1.3 流体动力学

1.3.1 流体的流量与流速

1 流 量

(1) 体积流量(volumetric flow rate)

单位时间内流经管道任意截面的流体体积。

q_V——m³/s或m³/h

(2) 质量流量 (mass flow rate)

单位时间内流经管道任意截面的流体质量。

q_m——kg/s或kg/h。

二者关系： $q_m = q_V \rho$

2 流速

(1) 流速（平均流速, average velocity）

单位时间内流体质点在流动方向上所流经的距离。

$$u = \frac{q_V}{A} \qquad \text{m/s}$$

(2) 质量流速（mass velocity)

单位时间内流经管道单位截面积的流体质量。

$$G = \frac{q_m}{A} = \frac{q_V \rho}{A} = u\rho \qquad \text{kg/（m}^2\text{ s）}$$

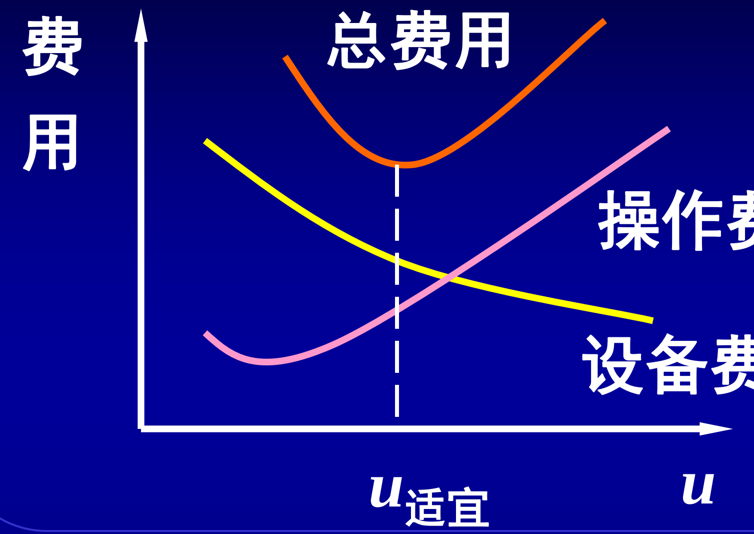
流量与流速的关系： $q_m = q_V \rho = uA\rho = GA$

3. 管径的估算

对于圆形管道：

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

流量q_V一般由生产任务决定。



流速选择：

u ↑→ d ↓ →设备费用↓

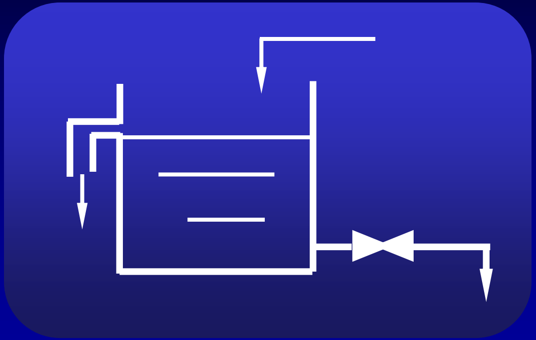
└──→ 流动阻力↑ →动力消耗↑ →操作费↑

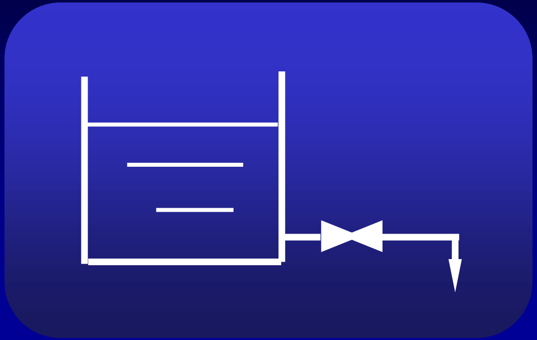
} 均衡考虑

常用流体适宜流速范围　　P43，表1-4

水及一般液体	1~3 m/s
粘度较大的液体	0.5~1 m/s
低压气体	8~15 m/s
压力较高的气体	15～25 m/s

1.3.2 定态流动与非定态流动





定态流动(steady state flow)：各截面上的温度、压力、流速等物理量仅随位置变化，而不随时间变化；

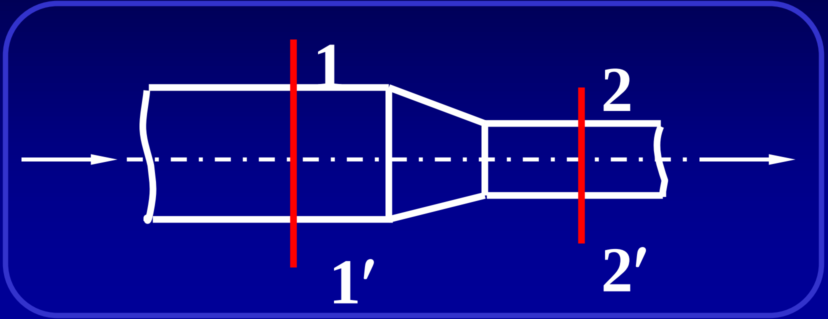
$$T, p, u = f(x, y, z)$$

非定态流动(unsteady state flow)：流体在各截面上的有关物理量既随位置变化，也随时间变化。

$$T, p, u = f(x, y, z, \theta)$$

1.3.3 定态流动系统的质量守恒—— 连续性方程

对于定态流动系统，在管路中流体没有增加和漏失的情况下：



$$q_{m1} = q_{m2}$$

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$$

推广至任意截面

$$q_m = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \Lambda = \rho u A = \text{常数}$$

连续性方程 (equation of continuity)

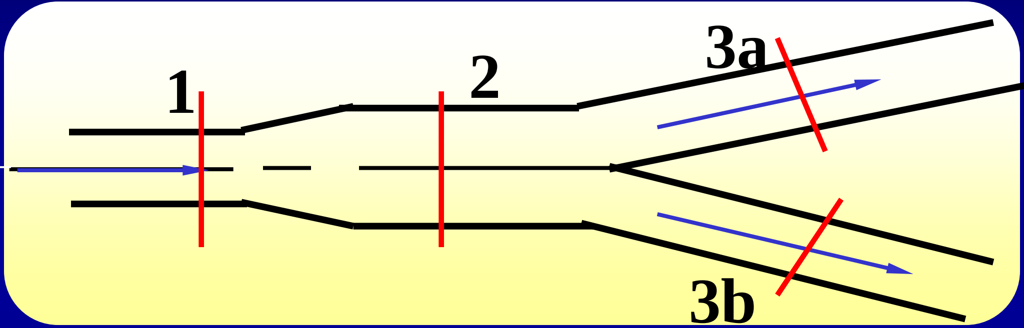
不可压缩性流体， $\rho = Const.$

$$q_V = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \Lambda = uA = \text{常数}$$

圆形管道 $$\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

即不可压缩流体在管路中任意截面的流速与管内径的平方成反比 。

例1-6 管路由φ89×4mm的管1、φ108×4mm的管2和两段φ57×3.5mm的分支管3a及3b连接而成。若水以$9\times10^{-3}m^3/s$的体积流量流动，且在两段分支管内的流量相等，试求水在各段管内的速度。



管路1 (φ89×4mm)： $q_{V1}=q_V$

$$u_1=\frac{q_{V1}}{A_1}=\frac{9\times10^{-3}}{0.785\times(0.089-0.004\times2)^2}$$
$$=1.75m/s$$

管路2 (φ108×4mm)： $q_{V2}=q_V$

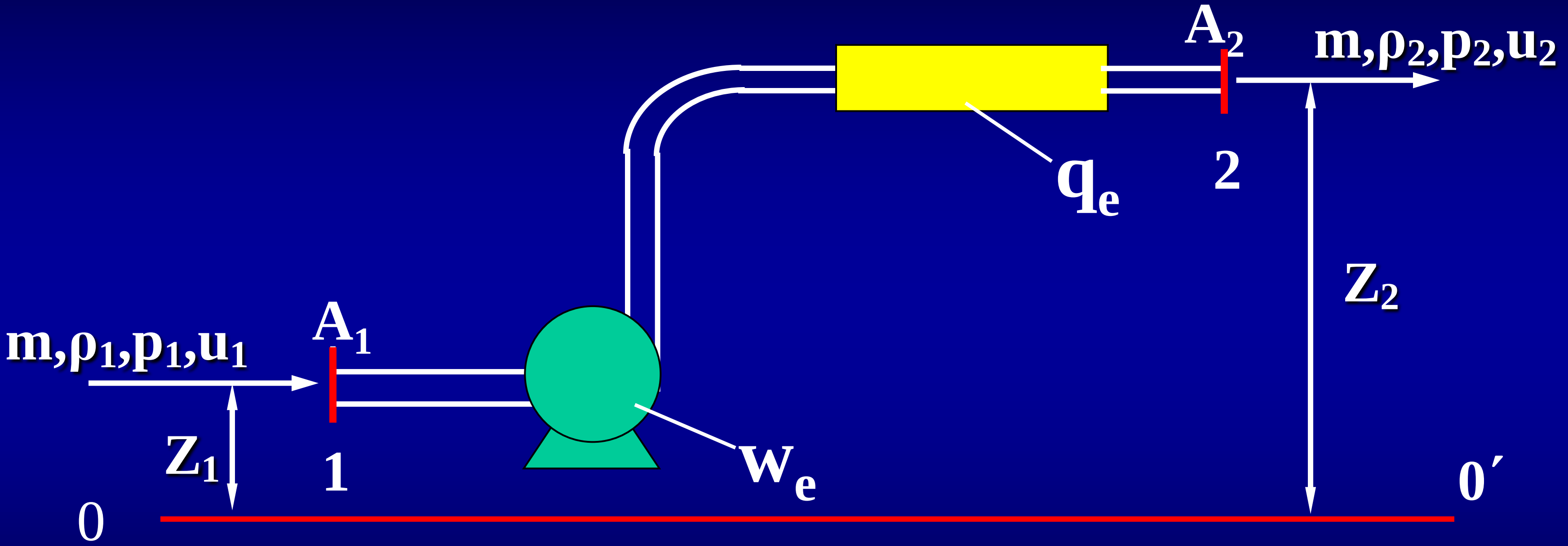
$$u_2=\frac{q_{V2}}{A_2}=\frac{9\times10^{-3}}{0.785\times(0.108-0.004\times2)^2}=1.15m/s$$

管路3a,3b (φ57×3.5mm)： $q_{V3a}=q_{V3b}=0.5q_V=q_{V3}$

$$u_{3a}=u_{3b}=\frac{q_{V3}}{A_3}=\frac{4.5\times10^{-3}}{0.785\times(0.057-0.0035\times2)^2}=2.3m/s$$

1.3.4 定态流动系统的能量守恒

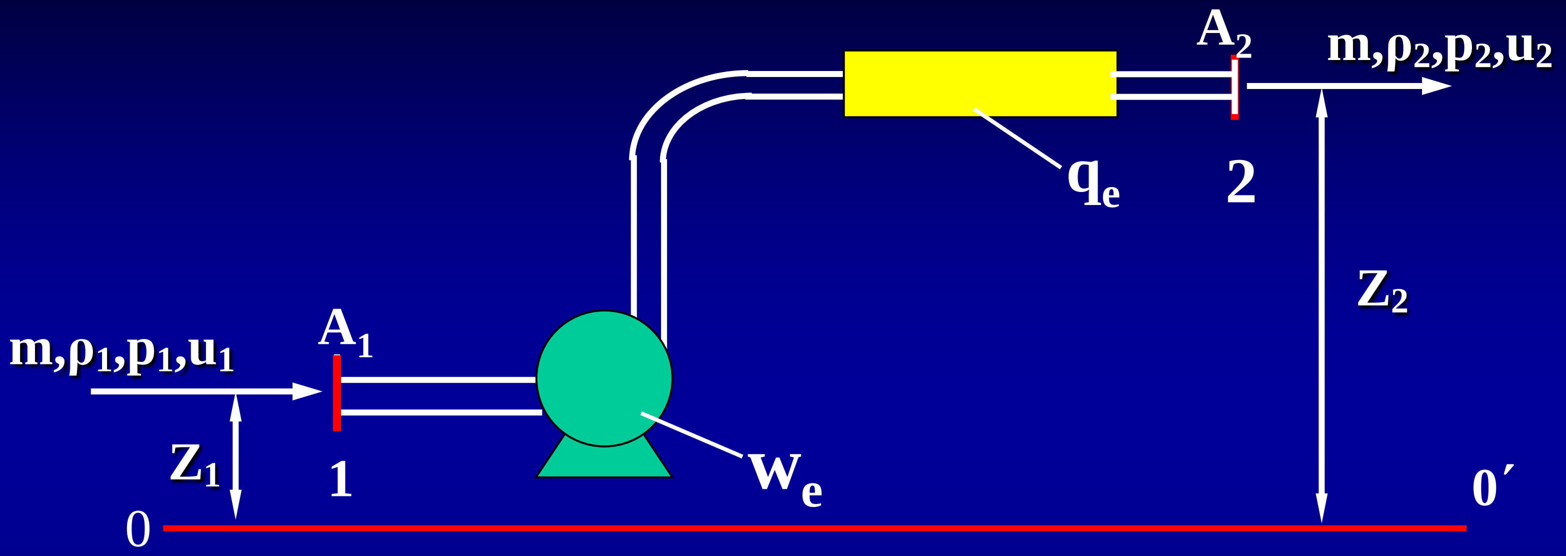
1 能量衡算



(6)热——流体流动过程所吸收或放出的热

m kg流体吸收的热为mq_e，J;

2 总能量守恒方程



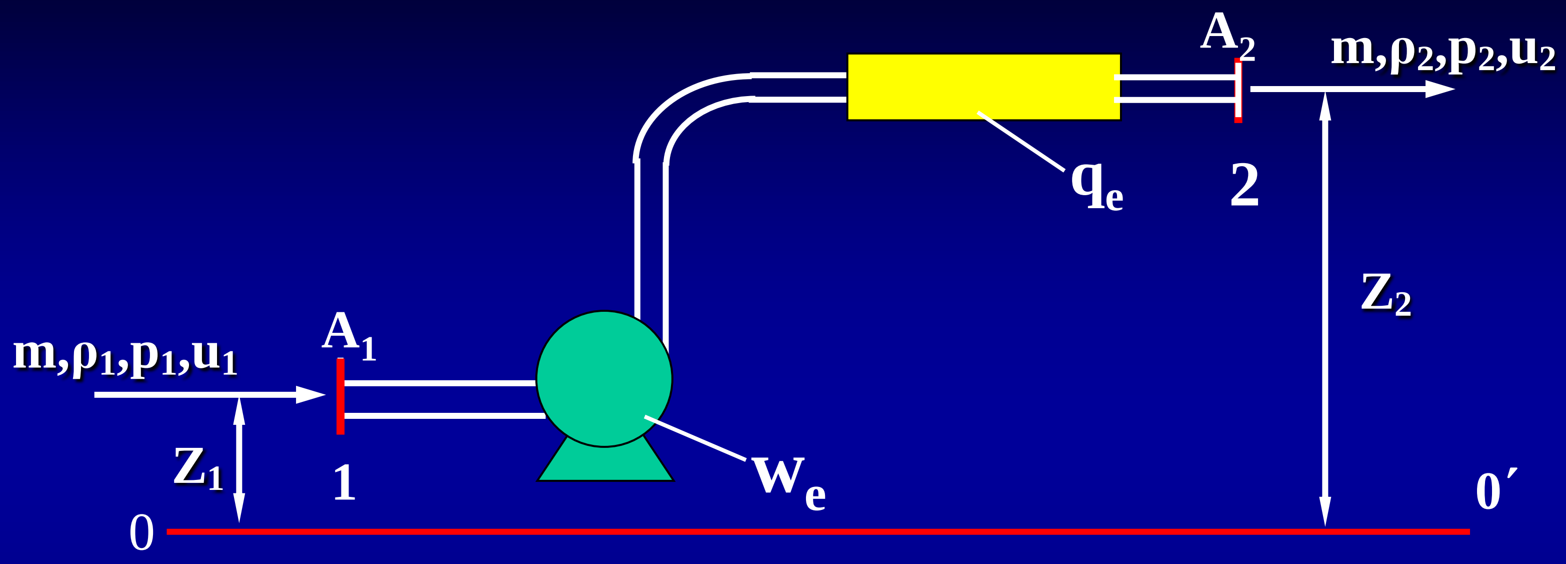
对于质量为m kg的流体，总能量守恒方程为：

$$mU_1+mgZ_1+p_1V_1+mu_1^2/2+mw_e+mq_e= mU_2+mgZ_2+p_2V_2+mu_2^2/2 \text{ , [J]}$$

对于单位质量流体，总能量守恒方程为：

$$U_1+gZ_1+p_1/\rho_1+u_1^2/2+w_e+q_e= U_2+gZ_2+p_2/ \rho_2 +u_2^2/2 \qquad \text{[J/kg]}$$

能量的分类



1. 机械能，包括位能、动能、静压能及功；**此类能量在流体流动的过程中可以互相转换，也可以转换为热或流体内能。**
2. 内能和热，**此类能量在流动系统中不能直接转变为用于输送流体的机械能。**

3 机械能守恒方程

对于质量为m kg的流体，机械能守恒方程为：

$$mgZ_1+p_1V_1+mu_1^2/2+mw_e= mgZ_2+p_2V_2+mu_2^2/2+m\Sigma w_{f1\text{-}2}，\quad [J]$$

其中，$\Sigma w_{f1\text{-}2}$为单位质量流体由“1”截面流到“2”截面所损失的能量。

对于单位质量流体，机械能守恒方程为：

$$gZ_1+p_1/\rho_1+u_1^2/2+w_e= gZ_2+p_2/\rho_2+u_2^2/2+\Sigma w_{f1\text{-}2}，\quad [J/kg]$$

对于单位重量流体，机械能守恒方程为：

$$Z_1+p_1/\rho_1 g+u_1^2/2g+He = Z_2+p_2/\rho_2 g+u_2^2/2g+\Sigma h_{f1\text{-}2}，\quad [m]$$

其中，$He=w_e/g$为单位质量流体得到的外加压头；

$\Sigma h_{f1\text{-}2}= \Sigma w_{f1\text{-}2}/g$为单位质量流体由“1”截面流到“2”截面的压头损失。

各项意义-1

位能/位压头

mgZ—— m kg流体具有的位能，[J];

gZ—— **单位质量**流体具有的位能，[J/kg];

Z—— **单位重量**流体具有的位能，又称位压头，[m];

注意事项　计算中为了确定具体的值，首先需要**选择基准面**，基准面不会影响计算结果；基准面确定后，**上正下负**。

静压能/静压头

pV—— m kg流体具有的静压能，[J];

p/ρ —— **单位质量**流体具有的静压能，[J/kg];

p/ρg —— **单位重量**流体具有的静压能，又称静压头，[m];

注意事项　守恒方程中压力统一

各项意义-2

动能/动压头

$mu^2/2$—— m kg流体具有的动能，[J];

$u^2/2$—— **单位质量**流体具有的动能，[J/kg];

$u^2/2g$—— **单位重量**流体具有的动能，又称动压头，[m];

4. 理想流体的机械能衡算

理想流体是指流动中没有摩擦阻力的流体。

$$gZ_1+p_1/\rho_1+u_1^2/2+\cancel{w_e}= gZ_2+p_2/\rho_2+u_2^2/2+\Sigma \cancel{w_{f1\text{-}2}}\quad , \quad [J/kg]$$

$$Z_1+p_1/\rho_1 g+u_1^2/2g+\cancel{He} = Z_2+p_2/\rho_2 g+u_2^2/2g+\Sigma \cancel{h_{f1\text{-}2}}\quad , \quad [m]$$

$$\underline{z_1 g+\frac{1}{2}u_1^2+\frac{p_1}{\rho}=z_2 g+\frac{1}{2}u_2^2+\frac{p_2}{\rho}}$$

$$\underline{z_1+\frac{1}{2g}u_1^2+\frac{p_1}{\rho g}=z_2+\frac{1}{2g}u_2^2+\frac{p_2}{\rho g}}$$

—— 伯努利方程式 (Bernoulli’s Equation)

5. 伯努利方程的讨论

（1）若流体处于静止，u=0，$\Sigma W_f=0$，$W_e=0$，则伯努利方程变为

$$z_1 g+\frac{p_1}{\rho}=z_2 g+\frac{p_2}{\rho}$$

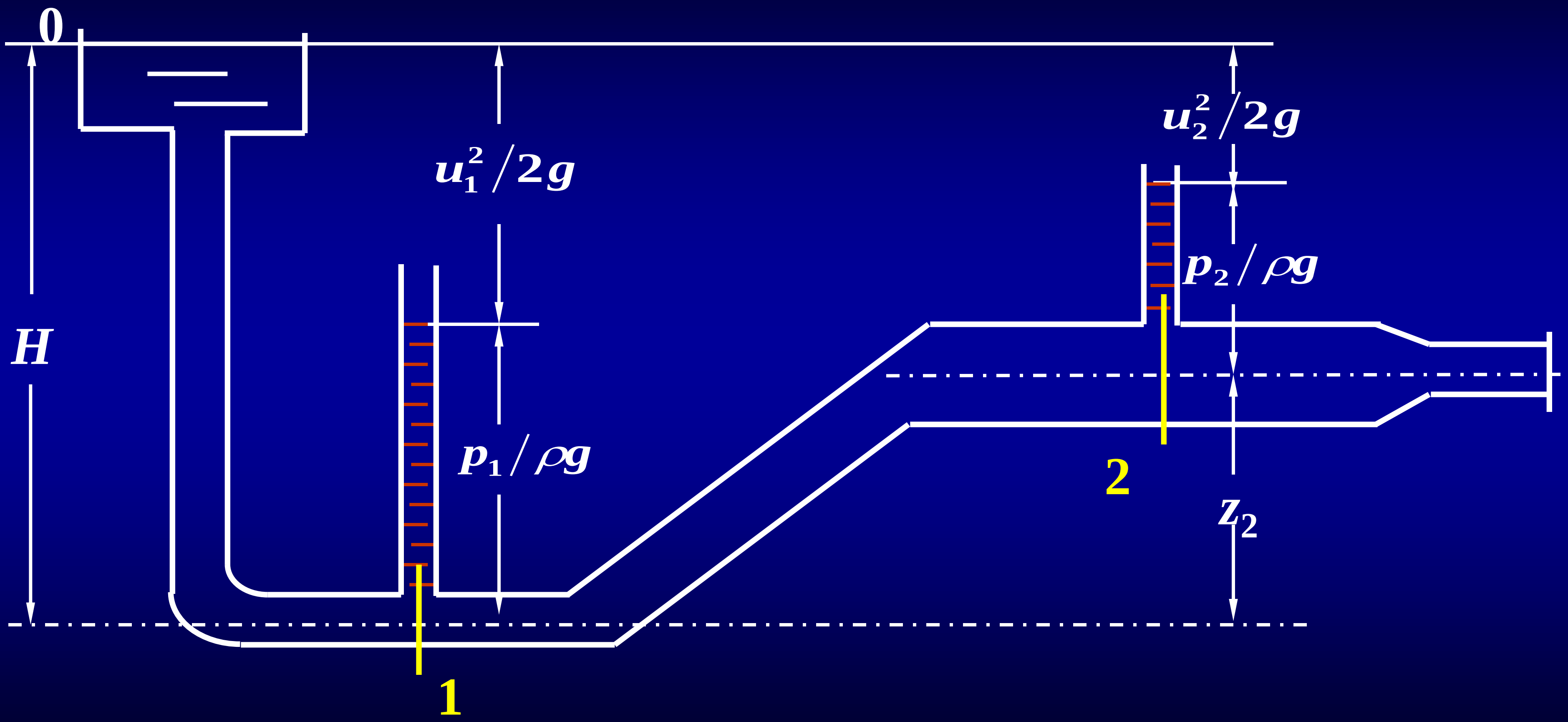
说明伯努利方程既表示流体的运动规律，也可以表示流体静止状态的规律 。

（2）理想流体在流动过程中任意截面上总机械能、总压头为常数，即

$$zg+\frac{1}{2}u^2+\frac{p}{\rho}=Const.$$

$$z+\frac{1}{2g}u^2+\frac{p}{\rho g}=Const.$$

伯努利方程的物理意义



（3）zg、$\dfrac{p}{\rho}$、$\dfrac{1}{2}u^2$——某截面上单位质量流体所具有的位能、动能和静压能；

W_e、ΣW_f——在两截面间单位质量流体获得或消耗的能量。

有效功率：$N_e = q_m W_e$

轴功率：$N = \dfrac{N_e}{\eta}$

（4）伯努利方程式适用于不可压缩性流体。

对于可压缩性流体，当 $\dfrac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\%$ 时，仍可用该方程计算，但式中的密度ρ应以两截面的平均密度ρ_m代替。

6. 伯努利方程的应用及解题步骤

(1) 伯努利方程的应用

$$gZ_1+p_1/\rho_1+u_1^2/2+w_e= gZ_2+p_2/\rho_2+u_2^2/2+\Sigma w_{f1-2}\text{，}[J/kg]$$

$$Z_1+p_1/\rho_1 g+u_1^2/2g+He = Z_2+p_2/\rho_2 g+u_2^2/2g+\Sigma h_{f1-2}\text{，}[m]$$

利用伯努利方程与连续性方程，可以确定：

- 管内流体的流量；
- 输送设备的功率；
- 管路中流体的压力；
- 容器间的相对位置等。

(2) 应用伯努利方程解题步骤

1）根据题意画出流动系统的示意图，标明流体的流动方向，定出上、下游截面，明确流动系统的衡算范围；

2）截面的选取

- 与流体的流动方向相垂直；
- 两截面间流体应是定态连续流动；
- 截面宜选在已知量多、计算方便处。

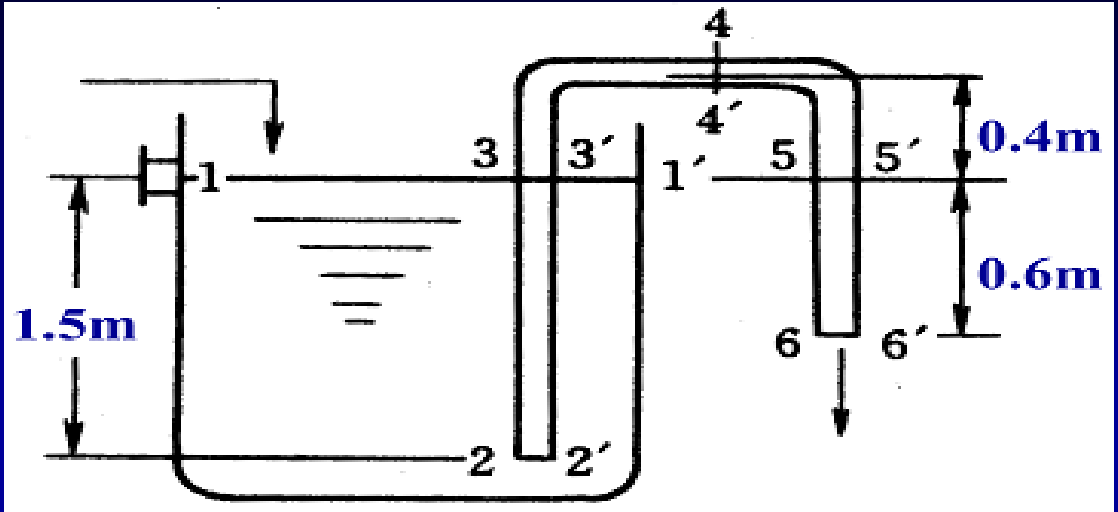
3）位能基准面的选取

- 必须与地面平行；
- 宜于选取两截面中位置较低的截面；
- 若截面不是水平面，而是垂直于地面，则基准面应选过管中心线的水平面。

4）各物理量的单位应保持一致，压力表示同为绝压或同为表压

例　题　虹吸管

书*p*20例1-7



讨论：

(1) 此流程用于无底阀的高位槽排水，利用位能；

(2) 管内为负压操作；

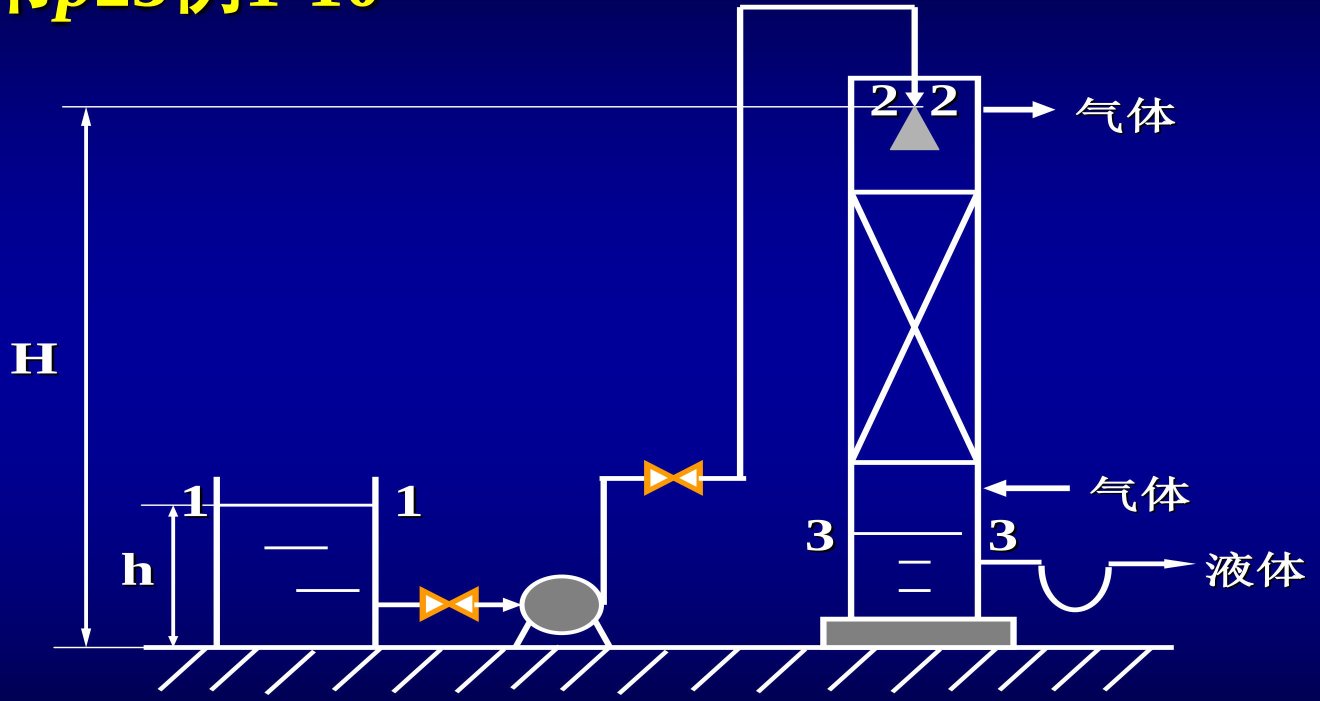
(3) 管内必须充满液体，保证流体连续。如果管路漏入气体，破坏了流体的连续，则虹吸现象即被破坏；

(4) 实际管路中存在阻力，*H*一定，管子越长，流量越小。

例　题

计算轴功率

书*p*23例1-10



● 例　题　**计算轴功率**

流量q_V=84.82m^3/h；

内径d=0.1m；

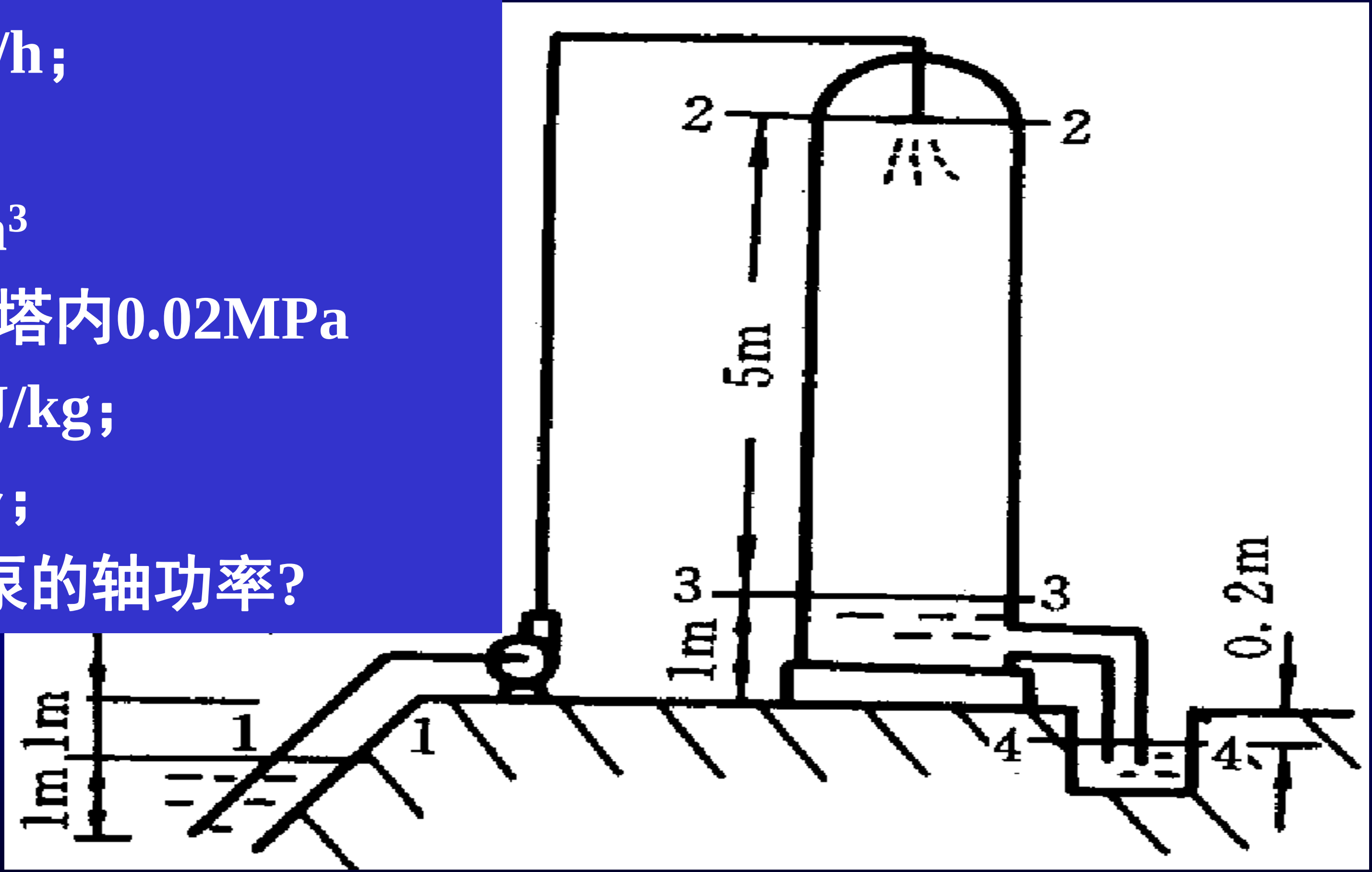
密度ρ=1000kg/m^3

喷头处压力大于塔内0.02MPa

塔前管路W_f=10J/kg；

塔后管路W_f忽略；

η＝65%，求：泵的轴功率?



例　题　计算轴功率

3与4之间列B.E.

$$z_3+\frac{p_3}{\rho g}+\frac{u_3^2}{2g}+He=z_4+\frac{p_4}{\rho g}+\frac{u_4^2}{2g}+\sum h_{f\,3-4}$$

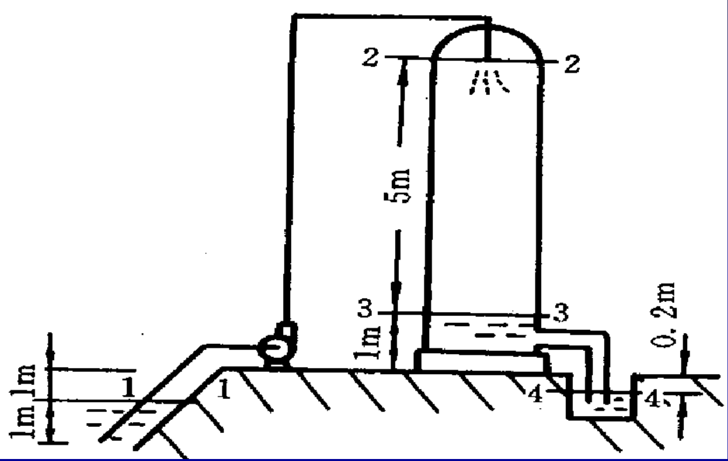
$$z_3=1m，\quad z_4=-0.2m;$$

$$p_3=p(表)，\quad p_4=0(表);$$

$$u_3=u_4=0;$$

$$He=0,\sum h_{f\,3-4}=0;$$

$$1+\frac{p}{\rho g}+0+0=-0.2+0+0+0$$



q_V=84.82m³/h；d=0.1m；
ρ=1000kg/m³
喷头处压力大于塔内0.02MPa
塔前管路W_f=10J/kg；
塔后管路W_f忽略；η＝65%
求：泵的轴功率?

$$p=-1.2\rho g=-1.2\times1000\times9.81=-11772Pa$$

例　题　计算轴功率

1与2之间列B.E.

$$z_1+\frac{p_1}{\rho g}+\frac{u_1^2}{2g}+He=z_2+\frac{p_2}{\rho g}+\frac{u_2^2}{2g}+\sum h_{f1-2}$$

$$z_1=-1m，\quad z_2=6m;$$

$$p_1=0(表)，\quad p_2=0.02\times10^6+(-11772)=8228Pa;$$

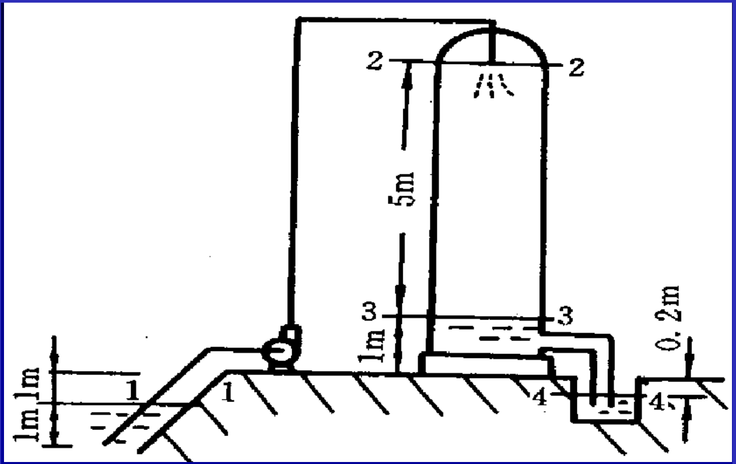
$$u_1=0;u_2=\frac{q_v}{A}=\frac{84.82}{0.785\times0.1^2\times3600}=3m/s$$

$$\sum h_{f1-2}=\frac{10}{9.81}=1.02m;$$

$$-1+0+0+He=6+\frac{8228}{1000\times9.81}+\frac{3^2}{2\times9.81}+1.02$$

$$He=9.32m$$

$$Ne=\rho gHeQ=1000\times9.81\times9.32\times\frac{84.82}{3600}=2.15kW \quad N=\frac{Ne}{\eta}=\frac{2.15}{0.65}=3.3kW$$



q_V=84.82m³/h；d=0.1m；

ρ=1000kg/m³

喷头处压力大于塔内0.02MPa

塔前管路W_f=10J/kg；

塔后管路W_f忽略；η＝65%

求：泵的轴功率?

小结1.3

基本概念：q_m，q_v； u；G； 定态、非定态流动

重点：连续性方程与伯努利方程。

难点：正确选取截面及基准面，解决流体流动及输送问题。

（1）画流程示意图和表明流动方向，**定出上下游截面**，明确流动系统的衡算范围。

（2）位能基准面的选取

（3）各物理量单位保持一致，压力表示方法也一致。

（4）衡算范围所含的外功及阻力损失应考虑。

（1）连续性方程——质量守恒式

定态流动$\rho = Const$ **圆形管道：** $\dfrac{u_1}{u_2} = \dfrac{A_2}{A_1} = \left(\dfrac{d_2}{d_1}\right)^2$

（2）伯努利方程——机械能守恒式

1） $z_1 g + \dfrac{1}{2}u_1^2 + \dfrac{p_1}{\rho} + W_e = z_2 g + \dfrac{1}{2}u_2^2 + \dfrac{p_2}{\rho} + \sum W_f$ $\dfrac{J}{kg}$

2） $z_1 + \dfrac{1}{2g}u_1^2 + \dfrac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \dfrac{1}{2g}u_2^2 + \dfrac{p_2}{\rho g} + \sum h_f$ $\dfrac{J}{N} = m$

3） $\rho g z_1 + \dfrac{1}{2}\rho u_1^2 + p_1 + W_e \rho = \rho g z_2 + \dfrac{1}{2}\rho u_2^2 + p_2 + \Delta p_f$ $\dfrac{J}{m^3} = Pa$

正确选取截面——定态连续流动