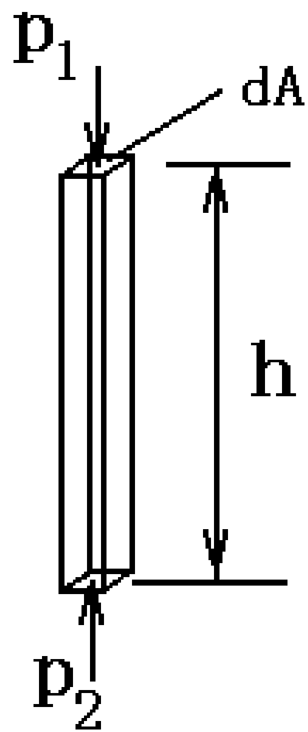
$p_A = p_2 + \rho_{冷} gh$ 由于 $\rho_{冷} > \rho_{热}$

$p_B = p_2 + \rho_{热} gh$ 则 $p_A > p_B$ 所以拔风

烟囱拔风的必要条件是什么？

2.4.3 浮力的本质：



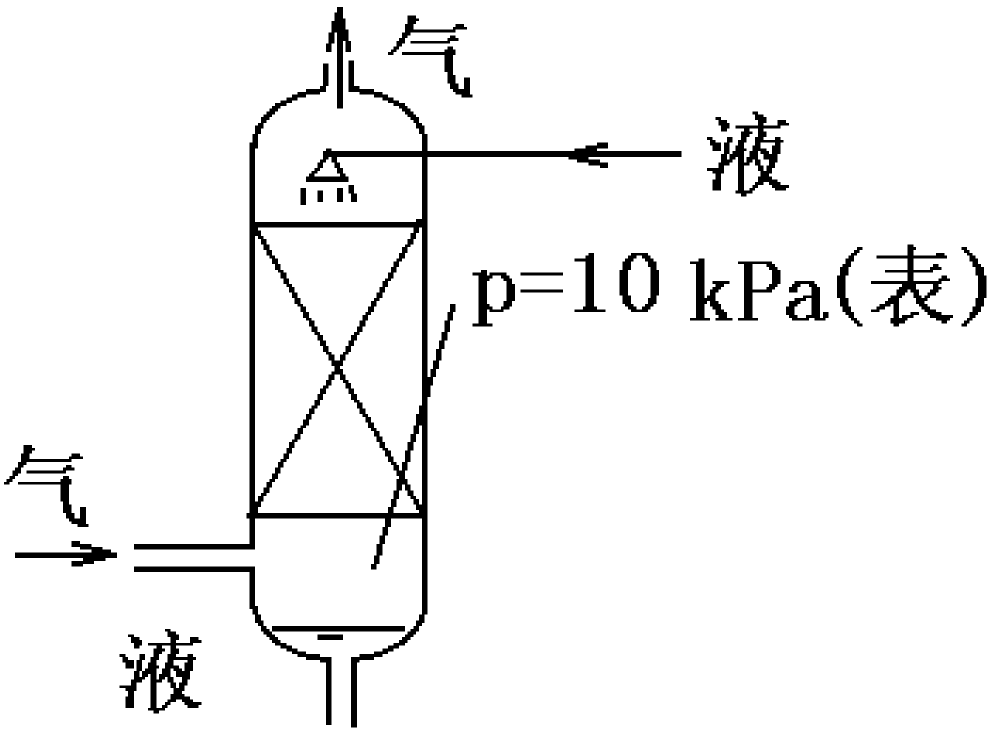


物体上下所受压强不同，由此产生浮力

取微元：压差力$=(p_2-p_1)dA=\rho ghdA=\rho gdV_{排}$

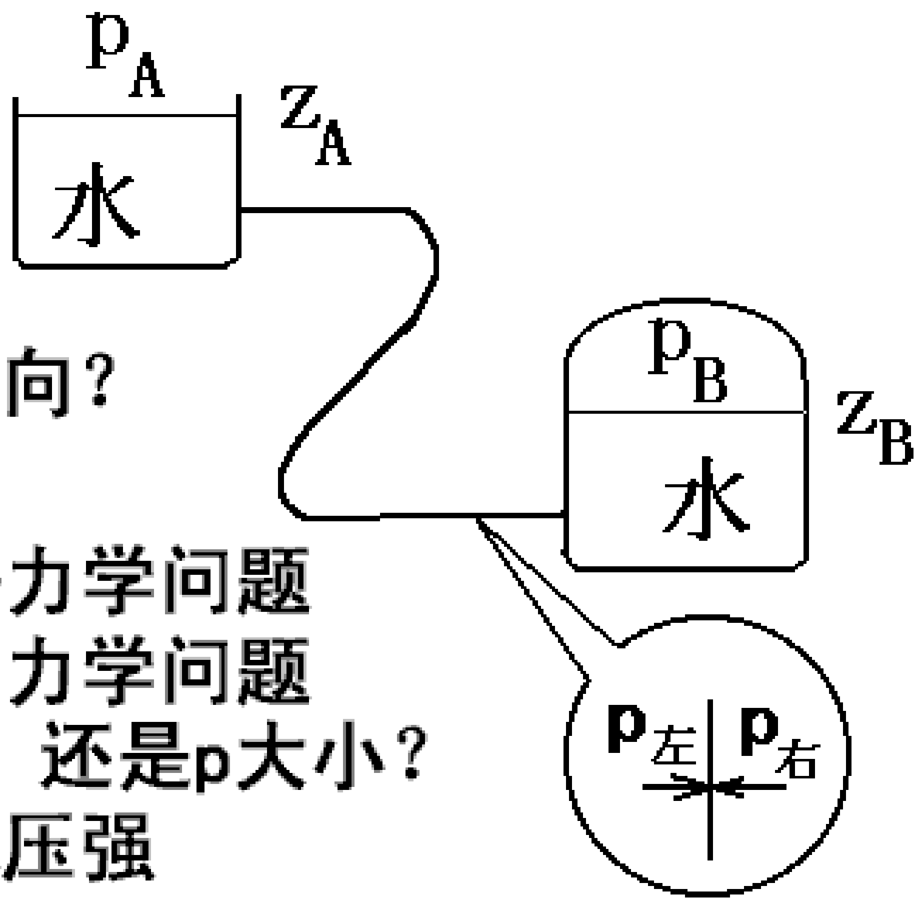
任一物体都可分成无数细条，　$V_{排}=\Sigma dV_{排}$

2.4.4 液封：



设备中压力要保持，液体要排出，须用液封

2.4.5 流向判别：



接通后流向？

流水的有无是静力学问题

流水的多少是动力学问题

判据是看z大小，还是p大小？

同一水平高度比压强

$p_{左}=p_A+\rho g z_A=\mathcal{P}_A$　　　　$p_{右}=p_B+\rho g z_B=\mathcal{P}_B$

3　流体流动中的守恒原理

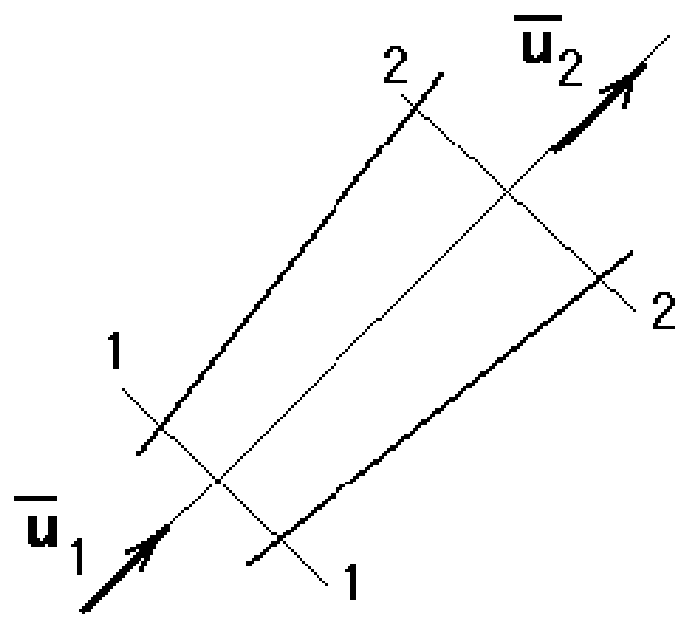
3.1 质量守恒

质量流量　$q_m = q_v \rho$

平均流速　$\bar{u} = \dfrac{q_v}{A}$

定态，不可压缩流体

$$\bar{u}_1 A_1 = \bar{u}_2 A_2$$



3.2 机械能守恒

3.2.1 牛顿第二定律：合外力=质量×加速度

考察流体流动的机械能变化，其特征是存在 $\frac{du}{dt}$

伯努利方程的物理意义：三项机械能之和为常数

$$zg+\frac{p}{\rho}+\frac{u^2}{2}=\text{常数},$$

或 $$z_1g+\frac{p_1}{\rho}+\frac{u_1^2}{2}=z_2g+\frac{p_2}{\rho}+\frac{u_2^2}{2},\quad \text{J/kg}$$

$$z+\frac{p}{\rho g}+\frac{u^2}{2g}=\text{常数},\quad \text{J/N=m}$$

几何意义：位头、压头、速度头总高为常数

伯努利方程的应用条件：

1) 重力场，定态流动，不可压缩的理想流体沿轨线

2) 无外加机械能或机械能输出

3.2.2 推广到工程上可用形式：

沿轨线——→沿流线　定态：流线与轨线重合

u、p等参数与时间无关

沿流线——→沿流管　截面处均匀流（没有加速度）

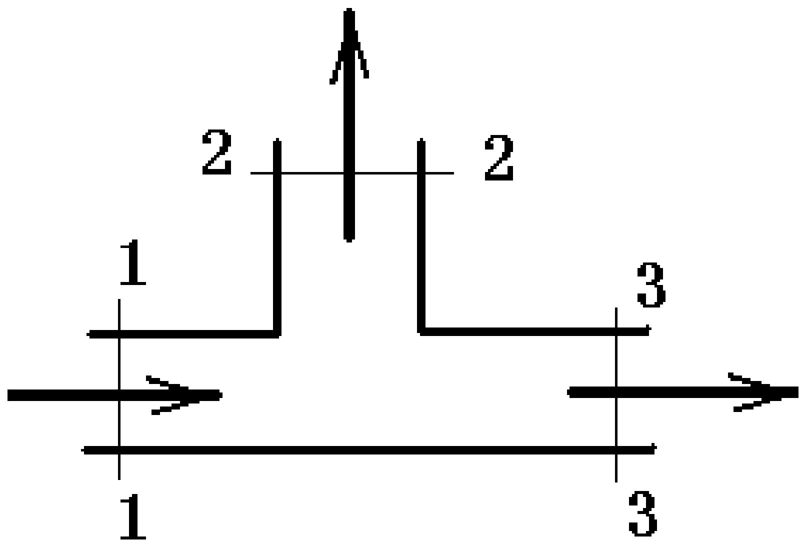
截面处流速均匀分布

平均速度→速度分布　引入α

理想流体→粘性损失　引入h_f

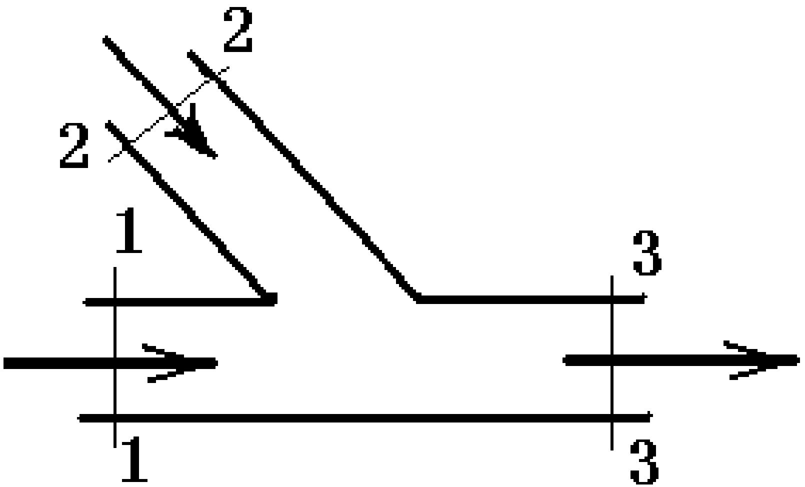
得机械能衡算式：$\dfrac{\mathscr{P}_1}{\rho}+\dfrac{\alpha_1 u_1^2}{2}=\dfrac{\mathscr{P}_2}{\rho}+\dfrac{\alpha_2 u_2^2}{2}+h_f$

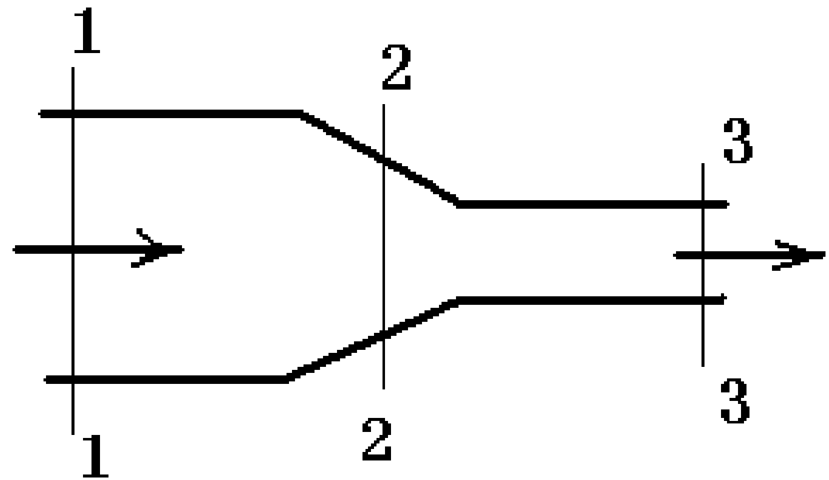
3.2.3 应用时注意：

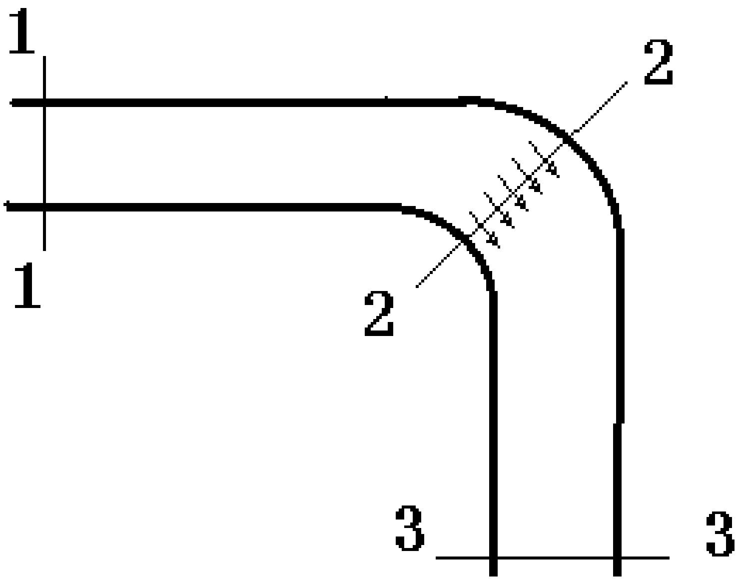


$u_1A_1=u_2A_2+u_3A_3$

$$z_1 g+\frac{p_1}{\rho}+\frac{u_1^2}{2}\doteqdot z_2 g+\frac{p_2}{\rho}+\frac{u_2^2}{2}\left(+z_3 g+\frac{p_3}{\rho}+\frac{u_3^2}{2}\right)$$

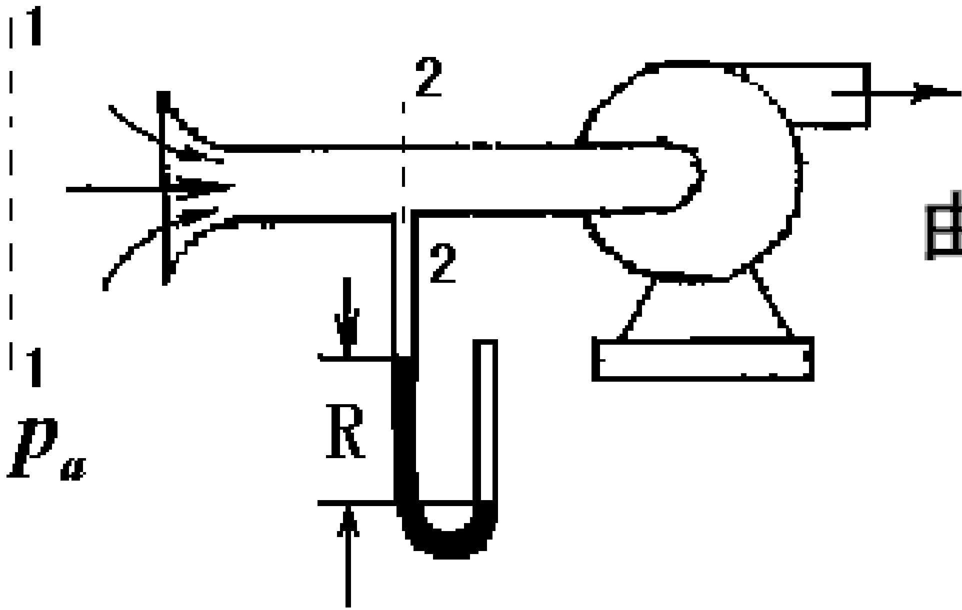

2
2
1
3
1
3


1
2
3
3
2
1


1
2
1
2
3
3

3.2.4 工程应用：

(1)测风量



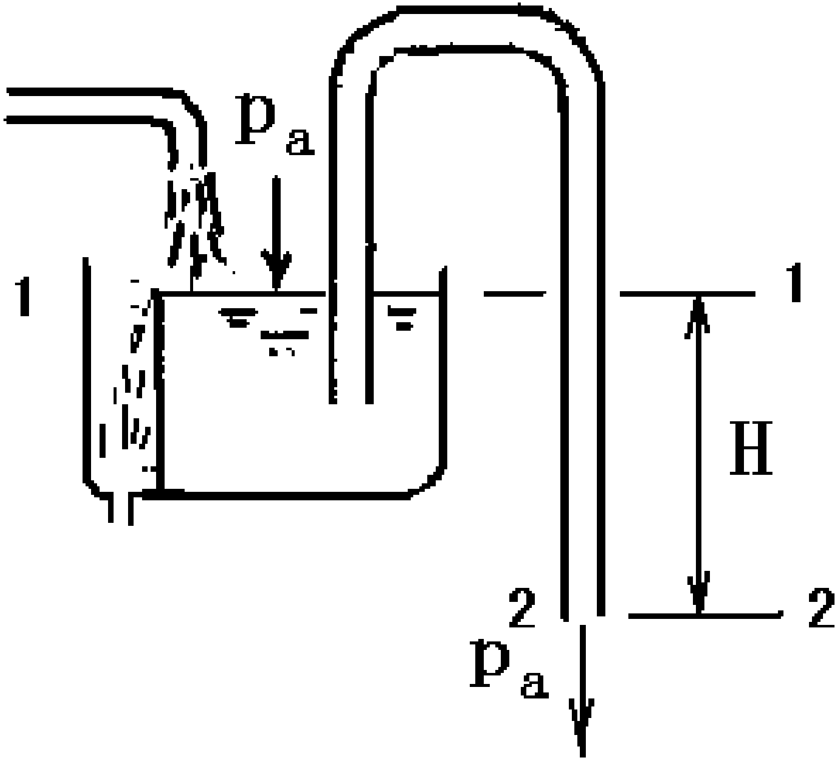
由1-1至2-2排方程：

$$\frac{p_a}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

压差计：$p_a = p_2 + \rho_i g R$

可得：$$u_2 = \sqrt{\frac{2(p_a - p_2)}{\rho}} = \sqrt{2gR\frac{\rho_i}{\rho}}$$

(2) 虹吸

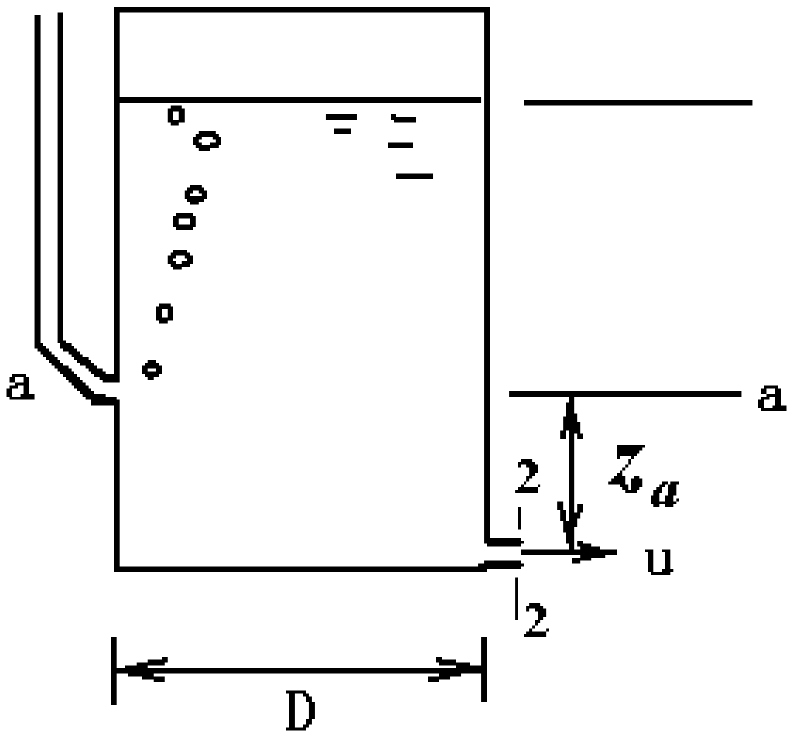


从1-1至2-2排方程

$$\frac{p_a}{\rho}+Hg=\frac{p_a}{\rho}+\frac{u_2^2}{2}$$

$$u_2=\sqrt{2gH}$$

(3) 马利奥特容器



求水面在a-a面以上时的放水速度

由a-a面至出口小孔截面2-2排方程

$$\frac{p_a}{\rho}+z_a g=\frac{p_a}{\rho}+\frac{u^2}{2}$$

这时的流动条件是定态的 $u=\sqrt{2gz_a}$

应用伯努利方程时所应注意的问题：

1. 看是否符合应用条件（连续流，满流）

2. 画示意图

3. 截面选取 平行流，已知量最多，
大截面 $u=0$

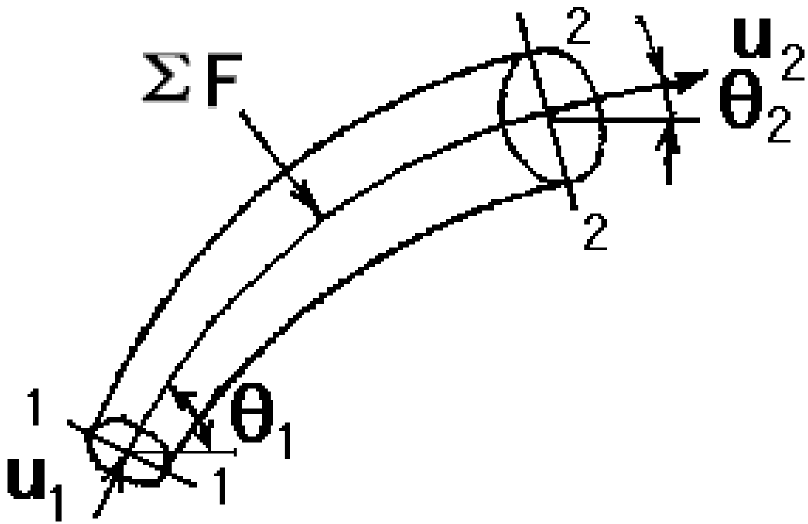
3.3 动量守恒

牛顿第二定律可写成：

$$F\Delta t=\Delta(mu)$$

取单位时间计：

$$F=\Delta(q_m u)=\Sigma_{出}q_m u-\Sigma_{进}q_m u$$



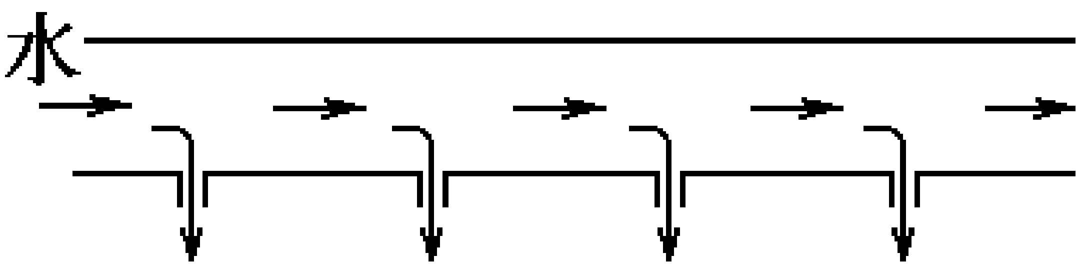
单进单出：

$$\Sigma F_x=q_m(u_{2x}-u_{1x})$$
$$\Sigma F_y=q_m(u_{2y}-u_{1y})$$
$$\Sigma F_z=q_m(u_{2z}-u_{1z})$$

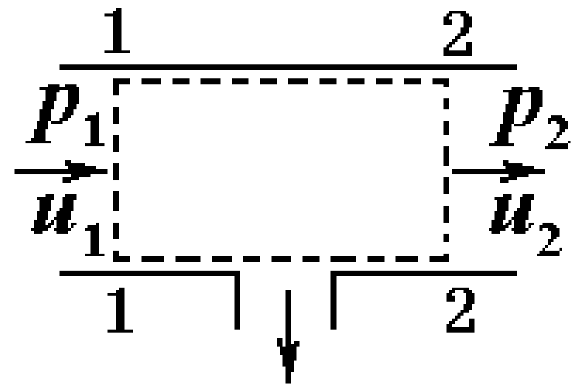
条件：定态流动，管截面上速度均匀分布

工程应用：

（1）流量分配



取一节作分析



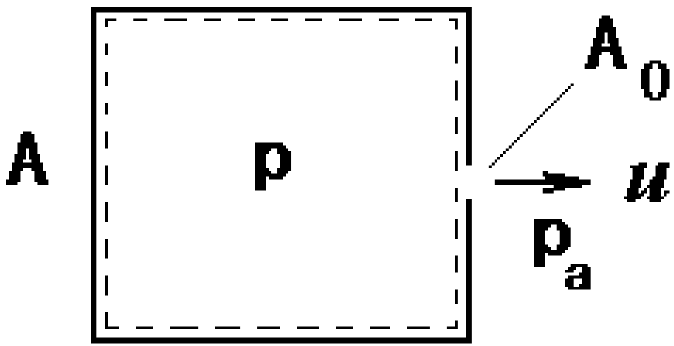
忽略壁面摩擦阻力，按x方向动量守恒式

$$p_1 A - p_2 A = \rho\, u_2^2 A - \rho\, u_1^2 A$$

因水从支管中流出，$u_2 < u_1$，所以，$p_2 > p_1$

$$p_2 - p_1 = \rho\,(u_1^2 - u_2^2)$$

（2）压力射流



根据动量守恒，压力射流的小孔流速是多少呢？

解：划虚线控制体，按水平方向列动量守恒式

$$Ap-(A-A_0)p-A_0p_a=q_mu-0=A_0\rho u^2$$

这样 $A_0(p-p_a)=A_0\rho u^2$，得 $u=\sqrt{\dfrac{p-p_a}{\rho}}$

按实用形式，$u=C_0\sqrt{\dfrac{2(p-p_a)}{\rho}}$，得 $C_0=0.7$

4 流体流动的内部结构

4.1 流动的型态

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

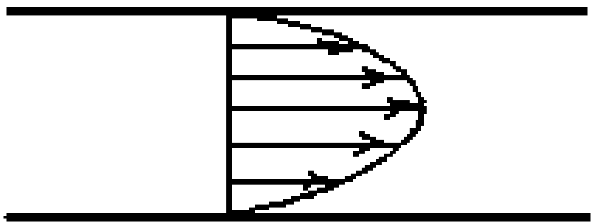
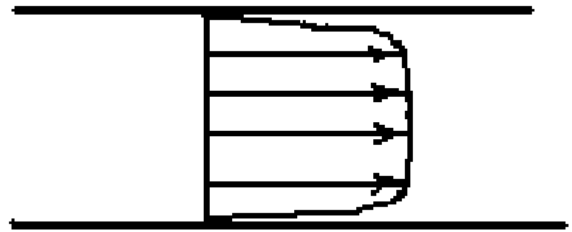
对于水平直管，$h_f=\frac{p_1-p_2}{\rho}=\frac{\Delta p}{\rho}$

人们发现两种规律：$\Delta p \propto u^1$， $\Delta p \propto u^{1.75\sim 2}$

雷诺实验　　　　表明存在两种流动类型

判断依据：雷诺数　$\mathrm{Re}=\frac{du\rho}{\mu}$

4.1.1 层流和湍流的区别：

	层流	湍流
①		
②	$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = 0.5$	$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} \approx 0.8$
③	无微团作径向运动	有微团作径向运动
④	层流层从中心到管壁	层流内层附壁
⑤	$\tau = \mu \frac{du}{dy}$	$\tau = (\mu + \mu') \frac{du}{dy}$

⑥	h_f与$\dfrac{\varepsilon}{d}$无关	h_f与$\dfrac{\varepsilon}{d}$有关
⑦	$h_f \propto u^1$	$h_f \propto u^{1.75\sim2}$
⑧	传热、传质慢	传热、传质快

层流和湍流的本质区别：

是否存在速度、压强的脉动性

4.1.2 流型判据

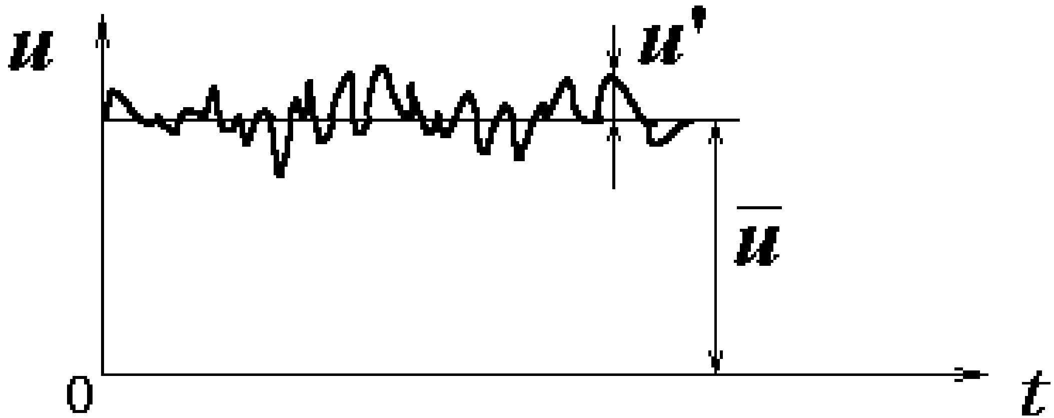
$Re<2000$ 层流

$2000<Re<4000$ 或为层流，或为湍流

$Re>4000$ 湍流

4.2 湍流的基本特征

4.2.1 时均速度和脉动速度



速度=时均速度+脉动速度　$u=\overline{u}+u'$

4.2.2 湍流的强度和尺度

湍流：主体流动+各种大小、强弱的旋涡

湍流强度 $I_x = \sqrt{\overline{u_x'^2}}$ 或 $I_x = \sqrt{\overline{u_x'^2}} / \overline{u}$

湍流尺度 $l = \int_0^\infty R dy$

两点间的相关系数 $R = \dfrac{\overline{u'_{x1} u'_{x2}}}{\sqrt{\overline{u_{x1}'^2}} \sqrt{\overline{u_{x2}'^2}}}$

两点间的距离为 y

4.2.3 湍流粘度 μ'：

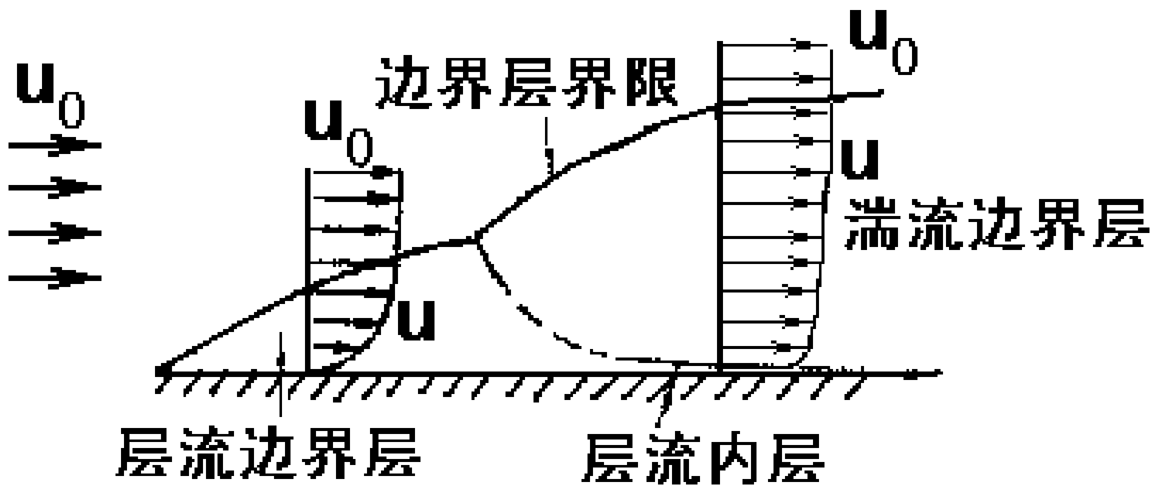
$$\tau = (\mu + \mu') \frac{du}{dy}$$

μ' 与流动状况有关，与物性无关

4.3 边界层及边界层脱体

4.3.1 边界层

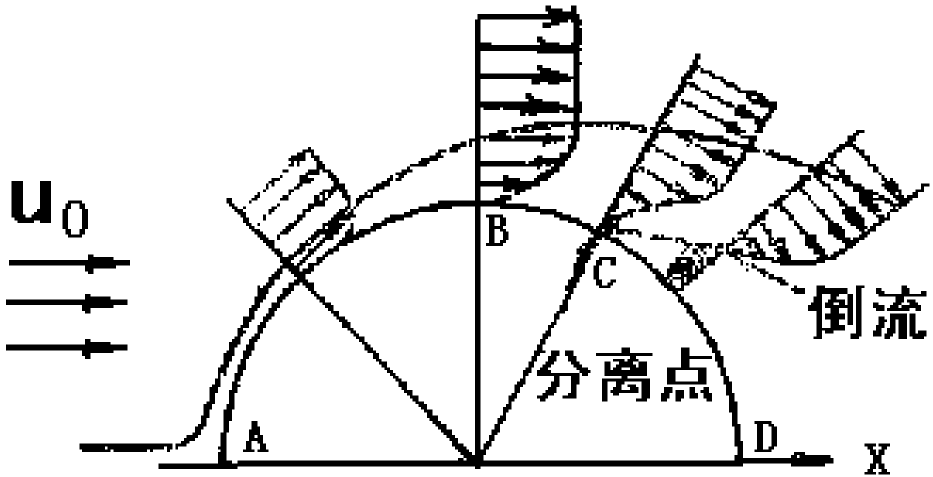
实际流体 μ ≠0，壁面无滑脱



边界层——流动流体受固体壁面阻滞而造成速度梯度的区域

圆管入口段阻力大、传热、传质快

4.3.2 边界层脱体



流体绕过圆柱的流动

边界层脱体的后果：

1. 产生大量的旋涡， 2. 造成较大能量损失

边界层脱体的条件：

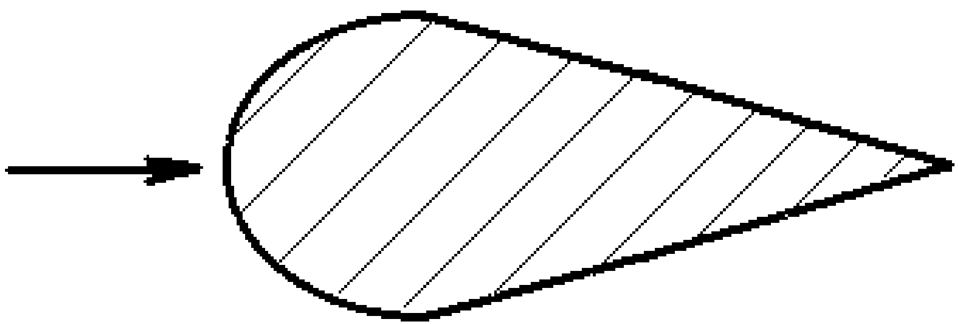
1．逆压强梯度

2．外层动量来不及传入

如：平板不会发生脱体（无倒压区）

流线型物体也不发生脱体

（尾部收缩缓慢，动量来得及传入）



4.4 圆管内流体运动的数学描述

数学描述方法：

①取控制体（微分控制体或积分控制体）

②作力（热量、质量）衡算

③结合本过程的特征方程（如$\tau=\mu\dfrac{du}{dy}$）解方程

④将结果整理成所需要的形式

4.4.1 取控制体作力衡算

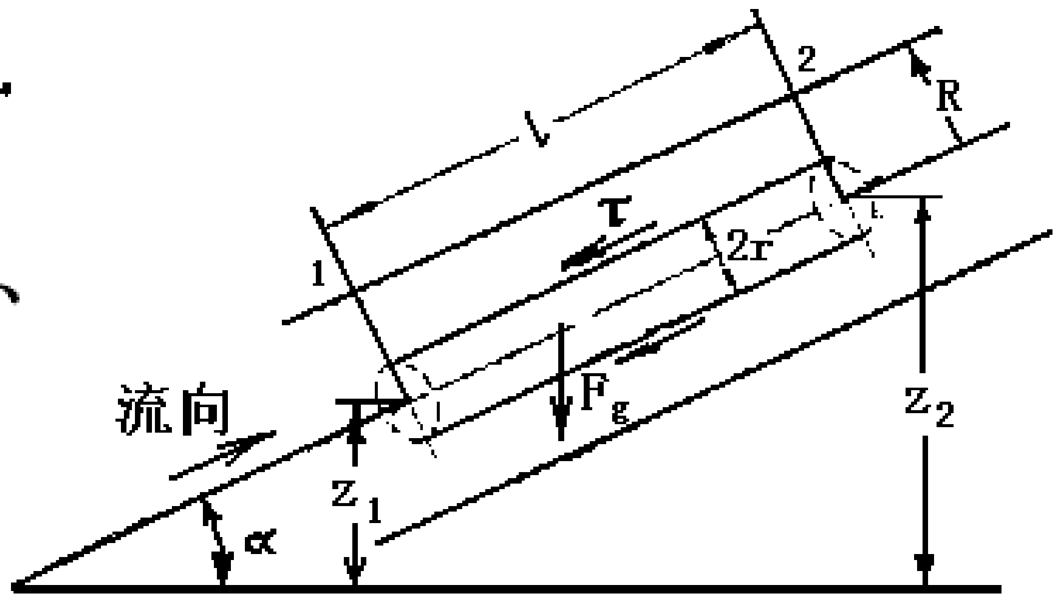
$(p_1-p_2)\pi r^2-\pi r^2 l\rho g\cdot\sin\alpha-2\pi r l\tau=0$

$l\cdot\sin\alpha=z_2-z_1$

得， $(\mathcal{P}_1-\mathcal{P}_2)r=2l\tau$

或 $\tau=\dfrac{\mathcal{P}_1-\mathcal{P}_2}{2l}r$

此式与流体性质、流动类型无关



4.4.1 取控制体作力衡算

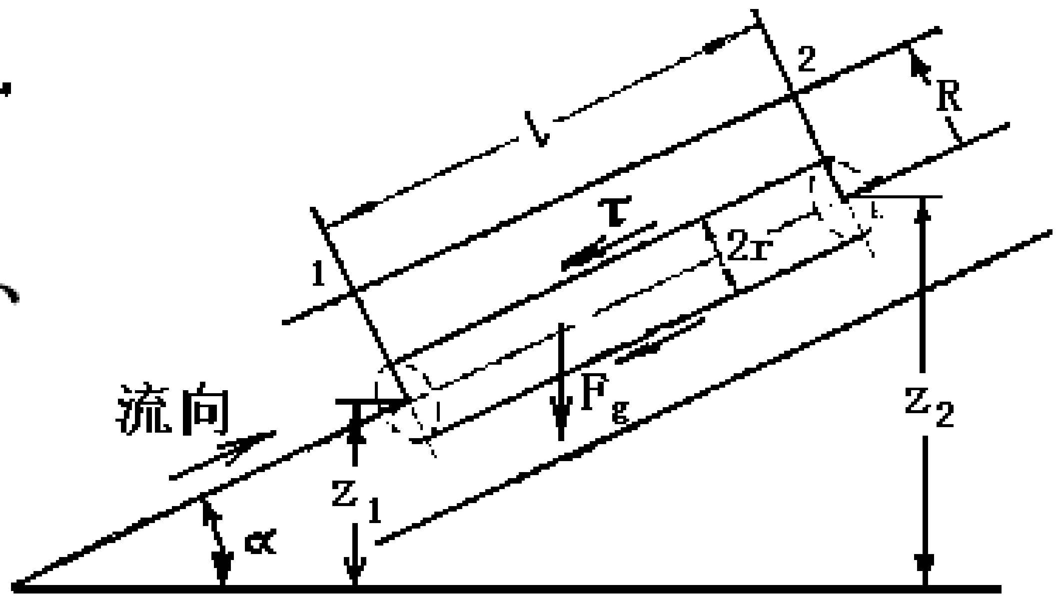
$$(p_1-p_2)\pi r^2-\pi r^2 l\rho g\cdot\sin\alpha-2\pi r l\tau=0$$

$$l\cdot\sin\alpha=z_2-z_1$$

得， $(\mathcal{P}_1-\mathcal{P}_2)r=2l\tau$

或 $\tau=\dfrac{\mathcal{P}_1-\mathcal{P}_2}{2l}r$

此式与流体性质、流动类型无关



5 阻力损失

5.1 两种阻力损失

划分：直管阻力损失（沿程阻力损失）
局部阻力损失（流体流经管件、阀件的阻力损失）

5.1.1 直管阻力损失

影响因素有三种：①物性因素 ρ， μ
②设备因素 d，l，ε
③操作因素 u

机械能衡算 $$\frac{p_1}{\rho}+\frac{u_1^2}{2}=\frac{p_2}{\rho}+\frac{u_2^2}{2}+h_f$$

对于直管，$u_1=u_2$， $$h_f=\frac{p_1-p_2}{\rho}=\frac{\Delta p}{\rho}$$

5.1.2 泊谖叶方程

层流时，已得 $u_{\max}=\dfrac{\mathcal{P}_1-\mathcal{P}_2}{4\mu l}R^2=2u$

得 $h_f=\dfrac{\Delta\mathcal{P}}{\rho}=\dfrac{32\mu ul}{\rho d^2}$

应用条件：①牛顿流体

②层流状态

③圆直管速度分布稳定段（非入口段）

层流直管阻力也可写成

$$h_f=\left(\frac{64}{\mathrm{Re}}\right)\left(\frac{l}{d}\right)\left(\frac{u^2}{2}\right)$$

5.2 湍流直管阻力损失

实验研究方法:

基本要求：由小见大，由此及彼

因次论指导下的实验研究方法主要步骤:

① 析因实验-----找出主要影响因素

$$h_f=f(d, l, \mu, \rho, u, \varepsilon)$$

若按每个变量做五个点,则实验工作量惊人(5^6次)

② 无因次化-----减少工作量

因次----就是量纲

因次论的基本依据：物理方程的因次一致性

力学范围内基本因次只有三个

质量[M]，长度[L]，时间[T]

其它因次均为导出因次，如密度$[ML^{-3}]$

$$h_f = f(d, l, \mu, \rho, u, \varepsilon)$$

选 d, u, ρ 为基本变量，将h_f，l，μ，ε 无因次化

$$\frac{h_f}{u^2} = \varphi\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{l}{d}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$$

③ 实验并数据处理

因$h_f \propto l$，习惯用$u^2/2$表示速度头，则

$$h_f = \lambda \frac{l}{d}\frac{u^2}{2}$$

记摩擦系数

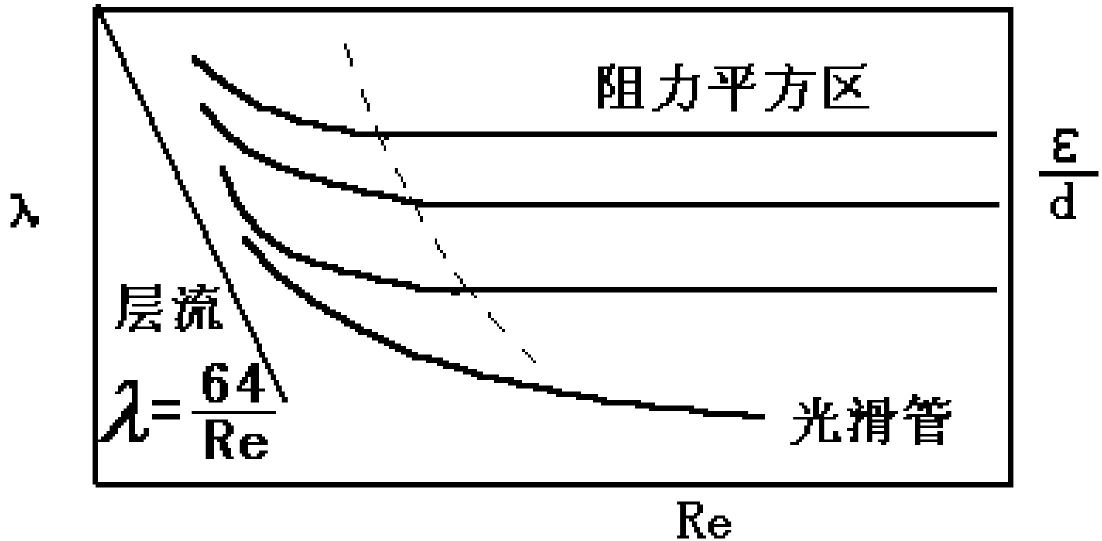
$$\lambda = \varphi\left(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$$

以不同的Re(方便地调节u),不同的人工粗糙管

以水或空气就可做实验

5.3 摩擦系数

5.3.1 莫迪图



分析

层流时，管内全部为层流，λ与ε/d无关

湍流时，层流内层厚度δ，

δ＞ε，水力光滑管， λ与Re有关，与 ε/d无关

δ∽ε，λ与Re、 ε/d都有关

δ＜ε，完全湍流粗糙管，λ与Re无关，与ε/d有关

同一根管子，可以既是光滑管，又是粗糙管

5.3.2 非圆形直管阻力损失

用当量直径 d_e

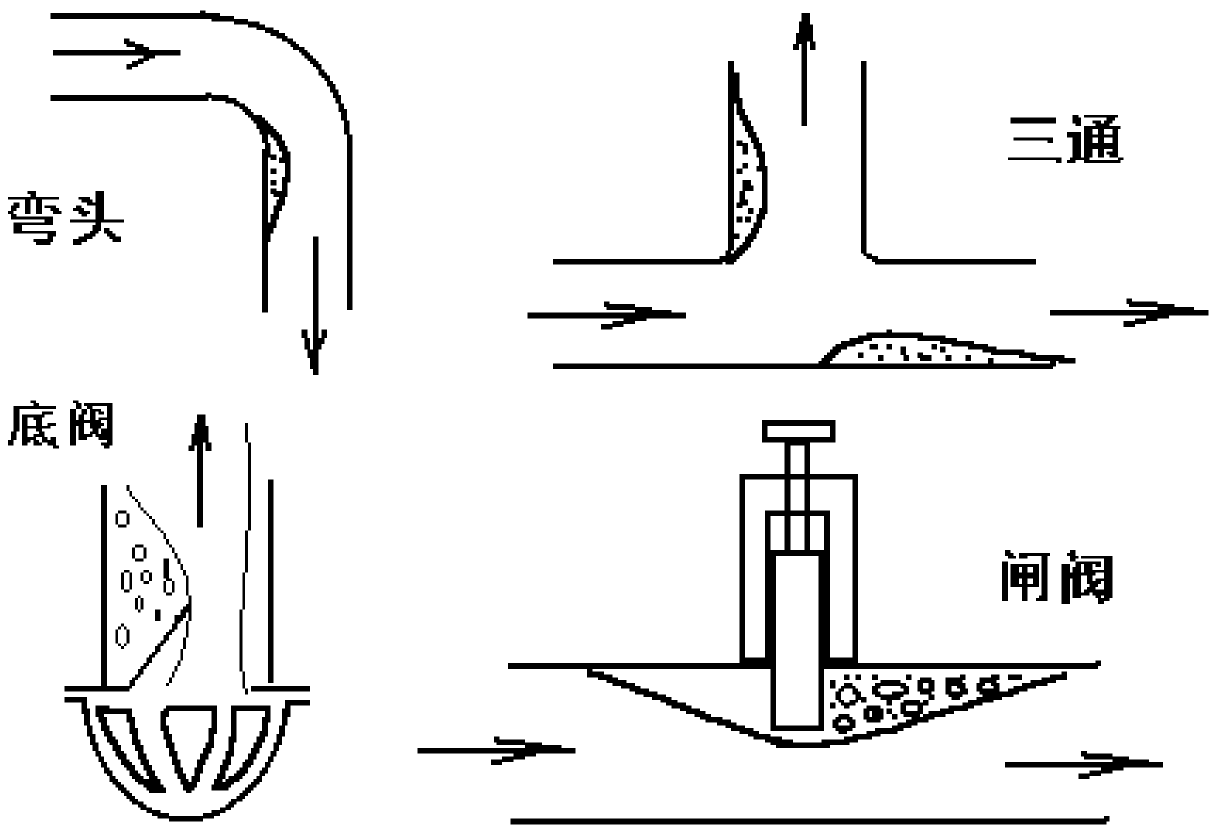
$$d_e = \frac{4 \times \text{管道截面积}}{\text{浸润周边}} = \frac{4A}{\Pi}$$

这里 d_e 仅用于 $h_f = \lambda \dfrac{l}{d_e} \dfrac{u^2}{2}$ 和 $\mathrm{Re} = \dfrac{d_e u \rho}{\mu}$

速度u为实际平均速度，而 $u \neq \dfrac{q_V}{\pi d_e^2 / 4}$

5.4 局部阻力损失

管件阀件处流道变化大，多发生边界层脱体，
产生大量旋涡，消耗了机械能



5.4.1 局部阻力计算式

工程上取 $h_f = \zeta \dfrac{u^2}{2}$，ζ---阻力系数

或 $h_f = \lambda \dfrac{l_e}{d} \dfrac{u^2}{2}$，$l_e$---当量长度

实测的ζ和 l_e 已成图表，供设计使用

注意：1. 两种方法并不一致，都有近似

2. 计算所取速度要看图表规定

阻力的单位有三种：①损失压降　N/m^2

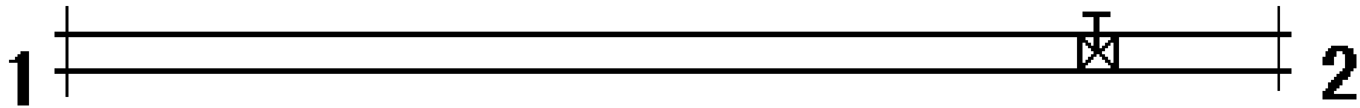
②损失能量　J/kg

③损失压头　J/N=m

工程计算(一)水平管输油

在250kPa的压差下输送ρ=800kg/m^3, μ=0.1Pa•s的油品，管长$l+l_e$=10km, 管内径d=300mm。求流量为多少m^3/s?

解：画简图，从1至2排机械能守恒式



$$\frac{\mathcal{P}_1}{\rho}+\frac{u^2}{2}=\frac{\mathcal{P}_2}{\rho}+\frac{u^2}{2}+\lambda\frac{l+l_e}{d}\frac{u^2}{2}$$

因μ较大，可先设Re<2000，层流 $\lambda = \dfrac{64}{\text{Re}}$

$$u = \frac{\Delta \mathcal{P} d^2}{32\mu(l + l_e)} = \frac{250000 \times 0.3^2}{32 \times 0.1 \times 10000} = 0.70 m/s$$

验 $\text{Re} = \dfrac{du\rho}{\mu} = \dfrac{0.3 \times 0.7 \times 800}{0.1} = 1687 < 2000$

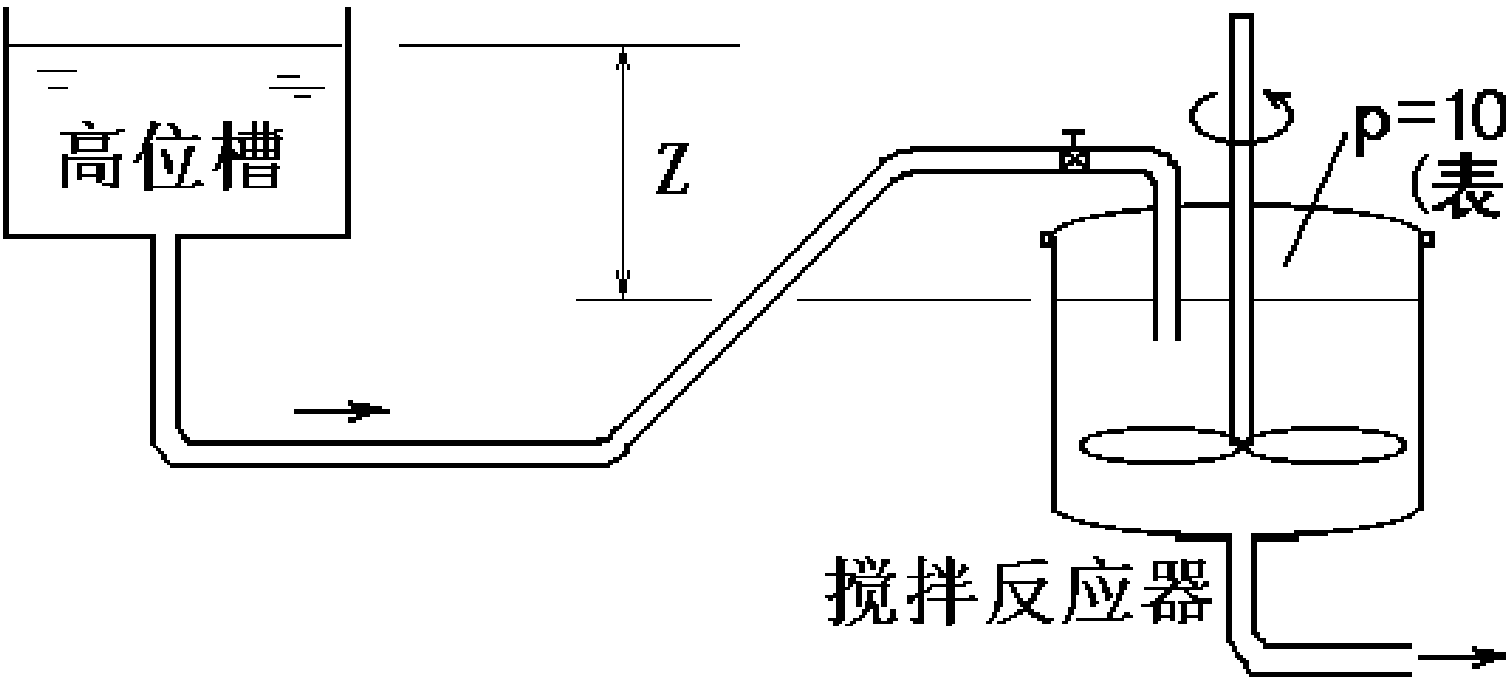
原设成立，计算有效

$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2 u = 0.785 \times 0.3^2 \times 0.7 = 0.050 m^3/s$$

工程计算(二)高位槽送液

由一高位槽向搅拌反应器送料，料液性质同20℃的水，流量1.3l/s，镀锌铁管$\phi 42\times 3$mm，管长10m，90°弯头4个，闸阀(全开)1个。

试求：Z应为多少m。



解： $u=\dfrac{4q_v}{\pi d^2}=\dfrac{4\times 1.3\times 10^{-3}}{3.14\times 0.036^2}=1.28m/s$

$$\mathrm{Re}=\frac{du\rho}{\mu}=\frac{0.036\times 1.28\times 1000}{0.001}=4.61\times 10^4$$

查90° 弯头 ζ=0. 75，闸阀全开 ζ=0. 17，出口 ζ=1

取 ε=0. 2mm， ε/d=0. 0056，查 λ=0. 033

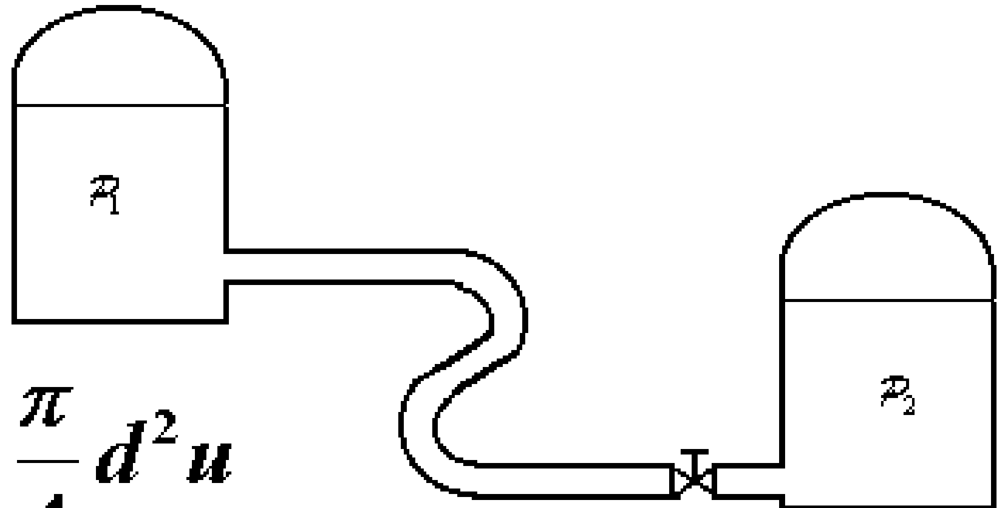
由高位槽液面至反应器液面作机械能衡算

$$Z=\frac{p}{\rho g}+\left(\lambda\frac{l}{d}+\Sigma\zeta\right)\frac{u^2}{2g}=\frac{10^4}{10^3\times 9.81}+$$

$$\left(0.033\times\frac{10}{0.036}+4\times 0.75+0.17+1\right)\frac{1.28^2}{2\times 9.81}=2.13m$$

6 管路计算

6.1 变量分析



6.1.1 变量

质量守恒式 $q_V = \frac{\pi}{4} d^2 u$

机械能衡算式 $\frac{\mathcal{P}_1}{\rho} = \frac{\mathcal{P}_2}{\rho} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \zeta\right) \frac{u^2}{2}$

摩擦系数计算式 $\lambda = \varphi\left(\frac{du\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$

其中物性参数 μ、ρ 已知

设备参数 l、d、ε、$\Sigma\zeta$

操作参数 q_v、u、p_1、p_2

中间变量 λ

9个变量，需给定6个独立变量，可求其它3个

按计算目的可分为两类

设计型计算：给定 q_v、p_2、l、ε、$\Sigma\zeta$

选择 最优 u

求 p_1、d

操作型计算：给定 d、p_1(或V)、p_2、l、ε、$\Sigma\zeta$

求 q_v（或 p_1）

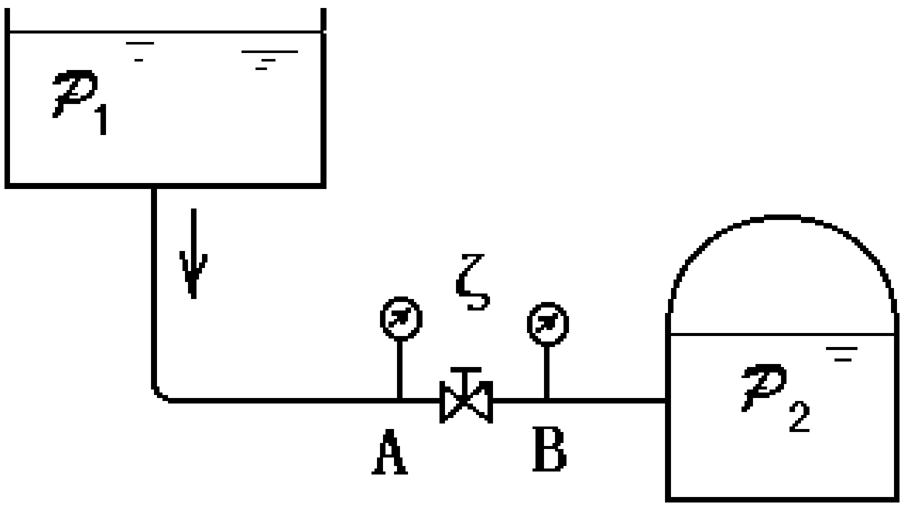
6.1.2 阻力损失压差-管路状况-流量三者关系

$$h_f=\frac{\Delta \mathcal{P}}{\rho}=\left(\lambda\frac{l}{d}+\Sigma\zeta\right)\frac{u^2}{2}=\left(\lambda\frac{l}{d}+\Sigma\zeta\right)\frac{8}{\pi^2 d^4}q_v^2$$

结论：①管路状况一定，$q_v\uparrow$，$h_f\uparrow$

②$h_f(\Delta P)$一定，$\zeta\uparrow$，$q_v\downarrow$

③q_v一定，$\zeta\uparrow$，$h_f\uparrow$



图中，$\zeta\uparrow$，则h_{fAB} ___，p_A___，p_B ___，为什么

若水流方向相反呢，$\zeta\uparrow$，则h_{fAB}___，p_A ___，p_B ___

6.2 管路计算

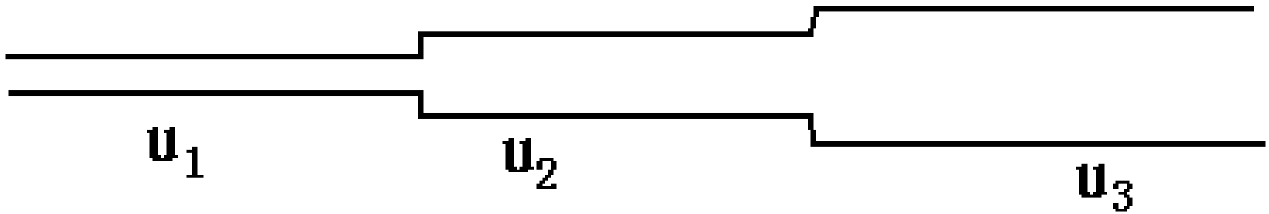
层流状态下 $\lambda = \dfrac{64}{\mathrm{Re}}$ 为显函数，可直接求解

湍流状态下 $$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2\log\left(\frac{2\varepsilon}{d} + \frac{18.7}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}\right)$$

为隐函数，常要试差求解

常可先设λ在阻力平方区，再根据计算所得Re修正λ

6.2.1 串联管路计算



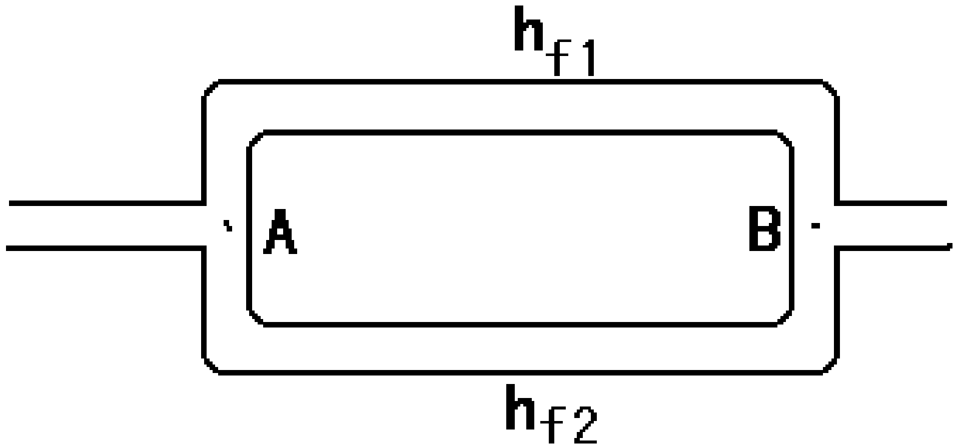
方程特点： $h_{f总}=h_{f1}+h_{f2}+h_{f3}$

$$q_v=q_{v1}=q_{v2}=q_{v3}$$

注意各段阻力计算的u、l、d、λ 的不同

6.2.2 复杂管路计算

并联管路计算



分流或合流时，有能量的损失和交换，有时 ζ<0

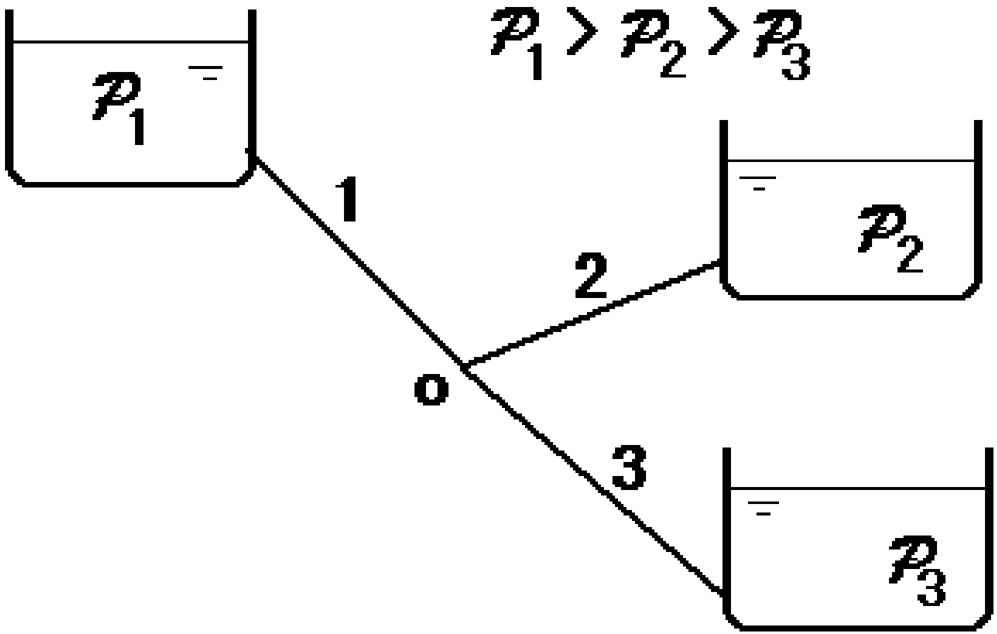
对于长管，三通处的阻力相对很小可忽略

方程特点：$$\frac{p_A - p_B}{\rho} = h_{f1} = h_{f2}$$

$$q_{v总} = q_{v1} + q_{v2}$$

注意h_f不要重复计算

6.2.3 分支与汇合管路计算



$\mathcal{P}_1 - \mathcal{P}_0 = \rho\lambda_1 \dfrac{8l_1}{\pi^2 d_1^5} q_{v1}^2$，有三个式子，

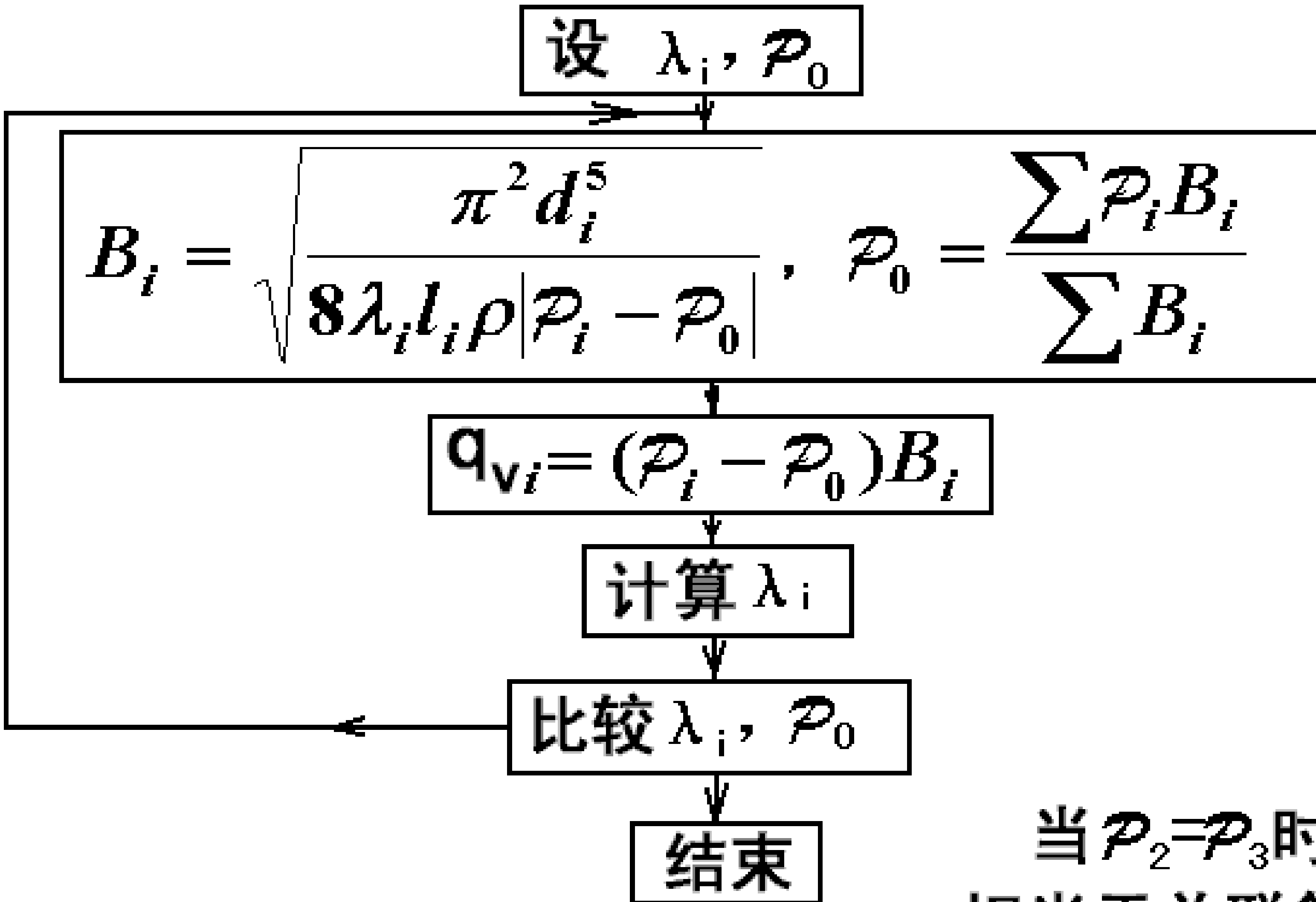
管2的流向看$\mathcal{P}_2$与$\mathcal{P}_0$大小

$$\sum_{i=1}^{3} q_{vi} = 0$$，进0点为正，出0点为负

$$q_{vi} = (\mathcal{P}_i - \mathcal{P}_0)\sqrt{\frac{\pi^2 d_i^5}{8\lambda_i l_i \rho \left|\mathcal{P}_i - \mathcal{P}_0\right|}} = (\mathcal{P}_i - \mathcal{P}_0) B_i$$

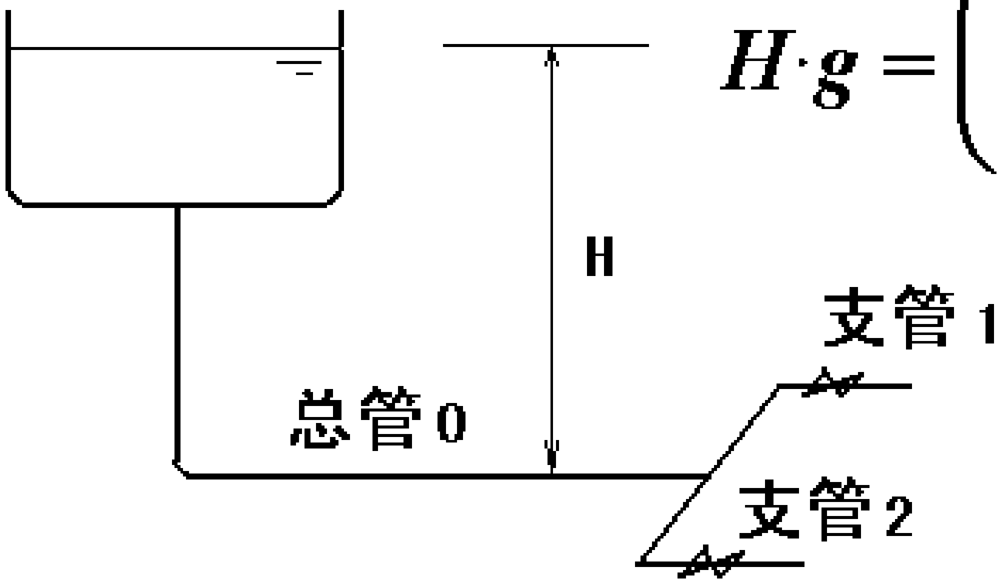
$$\sum q_{vi} = \sum \mathcal{P}_i B_i - \mathcal{P}_0 \sum B_i = 0,$$

$$\mathcal{P}_0 = \frac{\sum \mathcal{P}_i B_i}{\sum B_i}$$



当 $\mathcal{P}_2=\mathcal{P}_3$ 时，
相当于并联管路

6.2.4 阻力控制问题



$$H \cdot g = \left(\lambda \frac{l}{d}\right)_0 \frac{u_0^2}{2} + \zeta_1 \frac{u_1^2}{2}$$

$$\zeta_1 \frac{u_1^2}{2} = \zeta_2 \frac{u_2^2}{2}$$

总管阻力为主时，增加分支,$q_{v总管}$ 几乎不变

支管阻力为主时，增加分支,$q_{v分支}$ 互不干扰

6.3 可压缩气体的管路计算

特殊性：ρ 为p的函数

机械能衡算式：$gz_1+\frac{u_1^2}{2}+\int_{p_2}^{p_1}\frac{dp}{\rho}=gz_2+\frac{u_2^2}{2}+h_f$

简化：①气体位能很小，可忽略

②等温流动或温差不大，$\mathrm{Re}=\frac{du\rho}{\mu}=\frac{dG}{\mu}$

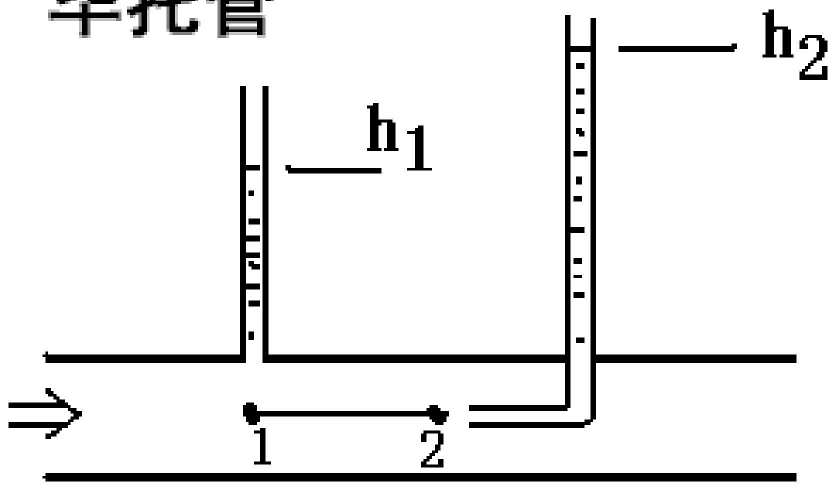
沿直管不变，λ 也不变

得 $$\frac{p_1-p_2}{\rho_m}=\lambda\frac{l}{2d}\left(\frac{G}{\rho_m}\right)^2+\left(\frac{G}{\rho_m}\right)^2\ln\frac{p_1}{p_2}$$

ρ_m 为p_m=$(p_1+p_2)/2$ 下的密度

7 流速和流量的测量

7.1 毕托管



沿流线从1至2排伯努利方程

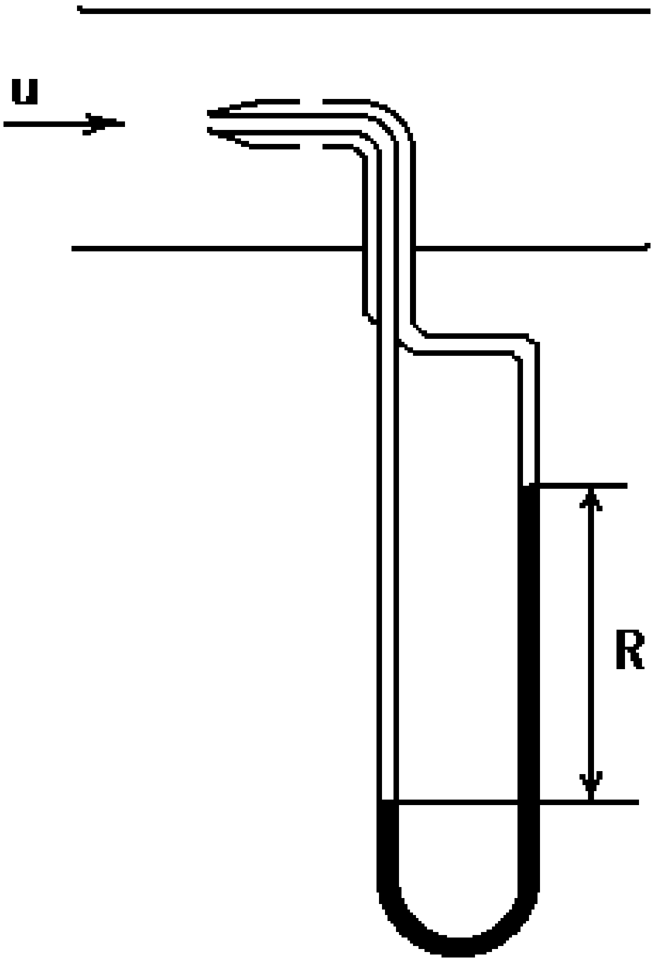
$$\frac{p_1}{\rho}+\frac{u_1^2}{2}=\frac{p_2}{\rho}+\frac{u_2^2}{2}$$

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

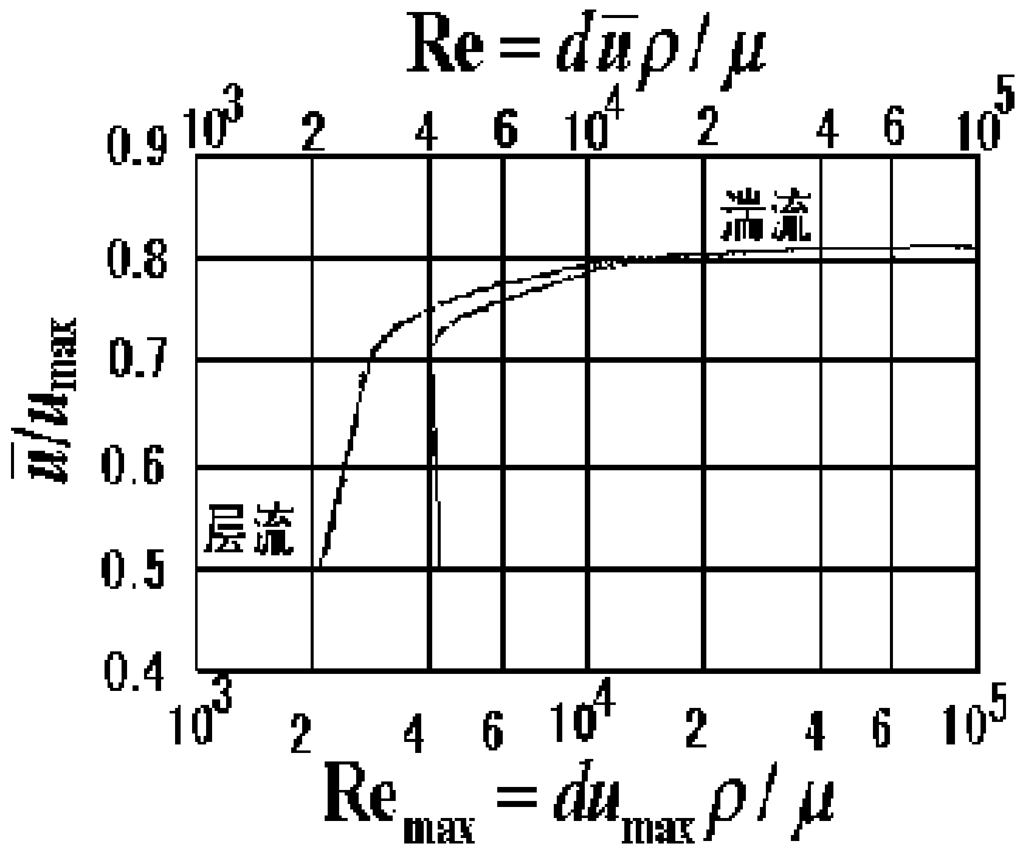
冲压强（驻点压强） 静压强 动压强

根据h_1, h_2的指示可算出点速度

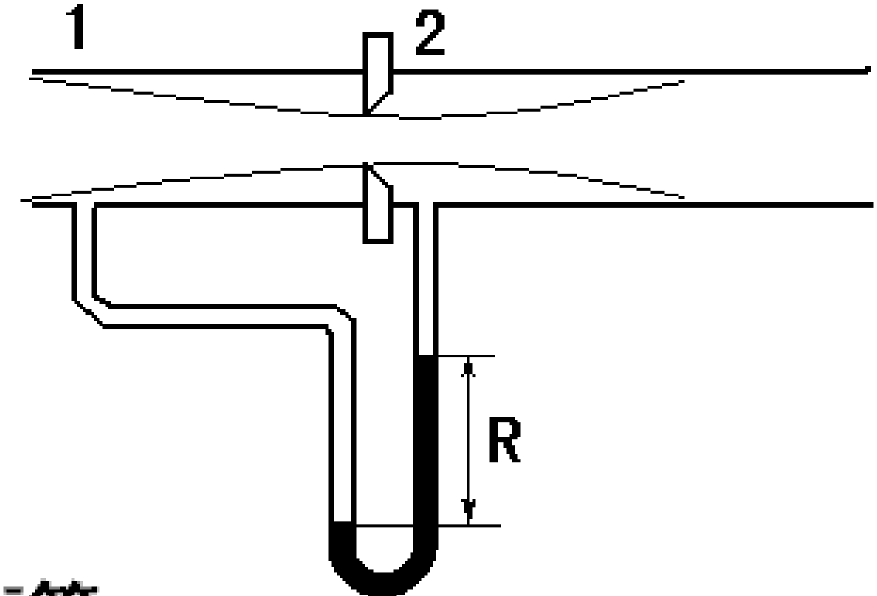
$$u_1=\sqrt{\frac{2(p_2-p_1)}{\rho}}=\sqrt{2g(h_2-h_1)}$$



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



7.2 孔板流量计



分析处理方法:

①先作 μ =0处理

②再考虑 μ 的影响

①由1至2截面作能量衡算

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

质量守恒 $A_1 u_1 = A_2 u_2$

整理后 $$u_2=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{A_2^2}{A_1^2}}}\sqrt{\frac{2(\mathcal{P}_1-\mathcal{P}_2)}{\rho}}$$

②考虑μ的影响，A_2难以实测，用A_0计

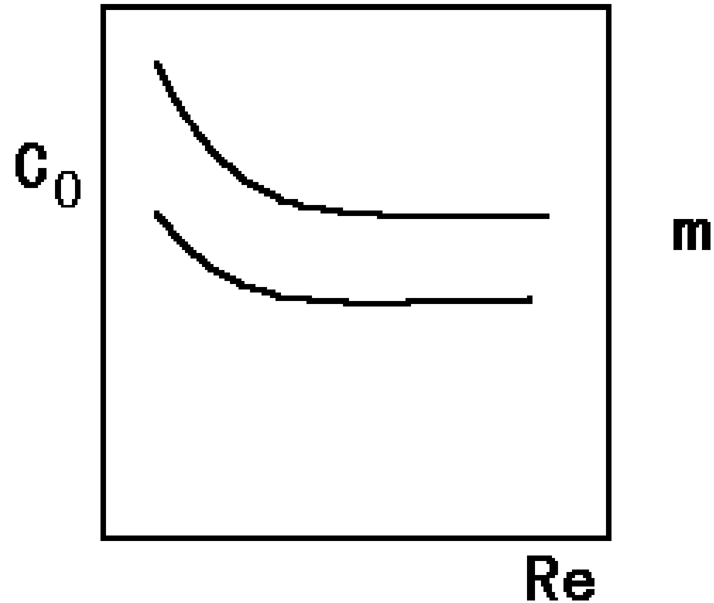
$$u_0=\frac{C}{\sqrt{1-\frac{A_0^2}{A_1^2}}}\sqrt{\frac{2(\mathcal{P}_1-\mathcal{P}_2)}{\rho}}=C_0\sqrt{\frac{2R(\rho_i-\rho)g}{\rho}}$$

$$q_V=C_0A_0\sqrt{\frac{2R(\rho_i-\rho)g}{\rho}}$$

$$q_v = C_0 A_0 \sqrt{\frac{2R(\rho_i - \rho)g}{\rho}}$$

$C_0 = f(Re_d, m)$

$m = A_0 / A_1$



孔板流量计的特点：结构简单，阻力损失较大

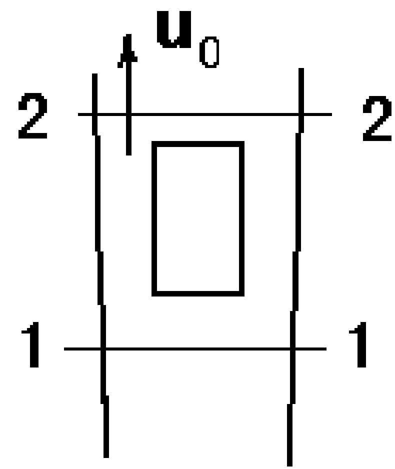
文丘里流量计特点：阻力损失较小，造价较高

7.3 转子流量计

转子力平衡：$(p_1-p_2)A_f=V_f\rho_f g$

由1-2能量守恒式：

$$\frac{p_1}{\rho}+gz_1+\frac{u_1^2}{2}=\frac{p_2}{\rho}+gz_2+\frac{u_0^2}{2}$$



$$(p_1-p_2)A_f=A_f(z_2-z_1)\rho g+A_f\left(\frac{u_0^2}{2}-\frac{u_1^2}{2}\right)\rho$$

$$(p_1-p_2)A_f=V_f\rho g+A_f\rho\left[1-\left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2\right]\cdot\frac{u_0^2}{2}$$

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

$$q_V = A_0 u_0 = A_0 C_R \sqrt{\frac{2V_f(\rho_f-\rho)g}{A_f\rho}}$$

转子流量计的特点：恒流速、恒压差

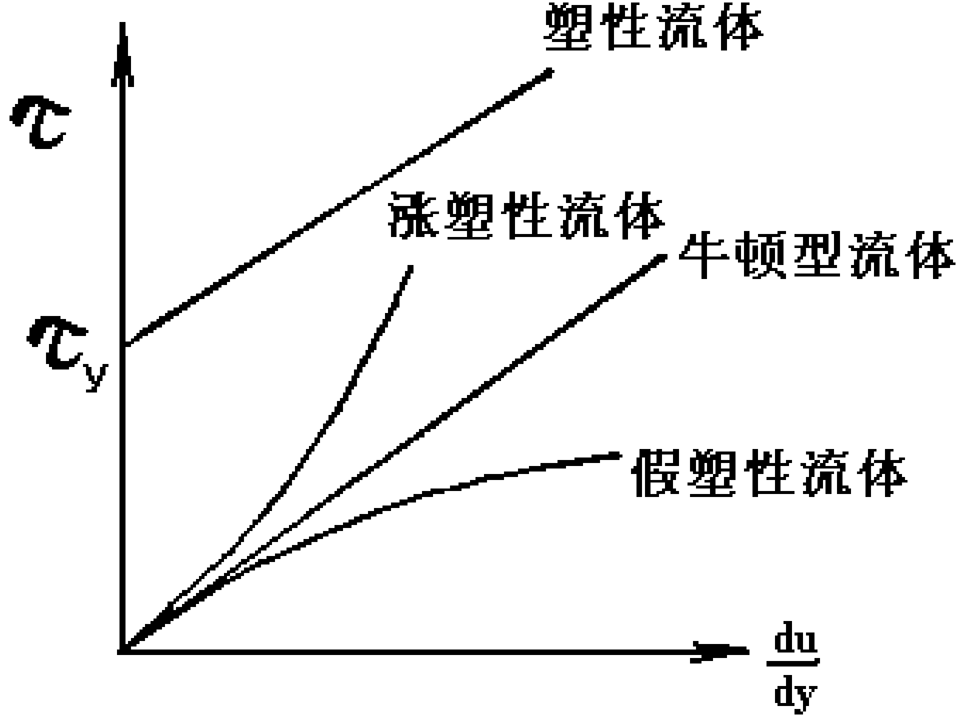
刻度换算：$\frac{q_{VB}}{q_{VA}} = \sqrt{\frac{\rho_A(\rho_f-\rho_B)}{\rho_B(\rho_f-\rho_A)}}$

出厂标准：液体 $\rho = 1000kg/m^3$

气体 $\rho = 1.2kg/m^3$

8 非牛顿流体的流动

8.1 非牛顿流体的基本特性



粘度 $\mu = \dfrac{\tau}{du/dy} = f\left(\dfrac{du}{dy}\right)$

剪切稀化现象----du/dy增加，μ降低

幂律流体 $\tau = K\left(\frac{du}{dy}\right)^n$

塑性----具有屈服应力 $\tau = \tau_y + K\left(\frac{du}{dy}\right)^n$

粘弹性（爬杆效应，挤出胀大，无管虹吸）

依时性----时间增加，μ变化

8.2 非牛顿流体的层流流动

阻力损失 $h_f = \frac{\Delta \mathcal{P}}{\rho} = 4f\frac{l}{d}\frac{u^2}{2}$

圆管中幂律流体流动

层流 $q_V = \frac{\pi n}{3n+1}\left(\frac{d}{2}\right)^{3+1/n}\left(\frac{\Delta \mathcal{P}}{2Kl}\right)^{1/n}$

范宁摩擦因子 $f = \frac{16}{\mathrm{Re}_{MR}}$

$$\mathrm{Re}_{MR} = \frac{d^n u^{2-n}\rho}{K\left(\frac{1+3n}{4n}\right)^n 8^{n-1}}$$

8．3 非牛顿流体的湍流流动与减阻现象

湍流 $$\frac{1}{\sqrt{f}}=\frac{4}{n^{0.75}}\log\left[\mathrm{Re}_{MR}\, f^{1-n/2}\right]-\frac{0.4}{n^{1.2}}$$

湍流减阻现象