习题：25，27，28，30

1.5 阻力损失

化工管路主要由两部分组成：一种是直管，另一种是弯头、三通、阀门等各种管件。

工程处理方便

直管阻力损失：直管造成的机械能损失。

局部阻力损失：管件造成的机械能损失。

根源：$\mu>0$，

（本质上直管、局部阻力损失是一样的）

1.5.1 直管阻力计算一般式

流体在均匀直管中作定态流动时，

$$h_f=\frac{\Delta\mathscr{P}}{\rho}$$（根据机械能守恒式）

在层流时，根据哈根-泊谡叶方程：

$$h_f=\frac{32\mu lu}{\rho d^2}$$

若将此式变化成：

$$h_f=\frac{64}{\frac{\rho ud}{\mu}}\cdot\frac{l}{d}\cdot\frac{u^2}{2}=\frac{64}{Re}\cdot\frac{l}{d}\cdot\frac{u^2}{2}$$

$$=\lambda_{层}\cdot\frac{l}{d}\cdot\frac{u^2}{2}$$

$$\lambda_{层}=\frac{64}{Re}$$

湍流时直管阻力类似于层流写成：

$$h_f=\lambda_{湍}\cdot\frac{l}{d}\cdot\frac{u^2}{2}$$

摩擦系数λ　$\lambda_{层}=\frac{64}{Re}$　　$\lambda_{湍}=?$

1.5.2 湍流时$\lambda_{湍}$求取

—用量纲分析法指导实验方法

1、析因实验—列出影响过程主要因素

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

即：$Q_1=f(Q_2,Q_3,Q_4,Q_5,Q_6,Q_7)$

其中 Q_1 至 Q_7 为描述此过程的 7 个变量。

ε-绝对粗糙度（平均值）

ε/d-相对粗糙度

2、规划实验—减少实验工作量

无量纲化—某些物理量组合使基本量纲的指数为零。

力学系：基本量纲有三个

质量[M]，长度[L]，时间[T]

量纲分析法的基础：

完整物理方程的等式两边都具有相同的量纲（量纲一致性，和谐性）

π 定理：某物理过程涉及物理量（变量）有 m 个，涉及基本量纲有 n 个，则各物理量组成的无量纲数群：

$$N=m-n \quad 个$$

现取相互独立变量 d，u，ρ

（即 Q_2，Q_5，Q_7）

作为基本量，而将其余变量无量纲化

独立—d，u，ρ 之间不能组成无量纲数群。

若取 l,d,ρ 则不行

∵ $l/d=[L]^0$　不独立

若对 $\mu=Q_6$　其无量纲化

$$\pi_6=\frac{Q_6}{Q_2^{x_6}Q_5^{y_6}Q_7^{z_6}}=[L]^0[T]^0[M]^0=1$$

分析如下：

$$\frac{\mu}{u^{x_6}d^{y_6}\rho^{z_6}}=\frac{[MT^{-1}L^{-1}]}{[T^{-1}L]^{x_6}[L]^{y_6}[ML^{-3}]^{z_6}}$$

$$=[\mathrm{L}]^0[\mathrm{T}]^0[\mathrm{M}]^0=1$$

即： $[MT^{-1}L^{-1}]=[M^{z_6}T^{-x_6}L^{x_6+y_6-3z_6}]$

$$\therefore 对\quad \left.\begin{array}{ll} M & z_6=1 \\ L & x_6+y_6-3z_6=-1 \\ T & -x_6=-1 \end{array}\right\} \Rightarrow \left\{\begin{array}{l} x_6=1 \\ y_6=1 \\ z_6=1 \end{array}\right.$$

因而 $\pi_6=\dfrac{\mu}{\rho u d}$

又如 $\pi_3=\dfrac{Q_3}{Q_2^{x_3}Q_5^{y_3}Q_7^{z_3}}=[L]^0[T]^0[M]^0=1$

同样用上述方法解得：

$$\pi_3=\frac{\varepsilon}{u^0 d^1 \rho^0}=\frac{\varepsilon}{d} \qquad \pi_4=\frac{l}{u^0 d^1 \rho^0}=\frac{l}{d}$$

$$\pi_1=\frac{h_f}{u^2 d^0 \rho^0}=\frac{h_f}{u^2}$$

通过无量纲化减少三个变量

$\pi_1=F(\pi_3,\pi_4,\pi_6)$ 即： $\dfrac{h_f}{u^2}=F(\dfrac{\mu}{\rho u d},\dfrac{\varepsilon}{d},\dfrac{l}{d})$

3、数据处理—实验结果的正确表达

$$\frac{h_f}{u^2/2}=\varphi'(\frac{\rho u d}{\mu},\frac{\varepsilon}{d},\frac{l}{d})$$

相似层流对比

$$h_f = \varphi(Re, \varepsilon / d) \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

即 $\lambda_{湍} = \varphi$（$Re, \varepsilon / d$）

讨论：

关于量纲分析法评述：

1、优点：“黑箱”方法，不涉及内部规律，指导实验，减少变量。做到“由此及彼”“由小见大”。凡是已有定律，定理都符合。

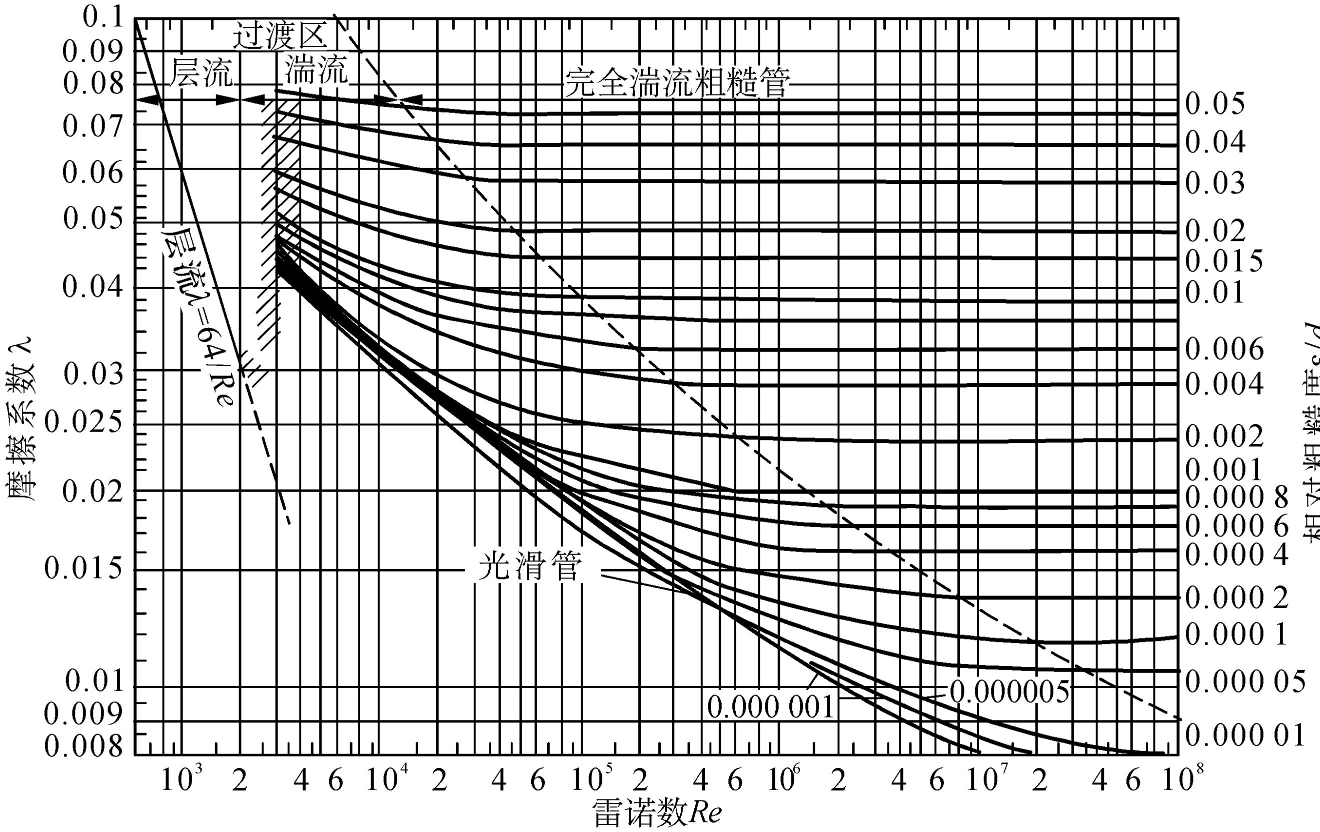
2、缺陷：随意性。过程变量数增、减或抓不住主要矛盾则会导致问题复杂性及不正确。

如取基本量 l,u,ρ 亦符合量纲分析法相关独立原则，但得到无量纲数群形式就不同。

又如 $\frac{\mu}{du\rho}$ 与 $\frac{\rho ud}{\mu}$ 均为无量纲

1.5.3λ～Re～ε/d 关联图（莫迪图）1944 年

1、莫迪（**moody**）图介绍（**p27 图 1-32**）



四个区域：

（Ⅰ）层流区：　***Re*≤2000**　　$\lambda = \dfrac{64}{\mathrm{Re}}$

(Ⅱ)过渡区　2000<*Re*<4000

工程上为安全，常作湍流计

(Ⅲ)湍流区

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

(Ⅳ)高度湍流区　阻力平方区

λ≈常数，$h_f = \lambda \dfrac{l}{d} \dfrac{u^2}{2}$

$\therefore h_f \propto u^2$　　　　$\lambda = f(\varepsilon/d)$

即 λ 与 Re 无关

2、查图方法：

如 ε/d=0.0004，Re=10^5　查图得 λ=0.02

3、拟合公式

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

思考：

有人认为："从 Moody 图已知，

$u\uparrow$ $Re\uparrow$ $\lambda\downarrow$ 而

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

因此除阻力平方区外，$u\uparrow$，h_f是否增大要比较 λ 与 u 后才能定" 您认为如何？

错　层流 $h_f=\dfrac{32\mu lu}{\rho d^2}$　无　λ

$h_f\propto u$

湍流时，$h_f\propto u^{1.75\sim2}$

∴　$u\uparrow$ 必定　$h_f\uparrow$　　化了能耗代价

1.5.4 非圆形直管阻力计算

—采用当量直径 d_e 计算 Re

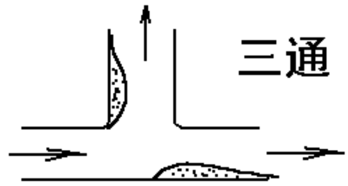
定义：$d_e=4\times\dfrac{\text{流通面积}}{\text{浸润周边}}$

$$h_f = \lambda \frac{l}{d_e} \frac{u^2}{2} \qquad \mathrm{Re} = \frac{d_e u \rho}{\mu}$$

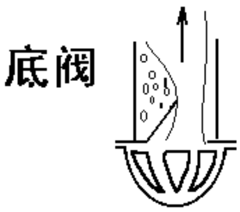
速度 u 为实际平均速度，而 $u \neq \dfrac{q_v}{\pi d_e^2 / 4}$

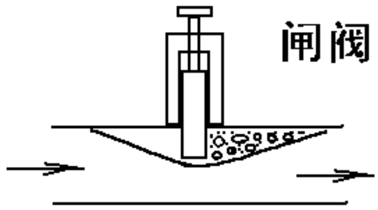
1.5.5 局部阻力计算

录像



录像





录像

两种方法：

阻力系数法 ζ $\quad h_f = \zeta \cdot \dfrac{u^2}{2}$

当量长度法 l_e $\quad h_f = \lambda \dfrac{l_e}{d} \dfrac{u^2}{2}$

注意：

1、用 ζ 法或 l_e 法计算都是经验的，ζ 值与

l_e值由实验测定

2、两种方法得 h_f 一般不等，取大值安全，

$h_f=\zeta\cdot\frac{u^2}{2}$中 ζ与 Re 无关，$h_f=\lambda\frac{l_e}{d}\frac{u^2}{2}$中

λ与 Re 有关（阻力平方区除外）

3、用$h_f=\zeta\cdot\frac{u^2}{2}$计算时，$u$ 应采用小管中大流速。

查图练习 （p31,图 1-35）

已知闸阀 1/2 开，管径 100mm

求当量长度 l_e

由共线图中查得 l_e=22m

其含义：相当于直管长 22m 的阻力当量

查表 1-2 ζ值

注意： （1）流入大容器 $\zeta=1$

（2）入管口 $\zeta=0.5$

（3）阀门关小 $\zeta\uparrow$

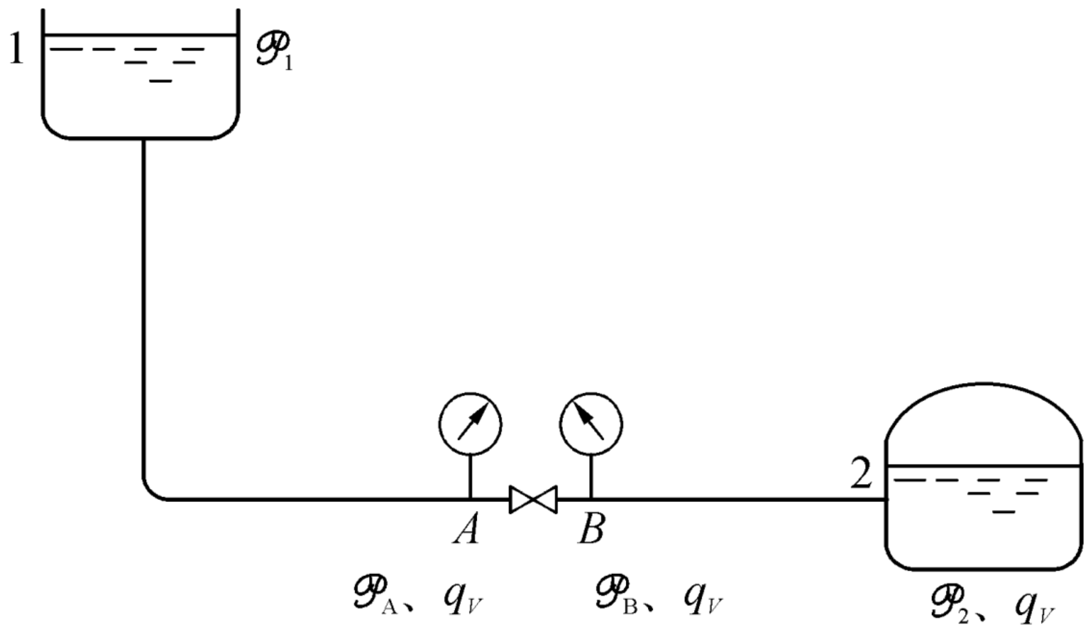
开大 $\zeta\downarrow$

阀门全关 $\zeta=\infty$ 不通

1.6 流体输送管路的计算

1.6.1 阻力对管内流动的影响

—阀门调节作用



设：各管段的管径相同，高位槽内液面保持恒定，液体作定态流动。

求：阀门由全开至半开时，p_A，p_B 如何变化。

解：$\dfrac{\mathscr{P}_1}{\rho}=\dfrac{\mathscr{P}_2}{\rho}+\Sigma h_{f\,1-2}$

$$=\frac{\mathscr{P}_2}{\rho}+[(\lambda\frac{l+l_e}{d})_{1-A}+\zeta+(\lambda\frac{l+l_e}{d})_{B-2}]\frac{8q_V^2}{\pi^2 d^5}$$

阀门关小， $\zeta\uparrow$， $\therefore q_V\downarrow$

a、 列 1-A 截面伯努利方程

$$\frac{p_1}{\rho}+gz_1+\frac{u_1^2}{2}=\frac{p_A}{\rho}+gz_A+\frac{u_A^2}{2}+\Sigma h_{f1A}$$

$p_1=p_a$ $u_1=0$ $z_1-z_A=z$ $u_A=u$

$$\Sigma h_{f1-A}=\lambda\frac{l_{1-A}}{d}\cdot\frac{u_2^2}{2}+\Sigma(\zeta_{小}+\zeta_{弯})\frac{u^2}{2}$$

因而上式便为

$$gz=\frac{p_A(表)}{\rho}+(\lambda\frac{\Sigma l}{d}+\zeta_{小}+\zeta_{弯}+1)\frac{u^2}{2}$$

$u\downarrow$ $p_A(表)\uparrow$

b、列 B-2 截面伯努利方程

$$\frac{p_B}{\rho}+gz_B+\frac{u_B^2}{2}=\frac{p_2}{\rho}+gz_2+\frac{u_2^2}{2}+\Sigma h_{fB-2}$$

$p_2=p_a$ $u_B=u$ $u_2=$

$$\Sigma h_{fB-2}=\lambda\frac{l_{B-2}}{d}\cdot\frac{u^2}{2}$$

$$\therefore\frac{p_B(表)}{\rho}=\lambda\frac{l_{B-2}}{d}\frac{u^2}{2}+g(z_2-z_B)$$

$u\downarrow$ $p_B(表)\downarrow$

注意： 此题将阀门关小，h_{f1-2} 不变，改变的只是 ζ。