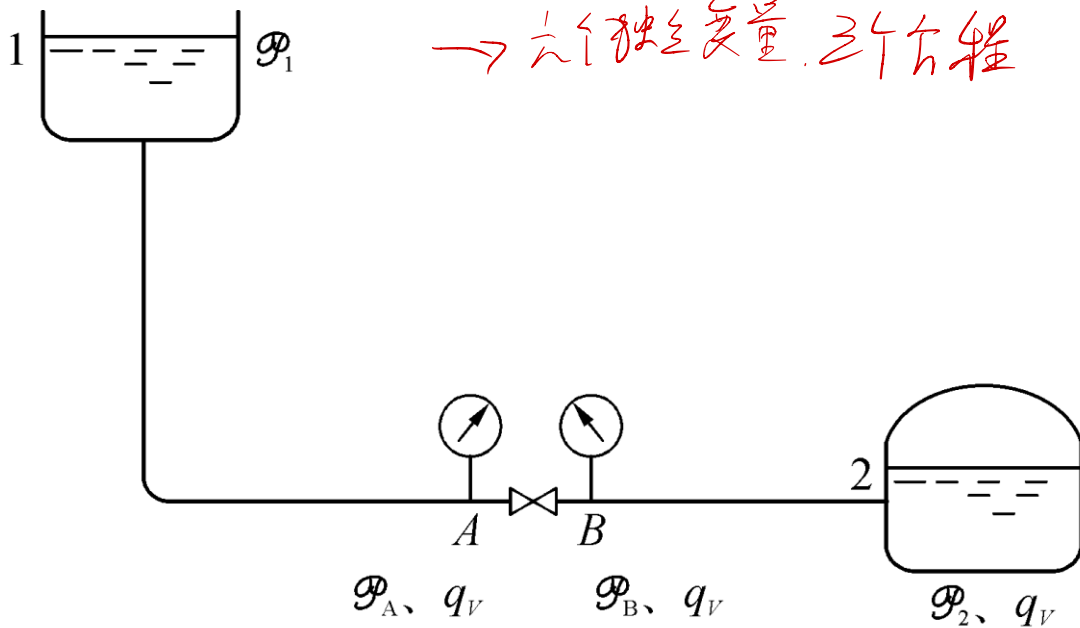


习题: 32,33,34,35

1.6.2 简单管路计算

1、数学描述

解决管路计算基本方程: (图 1-37)



质量守恒方程: $q_V = \frac{\pi}{4} d^2 u$ (不可压缩). 不因摩擦/位差变化
* u 仅与 A, q_V 有关

机械能守恒: $\frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_2}{\rho g} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2g}$
→ 整体分析 $u_1 = u_2 = 0$, 管内分析 $u_1 = u_2$ 同截面
因动能项相比阻力项小, 可以忽略.

阻力规律: $\lambda = f\left(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$ 关联度: 层流, 湍流 (Re 数), 充分湍流 (阻力平方)

当被输送的流体已定, 其物性 ρ, μ 已定, 上述方程具有 9 个变量。

自由度 = 变量数 - 方程数 = 9 - 3 = 6

即若能给定其中 独立的 6 个变量, 其它 3 个就可求出

$$q_V = \frac{\pi}{4} d^2 u$$

只有两个变量独立

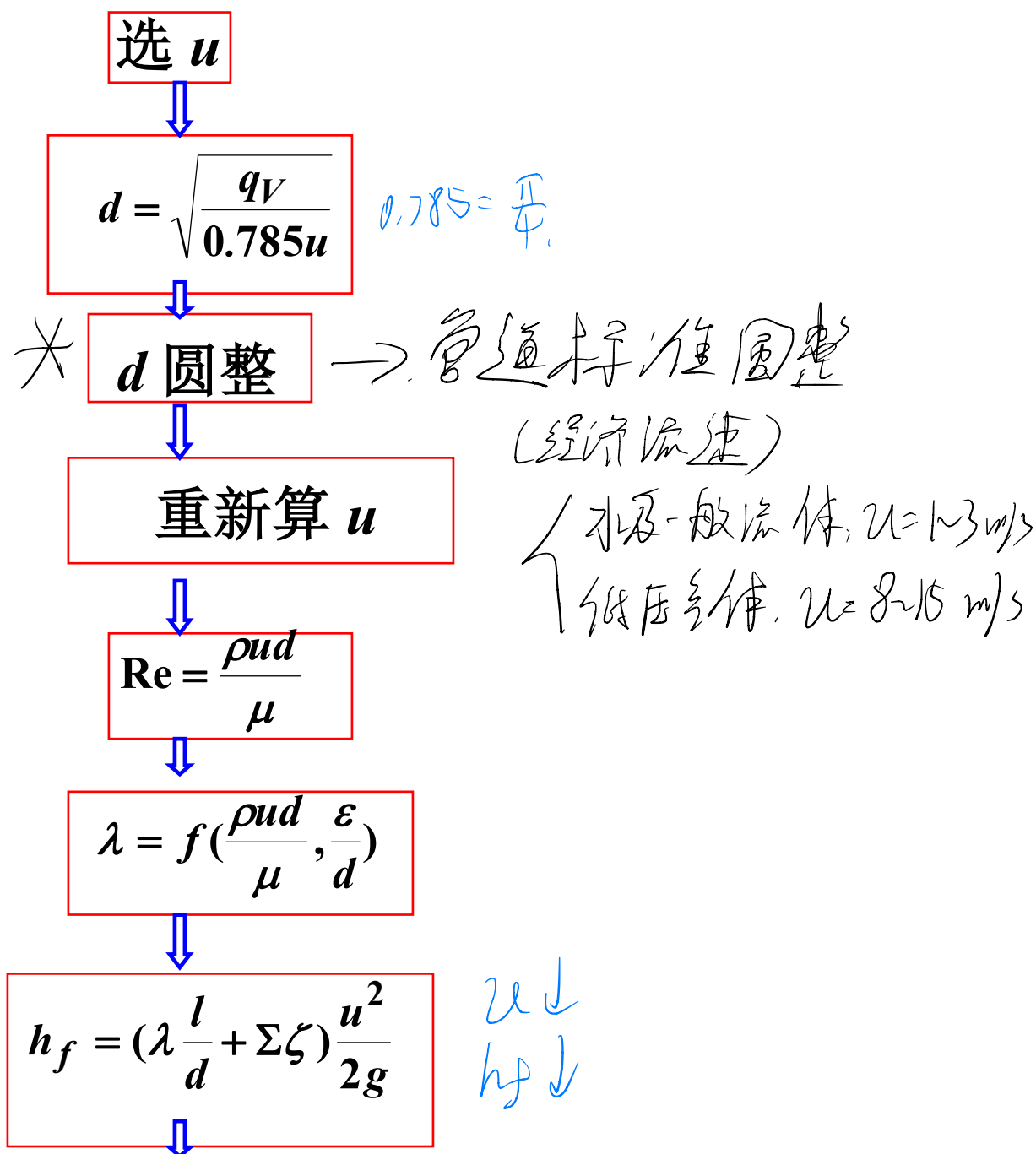
2、设计型命题

命题：规定输送量 q_V 目标 (要求流量 设计过程)

已知： q_V, l, ε (管子材料), $\Sigma \zeta, \mathcal{P}, u$ (选定)

求：最经济的管径 d , 供液点提供的势能 \mathcal{P}_1 (λ 在过程中顺便求得)

计算过程以框图表示



$$\frac{\mathcal{P}_1}{\rho g} = \frac{\mathcal{P}_2}{\rho g} + h_{f1-2}$$

设计型命题：存在着变量选择的问题

当 q_v 一定时， d 与 \sqrt{u} 成反比

$d \uparrow$ ， $u \downarrow$ 设备费用增加，

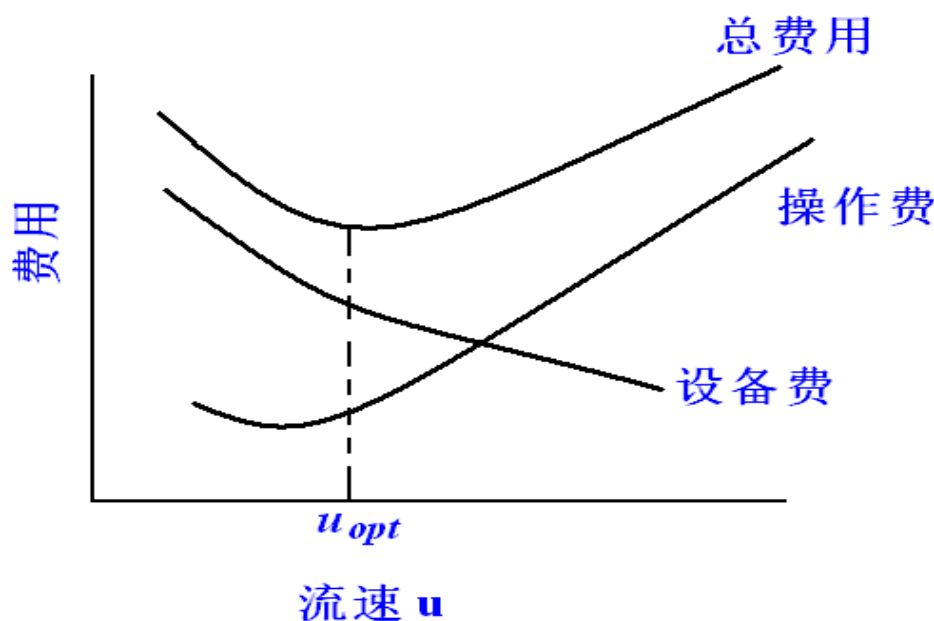
$u \downarrow$ $h_f \downarrow$ $\mathcal{P}_1 \downarrow$ 因而操作费用减少

而当 $d \downarrow$ ， $u \uparrow$ 设备费用减少，

$u \uparrow$ $h_f \uparrow$ $\mathcal{P}_1 \uparrow$ 因而操作费用增加

所以对设计人员来讲，就在于从这一系列计算结果中选出最经济合理的管径 d_{opt} 。

由此可见，设计型问题一般都包括着“选择”或“优化”问题。(图 1-40)



已知：某工业燃烧炉 $q_v=80000\text{m}^3/\text{h}$, $\rho_{\text{烟气}}=0.67\text{kg}/\text{m}^3$, $\mu=0.026\text{mPa}\cdot\text{s}$, 选红砖 $\varepsilon=0.8\text{mm}$, $\rho_{\text{大气}}=1.15\text{kg}/\text{m}^3$, $p_1(\text{真})=0.2\text{kPa}$.
 (Pa随H有变)

试设计烟囱的直径，高度。

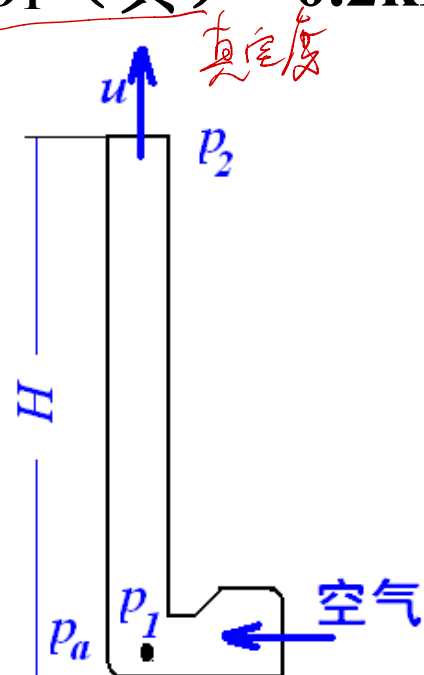
解：列烟囱底部（1 截面）与顶部（2 截面）柏努利方程

$$\checkmark \frac{p_1}{\rho_{\text{烟}}} + gz_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_{\text{烟}}} + gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \Sigma h_{f1-2}$$

烟囱 $d_1=d_2$, $\therefore u_1=u_2$

$z_1=0, z_2=H$

$p_1=p_a-p_1(\text{真})$



原始式
子发来
(取面
控制体)

$$\star p_2 = p_a - \rho_{\text{air}} gH$$

高度引起大气压力变化不可忽略
 (高度高到一定程度有变)

$$\Sigma h_{f1-2} = \lambda \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

$$\lambda = f\left(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$$

$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2 u$$

未知数： H, d, u, λ (变量分析：3个方程4个未知量)

因而必须设一个变量

若设 $d=1\text{m}$

$$u = \frac{q_v}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \frac{80000/3600}{0.785 \times 1^2} = 28.3(\text{m/s})$$

此速度不符合 p35 表 1-3 常用速度范围， d 选

太小

因而重选 $d=1.5\text{m}$

$$u = \frac{q_v}{\frac{1}{4}\pi d^2} = \frac{80000/3600}{0.785 \times 1.5^2} = 12.58(\text{m/s})$$

$$\text{Re} = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{0.67 \times 12.58 \times 2}{0.026 \times 10^{-3}} = 4.86 \times 10^5$$

$\varepsilon/d=0.00053$, 查表得 $\lambda=0.018$

$\therefore 1-2$ 截面间柏努利方程为

$$\frac{-p_1(\text{真})}{\rho_{\text{烟}}} = \frac{-\rho_{\text{air}} g H}{\rho_{\text{烟}}} + g H + \lambda \frac{H}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

$$-\frac{0.2 \times 10^3}{0.67} = \left(-\frac{1.15 \times 9.81}{0.67} + 9.81 + 0.018 \times \frac{1}{2} \times \frac{12.58^2}{2} \right) H$$

$$H = 48.2(\text{m})$$

同样计算:

$d(\text{m})$	1.5	2	3
$H(\text{m})$	48.2	43	42.1

烟囱得以排气的必要条件是

$$\rho_{\text{烟}} < \rho_{\text{外}},$$

若 $\rho_{\text{烟}} < \rho_{\text{外}}$ 时, $p_1 < 0$, 即无法起到抽吸作用。

H 增加, p_1 降低 (即真空度增加), 抽吸量增加。

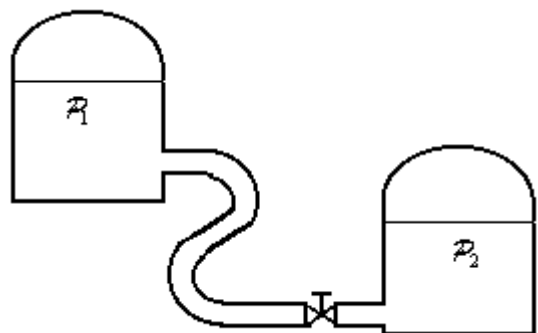
3、操作型命题

已知: d (过程, 外界条件已确定)

$\mathcal{P}_1, \mathcal{P}_2, \Sigma \zeta, l, \varepsilon,$

求: q_v , (顺便求得 u, λ)

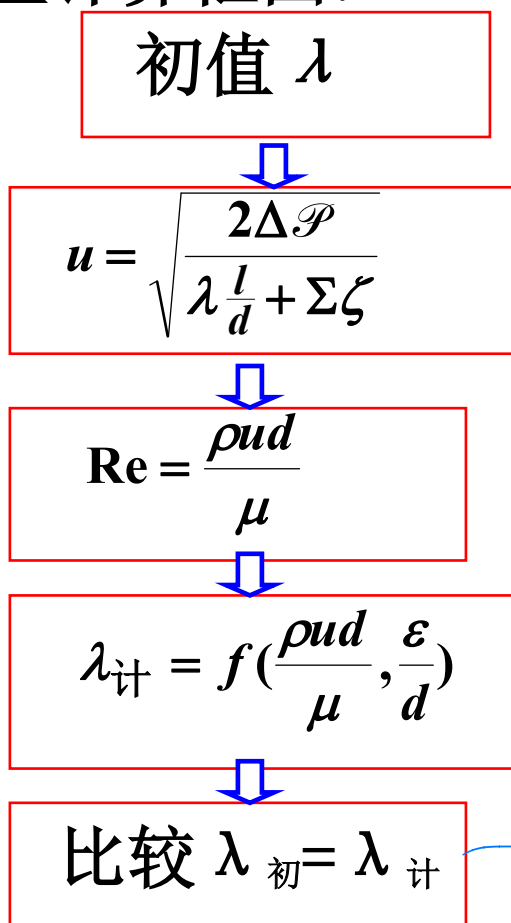
操作型命题 d 不变, 其它参数都可改变



如图示流程若阀门开大, 其余不变, 对管路流量有何变化?

(实质 $\zeta_{\text{阀}} \downarrow$, q_v 如何变, 操作型命题)

操作型计算框图:



试差迭代

$$q_V = \frac{\pi}{4} d^2 u$$

注意： (1) $\lambda = f(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d})$ 是非线性

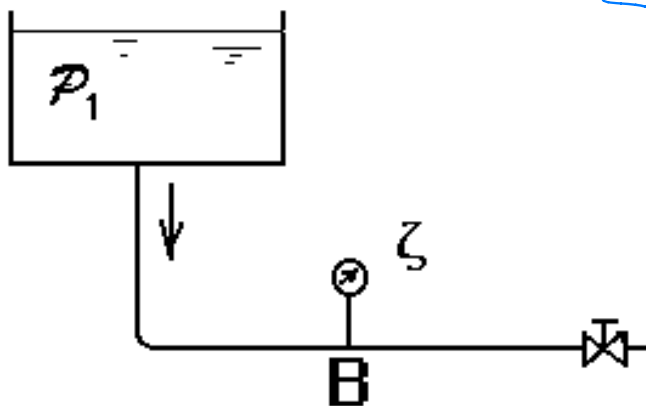
** 试差* \therefore 试差，迭代 *非线性，有解方程，迭代求解*

若已知阻力损失服从平方或一次方定律时，则可以解析求解。无需试差。

(2) 初值 λ 范围 $\lambda = 0.02 \sim 0.03$

(范围不大) \star 水: $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ \downarrow 大!

例：某输送油管如图所示，油品黏度 $25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，密度 800 kg/m^3 ，管内径 100 mm ， $l_{OB} = 50 \text{ m}$ (包括局部阻力当量长度)， $\varepsilon = 0.3 \text{ mm}$ ，当 B 点压力表读数为 53 kPa 时，管道内流体的流量为多少？



层流，无紊

(条件明确各系：仅是管路性质)

解：列 1-B 截面伯努利方程：

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_B}{\rho} + gz_B + \frac{u_B^2}{2} + \lambda \frac{l}{d} \frac{u_B^2}{2}$$

$$p_1 = p_a, z_1 = 7 \text{ m}, z_B = 0, p_B = p_a + 53 \text{ kPa}$$

$$u_1 \approx 0$$

$$gz_1 = \frac{p_B(\text{表})}{\rho} + \frac{u_B^2}{2} + \lambda \frac{l}{d} \frac{u_B^2}{2}$$

$$q_V = \frac{\pi}{4} d^2 u \quad \rightarrow \text{引出方程}$$

$$\lambda = f\left(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$$

由于 $\lambda = f\left(\frac{\rho u d}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$ 非线性，试差。

但由于 $\mu = 25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 很大，假设流动在层流区

$$\therefore \lambda = \frac{64}{\text{Re}}$$

↳ 不然无法直接求解

（需从已知量中去
复线代入）

代入伯努利方程：

$$9.81 \times 7 = \frac{53 \times 10^3}{800} + \frac{u_B^2}{2} + \frac{32 \times 25 \times 10^{-3} \times 50 \times u_B}{800 \times 0.1^2}$$

$$u_B = 0.5 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{800 \times 0.5 \times 0.1}{25 \times 10^{-3}} = 1600 < 2000$$

\therefore 假定成立，计算有效。

4、综合型计算

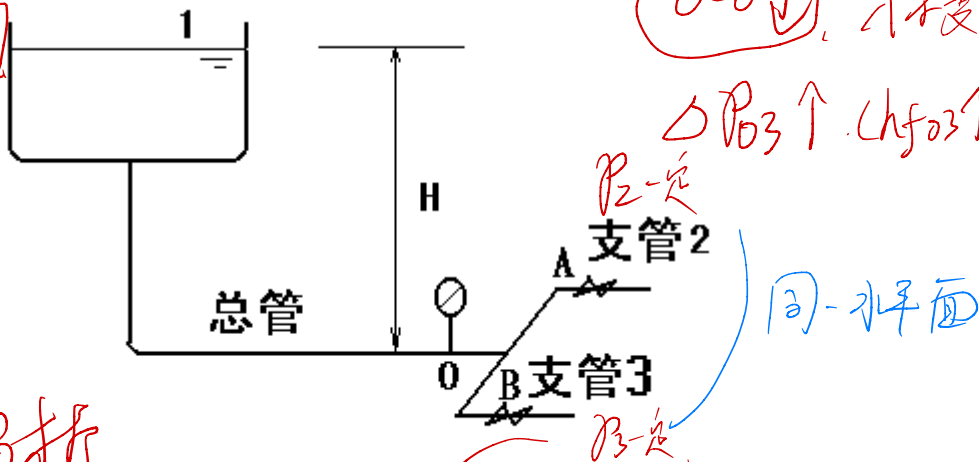
- 原有管道改造
- 管路处理能力增加

1.6.3 复杂管路

一、阻力对管内流动的影响

1、分支管路

P_1 一定



☆ 管路分析

阀 A 关小, $\zeta_A \uparrow, u_2 \downarrow, P_0 \uparrow, u_0 \downarrow \rightarrow$ 总管流量跟着所调支管调整
 $P_{0-3} \uparrow, \zeta_B$ 不变, $u_3 \uparrow$

两种极端情况:

a、支管阻力控制: 目标: 支管间相互不影响

总管很粗, $u_0 \approx 0, P_1 = P_0$

$$\frac{P_0 - P_2}{\rho g} = (\zeta_A + 1) \frac{u_A^2}{2g} \quad \text{当 } \zeta_A \uparrow, u_A \downarrow$$

P_0 不变, u_B 不变

$$\frac{P_0 - P_3}{\rho g} = (\zeta_B + 1) \frac{u_B^2}{2g} \quad \text{当 } \zeta_B \downarrow, u_B \uparrow$$

P_0 不变, u_A 不变

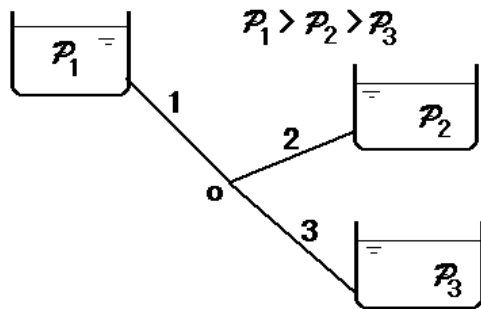
支管相互不干扰—希望如此

b、总管阻力控制

$P_0 = P_2$ 或 P_3, u_0 为定值 而 $q_{V0} = q_{V2} + q_{V3}$

\therefore 支管间互相干扰

2、分流与合流



已知: $p_1 > p_2 > p_3$

阀门调节作用可变成分流与合流

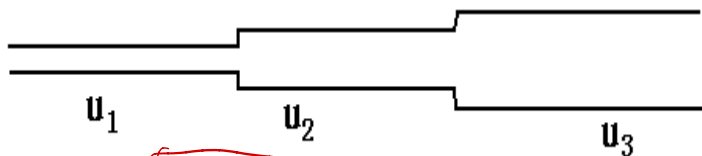
判断: $p_0 > p_2$ 分流 $p_0 < p_2$ 合流

$$\sum \frac{\Delta p}{\rho}$$

能否流动比较 p 大小

二、复杂管路计算

1、串联管路



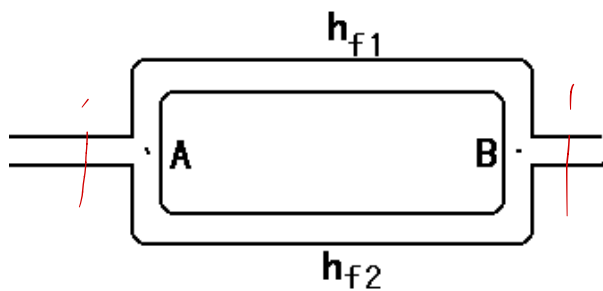
类比电路 $\left\{ \begin{array}{l} q_v \text{ 电流} \\ p \text{ 电压 (电势)} \\ h_f \text{ 阻抗} = q_v \cdot (\text{电阻}) \end{array} \right.$

特点: a、流量相同 b、阻力叠加

$$h_{fAB} = h_{f1} + h_{f2} + h_{f3}$$

$$u_1 = u_2 = u_3$$

2、并联管路



串联并联是
一切流体的
数量性质

特点:

(电流相加)

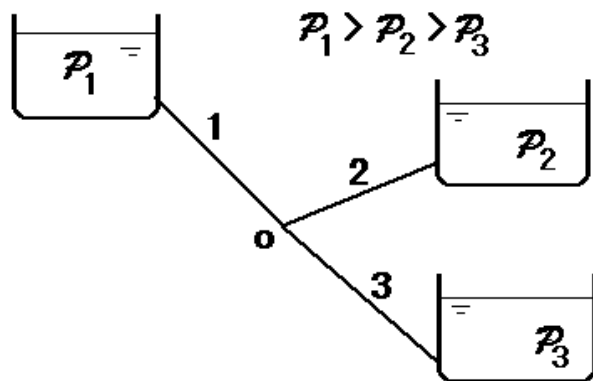
a、流量叠加 $q_v = q_{v1} + q_{v2}$

b、阻力损失相等

$$h_{fAB} = h_{f1} = h_{f2}$$

即 $\frac{\Delta p_{AB}}{\rho}$ 是定值

3、分支汇合管路



如为分支管路（忽略 O 点动量交换）

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + h_{f1-0} + h_{f0-2}$$

不管 3

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_3}{\rho} + h_{f1-0} + h_{f0-3}$$

不管 2

按路分析
能量降

$$q_{V1} = q_{V2} + q_{V3} \rightarrow \text{流量并联}$$

工程上采用两种方法解决交点 O 处的能量交换和损失：

- a、看成流过管件（三通）的局部阻力损失；
- b、若输送管路的其它部分的阻力较大，三通所占比例很小可以忽略，此时可直接跨越交点列机械能守恒式。

已知（习题 1-34）： $l_{AB}=6\text{m}$, $d_1=41\text{mm}$, $l_{BC}=15\text{m}$, $l_{BD}=24\text{m}$, $d_2=d_3=25\text{m}$, $\lambda=0.03$

求：(1) q_{V1} 、 q_{V2} 、 q_{V3}
(2) D 阀关闭， q_{V3}'

解：(1) 从 B 点至两管口列柏努利方程

$$\frac{p_B}{\rho} + \frac{u_B^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + h_{f2}$$

$$= \frac{\mathcal{P}_3}{\rho} + \frac{u_3^2}{2} + h_{f3}$$

$$h_{f2} + \frac{u_2^2}{2} = h_{f3} + \frac{u_3^2}{2}$$

$$\text{即: } \left(\lambda \frac{l_2}{d_2} + 1\right) \frac{u_2^2}{2} = \left(\lambda \frac{l_3}{d_3} + 1\right) \frac{u_3^2}{2}$$

$$(0.03 \times \frac{24}{0.025} + 1) u_2^2 = (0.03 \times \frac{15}{0.025} + 1) u_3^2$$

$$\therefore u_2 = 0.798 u_3$$

由质量守恒方程: $q_{V1} = q_{V2} + q_{V3}$

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 + u_3 d_3^2 = 1.798 d_3^2 \cdot u_3$$

$$\therefore u_1 = 1.798 \times \left(\frac{0.025}{0.041}\right)^2 u_3 = 0.669 u_3$$

$$u_3 = 1.50 u_1$$

由槽内液面至 C 阀出口处截面列柏努利方程:

$$Hg = \lambda \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{u_1^2}{2} + \lambda \frac{l_3}{d_3} \cdot \frac{u_3^2}{2} + \frac{u_3^2}{2}$$

$$\therefore 10 \times 9.81 = 0.03 \times \frac{6}{0.041} \cdot \frac{u_1^2}{2} + 0.03 \times \frac{15}{0.025} \times \frac{1}{2} \times (1.50 u_1)^2 + \frac{1}{2} (1.50 u_1)^2$$

$$= 23.6 u_1^2$$

$$\therefore u_1 = 2.04 (m/s)$$

$$u_3 = 1.5 \times 2.04 = 3.06 (m/s)$$

$$u_2 = 0.798 \times 3.06 = 2.44 (m/s)$$

因而有:

$$q_{V1} = \frac{1}{4} \pi d_1^2 \times u_1 = 0.785 \times 0.041^2 \times 2.04$$

$$= 2.69 \times 10^{-3} (m^3 / s) = 9.70 (m^3 / h)$$

$$q_{V2} = \frac{1}{4} \pi d_2^2 \times u_2 = 0.785 \times 0.025^2 \times 2.44$$

$$= 1.20 \times 10^{-3} (m^3 / s) = 4.31 (m^3 / h)$$

$$q_{V3} = q_{V1} - q_{V2} = 9.70 - 4.31 = 5.39 (m^3 / h)$$

(2) D 阀关闭时:

质量守恒方程: $q_{V1}' = q_{V3}'$

$$u_1' \cdot d_1^2 = u_3' \cdot d_3^2, u_3' = \left(\frac{0.041}{0.025}\right)^2 u_1' = 2.69 u_1'$$

由槽内液面至 C 阀出口处截面列柏努利方程:

$$Hg = \lambda \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{u_1^2}{2} + \lambda \frac{l_3}{d_3} \cdot \frac{u_3^2}{2} + \frac{u_3^2}{2}$$

$$\therefore 10 \times 9.81 = 0.03 \times \frac{6}{0.041} \times \frac{u_1^2}{2} + 0.03 \times \frac{15}{0.025} \times \frac{1}{2} \times (2.69 u_1)^2 + \frac{1}{2} (2.69 u_1)^2$$

$$= 70.94 u_1^2$$

$$\therefore u_1 = 1.18 (m / s)$$

$$q_{V3}' = q_{V1}' = \frac{1}{4} \pi d_1^2 \cdot u_1 = 0.785 \times 0.041^2 \times 1.18$$

$$= 1.55 \times 10^{-3} (m^3 / s) = 5.59 (m^3 / h)$$