

第1章 流体的流动与输送

- 1.1 流体概述
- 1.2 流体静力学方程及其应用
- 1.3 流体在管内流动的基本方程
- 1.4 流体的流动现象
- 1.5 流体在管内的流动阻力损失
- 1.6 管路计算
- 1.7 流速和流量的测量
- 1.8 流体输送机械

1.1 流体概述

- 气态和液态物料称为**流体**。化工生产中所处理的原料、半成品及产品大多数是流体。
- **流体流动的基本规律是化工原理的重要基础。**
- **流体输送**：管路的设计、输送机械的选择及所需功率的计算
- **测量压强、流速、流量**：测量仪表的操作原理多以流体的静止或流动规律为依据的。
- **为强化设备提供适宜的流动条件**：化工生产中的传热、传质过程都是在流体流动的情况下进行的，设备的操作效率与流体流动状况有密切的联系。

1. 流体的特性

(1)宏观：**均匀性、连续性、确定性**，例如**压强、温度和速率等**

(2)微观：**不均匀性、离散性、随机性**

➤ 研究流体的方法：

(1) 微观：从分子运动出发，采用统计平均的方法，建立宏观物理量满足的方程，即统计物理的方法。

(2) 宏观：从**质点**角度研究流体流动规律。

➤ 从工程实际出发研究流体的**宏观运动规律**。

2. 连续介质假设

连续介质假设：流体有大量**质点**组成，彼此间没有空隙完全充满所占空间，每个空间点在每个时刻都有确定的物理量，它们都是空间坐标和时间的连续函数。研究流体力学的根本假设，一般流体都适用。

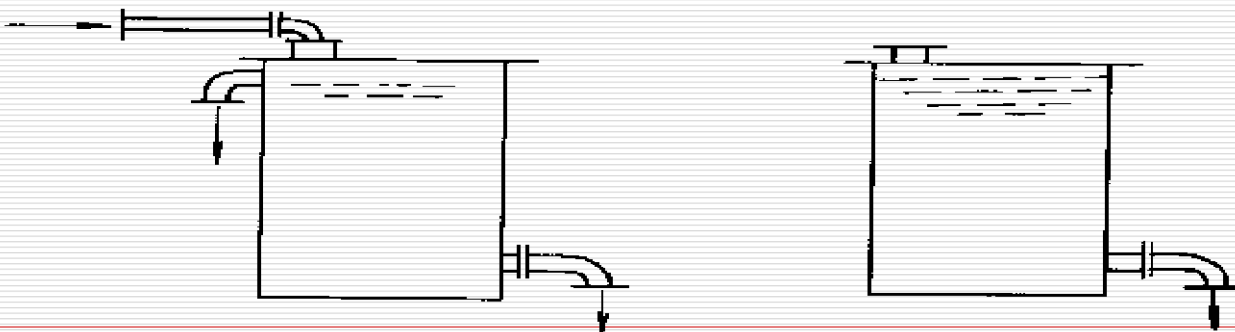
- **流体质点：**又称**微团**，指微观上充分大、宏观上充分小的分子团。其尺度远比设备小但比分子自由程大得多。
- 基于连续介质假设，流体是均匀的**连续体**，而不是含有大量分子的离散体。

3. 流体的易流动性和粘性

- **剪力**：平行于运动方向的表面力。 **剪切力**
- **剪应力**：两流体层间单位面积上受到的抵抗相对滑动的作用力。 **切应力**
- **易流动性**：静止流体受到剪应力能流动，发生任意大的形变。
- **粘性**：两流体层间抵抗相对滑动（抵抗形变）的性质
- **理想流体**：无粘性
- **粘性流体（实际流体）**：有粘性

4. 定态流动和非定态流动

- **定态流动**：空间各点的操作参数（压强、温度和速率等）不随时间变化但可随位置变化的流动，又称**稳定流动**或**定常态流动**。
- **非定态流动**：空间各点的操作参数随时间变化的流动，又称**不稳定流动**或**非定常态流动**。
- 化工生产中连续运转的流动体系一般看作定态流动。



1.2 流体静力学方程及应用

1. 流体的密度

- 定义-单位体积流体所具有的质量

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{Kg/m}^3]$$

- 影响因素：温度和压力。液体可视为不可压缩流体，其密度受压强影响很小，随温度略有改变。
- 气体是可压缩流体，其密度随压强和温度而变。一般在压强不太高，温度不太低时，可按理想气体处理，否则按真实气体状态方程处理

气体的密度必须标明其状态！

1. 流体的密度

(1) 气体的密度

理想气体状态方程:

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \Rightarrow \rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$$

$$p - \text{kPa}$$

$$M - \text{kg/kmol}$$

$$T - \text{K}$$

$$R = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

(标准状态) $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$, $V_0 = 22.4 \text{ m}^3 / \text{kmol}$

$$\rho_0 = \frac{m}{V} = \frac{M}{22.4} = \frac{p_0 M}{RT_0}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \Rightarrow \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T} \Rightarrow \rho = \frac{M}{22.4} \times \frac{p}{p_0} \times \frac{T_0}{T}$$

1. 流体的密度

气体混合物，混合前后质量不变

$$\rho_m = \rho_1\varphi_1 + \rho_2\varphi_2 + \dots + \rho_n\varphi_n = \sum_{i=1}^n (\rho_i\varphi_i)$$

φ_i : 各组分的体积分率或摩尔分数

(2) 混合液体的密度

液体混合物，混合前后体积不变

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2} + \dots + \frac{\omega_n}{\rho_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\rho_i}$$

ω_i : 各组份的质量分率

【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

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

1. 流体的密度

□ 流体的**比容**-单位质量的流体所具有的体积

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad [m^3 / kg]$$

□ 流体的**比重**

$$d = \frac{\rho}{\rho_{4^{\circ}C H_2O}} = \frac{\rho}{1000}$$

相对密度，物料的密度与在标准大气压，4°C时纯H₂O的密度（1 g/cm³）的比值。对于气体，是气体的分子量同空气的分子量（28.9644）的比值。液体或固体的比重说明了它们在另一种流体中是下沉还是漂浮。

2. 流体的静压强

流体的静压强：垂直作用于单位面积上的静压力

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{单位：Pa (N/m}^2\text{)}$$

- -流体压力与作用面垂直，并指向该作用面；
- 任意界面两侧所受压力，大小相等、方向相反；
- 作用于任意点不同方向上的压力在数值上均相同

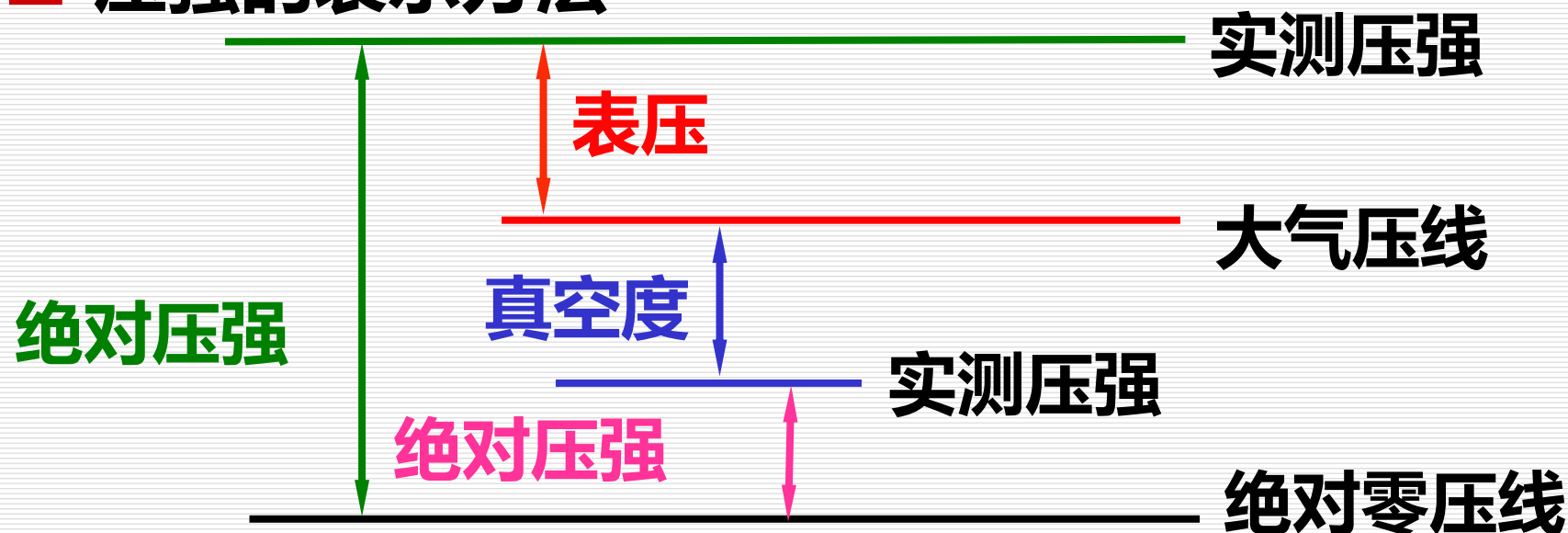
□ 压强的单位

■ $1\text{atm}=760\text{mmHg}=10.33\text{mH}_2\text{O}=101325\text{ Pa}$ (牢记)

■ $1\text{ kgf/cm}^2=0.9678\text{ atm}=10\text{ mH}_2\text{O}$
 $=735.6\text{ mmHg}=98000\text{ Pa}$

2. 流体的静压强

□ 压强的表示方法



$$\text{表压强} = \text{绝对压强} - \text{大气压强}$$

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强}$$

2. 流体的静压强

例题1-2：在兰州操作的苯乙烯真空蒸馏塔塔顶真空表读数为80kPa，在桂林操作时，真空表读数应为多少？已知兰州地区的平均大气压85.3kPa，桂林地区为101.33 kPa。

解：维持操作的正常进行，**应保持相同的绝对压强**，根据兰州地区的压强条件，可求得操作时的绝对压强。

绝对压强 = 大气压强 - 真空度

$$= 85300 - 80000 = 5300[\text{Pa}]$$

真空度 = 大气压强 - 绝对压强

$$= 101330 - 5300 = 96030[\text{Pa}]$$

3. 流体静力学方程

流体静力学：

研究流体在**无外力**作用下处于平衡的规律。

研究的实质：

描述静止流体内部压强的变化规律

流体静力学基本方程：

描述在重力作用下，静止流体内部压强的变化规律的数学表达式。

3. 流体静力学方程

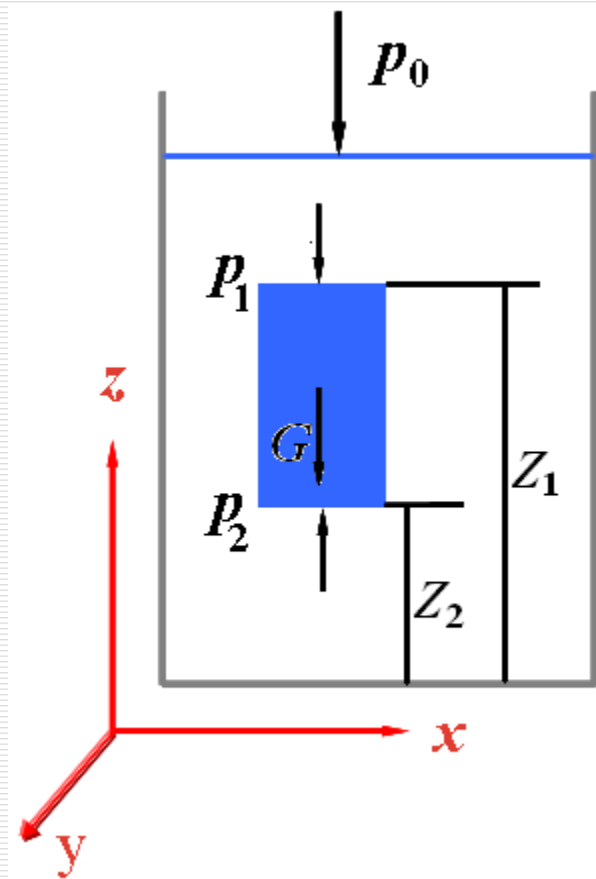
□ 推导过程

液柱 z 方向受力分析:

(1) 上端面所受总压力 $F_1 = -p_1 A$

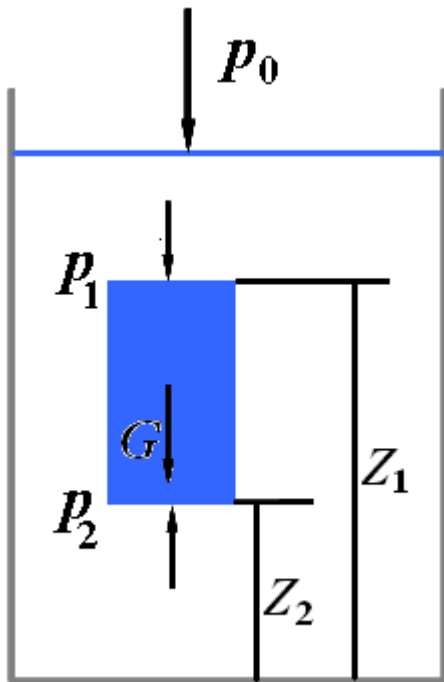
(2) 下端面所受总压力 $F_2 = p_2 A$

(3) 液柱的重力 $G = -\rho g(z_1 - z_2)A$



3. 流体静力学方程

液柱处于静止时，各方向上液柱受力为零：



z 方向 $p_1 A + \rho g A (z_1 - z_2) = p_2 A$

整理得： $p_2 = p_1 + \rho g (z_1 - z_2)$ 压力形式

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

若取液柱的上底面在液面上，则： $p = p_0 + \rho g h$

同种连续的静止流体内部同一水平面上各点压强相等。

P11微积分的推导过程自学！

3. 流体静力学方程

讨论: $p = p_0 + \rho gh$ $z_1 g + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho}$

1) 适用条件: 重力场中**静止的、连续的同一种不可压缩性流体**

2) 物理意义:

zg ——单位质量流体所具有的位能, J/kg;

$\frac{p}{\rho}$ ——单位质量流体所具有的静压能, J/kg。

在同一静止流体中, 处在不同位置流体的**位能和静压能**各不相同, 但二者可以转换, 其**总和保持不变**。

3. 流体静力学方程

$$3) \quad p_0 \text{ 一定时}, \quad p = f(\rho, h) \begin{cases} h \uparrow \Rightarrow p \uparrow \\ \rho \uparrow \Rightarrow p \uparrow \end{cases}$$

静止的*连续的*同一种流体*同一水平面*压强处处相等。
压力相等的面称为等压面。

4) 压强具有可传递性。即：液面上方流体压力改变，液体内部压力随之改变且变化值相同。

$$5) \quad \frac{p - p_0}{\rho g} = h \quad (\text{液柱高度, 即: 水柱和汞柱})$$

6) 气体：密度变化不大，也可采用此公式。不连续的流体，分段使用

例题1-3.

1.判断下面各式是否成立？

$$P_A = P_{A'} \quad P_B = P_{B'} \quad P_C = P_{C'}$$

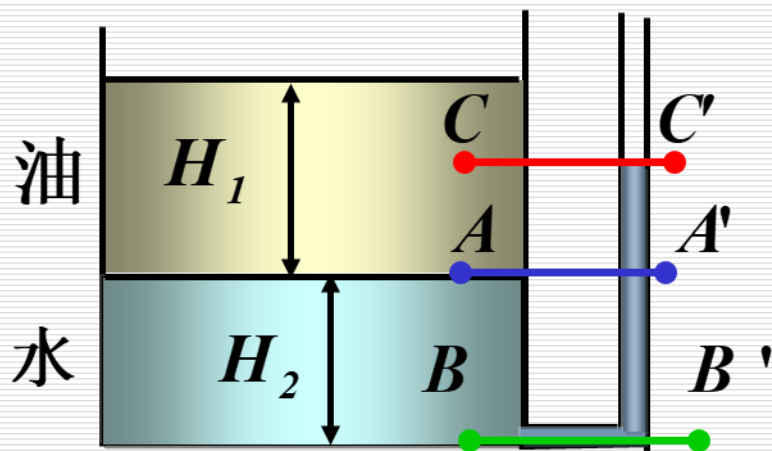
2.细管液面高度。

$$\rho_1 = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

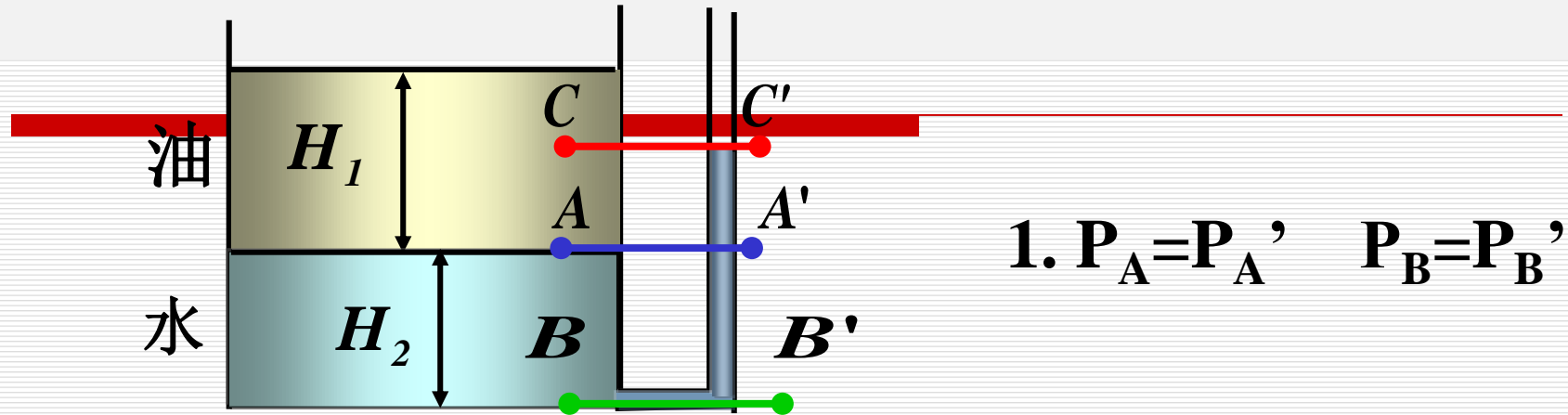
$$H_1 = 0.7 \text{ m}$$

$$H_2 = 0.6 \text{ m}$$



3.当细管水位下降多高时，槽内水将放净？

解: 利用等压面原理求解



$$1. P_A = P_{A'} \quad P_B = P_{B'}$$

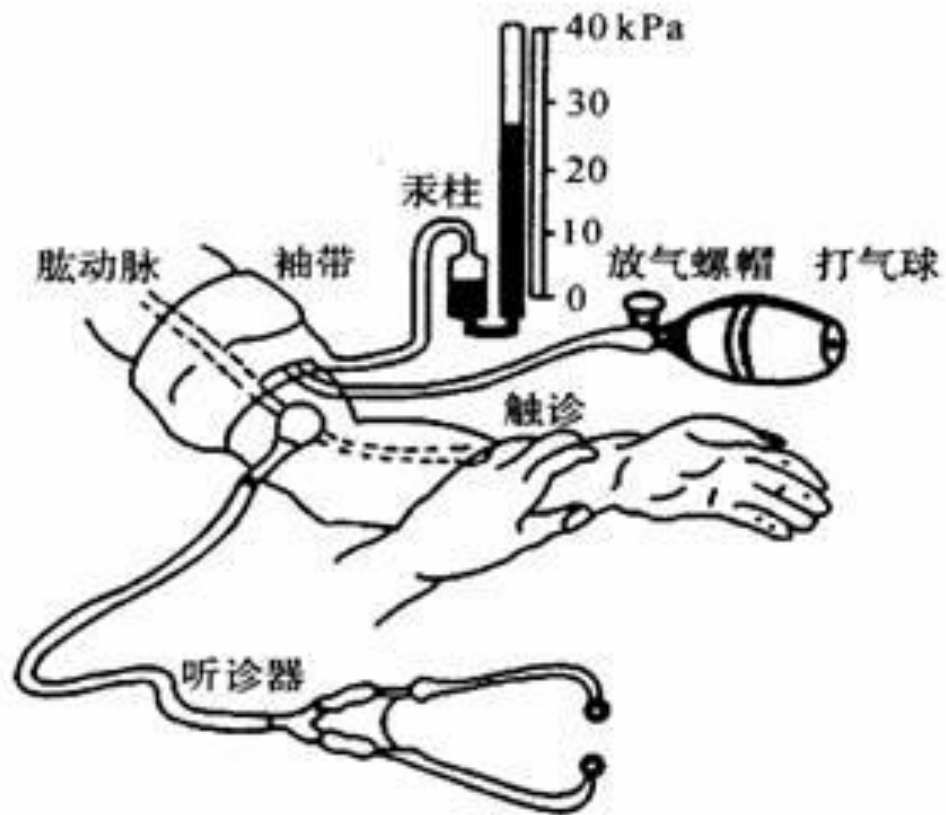
$$2. P_B = \rho_1 g H_1 + \rho_2 g H_2 + p_0 = \rho_2 g h + p_0 = P_{B'},$$

$$h = 1.16 \text{ m}$$

$$3. \rho_2 g h' = \rho_1 g H_1$$

$$h' = \rho_1 g H_1 / \rho_2 g = 800 \times g \times 0.7 / 1000 \times g = 0.56 \text{ m}$$

4. 流体静力学方程的应用



4. 流体静力学方程的应用

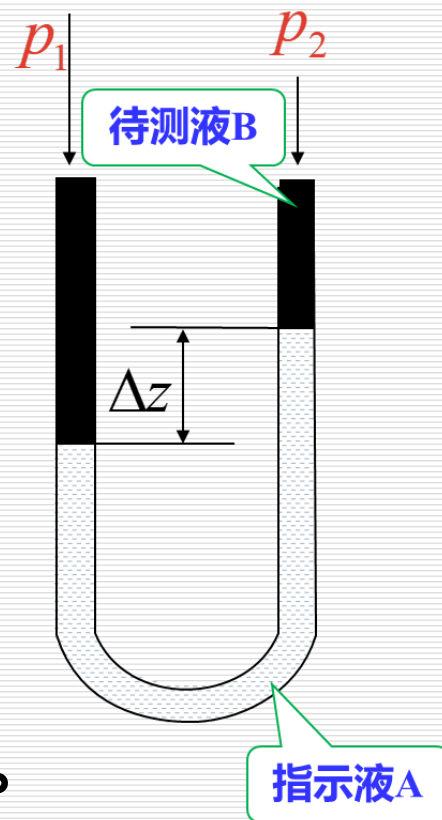
(1) 压强及压强差的测量

□ U形压差计

指示液的选取：

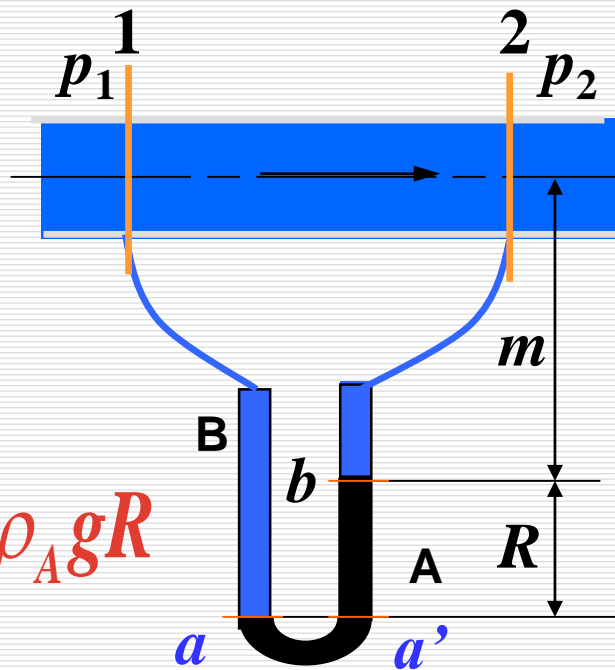
- 指示液与被测流体不互溶，不发生化学反应；
- 其密度要大于被测流体密度。

常见指示液：汞、四氯化碳、液体石蜡等。



例题1-4： U形管压差计测水平管中流体压差，如右图所示，
请问1、2两截面处流体压强差为多少？（指示液A、管
中流体B）

解：选等压面aa'如图所示，则 $p_a = p_{a'}$



$$p_a = p_1 + \rho_B g(m + R)$$

$$p_{a'} = p_2 + \rho_B g m + \rho_A g R$$

所以 $p_1 + \rho_B g(m + R) = p_2 + \rho_B g m + \rho_A g R$

整理得 $p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B) g R$

——两点间压差计算公式

讨论

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B)gR$$

(1) 当被测的流体为气体时, $\rho_A \gg \rho_B$, ρ_B 可忽略, 则

$$p_1 - p_2 \approx \rho_A gR$$

(2) 若U型管的一端与被测流体相连接, 另一端与大气相通, 那么读数 R 就反映了被测流体的绝对压强与大气压之差, 也就是被测流体的**表压**。

(3) 当 $p_1 - p_2$ 值较小时, R 值也较小, 若希望读数 R 清晰, 可采取三种措施: **两种指示液的密度差尽可能减小; 采用倾斜U型管压差计; 采用微差压差计。**

4. 流体静力学方程的应用

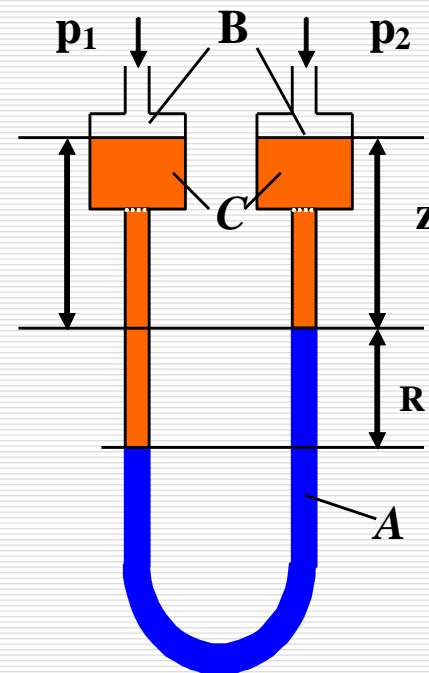
□ 双液体U型管压差计(微压差计)

U型管的两侧管的顶端增设两个小扩大室,其内径与U型管的内径之比 > 10 , 装入两种密度接近且互不相溶的指示液A和C, 且指示液C与被测流体B亦不互溶。

ρ_C 略小于 ρ_A

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C)gR$$

——微差压差计两点间压差计算公式



4. 流体静力学方程的应用

例题1-2：用2种压差计测量气体的微小压差 $\Delta P = 100 \text{ Pa}$

试问：

1) 用普通压差计，以苯为指示液，其读数 R 为多少？

3) 若用微差压差计，其中加入苯和水两种指示液，扩大室截面积远远大于U型管截面积，此时读数 R'' 为多少？
 R'' 为 R 的多少倍？

4. 流体静力学方程的应用

解：1) 普通管U型管压差计

$$R = \frac{\Delta P}{\rho_c g} = \frac{100}{879 \times 9.807} = 0.0116 \text{ m}$$

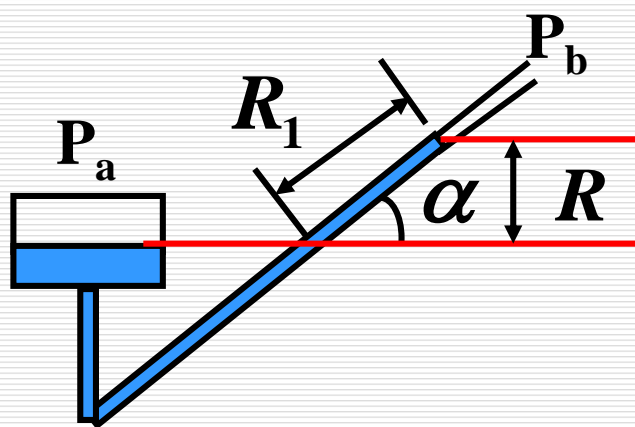
3) 微差压差计

$$R'' = \frac{\Delta P}{(\rho_A - \rho_c) g} = \frac{100}{(998 - 879) \times 9.807} = 0.0857 \text{ m}$$

故： $\frac{R''}{R} = \frac{0.0857}{0.0116} = 7.39$

4. 流体静力学方程的应用

□ 倾斜液柱压差计



$$R_1 = R / \sin \alpha$$

$$R = R_1 \sin \alpha$$

注：倾斜的目的放大压差计距离读数。

4. 流体静力学方程的应用

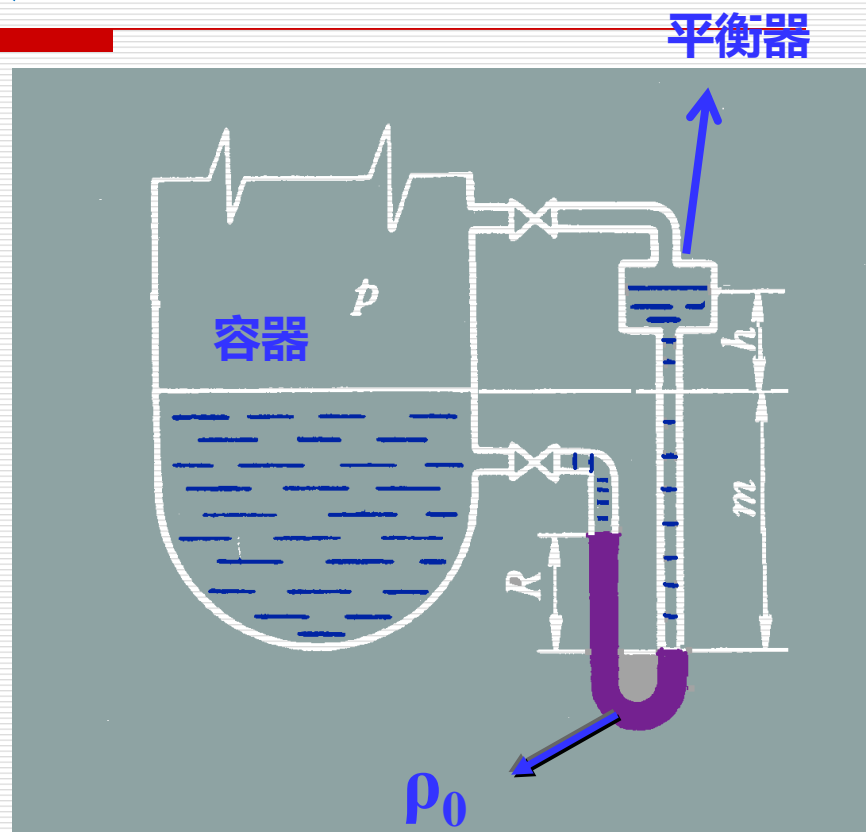
(2) 液位的测量和控制

□ 地上高大容器的液位计

$$h = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} R$$

压差计读数 R 反映出容器内的液面高度的变化。

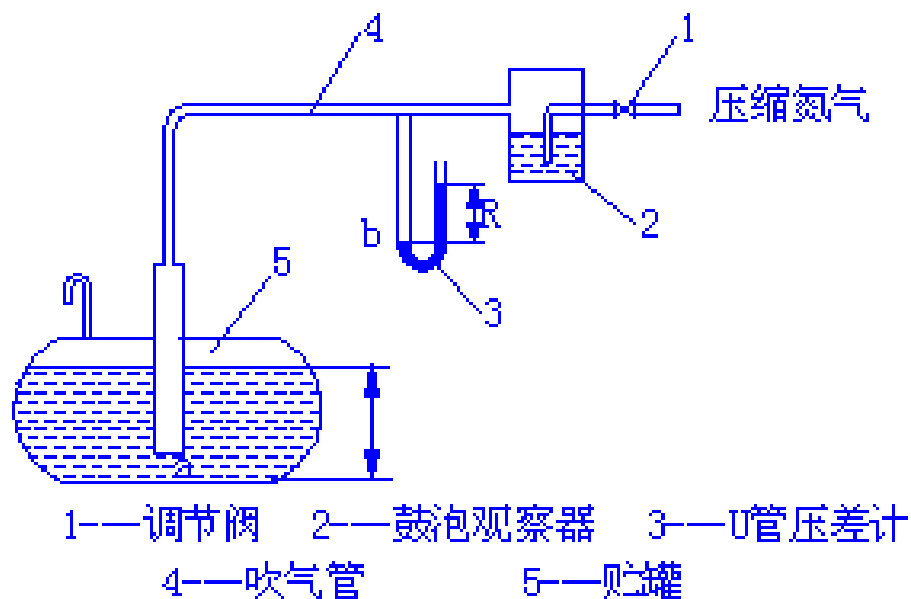
釜液面越高， h 越小，压差计读数 R 越小；当液面达到最高时， h 为零， R 亦为零。



4. 流体静力学方程的应用

□ 远距离测量液位计

压缩氮气自管口经调节阀通入，调节气体的流量使气流速度**极小**，只要在鼓泡观察室内看出有气泡缓慢逸出即可。



压差计读数 R 的大小，反映出贮罐内液面的高度。

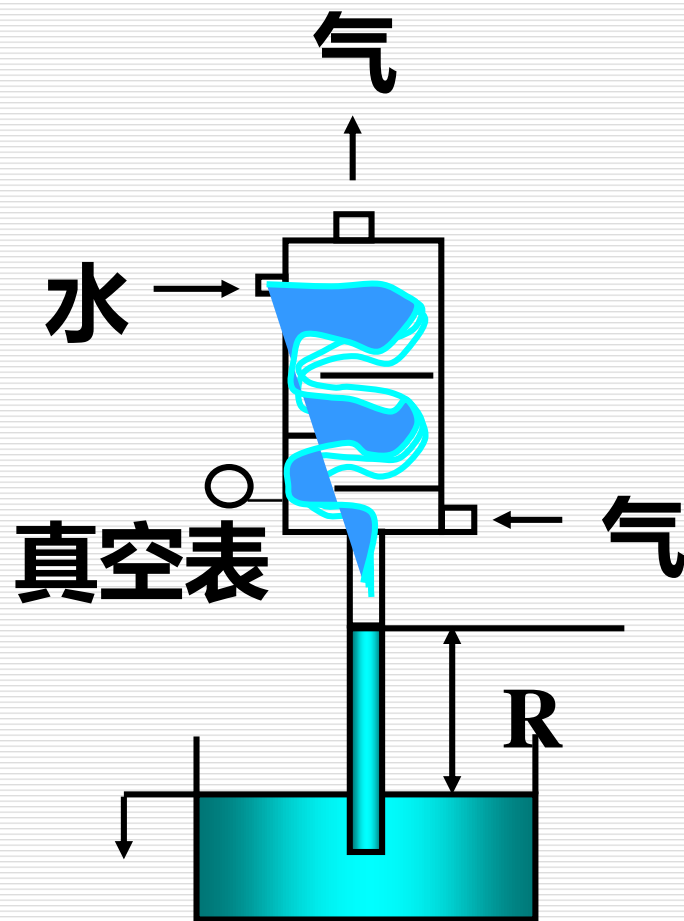
4. 流体静力学方程的应用

(3) 液封高度的计算

液封作用：

- 确保设备安全：当设备内压力超过规定值时，气体从液封管排出；
- 防止气柜内气体泄漏。

液封高度：
$$R = \frac{p(\text{表})}{\rho g}$$



例题1-6：已知：抽真空装置的真空表读数为80 kPa，求气分管中水上升的高度。

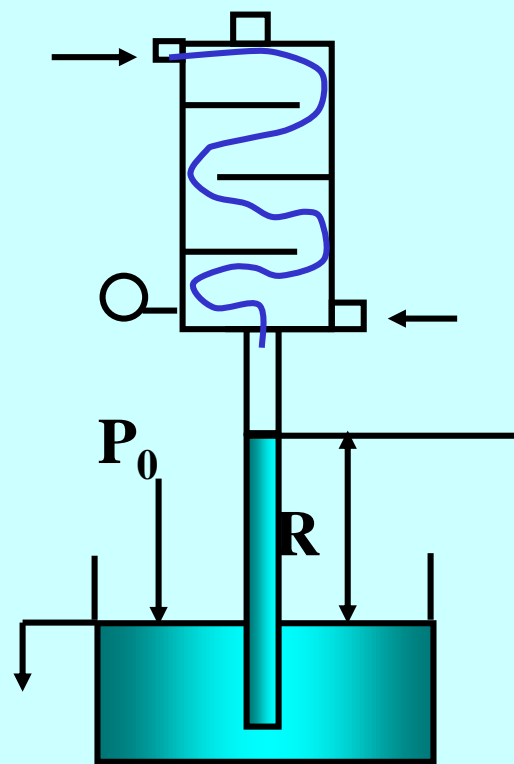
$$P_0 = P + \rho g R$$

P为装置内的绝对压强

$$R = \frac{P_0 - P}{\rho g}$$

$$P = P_0 - \text{真空度}$$

$$R = \frac{80000}{1000 \times 9.81} = 8.15m$$



思考题

- 连续介质假设及其意义是什么？
- 流体的绝对压强、表压强和真空度的关系？
- 流体静力学方程的推导、适用范围及其应用？

作业

□ 教材P54: 1-2, 1-4

如图所示的测压差装置中，U形管压差计中的指示液为水银，其密度为 ρ_{Hg} ，其他管内均充满水，其密度为 ρ_w ，U形管压差计的读数为 R ，两测压点间的位差为 h ，试求 a 、 b 两测压点间的压力差 $p_a - p_b$

