



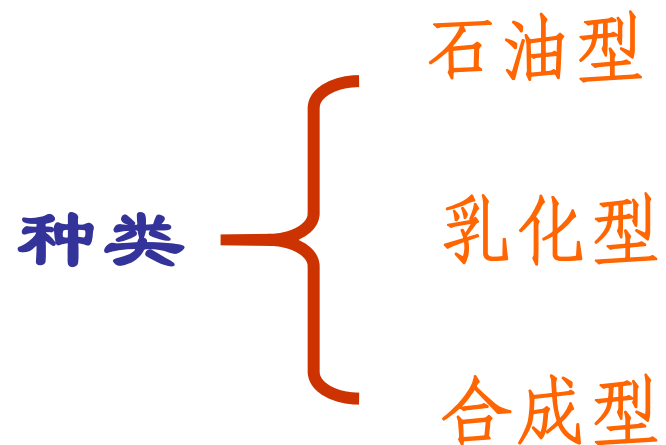
第一章 液压传动的基础知识

- § 1 液压传动的工作介质
- § 2 液体静力学基础
- § 3 液体动力学基础
- § 4 液体流动时的压力损失
- § 5 液体流经小孔的流量
- 重点习题解答



§ 1 液压油及其物理性质

液压油的作用：液压系统中 **动力** 和 **信号** 的传输介质。





一、液压油的物理性质

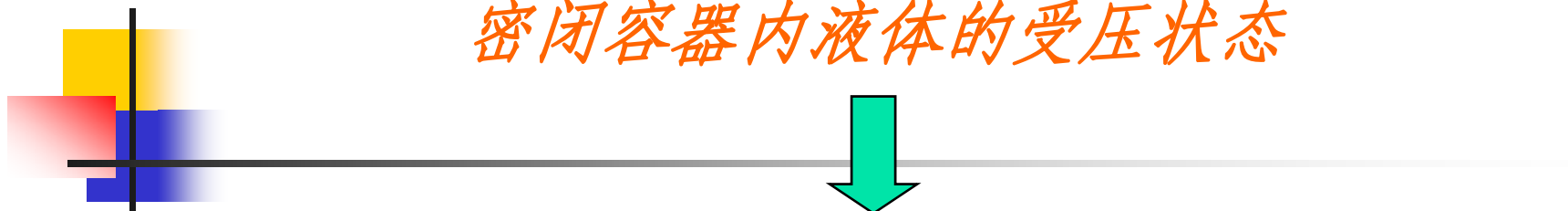
(一) 密度: $\rho = m/V$ kg/m^3

一般认为液压油不可压缩, 即:

$$\rho = Const(\text{约为 } 900 kg/m^3)$$

(二) 可压缩性:

密闭容器内液体的受压状态



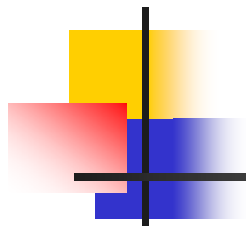
压缩系数

$$k = - \frac{(\Delta V / V_0)}{\Delta p}$$

体积弹性模量

$$K = \frac{1}{k} = - \frac{\Delta p}{(\Delta V / V_0)}$$

$\Delta V / V_0$: 体积相对变化率



常温下纯净液压油的体积弹性模量:

$$(1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{N/m}^2$$

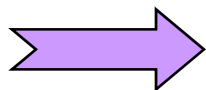
近似认为通常状况下，液压油是不可压缩的。

注意：一旦液压油中混有空气，其可压缩性将大大加强，此时便不能再将液压油看作是不可压缩**的了。**

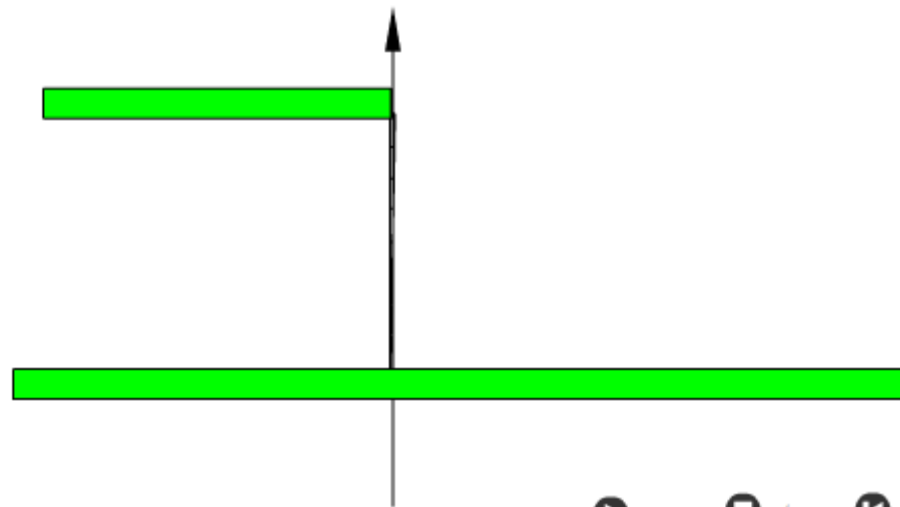
(三) 粘性：

反映液体流动性大小的物理量。

液体在运动
平板中的层
流现象。



液体粘性示意图



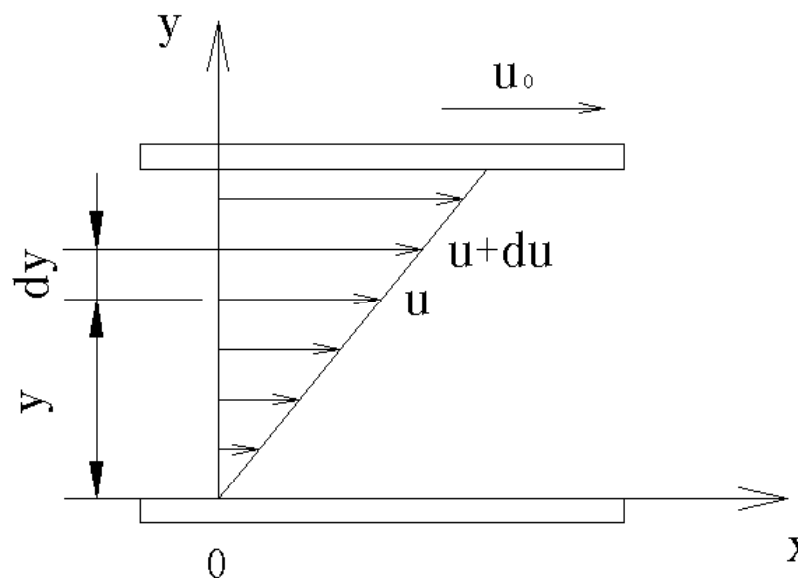
play stop rew

液体流动时由于分子间内聚力的作用阻碍其相对运动的现象表现为液体的粘性。

牛顿的液体内摩擦定律

$$F_f = \mu \cdot A \cdot \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy}$$



F_f : 内摩擦力

τ : 内摩擦应力

A : 液层接触面积

μ : 动力粘度

du/dy : 速度梯度（沿各层液面速度变化的方向）



工程上粘度的三种表示方式

1. 动力粘度 μ

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \Rightarrow \mu = \frac{\tau}{du / dy}$$

标准单位: $Pa \cdot s$ (帕斯卡·秒)



2. 运动粘度 ν

$$\nu = \mu / \rho$$

ρ : 液体密度

标准单位: m^2/s

常用单位: St (斯)

$$1St = \mathbf{10^{-4} \text{ m}^2 / s}$$

cSt (厘斯)

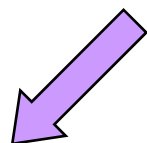
$$1cSt = \mathbf{10^{-6} \text{ m}^2 / s}$$



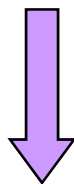
3. 相对粘度

相对粘度又称条件粘度，是采用特定粘度计在规定条件下测出的液体粘度。

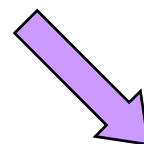
相对粘度



恩氏度
(中国)



雷氏度
(英国)



赛氏通用秒
(美国)



恩氏粘度定义:

200ml温度为 $t(^{\circ}\text{C})$ 的被测液体流经恩氏粘度计的 $\Phi 2.8\text{mm}$ 小孔的时间为 t_1
200ml温度为 20°C 蒸馏水流经恩氏粘度计的 $\Phi 2.8\text{mm}$ 小孔的时间为 t_2 ，则被测液体在 $t^{\circ}\text{C}$ 下的相对粘度为：

$$^{\circ}E_t = t_1 / t_2$$



各种粘度之间的转换

运动粘度与相对粘度的关系

$$v_t = 7.31^{\circ}E_t - \frac{6.31}{^{\circ}E_t} \quad v_t \text{单位: } \underline{cSt}$$

运动粘度与动力粘度的关系

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad \mu, v \text{均采用标准单位}$$



粘度与压力和温度之间的关系

液体粘度与液体
压力的关系

$$p \uparrow \Rightarrow \mu(\nu) \uparrow$$

液体粘度与液体
温度的关系

$$T \uparrow \Rightarrow \mu(\nu) \downarrow$$



液压油粘度的选择原则

系统工作压力较高

环境温度较高

高粘度液压油

工作部件运行

速度较高

低粘度液压油

[返回根目录](#)



§2 液体静力学基础

液体静力学：研究液体处于相对静止状态下的平衡规律。

一：液体压力的定义

液体单位面积上所受到的法向力

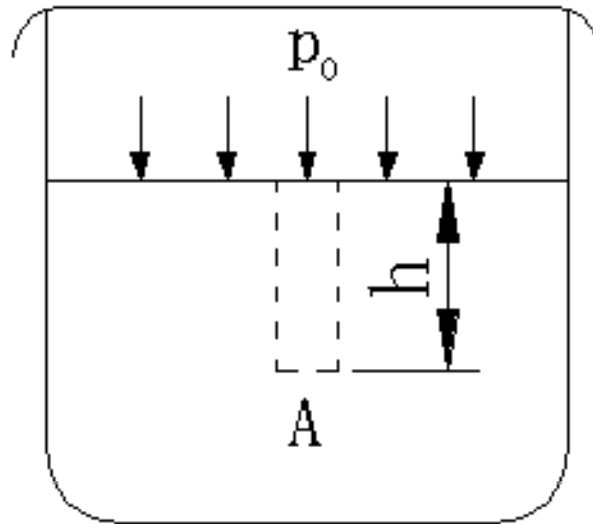
$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad \xrightarrow{\text{均匀作用力}} \quad p = \frac{F}{A}$$



液体压力的特性

- ⑨ 液体压力沿液面内法线方向作用于承压面。
- ⑨ 静止液体内任意一点处的压力在各个方向上均相等。

二. 重力作用下静止液体内部的压力分布



液体静力学基本方程:

$$p = p_0 + \rho gh$$



三. 静止液体的压力传递 – 帕斯卡原理

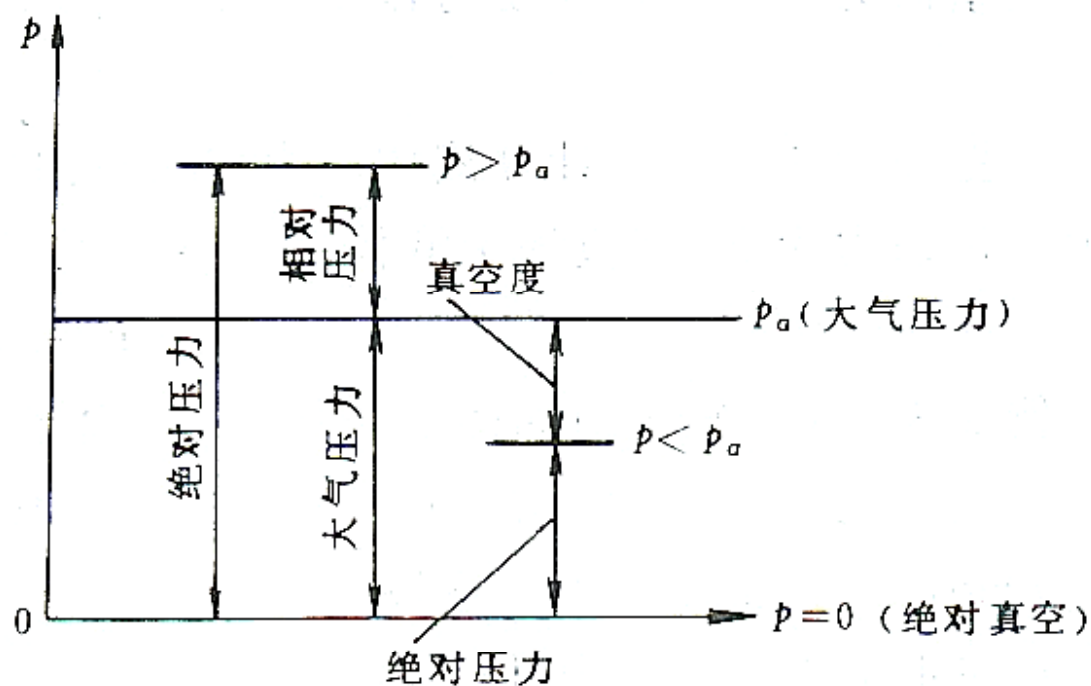
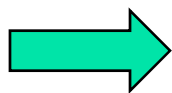
施加于静止液体上的压力将等值同时传递到液体内部各点。

在外加压力远大于液体由于自重而产生的压力时，可近似认为密闭容器内部液体各点的压力均等于外加压力。

液压系统内液体的压力是由负载所决定的。

四. 液体压力的表示方法及单位

- 绝对压力
- 相对压力
- 真空度



标准单位: Pa (N/m^2)

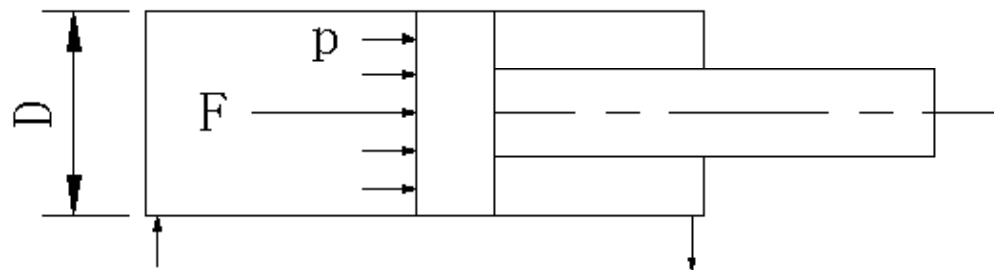
常用单位:

$\text{KPa} = 10^3 \text{Pa}$ $\text{MPa} = 10^6 \text{Pa}$ $\text{Bar} = 10^5 \text{Pa}$

五. 液体对固体壁面的作用力

➤ 液体作用于平面上的力

$$F = p \times A$$

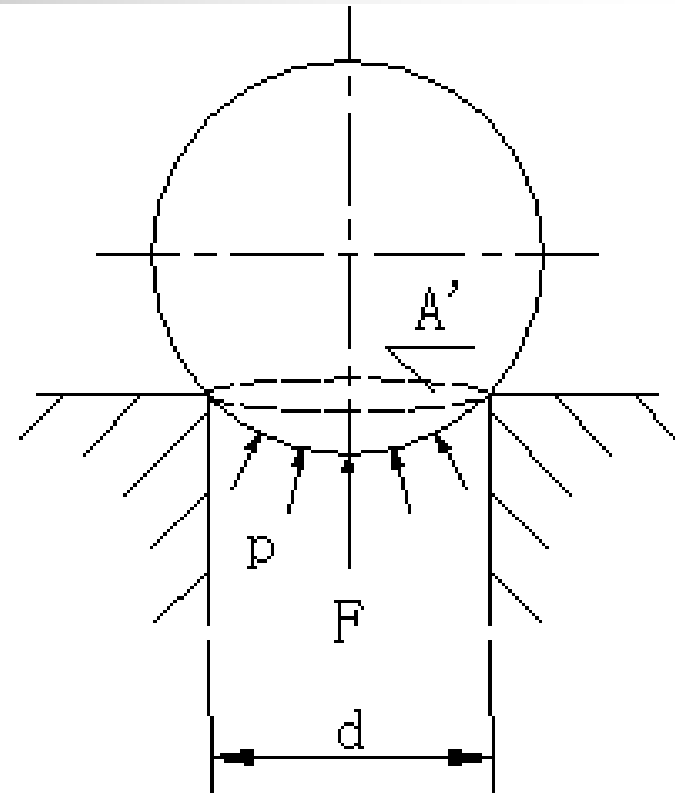


$$F = p \times A = p \times \frac{\pi D^2}{4}$$

液体作用于曲面上的力

$$F = p \times A_x$$

沿作用力方向
的投影面积



$$F = p \times A' = p \frac{\pi d^2}{4}$$



§ 2-3 液体动力学基础

液体动力学：研究液体处于相对流动状态时的运动规律以及能量转换。

一：基本概念

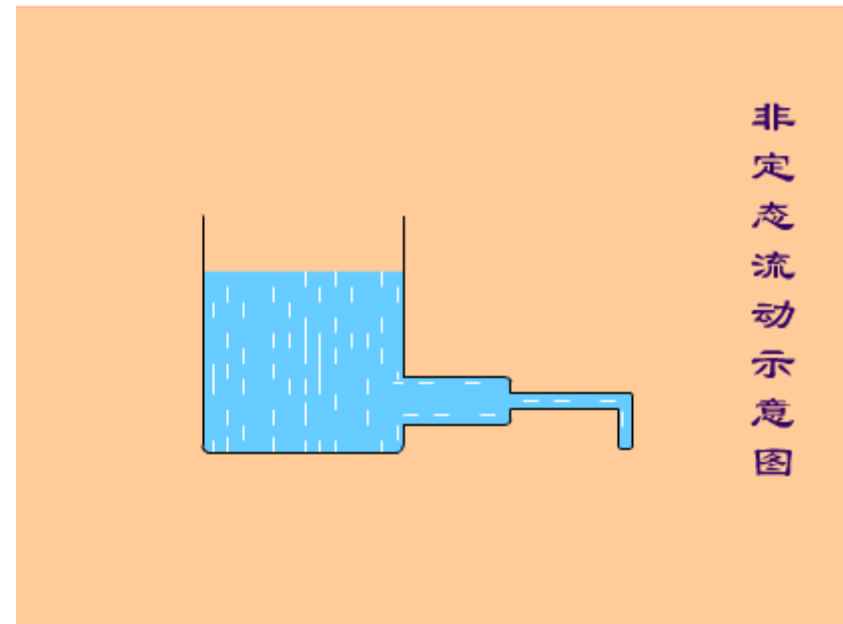
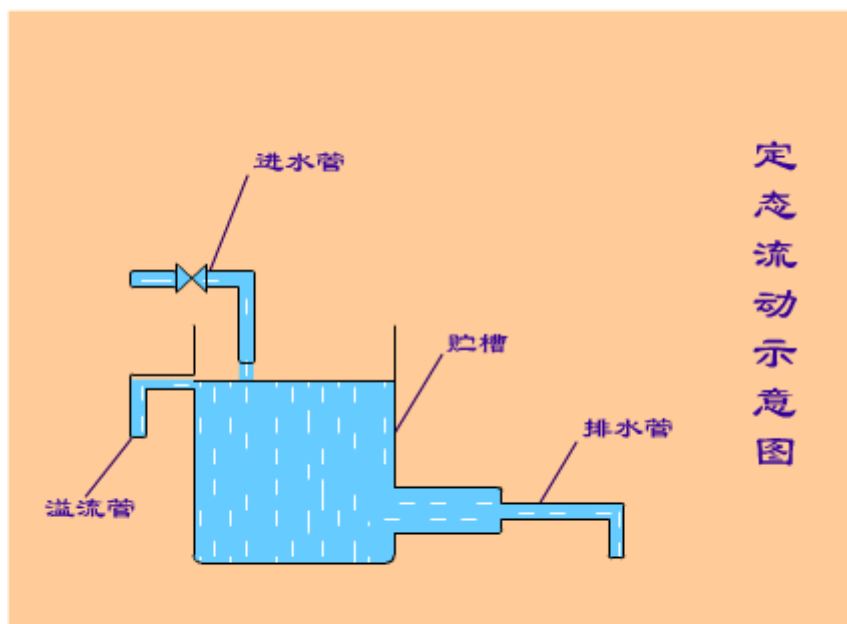
(一) 理想液体和稳定流动

- **理想液体**：无粘性，且不可压缩的液体
- **稳定流动**：液体流动时，其内部任一点处的压力、速度和密度都不随时间变化的流动形式（非时变流动，定常流动）



稳定流动

非稳定流动





(二) 流线、流束与通流截面

- **流线**：表征液体流动时某一时刻各质点的运动方向的曲线
- **流束**：相互平行（近似平行）的流线组成流束
- **通流截面**：流束中与所有流线正交的截面，通流截面上的各点流动方向垂直于该截面。



(三) 流量和平均流速

- **流量**：单位时间内通过某通流截面的液体体积

$$q = \frac{dV}{dt}$$

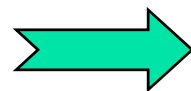
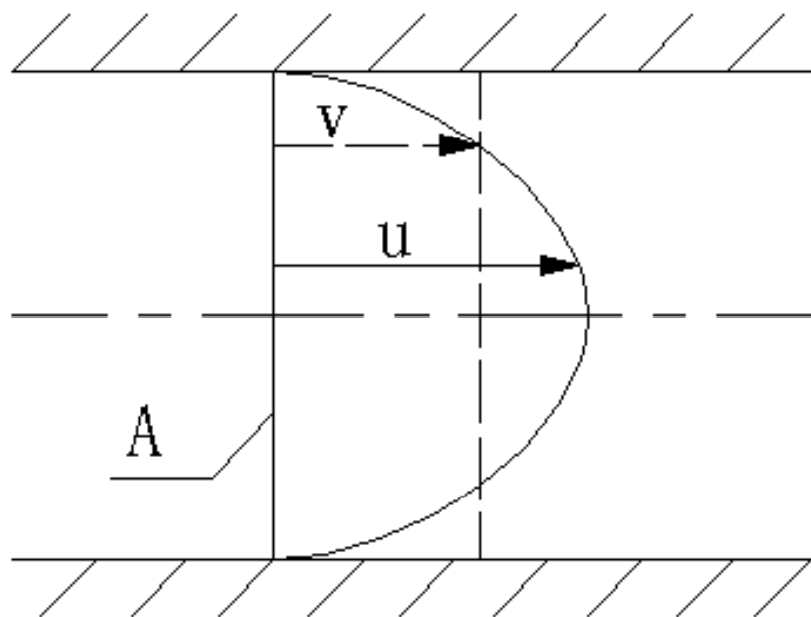
标准单位： m^3/s

常用单位： L/min ， mL/min

$1 m^3/s = 6 \times 10^4 L/min$ $1 L/min = 1000 mL/min$

➤ **平均流速**: 通流截面上各点速度的积分均值

通流截面上的速度分布



$$v = \frac{\int_A u dA}{A} = \frac{q}{A}$$

$$q = v \times A$$



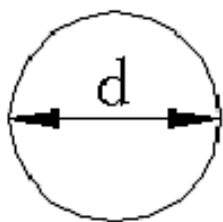
(三) 湿周与水力半径

- 湿周 x : 通流截面的有效周界长度
- 水力半径 R : 通流截面积与其湿周的比值

水力半径是一个表示某一通流截面通流能力的物理量。在截面积相等的情况下，水力半径越大，通流能力越强。

各种型式通流截面的湿周和水力半径

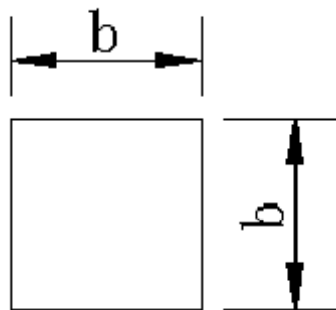
圆管



$$x = \pi d$$

$$R = \frac{\pi d^2 / 4}{x} = \frac{d}{4}$$

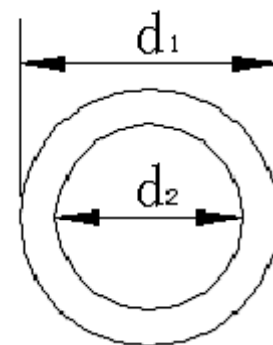
方管



$$x = 4b$$

$$R = \frac{b^2}{x} = \frac{b}{4}$$

环型管



$$x = \pi(d_1 + d_2)$$

$$R = \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4x} = \frac{d_1 - d_2}{4}$$



(四) 层流与湍流

层流和湍流是 **管路** 中液体流动的两种基本形态。

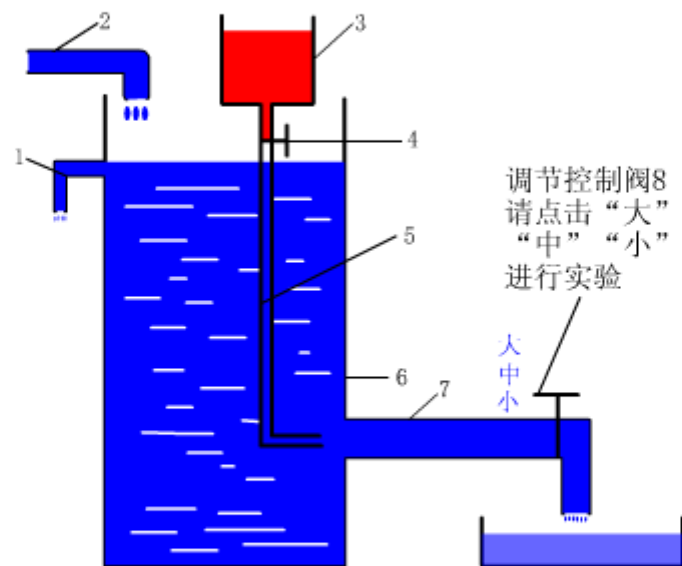
- **层流**：液体的流动呈线性和层状，各点流速平行与管路轴线，液体流动时所遇的阻力主要是 **粘性力**。
- **湍流**：指管路内液体各质点的运动杂乱无章，除沿轴线方向的流动外，还存在沿管径方向的剧烈横向运动。

液体流动的雷诺实验

小阀口 → 层流状态

中阀口 → 临界状态

大阀口 → 湍流状态



(五) 雷诺数

用以判别液体流动状态的物理量

雷诺数
Re

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$
$$Re = 4 \frac{vR}{\nu}$$

管路直径

平均流速

水力半径

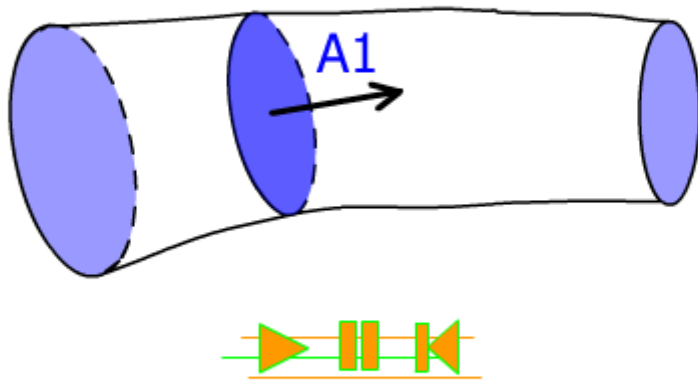
运动粘度

对于金属圆管：雷诺数 $Re < 2320$ —层流；
 $Re > 2320$ —湍流

二：液体流动的连续性方程

液流的连续性原理

根据质量守恒的原则



$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q$$

连续性方程可以用来求解一定流量的液流在各个截面积已知的通流截面处的平均流速。

三：伯努利方程 - 能量方程

稳定流动的理想流束

通流截面的总能量



压力能



势能

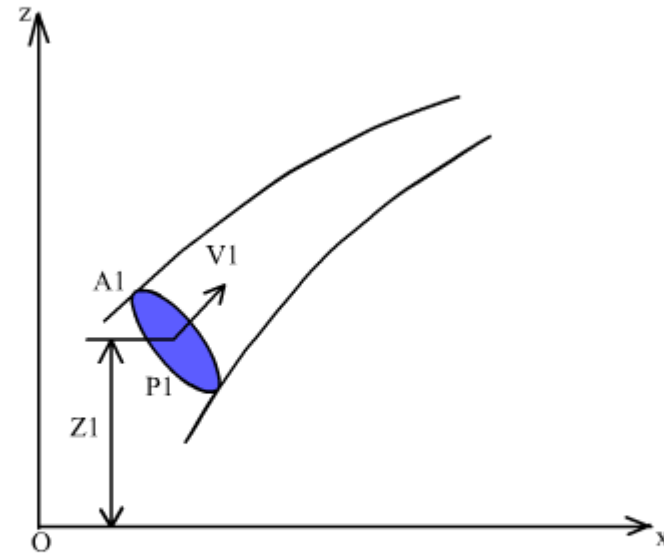


动能

根据能量守恒原则



液流在各通流截面的压力能、势能和动能之和相等





理想液体微流束的伯努利方程的表达形式

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

比压能

比势能

比动能



实际液体总流的伯努利方程的表达形式

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2} + h_w g$$

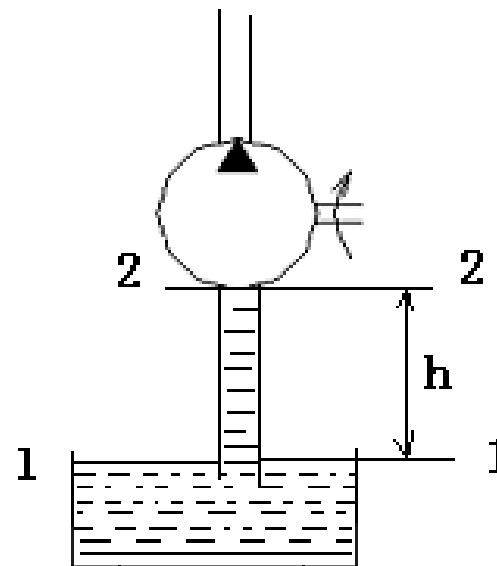
v_1, v_2 : 参考液体两端截面的平均流速

α_1, α_2 : 流速修正系数

粘性力损失

伯努利方程在液压系统中的应用

液压泵吸油时进口
的真空度



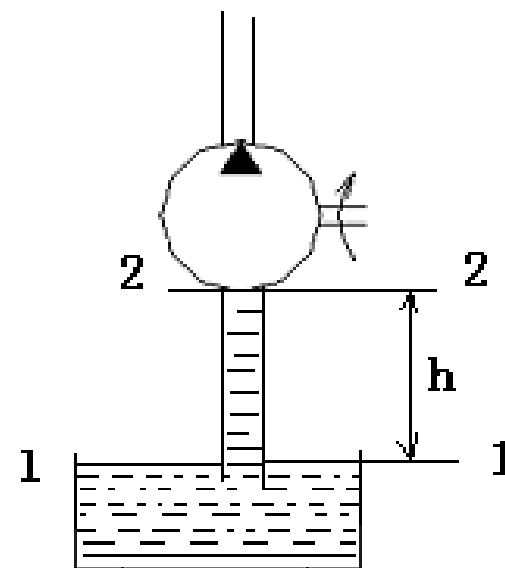
选取油箱顶层液面为上游截面；液压泵进口处为下游截面，并以上游截面为零势能面。上游截面由于截面积较大，且流速缓慢，可近似认为流速为零。

伯努利在液压系统中的应用

进口管径 d , 吸油流量 q , 吸油高度 h ,
速度修正系数 $\alpha = 1$, 列伯努利方程:

$$0 = -\frac{p_2}{\rho} + hg + \frac{1}{2}\left(\frac{4q}{\pi d^2}\right)^2 + h_w g$$

$$\Rightarrow p_2 = \left(hg + \frac{1}{2}\left(\frac{4q}{\pi d^2}\right)^2 + h_w g\right) \cdot \rho$$



液压泵的自吸能力有限，在进口真空度一定的情况下，最大吸油高度会随着泵吸油流量的增大而减小，在大流量情况下甚至要采用液压泵低于油箱高度的倒灌式安装方式。



四：动量方程

用以计算液体流动对固体壁面的作用力

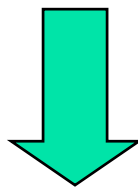
动量定理



$$F = \frac{d(mv)}{dt}$$

作用在参考液体上的合外力

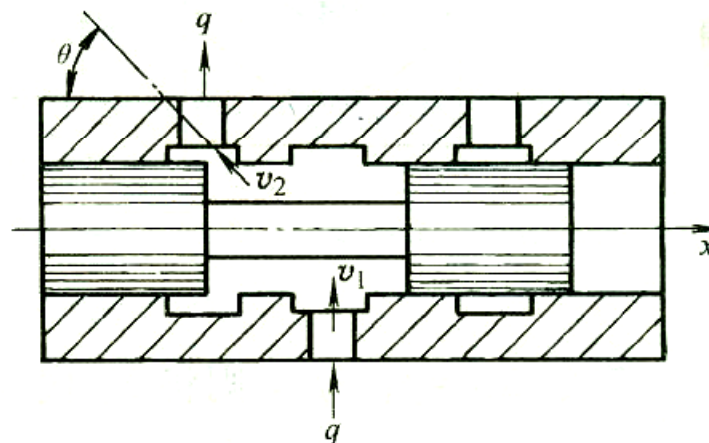
参考液体动量变化量



$$F = \rho \times q (\beta_2 \vec{v}_2 - \beta_1 \vec{v}_1)$$

液流动量方程在液压系统中的应用

求阀心所受到某一方向的稳态液动力



对阀进、出口之间的液体列动量方程，可得参考液体在轴线x方向上所受的合外力为：

$$F_x = \rho \times q(v_2 \cos \theta - v_1 \cos 90^\circ) = \rho \times qv_2 \cos \theta$$

阀心所受到的稳态液动力与液体所受的合外力互为作用力与反作用力，二者等值反向。



§ 2-4 液体流动时的压力损失

液体在管路中流动时，由于受到各种液流阻力的作用（如粘性力、惯性力），因此在流动时要产生能量损失，这种能量损失形式就表现为液体沿流动方向上压力的损失。

压力损失现象在液体流动时才会出现，静止的液体不会产生压力损失。



一:压力损失的基本形式

(一) 沿程压力损失

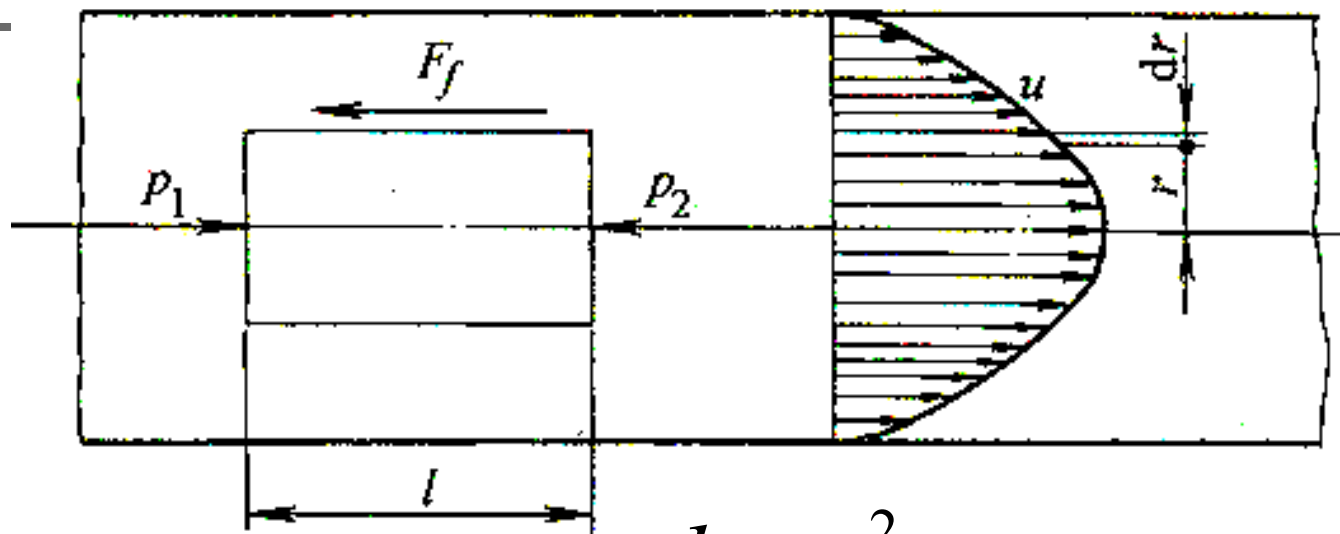
指因粘性摩擦产生的压力损失，沿管路长度方向均匀分布，并与管路的长度成正比。



沿等直径直段管路部分的产生的压力损失

液体层流时的沿程压力损失

圆管层流
的压力损失
情况



$$\Delta p_{\lambda} = p_1 - p_2 = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$

沿程阻力系数
理论值: $\lambda = 64/Re$
金属圆管: $\lambda = 75/Re$

管径
(4R)

平均流速



液体湍流时的沿程压力损失

对于光滑金属圆管

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2}$$


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



(二) 局部压力损失

指液体在流经局部障碍（阀口，接头，弯管等）处产生的压力损失。

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta \frac{\rho v^2}{2}$$

**ζ : 局部阻力系数
(查表求得)**



各类液压阀局部压力损失的类比计算

$$\Delta p_{\zeta} = \Delta p_{\zeta n} \left(\frac{q}{q_n} \right)^2$$

额定流量下的
压力损失

额定流量

实际流量

液压系统管路总压力损失的计算

$$\Delta p = \Sigma \Delta p_{\lambda} + \Sigma \Delta p_{\xi}$$

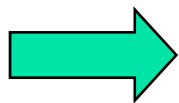
直径相等的各
段直管沿程压
力损失总和

各局部障碍
的局部压力
损失总和。



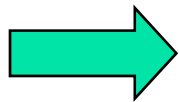
§ 2-5 孔口和缝隙流动

研究内容



液体在流经具有特殊形状的小孔或缝隙等液阻时所表现出来的流量与压力特性

指导意义



开发各种相应类型的节流装置用以实现对液体流量的控制

一、薄壁小孔的通流特性

薄壁孔：

长径比： $l/d \leq 0.5$

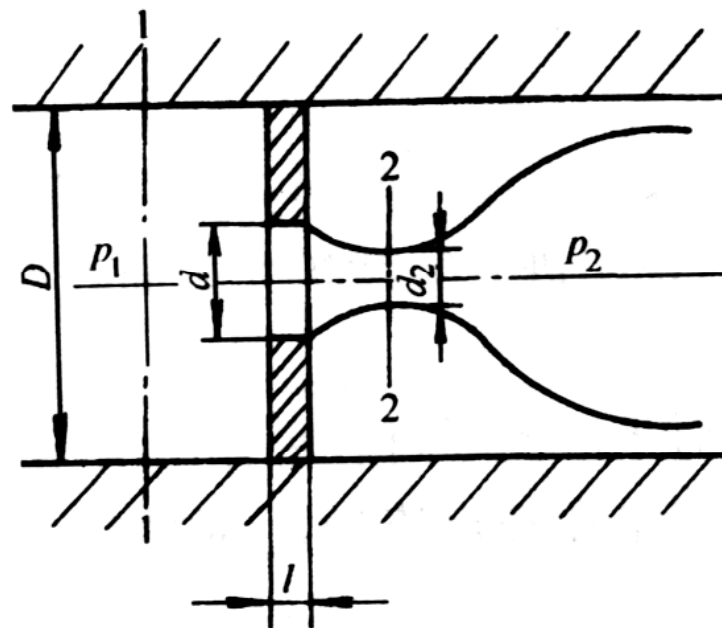
流量公式：

$$q = C_d A_T \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

流量系数

孔口
面积

前后压
力差



特点：流程短，对油温变化不敏感，流量稳定，适合作为流量控制元件使用。

二、细长小孔的通流特性

薄壁孔：

长径比： $l/d > 4$

流量公式：

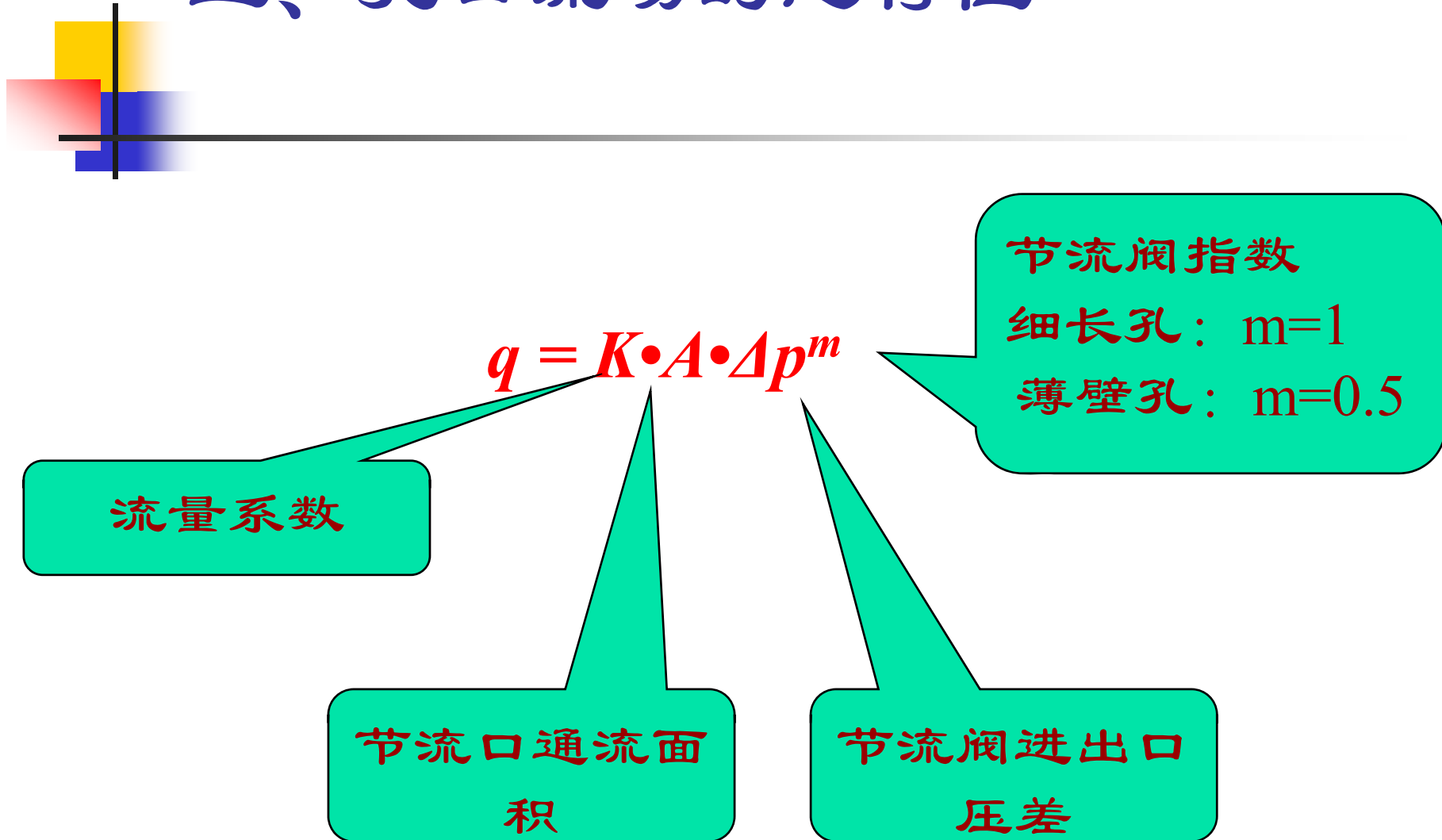
$$q = \frac{d^2}{32\mu l} A_T \Delta p$$

特点：流量受油温的影响较大，易堵塞。一般作为阻尼孔用于特殊功能的液压元件。

动力粘度

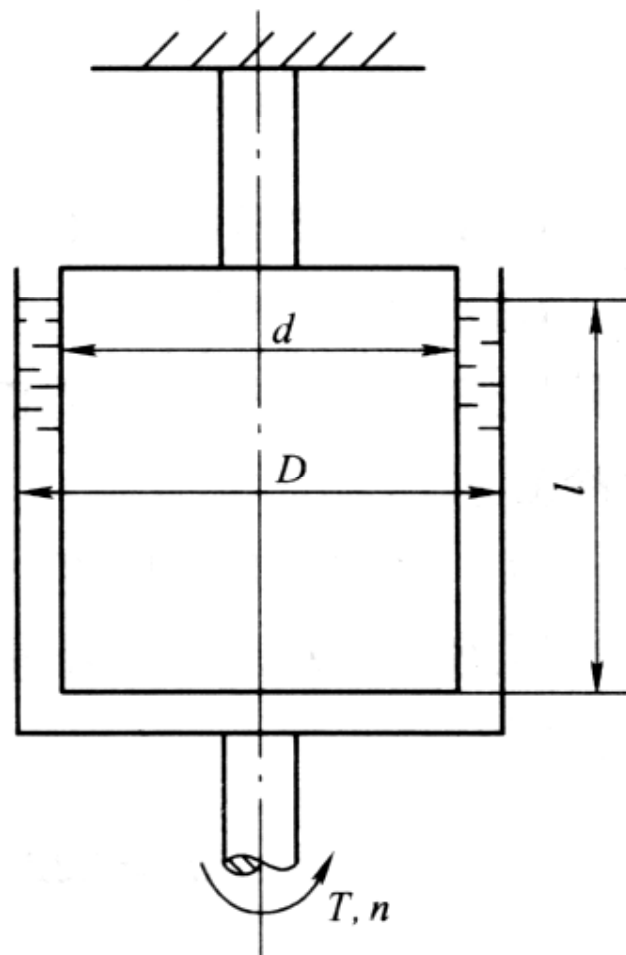
孔长

三、孔口流动的总特性



流体力学基础知识习题讲解

1、如图所示为一粘度计， $D=100\text{mm}$ ， $d=98\text{mm}$ ， $l=200\text{mm}$ ，外筒转速 $n=8\text{r/s}$ ，测得的外筒转矩 $T=0.4\text{N}\cdot\text{m}$ ，试求液体的动力粘度。



[返回1](#)

[返回2](#)



流体力学基础知识习题讲解

解：外筒旋转时的线速度为：

$$v = \omega R = 2\pi n \frac{D}{2} = 2 \times \pi \times 8 \times \frac{100}{2} (mm/s) = 2.512m/s$$

根据外筒的转矩，则可得出液体对外筒内表面的摩擦力 F_f 为：

$$F_f = \frac{2T}{D} = \frac{2 \times 0.4}{0.1} = 8N$$

看图



流体力学基础知识习题讲解

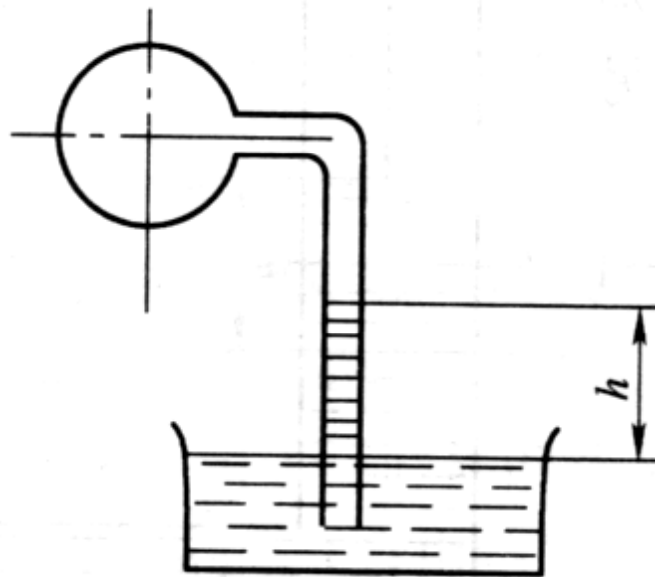
根据液体的牛顿内摩擦定律:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_f = \mu A \frac{du}{dy} \Rightarrow \mu = \frac{F_f / A}{du / dy} \\ A = \pi D l = \pi \times 0.1 \times 0.2 m^2 = 0.0628 m^2 \\ \frac{du}{dy} = \frac{v - 0}{(0.1 - 0.098) / 2} (s^{-1}) = 2512 s^{-1} \end{array} \right. \Rightarrow \mu = 0.051 Pa \cdot s$$

看图

流体力学基础知识习题讲解

2、如图所示,具有一定真空度的容器用一根管子倒置于液面与大气相通的水槽中,液体在管子中的上升高度为 $h=1m$,设液体的密度为 $\rho=1000kg/m^3$,试求容器内的真空度。



[返回](#)



流体力学基础知识习题讲解

解：根据连通器的基本原理，选取水槽液面作为参考面，则可得以下关系：

$$\begin{aligned} p_0 &= p_x + \rho gh \Rightarrow p_x = p_0 - \rho gh \\ &= 1.0 \times 10^5 - 1000 \times 9.8 \times 1 (Pa) = 9.12 \times 10^4 Pa \end{aligned}$$

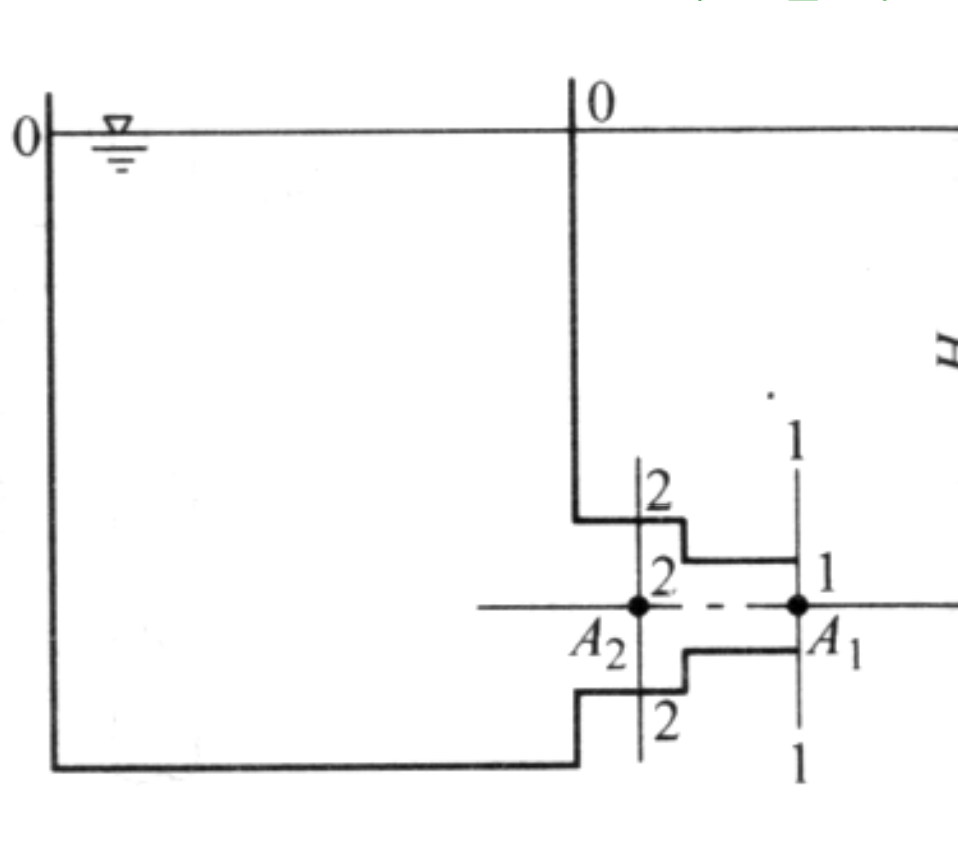
根据真空度的定义，则容器内真空度为：

$$p_V = p_0 - p_x = 9.8 \times 10^3 Pa$$

看图

流体力学基础知识习题讲解

3、如图所示,已知容器出口处水深 $H=10m$,截面 A_1 和截面 A_2 ,试求出口の出流流量以及点2处的相对压力。



[返回1](#)

[返回2](#)



流体力学基础知识习题讲解

解：取0-0面和1-1面列伯努利方程，并取动能修正系数为 $\alpha=1$ ，孔口中心线取为零势面，则有：

$$\frac{p_0}{\rho g} + H + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

容器上表面的速度 v_0 ，大气压 p_0 为 10^5Pa ，则有：

$$v_1 = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 10} (\text{m/s}) = 14 \text{m/s}$$

看图



流体力学基础知识习题讲解

根据流量连续性方程可得:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \Rightarrow v_2 = (A_1 / A_2) v_1$$

对1-1和2-2截面列伯努利方程, 压力用表压力计算

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \Rightarrow p_2 = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{\rho}{2} v_1^2 (1 - (\frac{A_1}{A_2}))$$

$$= \frac{1000}{2} 14^2 (1 - (\frac{0.02}{0.04})^2) (Pa) = 7.35 \times 10^4 Pa$$

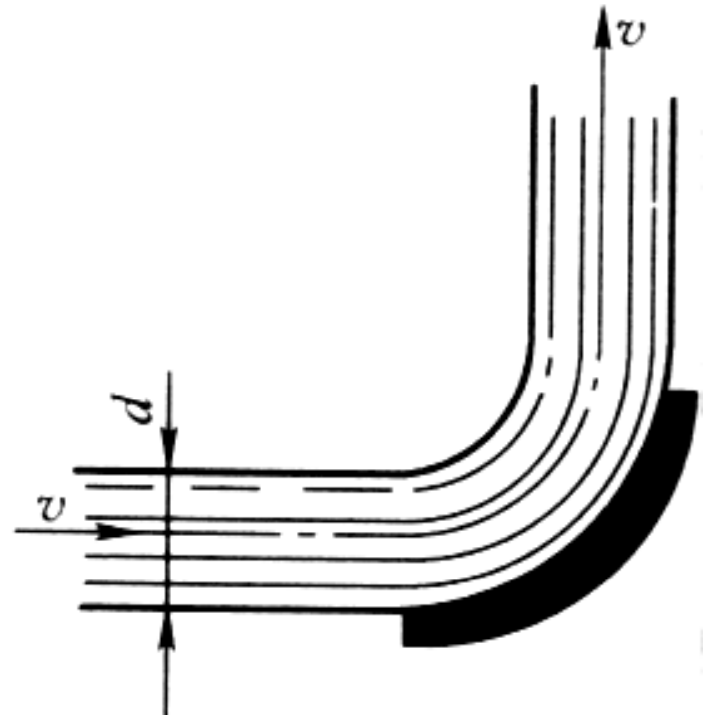
孔口出流流量为:

$$q = v_1 \times A_1 = 14 \times 0.02 = 0.28 m^3 / s$$

看图

流体力学基础知识习题讲解

4、如图所示,一水平放置的固定导板,将直径 $d=0.1m$,流速 $v=20m/s$ 的射流转过 90° ,试求导板作用于液体的合力大小及方向($\rho=1000kg/m^3$)。



流体力学基础知识习题讲解

解：分别在x和y向列液流的动量方程

$$x\text{方向: } -F \cos \theta = \rho q(0 - v)$$

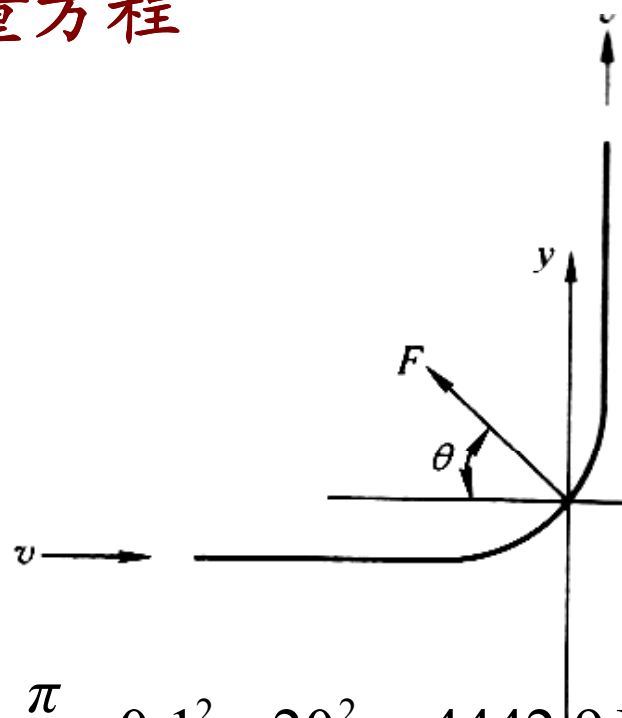
$$y\text{方向: } F \sin \theta = \rho q(v - 0)$$

上两式相除得：

$$\frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \tan \theta = 1 \Rightarrow \theta = 45^\circ$$

最终可得：

$$F = \frac{\rho q v}{\sin \theta} = \sqrt{2} \rho A v^2 = \sqrt{2} \times 1000 \times \frac{\pi}{4} \times 0.1^2 \times 20^2 = 4442.9 \text{ N}$$





流体力学基础知识习题讲解

5、运动粘度 $\nu=40 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 的油液通过水平管道,油液密度 $\rho=900 \text{kg}/\text{m}^3$,管道内径 $d=10 \text{mm}$, $l=5 \text{m}$,进口压力 $p_1=4.0 \text{MPa}$,问油液流速为 3m/s 时,出口压力为多少(MPa)?

解: 首先计算液体在管道中流动的雷诺数 Re

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu} = \frac{3 \times 0.01}{40 \times 10^{-6}} = 750 \quad \rightarrow \quad \text{Re} < 2320, \text{层流状态:}$$

按管道为金属圆管计算, 则沿程阻力系数 λ 为:

$$\lambda = \frac{75}{\text{Re}} = \frac{75}{750} = 0.1$$



流体力学基础知识习题讲解

液体在管道中的沿程压力损失为：

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = 0.1 \times \frac{5}{0.01} \times \frac{900 \times 3^2}{2} = 0.203 MPa$$

根据压力损失的方向：

$$p_1 - p_2 = \Delta p_{\lambda} \Rightarrow p_2 = p_1 - \Delta p_{\lambda} = 4.0 - 0.203 = 3.797 MPa$$



流体力学基础知识习题讲解

6、有一薄壁节流小孔,当通过的流量为 $q=25L/min$ 时,压力损失 $0.3MPa$ 为,试求节流孔的节流面积。流量系数 $C_d=0.61$,油液密度 $\rho=900kg/m^3$ 。

解：首先进行单位换算，各物理量换成国际单位：

$$q = 25L / \min = 4.17 \times 10^{-4} m^3 / s \quad \Delta p = 0.3MPa = 3 \times 10^5 Pa$$

根据薄壁小孔的流量公式可以得出：

$$q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \Rightarrow A = \frac{q}{C_d} \sqrt{\frac{\rho}{2 \Delta p}}$$
$$A = \frac{4.17 \times 10^{-4}}{0.61} \sqrt{\frac{900}{2 \times 3 \times 10^5}} = 2.65 \times 10^{-5} m^2$$



流体力学基础知识习题讲解

液体在管道中的沿程压力损失为：

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = 0.1 \times \frac{5}{0.01} \times \frac{900 \times 3^2}{2} = 0.203 \text{MPa}$$

根据压力损失的方向：

$$p_1 - p_2 = \Delta p_{\lambda} \Rightarrow p_2 = p_1 - \Delta p_{\lambda} = 4.0 - 0.203 = 3.797 \text{MPa}$$

[返回根目录](#)