

第一章 流体流动

【例 1-1】 已知硫酸与水的密度分别为 1830kg/m^3 与 998kg/m^3 ，试求含硫酸为 60%（质量）的硫酸水溶液的密度为若干。

解：根据式 1-4

$$\begin{aligned}\frac{1}{\rho_m} &= \frac{0.6}{1830} + \frac{0.4}{998} \\ &= (3.28+4.01) \times 10^{-4} = 7.29 \times 10^{-4} \\ \rho_m &= 1372\text{kg/m}^3\end{aligned}$$

【例 1-2】 已知干空气的组成为： O_2 21%、 N_2 78%和 Ar1%（均为体积%），试求干空气在压力为 $9.81 \times 10^4\text{Pa}$ 及温度为 100°C 时的密度。

解：首先将摄氏度换算成开尔文

$$100^\circ\text{C} = 273 + 100 = 373\text{K}$$

再求干空气的平均摩尔质量

$$\begin{aligned}M_m &= 32 \times 0.21 + 28 \times 0.78 + 39.9 \times 0.01 \\ &= 28.96\text{kg/m}^3\end{aligned}$$

根据式 1-3a 气体的平均密度为：

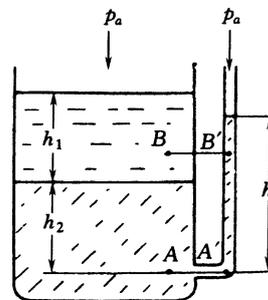
$$\rho_m = \frac{9.81 \times 10^4 \times 28.96}{8.314 \times 373} = 0.916\text{kg/m}^3$$

【例 1-3】 本题附图所示的开口容器内盛有油和水。油层高度 $h_1=0.7\text{m}$ 、密度 $\rho_1=800\text{kg/m}^3$ ，水层高度 $h_2=0.6\text{m}$ 、密度 $\rho_2=1000\text{kg/m}^3$ 。

(1) 判断下列两关系是否成立，即 $p_A=p'_A$
 $p_B=p'_B$

(2) 计算水在玻璃管内的高度 h 。

解：(1) 判断题给两关系式是否成立 $p_A=p'_A$ 的关系成立。因 A 与 A' 两点在静止的连通着的同一流体



例 1-3 附图

内，并在同一水平面上。所以截面 $A-A$ 称为等压面。

$p_B=p'_B$ 的关系不能成立。因 B 及 B' 两点虽在静止流体的同一水平面上，但不是连通着的同一种流体，即截面 $B-B$ 不是等压面。

(2) 计算玻璃管内水的高度 h 由上面讨论知， $p_A=p'_A$ ，而 $p_A=p'_A$ 都可以用流体静力学基本方程式计算，即

$$p_A = p_a + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2$$

$$p'_A = p_a + \rho_2 g h$$

于是 $p_a + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 = p_a + \rho_2 g h$

简化上式并将已知值代入，得

$$800 \times 0.7 + 1000 \times 0.6 = 1000 h$$

解得 $h = 1.16\text{m}$

【例 1-4】 如本题附图所示，在异径水平管段两截面（1-1'、2-2'）连一倒置 U 管压差计，压差计读数 $R=200\text{mm}$ 。试求两截面间的压强差。

解：因为倒置 U 管，所以其指示液应为水。设空气和水的密度分别为 ρ_g 与 ρ ，根据流体静力学基本原理，截面 $a-a'$ 为等压面，则

$$p_a = p'_a$$

又由流体静力学基本方程式可得

$$p_a = p_1 - \rho g M$$

$$p'_a = p_2 - \rho g (M - R) - \rho_g g R$$

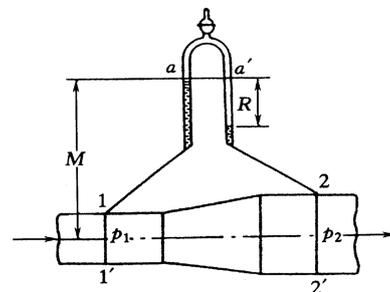
联立上三式，并整理得

$$p_1 - p_2 = (\rho - \rho_g) g R$$

由于 $\rho_g \ll \rho$ ，上式可简化为

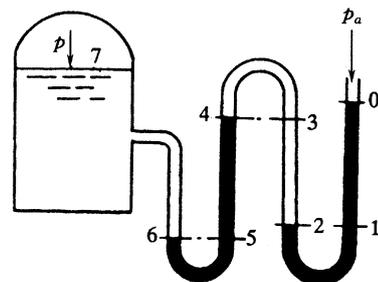
$$p_1 - p_2 \approx \rho g R$$

所以 $p_1 - p_2 \approx 1000 \times 9.81 \times 0.2 = 1962\text{Pa}$



例 1-4 附图

【例 1-5】 如本题附图所示，蒸汽锅炉上装置一复式 U 形水银测压计，截面 2、4 间充满水。



例 1-5 附图

已知对某基准面而言各点的标高为 $z_0=2.1\text{m}$, $z_2=0.9\text{m}$, $z_4=2.0\text{m}$, $z_6=0.7\text{m}$, $z_7=2.5\text{m}$ 。

试求锅炉内水面上的蒸汽压强。

解：按静力学原理，同一种静止流体的连通器内、同一水平面上的压强相等，故有

$$p_1=p_2, p_3=p_4, p_5=p_6$$

对水平面 1-2 而言, $p_2=p_1$, 即

$$p_2=p_a+\rho g(z_0-z_1)$$

对水平面 3-4 而言,

$$p_3=p_4=p_2-\rho g(z_4-z_2)$$

对水平面 5-6 有

$$p_6=p_4+\rho g(z_4-z_5)$$

锅炉蒸汽压强 $p=p_6-\rho g(z_7-z_6)$

$$p=p_a+\rho g(z_0-z_1)+\rho g(z_4-z_5)-\rho g(z_4-z_2)-\rho g(z_7-z_6)$$

则蒸汽的表压为

$$p-p_a=\rho g(z_0-z_1+z_4-z_5)-\rho g(z_4-z_2+z_7-z_6)$$

$$=13600\times 9.81\times(2.1-0.9+2.0-0.7)-1000\times 9.81\times$$

$$(2.0-0.9+2.5-0.7)$$

$$=3.05\times 10^5\text{Pa}=305\text{kPa}$$

【例 1-6】 某厂要求安装一根输水量为 $30\text{m}^3/\text{h}$ 的管路, 试选择合适的管径。

解：根据式 1-20 计算管径

$$d=\sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}}$$

式中 $V_s=\frac{30}{3600}\text{m}^3/\text{s}$

参考表 1-1 选取水的流速 $u=1.8\text{m/s}$

$$d=\sqrt{\frac{\frac{30}{3600}}{0.785\times 1.8}}=0.077\text{m}=77\text{mm}$$

查附录二十二中管子规格, 确定选用 $\phi 89\times 4$ (外径 89mm , 壁厚 4mm) 的管子, 其内径为:

$$d=89-(4\times 2)=81\text{mm}=0.081\text{m}$$

因此，水在输送管内的实际流速为：

$$u = \frac{\frac{30}{3600}}{0.785 \times (0.081)^2} = 1.62 \text{m/s}$$

【例 1-7】 在稳定流动系统中，水连续从粗管流入细管。粗管内径 $d_1=10\text{cm}$ ，细管内径 $d_2=5\text{cm}$ ，当流量为 $4 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ 时，求粗管内和细管内水的流速？

解：根据式 1-20

$$u_1 = \frac{V_s}{A_1} = \frac{4 \times 10^{-3}}{\frac{\pi}{4} \times (0.1)^2} = 0.51 \text{m/s}$$

根据不可压缩流体的连续性方程

$$u_1 A_1 = u_2 A_2$$

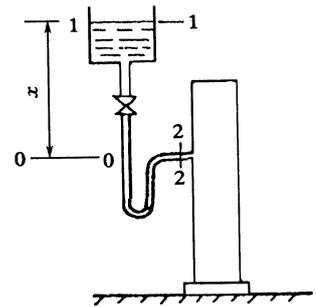
由此

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \left(\frac{10}{5}\right)^2 = 4 \text{倍}$$

$$u_2 = 4u_1 = 4 \times 0.51 = 2.04 \text{m/s}$$

【例 1-8】 将高位槽内料液向塔内加料。高位槽和塔内的压力均为大气压。要求料液在管内以 0.5m/s 的速度流动。设料液在管内压头损失为 1.2m （不包括出口压头损失），试求高位槽的液面应该比塔入口处高出多少米？

解：取管出口高度的 0-0 为基准面，高位槽的液面为 1-1 截面，因要求计算高位槽的液面比塔入口处高出多少米，所以把 1-1 截面选在此就可以直接算出所求的高度 x ，同时在此液面处的 u_1 及 p_1 均为已知值。2-2 截面选在管出口处。在 1-1 及 2-2 截面间列柏努利方程：



例 1-8 附图

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \Sigma h_f$$

式中 $p_1=0$ （表压）高位槽截面与管截面相差很大，故高位槽截面的流速与管内流速相比，其值很小，即 $u_1 \approx 0$ ， $Z_1=x$ ， $p_2=0$ （表压）， $u_2=0.5\text{m/s}$ ， $Z_2=0$ ，

$$\Sigma h_f/g=1.2\text{m}$$

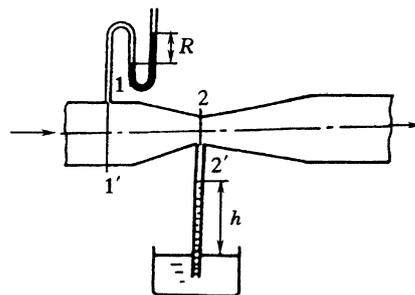
将上述各项数值代入，则

$$9.81x = \frac{(0.5)^2}{2} + 1.2 \times 9.81$$

$$x=1.2\text{m}$$

计算结果表明，动能项数值很小，流体位能的降低主要用于克服管路阻力。

【例 1-9】20℃ 的空气在直径为 80mm 的水平管流过。现于管路中接一文丘里管，如本题附图所示。文丘里管的上游接一水银 U 管压差计，在直径为 20mm 的喉颈处接一细管，其下部插入水槽中。空气流经文丘里管的能量损失可忽略不计。当 U 管压差计读数 $R=25\text{mm}$ 、 $h=0.5\text{m}$ 时，试求此时空气的流量为若干 m^3/h 。当地大气压强为 $101.33 \times 10^3\text{Pa}$ 。



例 1-9 附图

解：文丘里管上游测压口处的压强为

$$\begin{aligned} p_1 &= \rho_{\text{Hg}} g R = 13600 \times 9.81 \times 0.025 \\ &= 3335\text{Pa}(\text{表压}) \end{aligned}$$

喉颈处的压强为

$$p_2 = -\rho g h = -1000 \times 9.81 \times 0.5 = -4905\text{Pa}(\text{表压})$$

空气流经截面 1-1' 与 2-2' 的压强变化为

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} = \frac{(101330 + 3335) - (101330 - 4905)}{101330 + 3335} = 0.079 = 7.9\% < 20\%$$

故可按不可压缩流体来处理。

两截面间的空气平均密度为

$$\rho = \rho_m = \frac{M}{22.4} \frac{T_0 p_m}{T p_0} = \frac{29}{22.4} \times \frac{273 \left[101330 + \frac{1}{2}(3335 - 4905) \right]}{293 \times 101330} = 1.20\text{kg}/\text{m}^3$$

在截面 1-1' 与 2-2' 之间列柏努利方程式，以管道中心线作基准水平面。两截面间无外功加入，即 $W_e=0$ ；能量损失可忽略，即 $\Sigma h_f=0$ 。据此，柏努利方程式

可写为

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

式中 $Z_1=Z_2=0$

所以
$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{3335}{1.2} = \frac{u_2^2}{2} - \frac{4905}{1.2}$$

简化得
$$u_2^2 - u_1^2 = 13733 \quad (a)$$

据连续性方程 $u_1 A_1 = u_2 A_2$

得
$$u_2 = u_1 \frac{A_1}{A_2} = u_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = u_1 \left(\frac{0.08}{0.02} \right)^2$$

$$u_2 = 16u_1 \quad (b)$$

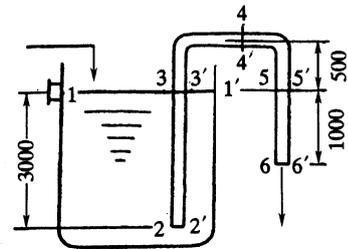
以式 (b) 代入式 (a), 即 $(16u_1)^2 - u_1^2 = 13733$

解得 $u_1 = 7.34 \text{m/s}$

空气的流量为

$$V_s = 3600 \times \frac{\pi}{4} d_1^2 u_1 = 3600 \times \frac{\pi}{4} \times 0.08^2 \times 7.34 = 132.8 \text{m}^3/\text{h}$$

【例 1-10】水在本题附图所示的虹吸管内作定态流动, 管路直径没有变化, 水流经管路的能量损失可以忽略不计, 试计算管内截面 2-2'、3-3'、4-4' 和 5-5' 处的压强。大气压强为 $1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ 。图 中所标注的尺寸均以 *mm* 计。



例 1-10 附图

解: 为计算管内各截面的压强, 应首先计算管内水的流速。先在贮槽水面 1-1' 及管子出口内侧截面 6-6' 间列柏努利方程式, 并以截面 6-6' 为基准水平面。由于管路的能量损失忽略不计,

即 $\Sigma h_f=0$ ，故柏努利方程式可写为

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

式中 $Z_1=1\text{m}$ $Z_6=0$ $p_1=0$ (表压) $p_6=0$ (表压) $u_1 \approx 0$

将上列数值代入上式，并简化得

$$9.81 \times 1 = \frac{u_6^2}{2}$$

解得 $u_6=4.43\text{m/s}$

由于管路直径无变化，则管路各截面积相等。根据连续性方程式知 $V_s=Au=$ 常数，故管内各截面的流速不变，即

$$u_2=u_3=u_4=u_5=u_6=4.43\text{m/s}$$

则 $\frac{u_2^2}{2} = \frac{u_3^2}{2} = \frac{u_4^2}{2} = \frac{u_5^2}{2} = \frac{u_6^2}{2} = 9.81\text{J/kg}$

因流动系统的能量损失可忽略不计，故水可视为理想流体，则系统内各截面上流体的总机械能 E 相等，即

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

总机械能可以用系统内任何截面去计算，但根据本题条件，以贮槽水面 1-1' 处的总机械能计算较为简便。现取截面 2-2' 为基准水平面，则上式中 $Z=2\text{m}$ ， $p=101330\text{Pa}$ ， $u \approx 0$ ，所以总机械能为

$$E = 9.81 \times 3 + \frac{101330}{1000} = 130.8\text{J/kg}$$

计算各截面的压强时，亦应以截面 2-2' 为基准水平面，则 $Z_2=0$ ， $Z_3=3\text{m}$ ， $Z_4=3.5\text{m}$ ， $Z_5=3\text{m}$ 。

(1) 截面 2-2' 的压强

$$p_2 = \left(E - \frac{u_2^2}{2} - gZ_2 \right) \rho = (130.8 - 9.81) \times 1000 = 120990\text{Pa}$$

(2) 截面 3-3' 的压强

$$p_3 = \left(E - \frac{u_3^2}{2} - gZ_3 \right) \rho = (130.8 - 9.81 - 9.81 \times 3) \times 1000 = 91560\text{Pa}$$

(3) 截面 4-4' 的压强

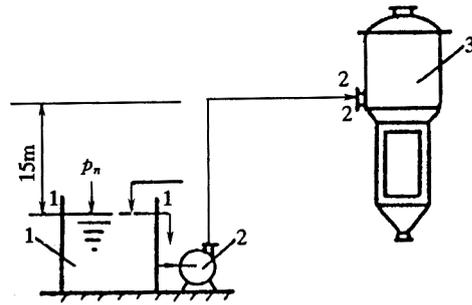
$$p_4 = \left(E - \frac{u_4^2}{2} - gZ_4 \right) \rho = (130.8 - 9.81 - 9.81 \times 3.5) \times 1000 = 86660 \text{Pa}$$

(4) 截面 5-5' 的压强

$$p_5 = \left(E - \frac{u_5^2}{2} - gZ_5 \right) \rho = (130.8 - 9.81 - 9.81 \times 3) \times 1000 = 91560 \text{Pa}$$

从以上结果可以看出，压强不断变化，这是位能与静压强反复转换的结果。

【例 1-11】 用泵将贮槽中密度为 1200kg/m^3 的溶液送到蒸发器内，贮槽内液面维持恒定，其上方压强为 $101.33 \times 10^3 \text{Pa}$ ，蒸发器上部的蒸发室内操作压强为 26670Pa （真空度），蒸发器进料口高于贮槽内液面 15m ，进料量为 $20 \text{m}^3/\text{h}$ ，溶液流经全部管路的能量损失为 120J/kg ，求泵的有效功率。管路直径为 60mm 。



例 1-11 附图

解：取贮槽液面为 1-1 截面，管路出口内侧为 2-2 截面，并以 1-1 截面为基准水平面，在两截面间列柏努利方程。

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \Sigma h_f$$

式中 $Z_1=0$ $Z_2=15 \text{m}$ $p_1=0$ （表压） $p_2=-26670 \text{Pa}$ （表压） $u_1=0$

$$u_2 = \frac{\frac{20}{3600}}{0.785 \times (0.06)^2} = 1.97 \text{m/s}$$

$$\Sigma h_f = 120 \text{J/kg}$$

将上述各项数值代入，则

$$W_e = 15 \times 9.81 + \frac{(1.97)^2}{2} + 120 - \frac{26670}{1200} = 246.9 \text{J/kg}$$

泵的有效功率 N_e 为：

$$N_e = W_e \cdot w_s$$

式中

$$w_s = V_s \cdot \rho = \frac{20 \times 1200}{3600} = 6.67 \text{ kg/s}$$

$$N_e = 246.9 \times 6.67 = 1647 \text{ W} = 1.65 \text{ kW}$$

实际上泵所作的功并不是全部有效的，故要考虑泵的效率 η ，实际上泵所消耗的功率（称轴功率） N 为

$$N = \frac{N_e}{\eta}$$

设本题泵的效率为 0.65，则泵的轴功率为：

$$N = \frac{1.65}{0.65} = 2.54 \text{ kW}$$

【例 1-12】 试推导下面两种形状截面的当量直径的计算式。

- (1) 管道截面为长方形，长和宽分别为 a 、 b ；
- (2) 套管换热器的环形截面，外管内径为 d_1 ，内管外径为 d_2 。

解：(1) 长方形截面的当量直径

$$d_e = \frac{4A}{\Pi}$$

式中 $A=ab$ $\Pi = 2(a+b)$

故

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

(2) 套管换热器的环隙形截面的当量直径

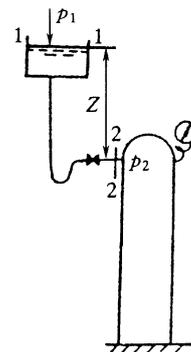
$$A = \frac{\pi}{4} d_1^2 - \frac{\pi}{4} d_2^2 = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)$$

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

故

$$d_e = \frac{4 \times \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)}{\pi (d_1 + d_2)} = d_1 - d_2$$

【例 1-13】 料液自高位槽流入精馏塔，如附图所示。塔内压强为 $1.96 \times 10^4 \text{ Pa}$ (表压)，输送管道为 $\phi 36 \times 2 \text{ mm}$ 无缝钢管，管长 8m。管路中装有 90° 标准弯头两个，



例 1-13 附图

180° 回弯头一个，球心阀（全开）一个。为使料液以 3m³/h 的流量流入塔中，问高位槽应安置多高？（即位差 Z 应为多少米）。料液在操作温度下的物性：密度 $\rho=861\text{kg/m}^3$ ；粘度 $\mu=0.643\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

解：取管出口处的水平面作为基准面。在高位槽液面 1-1 与管出口截面 2-2 间列柏努利方程

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \Sigma h_f$$

式中 $Z_1=Z$ $Z_2=0$ $p_1=0$ （表压）

$$u_1 \approx 0 \quad p_2 = 1.96 \times 10^4 \text{Pa}$$

$$u_2 = \frac{V_s}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{\frac{3}{3600}}{0.785(0.032)^2} = 1.04\text{m/s}$$

3

阻力损失

$$\Sigma h_f = \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta \right) \frac{u^2}{2}$$

取管壁绝对粗糙度 $\varepsilon=0.3\text{mm}$ ，则：

$$\frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.3}{32} = 0.00938$$

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{0.032 \times 1.04 \times 861}{0.643 \times 10^{-3}} = 4.46 \times 10^4 (\text{湍流})$$

由图 1-23 查得 $\lambda=0.039$

局部阻力系数由表 1-4 查得为

进口突然缩小（入管口） $\zeta=0.5$

90° 标准弯头 $\zeta=0.75$

180° 回弯头 $\zeta=1.5$

球心阀(全开) $\zeta=6.4$

故

$$\begin{aligned} \Sigma h_f &= \left(0.039 \times \frac{8}{0.032} + 0.5 + 2 \times 0.75 + 1.5 + 6.4 \right) \times \frac{(1.04)^2}{2} \\ &= 10.6\text{J/kg} \end{aligned}$$

所求位差

$$Z = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{\Sigma h_f}{g} = \frac{1.96 \times 10^4}{861 \times 9.81} + \frac{(1.04)^2}{2 \times 9.81} + \frac{10.6}{9.81} = 3.46\text{m}$$

截面 2-2 也可取在管出口外端, 此时料液流入塔内, 速度 u_2 为零。但局部阻力应计入突然扩大(流入大容器的出口)损失 $\zeta=1$, 故两种计算方法结果相同。

【例 1-14】 通过一个不包含 u 的数群来解决管路操作型的计算问题。

已知输出管径为 $\Phi 89 \times 3.5\text{mm}$, 管长为 138m, 管子相对粗糙度 $\varepsilon/d=0.0001$, 管路总阻力损失为 50J/kg, 求水的流量为若干。水的密度为 1000kg/m^3 , 粘度为 $1 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

解: 由式 1-47 可得

$$\lambda = \frac{2dh_f}{lu^2}$$

$$\text{又} \quad Re^2 = \left(\frac{d u \rho}{\mu} \right)^2$$

将上两式相乘得到与 u 无关的无因次数群

$$\lambda Re^2 = \frac{2d^3 \rho^2 h_f}{l \mu^2}$$

(1-53)

因 λ 是 Re 及 ε/d 的函数, 故 λRe^2 也是 ε/d 及 Re 的函数。图 1-29 上的曲线即为不同相对粗糙度下 Re 与 λRe^2 的关系曲线。计算 u 时, 可先将已知数据代入式 1-53, 算出 λRe^2 , 再根据 λRe^2 、 ε/d 从图 1-29 中确定相应的 Re , 再反算出 u 及 V_s 。

将题中数据代入式 1-53, 得

$$\lambda Re^2 = \frac{2d^3 \rho^2 h_f}{l \mu^2} = \frac{2 \times (0.082)^3 \times (1000)^2 \times 50}{138 \times (1 \times 10^{-3})^2} = 4 \times 10^8$$

根据 λRe^2 及 ε/d 值, 由图 1-29a 查得 $Re=1.5 \times 10^5$

$$u = \frac{Re \mu}{d \rho} = \frac{1.5 \times 10^5 \times 10^{-3}}{0.082 \times 1000} = 1.83\text{m/s}$$

水的流量为:

$$V_s = \frac{\pi}{4} d^2 u = 0.785 \times (0.082)^2 \times 1.83 = 9.66 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s} = 34.8 \text{m}^3/\text{h}$$

【例 1-15】 计算并联管路的流量

在图 1-30 所示的输水管路中, 已知水的总流量为 $3\text{m}^3/\text{s}$, 水温为 20°C , 各支管总长度分别为 $l_1=1200\text{m}$, $l_2=1500\text{m}$, $l_3=800\text{m}$; 管径 $d_1=600\text{mm}$, $d_2=500\text{mm}$, $d_3=800\text{mm}$; 求 AB 间的阻力损失及各管的流量。已知输水管为铸铁管, $\varepsilon=0.3\text{mm}$ 。

解: 各支管的流量可由式 1-58 和式 1-54 联立求解得出。但因 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 均未知, 须用试差法求解。

设各支管的流动皆进入阻力平方区, 由

$$\begin{aligned}\frac{\varepsilon_1}{d_1} &= \frac{0.3}{600} = 0.0005 \\ \frac{\varepsilon_2}{d_2} &= \frac{0.3}{500} = 0.0006 \\ \frac{\varepsilon_3}{d_3} &= \frac{0.3}{800} = 0.000375\end{aligned}$$

从图 1-23 分别查得摩擦系数为:

$$\lambda_1=0.017; \quad \lambda_2=0.0177; \quad \lambda_3=0.0156$$

由式 1-58

$$\begin{aligned}V_{s1}:V_{s2}:V_{s3} &= \sqrt{\frac{(0.6)^5}{0.017 \times 1200}} : \sqrt{\frac{(0.5)^5}{0.0177 \times 1500}} : \sqrt{\frac{(0.8)^5}{0.0156 \times 800}} \\ &= 0.0617 : 0.0343 : 0.162\end{aligned}$$

又

$$V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 3\text{m}^3/\text{s}$$

故

$$\begin{aligned}V_{s1} &= \frac{0.0617 \times 3}{(0.0617 + 0.0343 + 0.162)} = 0.72\text{m}^3/\text{s} \\ V_{s2} &= \frac{0.0343 \times 3}{(0.0617 + 0.0343 + 0.162)} = 0.40\text{m}^3/\text{s} \\ V_{s3} &= \frac{0.162 \times 3}{(0.0617 + 0.0343 + 0.162)} = 1.88\text{m}^3/\text{s}\end{aligned}$$

校核 λ 值:

$$Re = \frac{dV_s}{\mu} = \frac{d\rho}{\mu} \cdot \frac{V_s}{\pi d^2} = \frac{4\rho V_s}{\pi \mu d}$$

已知 $\mu = 1 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$

$$Re = \frac{4 \times 1000 \times V_s}{\pi \times 10^{-3} d} = 1.27 \times 10^5 \frac{V_s}{d}$$

故

$$Re_1 = 1.27 \times 10^6 \times \frac{0.72}{0.6} = 1.52 \times 10^6$$

$$Re_2 = 1.27 \times 10^6 \times \frac{0.4}{0.5} = 1.02 \times 10^6$$

$$Re_3 = 1.27 \times 10^6 \times \frac{1.88}{0.8} = 2.98 \times 10^6$$

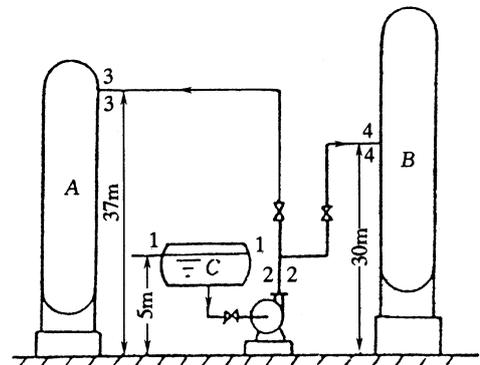
由 Re_1 、 Re_2 、 Re_3 从图 1-23 可以看出，各支管进入或十分接近阻力平方区，故假设成立，以上计算正确。

A 、 B 间的阻力损失 h_f 可由式 1-56 求出

$$h_f = \frac{8\lambda_1 l_{1-3}}{\pi^2 d_1^5} = \frac{8 \times 0.017 \times 1200 \times (0.72)^2}{\pi^2 (0.6)^5} = 110 \text{ J/kg}$$

【例 1-16】 用泵输送密度为 710 kg/m^3 的油品，如附图所示，从贮槽经泵出口后分为两路：一路送到 A 塔顶部，最大流量为 10800 kg/h ，塔内表压强为 $98.07 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。另一路送到 B 塔中部，最大流量为 6400 kg/h ，塔内表压强为 $118 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。贮槽 C 内液面维持恒定，液面上方的表压强为 $49 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

现已估算出当管路上的阀门全开，且流量达到规定的最大值时油品流经各段管路的阻力损失是：由截面 1-1 至 2-2 为 201 J/kg ；由截面 2-2 至 3-3 为 60 J/kg ；由截面 2-2 至 4-4 为 50 J/kg 。油品在管内流动时的动能很小，可以忽略。各截面离地面的垂直距离见本题附图。



例 1-16 附图

已知泵的效率为 60% ，求此情况下泵的轴功率。

解：在 1-1 与 2-2 截面间列柏努利方程，以地面为基准水平面。

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \Sigma h_{f1-2}$$

式中 $Z_1=5\text{m}$ $p_1=49 \times 10^3 \text{ Pa}$ $u_1 \approx 0$

Z_2 、 p_2 、 u_2 均未知， $\Sigma h_{f1-2}=20 \text{ J/kg}$

设 E 为任一截面上三项机械能之和，则截面 2-2 上的 $E_2 = gZ_2 + p_2/\rho + u_2^2/2$

代入柏努利方程得

$$W_e = E_2 + 20 - 5 \times 9.81 - \frac{49 \times 10^3}{710} = E_2 - 98.06$$

(a)

由上式可知，需找出分支 2-2 处的 E_2 ，才能求出 W_e 。根据分支管路的流动规律 E_2 可由 E_3 或 E_4 算出。但每千克油品从截面 2-2 到截面 3-3 与自截面 2-2 到截面 4-4 所需的能量不一定相等。为了保证同时完成两支管的输送任务，泵所提供的能量应同时满足两支管所需的能量。因此，应分别计算出两支管所需能量，选取能量要求较大的支管来决定 E_2 的值。

仍以地面为基准水平面，各截面的压强均以表压计，且忽略动能，列截面 2-2 与 3-3 的柏努利方程，求 E_2 。

$$\begin{aligned} E_2 &= gZ_3 + \frac{p_3}{\rho} + h_{f2-3} = 37 \times 9.81 + \frac{98.07 \times 10^4}{710} + 60 \\ &= 1804 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

列截面 2-2 与 4-4 之间的柏努利方程求 E_2

$$\begin{aligned} E_2 &= gZ_4 + \frac{p_4}{\rho} + h_{f2-4} = 30 \times 9.81 + \frac{118 \times 10^4}{710} + 50 \\ &= 2006 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

比较结果，当 $E_2=2006 \text{ J/kg}$ 时才能保证输送任务。将 E_2 值代入式 (a)，得

$$W_e = 2006 - 98.06 = 1908 \text{ J/kg}$$

通过泵的质量流量为

$$w_s = \frac{10800 + 6400}{3600} = 4.78 \text{ kg/s}$$

泵的有效功率为

$$N_e = W_e w_s = 1908 \times 4.78 = 9120 \text{ W} = 9.12 \text{ kW}$$

泵的轴功率为

$$N = \frac{N_e}{\eta} = \frac{9.12}{0.6} = 15.2 \text{ kW}$$

最后须指出，由于泵的轴功率是按所需能量较大的支管来计算的，当油品从截面 2-2 到 4-4 的流量正好达到 6400 kg/h 的要求时，油品从截面 2-2 到 3-3 的流量在管路阀全开时便大于 10800 kg/h 。所以操作时要把泵到 3-3 截面的支管

的调节阀关小到某一程度，以提高这一支管的能量损失，使流量降到所要求的数值。

习 题

1. 燃烧重油所得的燃烧气，经分析测知其中含 8.5%CO₂，7.5%O₂，76%N₂，8%H₂O（体积%）。试求温度为 500℃、压强为 101.33×10³Pa 时，该混合气体的密度。

2. 在大气压为 101.33×10³Pa 的地区，某真空蒸馏塔塔顶真空表读数为 9.84×10⁴Pa。若在大气压为 8.73×10⁴Pa 的地区使塔内绝对压强维持相同的数值，则真空表读数应为多少？

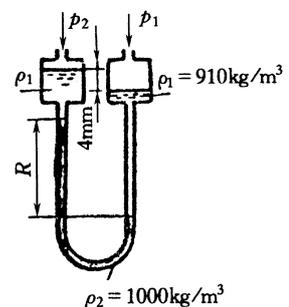
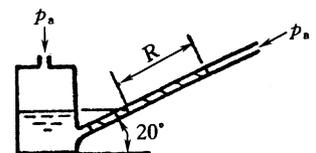
3. 敞口容器底部有一层深 0.52m 的水，其上部为深 3.46m 的油。求器底的压强，以 Pa 表示。此压强是绝对压强还是表压强？水的密度为 1000kg/m³，油的密度为 916 kg/m³。

4. 为测量腐蚀性液体贮槽内的存液量，采用图 1-7 所示的装置。控制调节阀使压缩空气缓慢地鼓泡通过观察瓶进入贮槽。今测得 U 型压差计读数 $R=130\text{mmHg}$ ，通气管距贮槽底部 $h=20\text{cm}$ ，贮槽直径为 2m，液体密度为 980 kg/m³。试求贮槽内液体的储存量为多少吨？

5. 一敞口贮槽内盛 20℃ 的苯，苯的密度为 880 kg/m³。液面距槽底 9m，槽底侧面有一直径为 500mm 的人孔，其中心距槽底 600mm，人孔覆以孔盖，试求：

- (1) 人孔盖共受多少静止力，以 N 表示；
- (2) 槽底面所受的压强是多少？

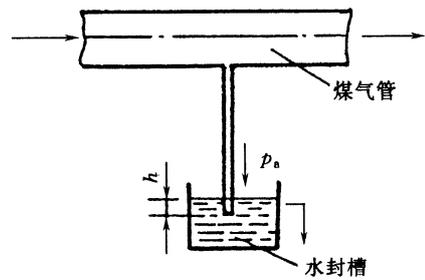
6. 为了放大所测气体压差的读数，采用如图所示的斜管式压差计，一臂垂直，一臂与水平成 20° 角。若 U 形管内装密度为 804 kg/m³ 的 95% 乙醇溶液，求读数 R 为 29mm 时的压强差。



习题 7 附图

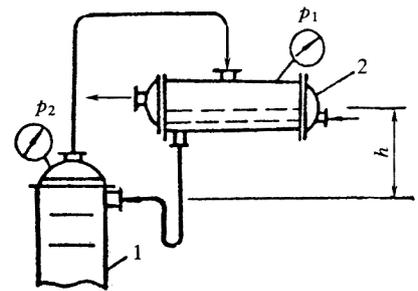
7. 用双液体 U 型压差计测定两点间空气的压差, 测得 $R=320\text{mm}$ 。由于两侧的小室不够大, 致使小室内两液面产生 4mm 的位差。试求实际的压差为多少 Pa 。若计算时忽略两小室内的液面的位差, 会产生多少的误差? 两液体密度值见图。

8. 为了排除煤气管中的少量积水, 用如图所示的水封设备, 水由煤气管路上的垂直支管排出, 已知煤气压强为 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ (绝对压强)。问水封管插入液面下的深度 h 应为若干? 当地大气压强 $p_a = 9.8 \times 10^4 \text{Pa}$, 水的密度 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ 。



习题 8 附图

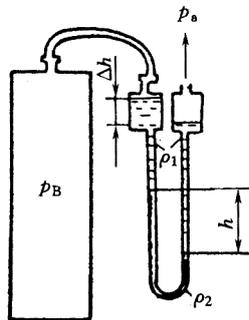
9. 如图示某精馏塔的回流装置中, 由塔顶蒸出的蒸气经冷凝器冷凝, 部分冷凝液将流回塔内。已知冷凝器内压强 $p_1 = 1.04 \times 10^5 \text{Pa}$ (绝压), 塔顶蒸气压强 $p_2 = 1.08 \times 10^5 \text{Pa}$ (绝压), 为使冷凝器中液体能顺利地流回塔内, 问冷凝器液面至少要比回流液入塔处高出多少? 冷凝液密度为 810kg/m^3 。



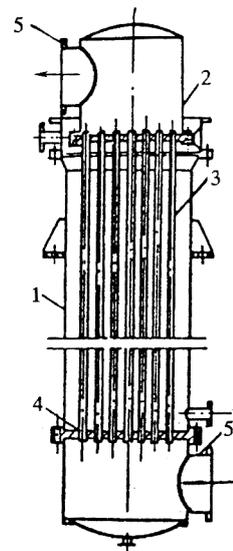
习题 9 附图

1—精馏塔; 2—冷凝器。

10. 为测量气罐中的压强 p_B , 采用如图所示的双液杯式微差压计。两杯中放有密度为 ρ_1 的液体, U 形管下部指示液密度为 ρ_2 。管与杯的直径之比 d/D 。试证:



习题 10 附图



习题 11 附图

1—壳体; 2—顶盖; 3—管束; 4—花板; 5—空气进出口。

$$p_B = p_a - hg(\rho_2 - \rho_1) - hg\rho_1 \frac{d^2}{D^2}$$

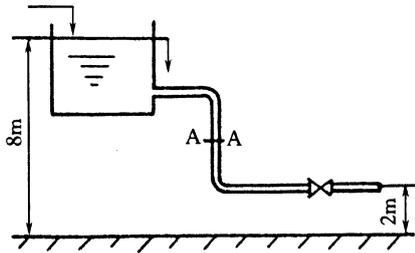
11. 列管换热器的管束由 121 根 $\phi 25 \times 2.5\text{mm}$ 的钢管组成，空气以 9m/s 的速度在列管内流动。空气在管内的平均温度为 50°C ，压强为 $196 \times 10^3\text{Pa}$ （表压），当地大气压为 $98.7 \times 10^3\text{Pa}$ 。试求：

- (1) 空气的质量流量；
- (2) 操作条件下空气的体积流量；
- (3) 将 (2) 的计算结果换算为标准状态下空气的体积流量。

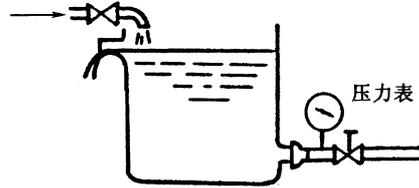
注： $\phi 25 \times 2.5\text{mm}$ 钢管外径为 25mm ，壁厚为 2.5mm ，内径为 20mm 。

12. 高位槽内的水面高于地面 8m ，水从 $\phi 108 \times 4\text{mm}$ 的管路中流出，管路出口高于地面 2m 。在本题中，水流经系统的能量损失可按 $h_f = 6.5u^2$ 计算，其中 u 为水在管内的流速，试计算：

- (1) $A-A$ 截面处水的流速；
- (2) 出口水的流量，以 m^3/h 计。



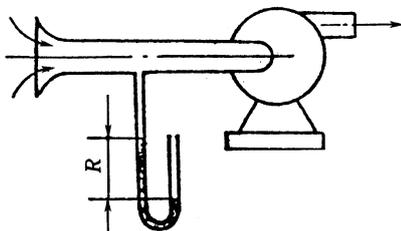
习题 12 附图



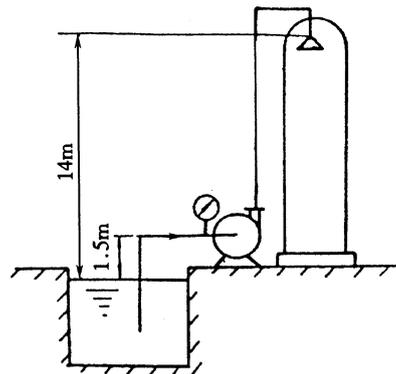
习题 13 附图

13. 在图示装置中，水管直径为 $\phi 57 \times 3.5\text{mm}$ 。当阀门全闭时，压力表读数为 $3.04 \times 10^4\text{Pa}$ 。当阀门开启后，压力表读数降至 $2.03 \times 10^4\text{Pa}$ ，设总压头损失为 0.5m 。求水的流量为若干 m^3/h ？水密度 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

14. 某鼓风机吸入管直径为 200mm ，在喇叭形进口处测得 U 型压差计读数



习题 14 附图



习题 15 附图

$R=25\text{mm}$ ，指示液为水。若不计阻力损失，空气的密度为 1.2kg/m^3 ，试求管路内空气的流量。

15. 用离心泵把 20°C 的水从贮槽送至水洗塔顶部，槽内水位维持恒定。各部分相对位置如图所示。管路的直径均为 $\phi 76\times 2.5\text{mm}$ ，在操作条件下，泵入口处真空表读数为 $24.66\times 10^3\text{Pa}$ ，水流经吸入管与排出管（不包括喷头）的阻力损失可分别按 $h_{f1}=2u^2$ 与 $h_{f2}=10u^2$ 计算。式中 u 为吸入管或排出管的流速。排出管与喷头连接处的压强为 $98.07\times 10^3\text{Pa}$ （表压）。试求泵的有效功率。

16. 图示为 30°C 的水由高位槽流经直径不等的两段管路。上部细管直径为 20mm ，下部粗管直径为 36mm 。不计所有阻力损失，管路中何处压强最低？该处的水是否会发生汽化现象？

17. 图示一冷冻盐水的循环系统。盐水的循环量为 $45\text{ m}^3/\text{h}$ ，管径相同。流体流经管路的压头损失自 A 至 B 的一段为 9m ，自 B 至 A 的一段为 12m 。盐水的密度为 1100 kg/m^3 ，试求：

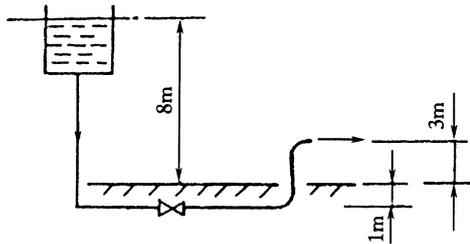
(1) 泵的功率，设其效率为 0.65 ；

(2) 若 A 的压力表读数为 $14.7\times 10^4\text{Pa}$ ，则 B 处的压力表读数应为多少 Pa ？

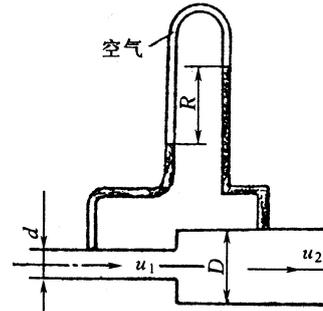
18. 在水平管路中，水的流量为 2.5L/s ，已知管内径 $d_1=5\text{cm}$ ， $d_2=2.5\text{cm}$ 及 $h_1=1\text{m}$ ，若忽略能量损失，问连接于该管收缩面上的水管，可将水自容器内吸上高度 h_2 为多少？水密度 $\rho=1000\text{ kg/m}^3$ 。

19. 密度 850 kg/m^3 的料液从高位槽送入塔中，如图所示。高位槽液面维持恒定。塔内表压为 $9.807\times 10^3\text{Pa}$ ，进料量为 $5\text{m}^3/\text{h}$ 。进料管为 $\phi 38\times 2.5\text{mm}$ 的钢管，管内流动的阻力损失为 30J/kg 。问高位槽内液面应比塔的进料口高出多少？

20. 有一输水系统如图所示。输水管径为 $\phi 57\times 3.5\text{mm}$ 。已知管内的阻力损失按 $h_f=45\times u^2/2$ 计算，式中 u 为管内流速。求水的流量为多少 m^3/s ？欲使水量增加 20% ，应将水槽的水面升高多少？



习题 20 附图



习题 21 附图

21. 水以 $3.77 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ 的流量流经一扩大管段。细管直径 $d=40\text{mm}$ ，粗管直径 $D=80\text{mm}$ ，倒 U 型压差计中水位差 $R=170\text{mm}$ ，求水流经该扩大管段的阻力损失 h_f ，以 mH_2O 表示。

22. 贮槽内径 D 为 2m ，槽底与内径 d_0 为 32mm 的钢管相连，如图所示。槽内无液体补充，液面高度 $h_1=2\text{m}$ 。管内的流动阻力损失按 $h_f=20u^2$ 计算。式中 u 为管内液体流速。试求当槽内液面下降 1m 所需的时间。

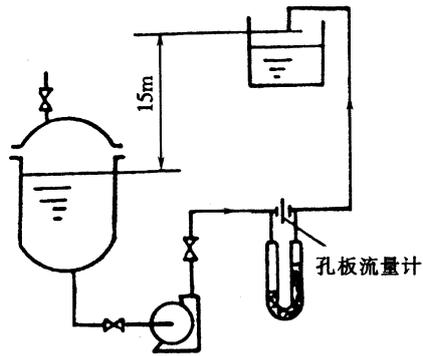
23. 90°C 的水流入内径为 20mm 的管内，欲使流动呈层流状态，水的流速不可超过哪一数值？若管内流动的是 90°C 的空气，则这一数值又为多少？

24. 由实验得知，单个球形颗粒在流体中的沉降速度 u_f 与以下诸量有关：

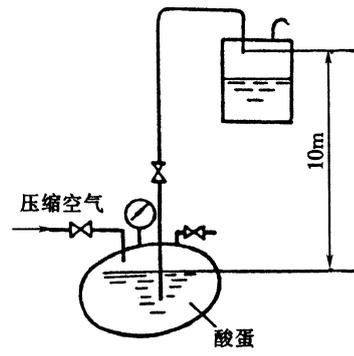
颗粒直径 d ；流体密度 ρ 与粘度 μ ，颗粒与流体的密度差 $\rho_a - \rho$ ；重力加速度 g 。试通过因次分析方法导出颗粒沉降速度的无因次函数式。

25. 用 $\phi 168 \times 9\text{mm}$ 的钢管输送原油，管线总长 100km ，油量为 60000kg/h ，油管最大抗压能力为 $1.57 \times 10^7\text{Pa}$ 。已知 50°C 时油的密度为 890kg/m^3 ，油的粘度为 $0.181\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。假定输油管水平放置，其局部阻力忽略不计，试问为完成上述输送任务，中途需几个加压站？

所谓油管最大抗压能力系指管内输送的流体压强不能大于此值，否则管子损坏。



习题 26 附图



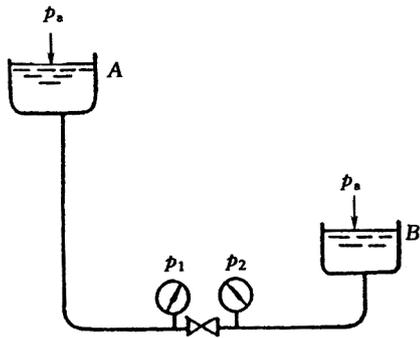
习题 27 附图

26. 每小时将 $2 \times 10^4 \text{kg}$ 的溶液用泵从反应器输送到高位槽（见图）。反应器液面上方保持 $26.7 \times 10^3 \text{Pa}$ 的真空度，高位槽液面上方为大气压。管路为 $\phi 76 \times 4 \text{mm}$ 钢管，总长 50m ，管线上有两个全开的闸阀，一个孔板流量计（ $\zeta=4$ ）、五个标准弯头。反应器内液面与管出口的距离为 15m 。若泵的效率为 0.7 ，求泵的轴功率。溶液 $\rho=1073 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu=6.3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ， $\varepsilon=0.3 \text{mm}$ 。

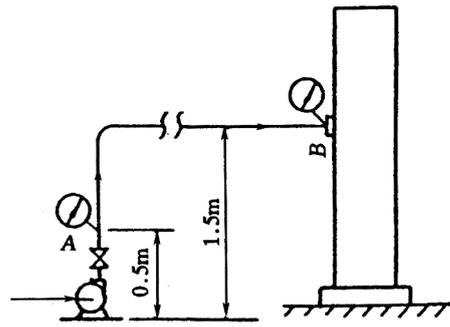
27. 用压缩空气将密闭容器（酸蛋）中的硫酸压送到敞口高位槽。输送流量为 $0.1 \text{m}^3/\text{min}$ ，输送管路为 $\phi 38 \times 3 \text{mm}$ 无缝钢管。酸蛋中的液面离压出管口的位差为 10m ，在压送过程中设位差不变。管路总长 20m ，设有一个闸阀（全开），8 个标准 90° 弯头。求压缩空气所需的压强为多少（表压）？硫酸 ρ 为 1830kg/m^3 ， μ 为 $0.012 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ，钢管的 ε 为 0.3mm 。

28. 粘度为 $0.03 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、密度为 900 kg/m^3 的液体自容器 A 流过内径 40mm 的管路进入容器 B 。两容器均为敞口，液面视作不变。管路中有一阀门，阀前管长 50m ，阀后管长 20m （均包括局部阻力的当量长度）。当阀全关时，阀前、后的压力表读数分别为 $8.82 \times 10^4 \text{Pa}$ 和 $4.41 \times 10^4 \text{Pa}$ 。现将阀门打开至 $1/4$ 开度，阀门阻力的当量长度为 30m 。试求：

- (1) 管路的流量；
- (2) 阀前、阀后压力表的读数有何变化？



习题 28 附图



习题 29 附图

29. 如图所示, 某输油管路未装流量计, 但在 A、B 两点的压力表读数分别为 $p_A=1.47 \times 10^6 \text{Pa}$, $p_B=1.43 \times 10^6 \text{Pa}$ 。试估计管路中油的流量。已知管路尺寸为 $\phi 89 \times 4 \text{mm}$ 的无缝钢管。A、B 两点间的长度为 40m, 有 6 个 90° 弯头, 油的密度为 820kg/m^3 , 粘度为 $0.121 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

30. 欲将 5000kg/h 的煤气输送 100km, 管内径为 300mm, 管路末端压强为 $14.7 \times 10^4 \text{Pa}$ (绝压), 试求管路起点需要多大的压强?

设整个管路中煤气的温度为 20°C , λ 为 0.016, 标准状态下煤气的密度为 0.85kg/m^3 。

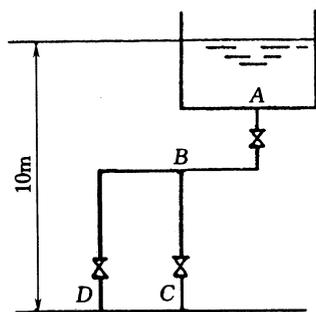
31. 一酸贮槽通过管路向其下方的反应器送酸, 槽内液面在管出口以上 2.5m。管路由 $\phi 38 \times 2.5 \text{mm}$ 无缝钢管组成, 全长 (包括管件的当量长度) 为 25m。由于使用已久, 粗糙度应取为 0.15mm。贮槽及反应器均为大气压。求每分钟可送酸多少 m^3 ? 酸的密度 $\rho=1650 \text{kg/m}^3$, 粘度 $\mu=0.012 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。(提示: 用试差法时可先设 $\lambda=0.04$)。

32. 水位恒定的高位槽从 C、D 两支管同时放水。AB 段管长 6m, 内径 41mm。BC 段长 15m, 内径 25mm。BD 长 24m, 内径 25mm。上述管长均包括阀门及其它局部阻力的当量长度, 但不包括出口动能项, 分支点 B 的能量损失可忽略。试求:

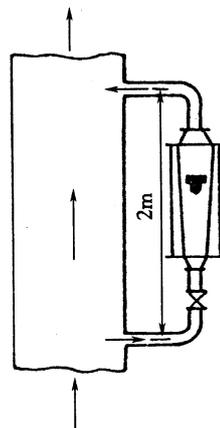
(1) D、C 两支管的流量及水槽的总排水量;

(2) 当 D 阀关闭, 求水槽由 C 支管流出的水量。设全部管路的摩擦系数 λ 均可取 0.03, 且不变化, 出口损失应另行考虑。

33. 用内径为 300mm 的钢管输送 20°C 的水，为了测量管内水的流量，采用了如图所示的安排。在 2m 长的一段主管路上并联了一根直径为 $\phi 60 \times 3.5\text{mm}$ 的支管，其总长与所有局部阻力的当量长度之和为 10m。支管上装有转子流量计，由流量计上的读数知支管内水的流量为 $2.72\text{m}^3/\text{h}$ 。试求水在主管路中的流量及总



习题 32 附图



习题 33 附图

流量。设主管路的摩擦系数 λ 为 0.018，支管路的摩擦系数 λ 为 0.03。