空气与气体动力学

张科

回顾：

1.流体、连续介质假设、质点

2.粘性、粘性系数、牛顿粘性定理 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ （理解、应用）

3.牛顿流体、理想流体

1.3 流体的物理学特性：

1.3.1粘性

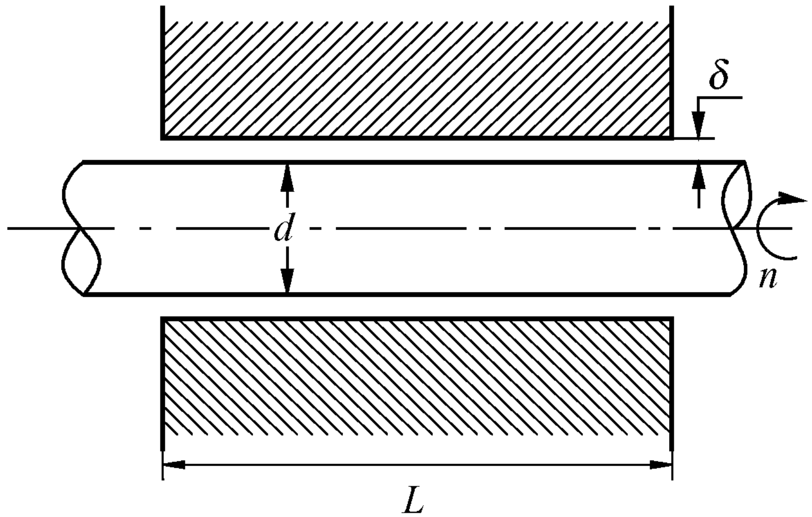
⑤ 理想流体：假想无粘性的流体，可忽略粘性的流体。

如？？

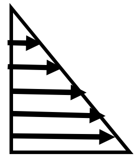
$$u\text{小，或}\frac{du}{dy}\text{小}$$

例　题

- 如图所示，转轴直径d=0.36m，轴承长度L=1m，轴与轴承之间的缝隙δ＝0.2mm，其中充满动力粘度μ＝0.72 Pa.s的油，如果轴的转速n=200rpm，求克服油的粘性阻力所消耗的功率。

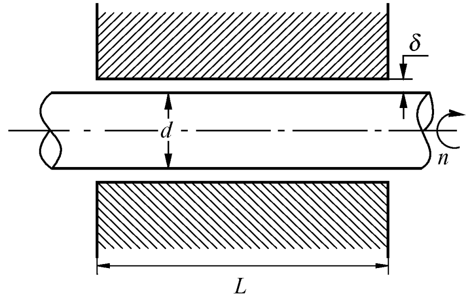


例　题



$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

解：油层与轴承接触面上的速度为零，与轴接触面上的速度等于轴面上的线速度：　（无滑移）



$$\upsilon = \frac{n\pi d}{60} = \frac{\pi \times 200 \times 0.36}{60} = 3.77 m/s$$

设油层在缝隙内的速度分布为直线分布，即 则轴表面上总的切向力为：

$$F = \tau A = \mu \frac{\upsilon}{\delta}(\pi . dL) = \frac{0.72 \times 3.77 \times \pi \times 0.36 \times 1}{2 \times 10^{-4}} = 1.535 \times 10^{4} (N)$$

克服摩擦所消耗的功率为：

$$N = F\upsilon = 1.535 \times 10^{4} \times 3.77 = 5.79 \times 10^{4} (Nm/s) = 57.9(kW)$$

1.3 流体的物理学特性：

1.3.2可压缩、热膨胀

$$\boldsymbol{\rho = f(P, T)}$$

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P dT$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T dP + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P dT$$

可压缩性 热膨胀性

- 可压缩性
  流体在外力作用下，其体积或密度可以改变的性质
- 热膨胀性
  流体在温度改变时，其体积或密度可以改变的性质

1.3 流体的物理学特性：

1.3.2可压缩、热膨胀

$$\frac{d\rho}{\rho}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right)_T dP+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_P dT$$

① 体积弹性模量

$$Ev=\rho\left(\frac{\partial P}{\partial\rho}\right)_T \quad \frac{dP}{d\rho/\rho}$$ 压强增量对密度相对变化之比

E_v大，不易压缩 ；水：$2.1\times 10^9 Pa$,空气：$1.0\times 10^5 Pa$

气体弹性与声速（扰动传播速度）有关，$c^2\propto\frac{\partial P}{\partial\rho}$

可压缩：$Ma=\frac{V}{c}>0.3$； 不可压缩： $Ma=\frac{V}{c}\le 0.3$

1.3 流体的物理学特性：

1.3.2可压缩、热膨胀

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T dP + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P dT$$

② 热膨胀系数

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P$$

水：$1.53 \times 10^{-4} K^{-1}$，空气： $3.5 \times 10^{-3} K^{-1}$

1.3 流体的物理学特性：

1.3.2可压缩、热膨胀

③ 完全气体状态方程

气体状态方程：$P = P(\rho, T)$

完全气体：假设分子为完全弹性的微小球形粒子，远离液态的气体。

完全气体：$P = \rho RT$

气体常数$R = {}^{\bar{R}}/_{M}$

空气 $R = {}^{8314J(kg\cdot K)}/_{28.97} = 287J(kg \cdot K)$

主观题 5分

设置

理想气体是什么？完全气体是什么？哪个有粘性？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

1.4 作用于流体上的力：

作用于流体上的力有哪些？

从便于写微积分公式的角度怎么分类？

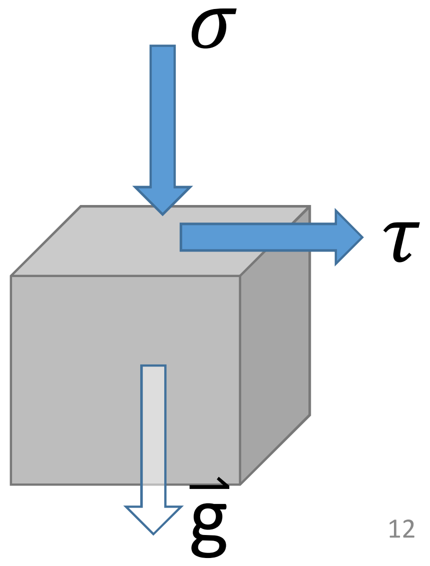
1.4 作用于流体上的力：

重力、惯性力、电磁力　非接触力，外力场作用，分布于体积

体积力（质量力）： $\vec{F}_V = \iiint_V \rho \, \vec{f}(x, y, z, t) dV$　$\vec{f} = \vec{g} = -g\vec{k}$

压力、拉力、剪切力　作用于表面，表面应力作用，分布于面积

表面力： $\vec{F}_S = \iint_S \vec{\tau} ds$　$\vec{F}_S = \iint_S \vec{\sigma}_n ds$



1.5 量纲与单位：

量纲：描述物理量的种类和性质(dimension)。

A *dimension* is the measure by which a physical variable is expressed quantitatively.

	长度	时间	质量	
	L	*T*	*M*	为基本量纲
单位：量（unit）	*m*	*s*	*kg*	国际单位

A *unit* is a particular way of attaching a number to the quantitative dimension.

量纲分析 *dimensional analysis*

主观题 1分

设置

密度ρ的国际单位是什么？量纲是什么？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

1.5 量纲与单位：

量纲一致性原理：*dimensionally consistent*

正确描述物理规律的方程，左右两侧量纲必须一致。

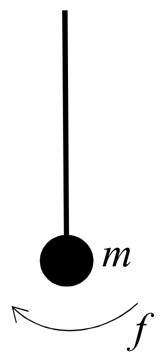
$$P_0 = P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g Z$$

$[ML^{-1}T^{-2}]$ $[ML^{-3}L^{2}T^{-2}]$ $[ML^{-3}LT^{-2}L]$

主观题 0.5分

设置

用量纲一致性原则解释f与m 无关？



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

作业：

复习笔记！

P27 . 1.16，1.19，

P29. 1.37，1.38

1. An early viscosity unit in the cgs system is the poise (abbreviated P), or g/(cm·s), named after J. L. M. Poiseuille, a French physician who performed pioneering experiments in 1840 on water flow in pipes. The viscosity of water (fresh or salt) at 293.16K=20°C is approximatelyμ=0.01 P. Express this value in SI。

二. 流体静力学

流体静力学：研究流体在外力作用下处于静止（平衡）态的特征。

流体相对某坐标系静止→流体处于平衡态

- 惯性系($\vec{a}=0$)
- 非惯性系($\vec{a}\neq 0$)

静止：
- 绝对静止
- 相对静止

质点间无相对运动！

流体力学分析方法、微分方程

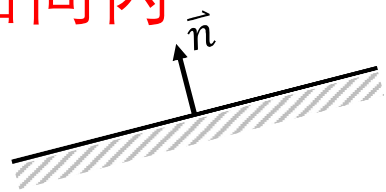
用途
- 液压机械，虹吸管等
- 不同高度下静止大气的压强、密度和温度等
- 大坝、桥梁等

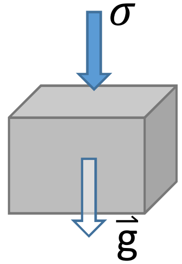
2.1流体静压强及其特性：

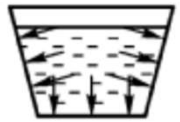
1. 静止流体不能承受剪切力（切应力），只存在正应力（法向）

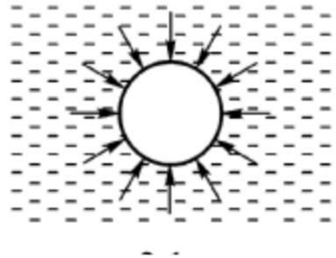
静压强，垂直表面向内

$$\vec{p}_n = -\vec{n}\,p$$





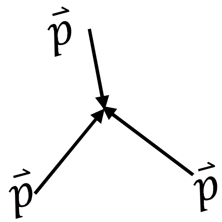


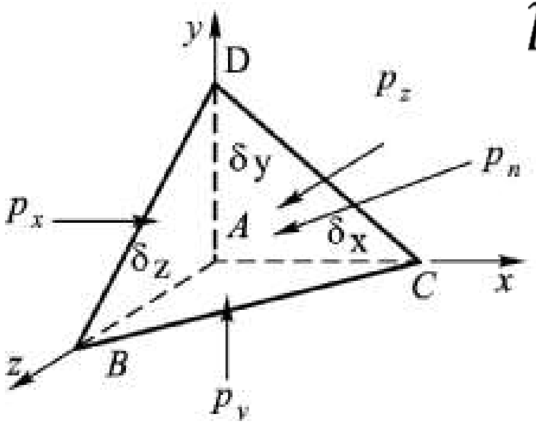


2. 过一点任意方向微元面上流体的静压强相同。

静压强仅和位置有关，与作用面方向无关。

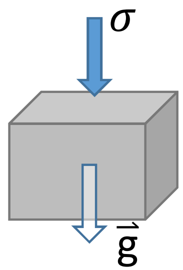
$$p = p(x, y, z, t)$$



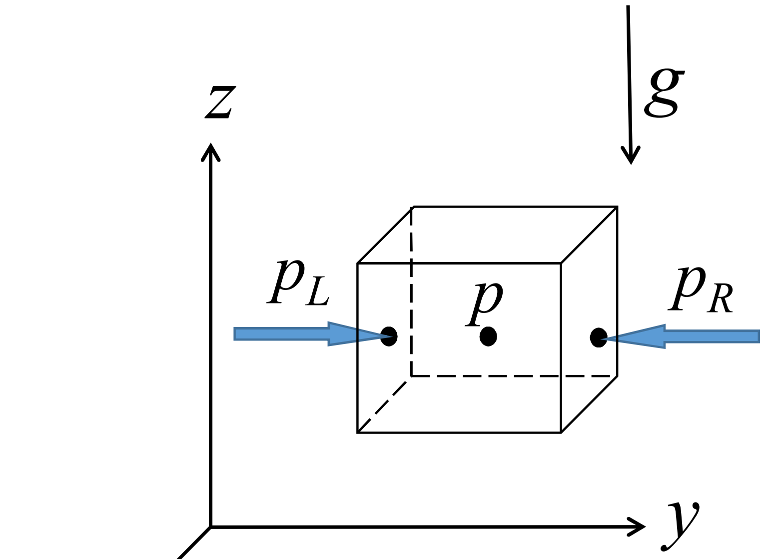


推导，P32，自学！！

2.2静止流体平衡微分方程 $(\vec{a}=0)$



微元体边长dx, dy, dz，重力沿z负向，中心点压强p



泰勒级数

$$p_L = p + \frac{\partial p}{\partial \mathrm{y}}\left(-\frac{dy}{2}\right)$$

$$p_R = p + \frac{\partial p}{\partial \mathrm{y}}\frac{dy}{2}$$

牛顿第二定律：$\vec{F} = m\vec{a} = 0$

y方向,平衡方程式:$F_L - F_R = 0$

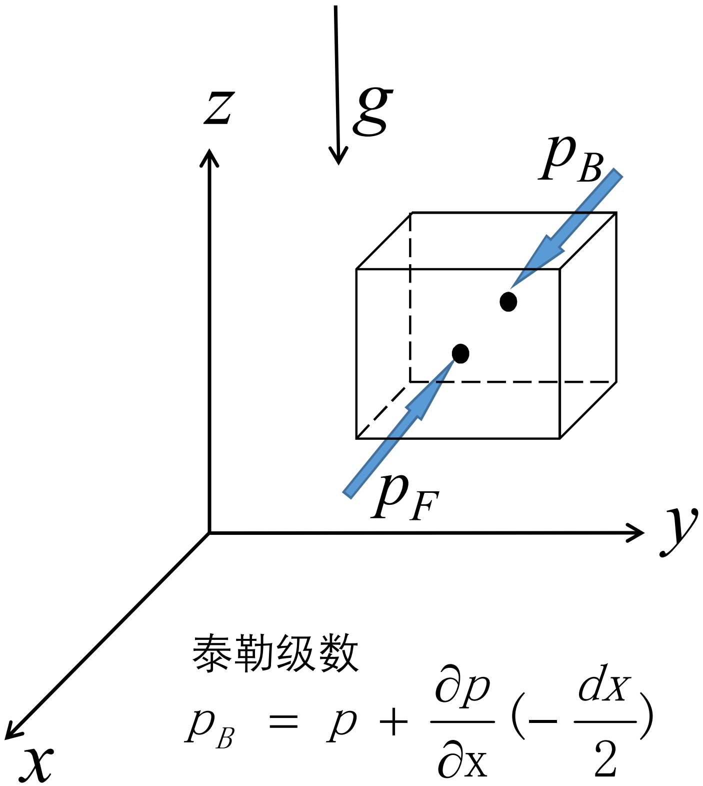
$$p_L dxdz - p_R dxdz = 0$$

$$\left(p - \frac{\partial p}{\partial y}\frac{dy}{2}\right)dxdz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial y}\frac{dy}{2}\right)dxdz = 0$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y}dxdydz = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \text{ -------- } ①$$

2.2静止流体平衡微分方程 $(\vec{a} = 0)$



泰勒级数

$$p_B = p + \frac{\partial p}{\partial x}\left(-\frac{dx}{2}\right)$$

$$p_F = p + \frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2}$$

x方向,平衡方程式:$F_B - F_F = 0$

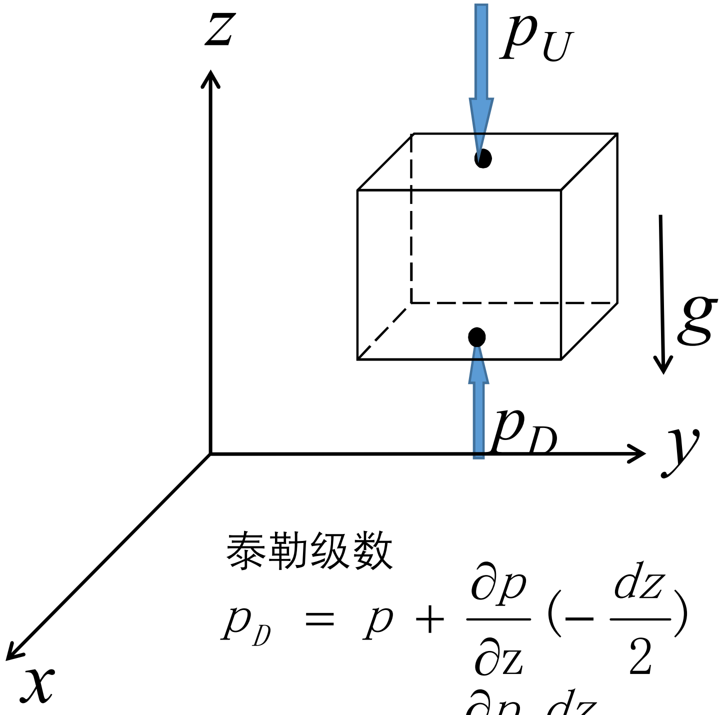
$$p_B dydz - p_F dydz = 0$$

$$\left(p - \frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2}\right)dydz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2}\right)dydz = 0$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x}dxdydz = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ -------- } ②$$

2.2静止流体平衡微分方程($\vec{a}=0$)



泰勒级数

$$p_D = p + \frac{\partial p}{\partial z}\left(-\frac{dz}{2}\right)$$

$$p_U = p + \frac{\partial p}{\partial z}\frac{dz}{2}$$

z方向,平衡方程式:$F_D - F_U = 0$

$$p_D dxdy - p_U dxdy - \rho g dz dy dz = 0$$

$$\left(p - \frac{\partial p}{\partial z}\frac{dz}{2}\right)dxdy - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z}\frac{dz}{2}\right)dxdy - \rho g dxdydz = 0$$

$$\left(-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g\right)dxdydz = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad ------- \quad ①$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad ------ \quad ②$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g = -\gamma \quad -------- \quad ③$$

①+②+③→ $\boxed{\frac{dp}{dz} = -\rho g = -\gamma}$ 静止流体,仅重力,沿z负向

投票(匿名) 最多可选1项

设置

泰勒级数展开是否理解，掌握？

A 是

B 否

C 还需课后复习

提交

主观题 2分

设置

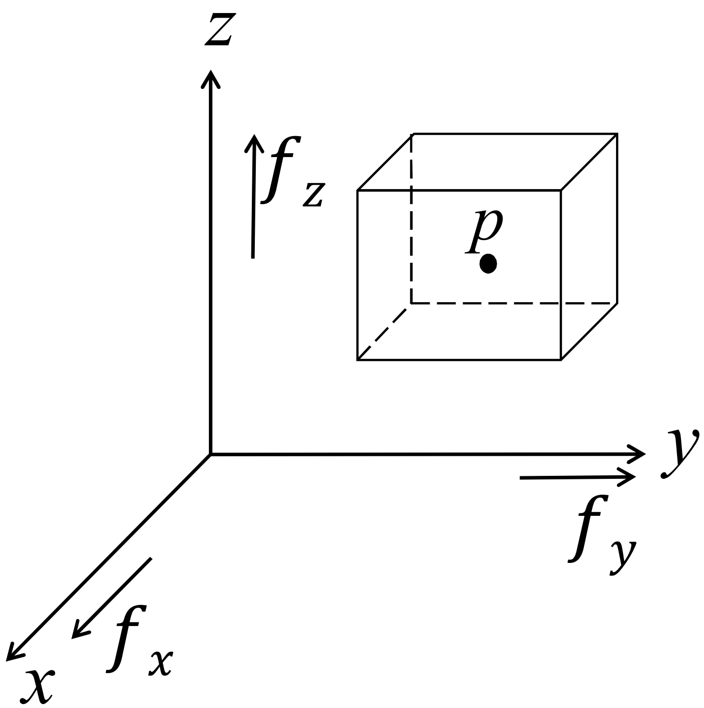
如果重力沿其他方向，静平衡微分方程如何变化？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

2.2静止流体平衡微分方程 ($\vec{a} = 0$)

单位质量力的投影 f_x 、f_y、f_z



$$\Rightarrow f_x - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$f_y - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} = 0, f_z - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

$$\vec{f} - \frac{1}{\rho}\nabla p = 0$$

2.3均质流体静平衡 (书2.4)

重力场中静止流体内压强分布方程：

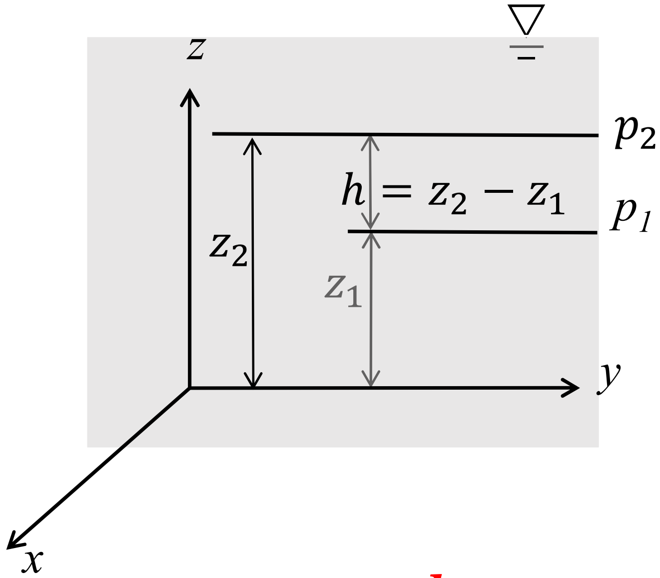
$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

$$dp = -\rho g dz$$

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = \int_{z_1}^{z_2} -\rho g dz$$

$$p_2 - p_1 = -\rho g (z_2 - z_1)$$

$$p_2 - p_1 = -\rho g h$$



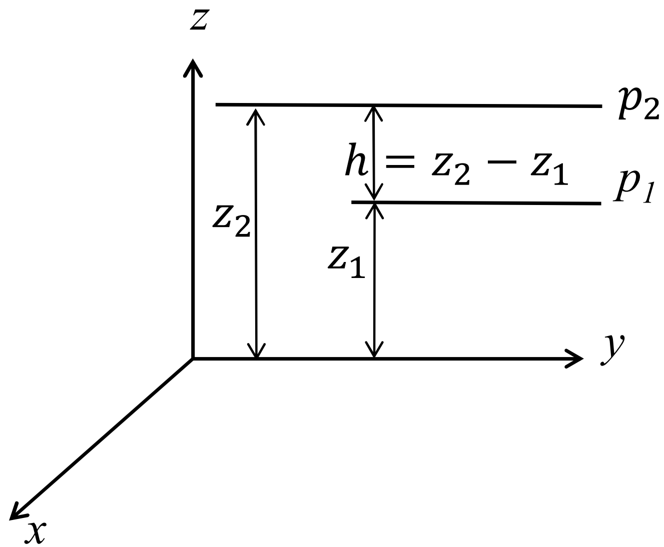
$$p_1 - p_2 = \rho g h$$

流体静平衡方程 Hydra-static equation

! $\rho = C$, 重力沿z向下!

2.3均质流体静平衡 (书2.4)

大气压强分布：



p, ρ, T为变量

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

$$p = \rho R T$$

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{pg}{RT}$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R}\frac{dz}{T}$$

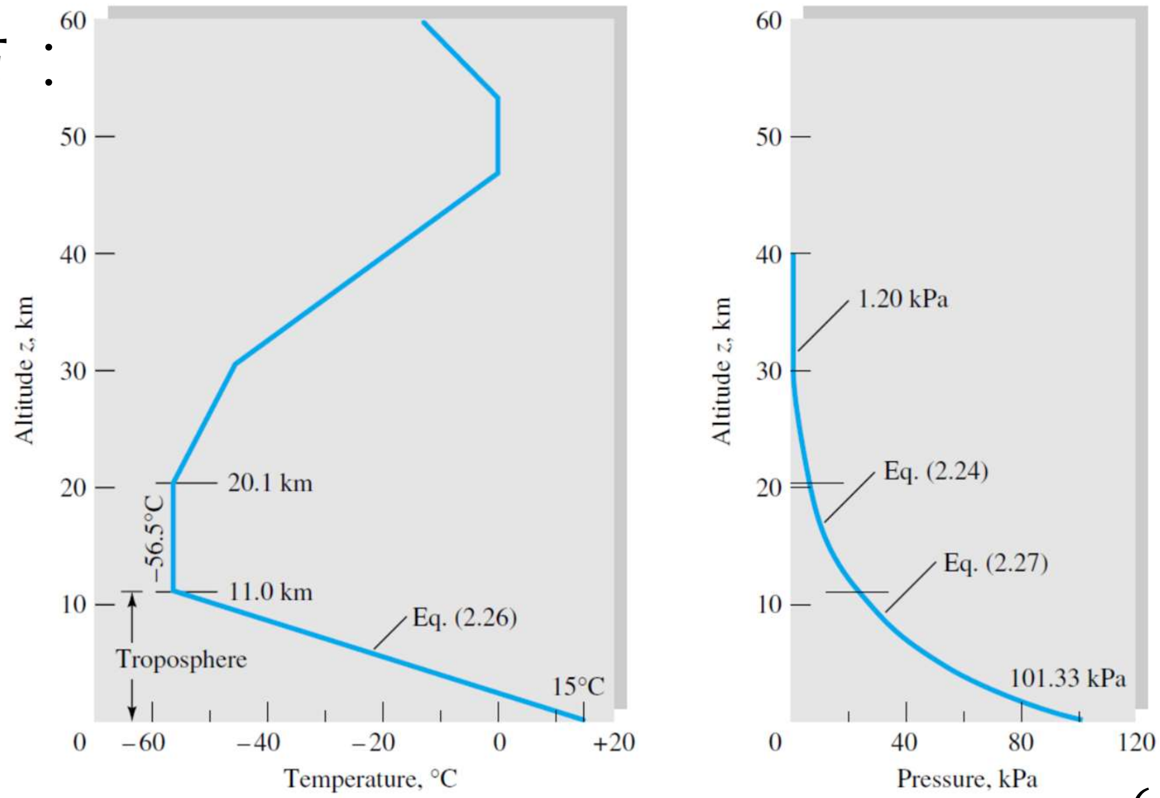
$$\int_{p_1}^{p_2}\frac{dp}{p} = ln\frac{p_2}{p_1} = \int_{z_1}^{z_2} -\frac{g}{R}\frac{dz}{T}$$

$$T = T_0 - \alpha z$$

$$p_2 = p_1 \exp[-\frac{g(z_2 - z_1)}{RT_0}]$$

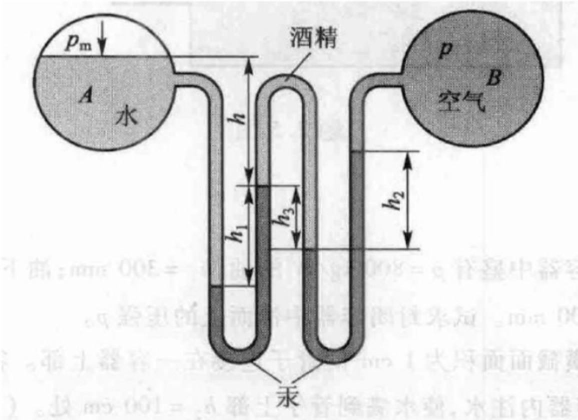
2.3均质流体静平衡 (书2.4)

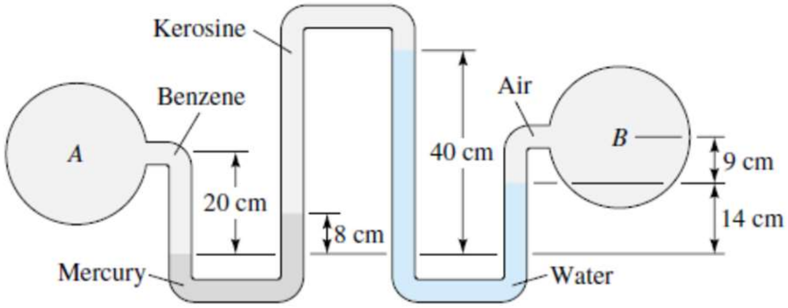
大气压强分布：



$$T = T_0 - \alpha z \qquad p_2 = p_1 \exp\left[-\frac{g(z_2 - z_1)}{RT_0}\right]$$

2.4应用（测压计）（书2.5） $p_2 - p_1 = -\rho g(z_2 - z_1)$





P2.31

步骤：

1.选参考点z=0；

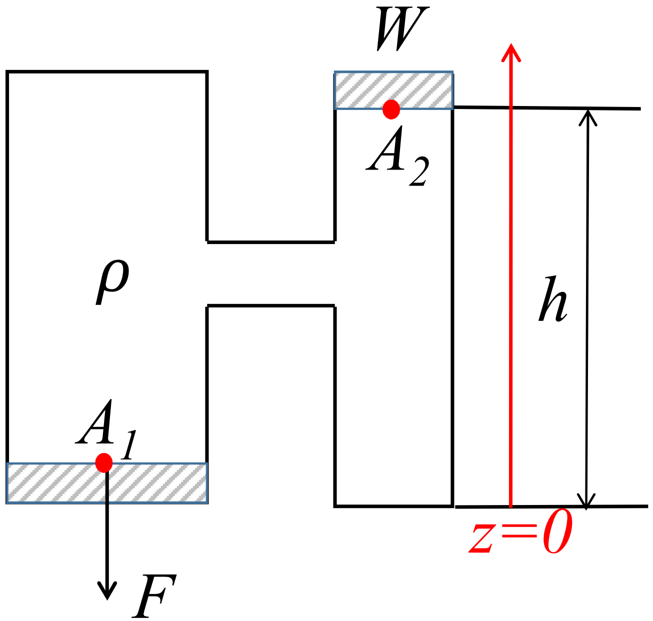
2.标点：交界面、感兴趣点;

3.用方程。

2.4应用（测压计）

$$p_2 - p_1 = -\rho g(z_2 - z_1)$$

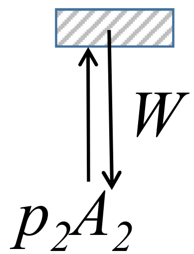
- What weight W is required to exert given F value?



解：1.选液面最低处为z=0处；

2.选点1、2；

3. @*2：$W=p_2A_2$ -------- ①



@*1：$F=p_1A_1$ -------- ②

1与2间：$p_2 - p_1 = -\rho g(z_2 - z_1)$

$= -\rho g h$ ------ ③

条理清晰，扣公式，少想象。

①+②+③→ $W=\frac{F}{A_1}A_2-\rho g h A_2$

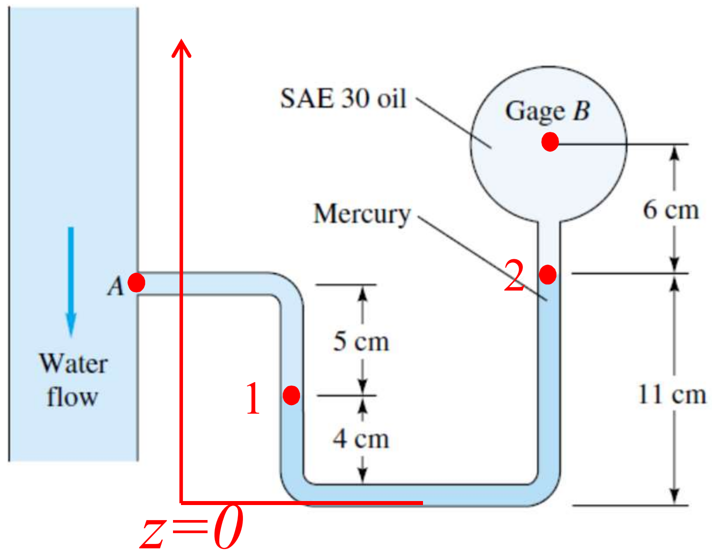
2.4应用（测压计）

$\gamma_{water} = 9790\ N/m^3$ $\gamma_{mercury} = 133{,}100\ N/m^3$ $\gamma_{oil} = 8720\ N/m^3$

$p_A = 96{,}351\ Pa = 96.4\ kPa$

EXAMPLE 2.4

Pressure gage *B* is to measure the pressure at point *A* in a water flow. If the pressure at *B* is 87 kPa, estimate the pressure at *A*, in kPa. Assume all fluids are at 20°C. See Fig. E2.4.



解：1.选液面最低处为z=0处；

2.选点A、1、2、B；

3. A与1间：

$$p_A - p_1 = -\rho_W g(z_A - z_1) = -\rho_W g h_W \quad ①$$

1与2间：

$$p_2 - p_1 = -\rho_M g(z_2 - z_1) = -\rho_M g h_M \quad ②$$

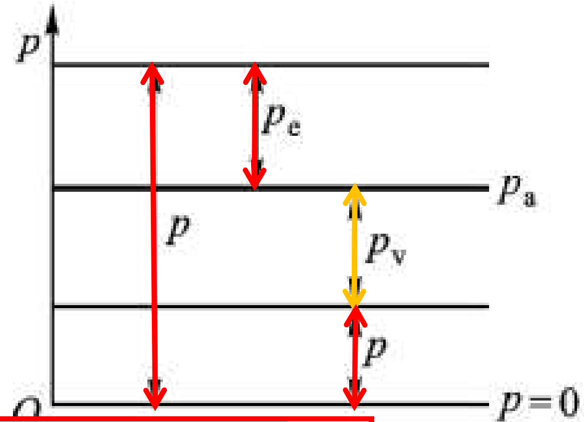
B与2间：

$$p_B - p_2 = -\rho_0 g(z_B - z_2) = -\rho_0 g h_0 \quad ③$$

①+②+③→ $$p_A = p_B + \rho_0 g h_0 + \rho_M g h_M - \rho_W g h_W$$

2.4应用（测压计）

绝对压强、计示（表）压强、真空压强：



绝对压强p_{abs}：以完全真空为基准计量的压强 $p_{\mathrm{abs}} = p$

计示压强p_{gage}：以当地大气压强为基准计量的压强 $p_{gage} = p_e = p - p_a$

真空压强p_v： $p_v = p_a - p$

相对压强

1 工程大气压＝ $9.80665 \times 10^4 Pa$ （公斤每平方厘米）

1 标准大气压＝ $1.01325 \times 10^5 Pa$

1 $bar = 10^5 Pa$

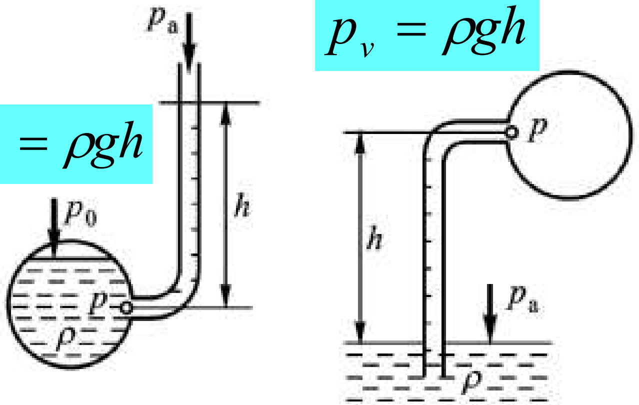
2.4应用（测压计）　相对！！

液柱式测压计：

1. 单管式测压计

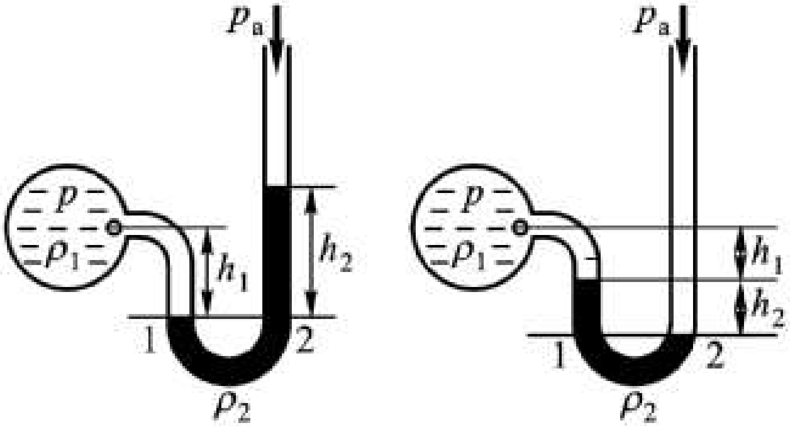
$$p_e = \rho g h$$

$$p_v = \rho g h$$



(a)　(b)

2. U形管测压计



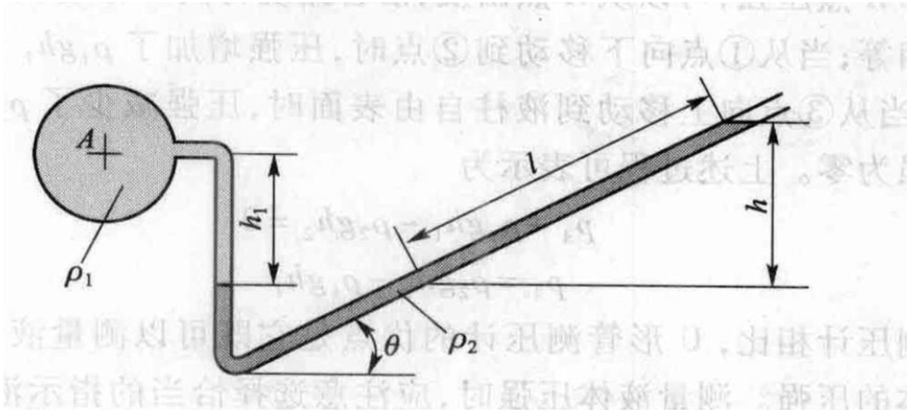
$$p_e = \rho_2 g h_2 - \rho_1 g h_1$$

$$p_v = \rho_2 g h_2 + \rho_1 g h_1$$

2.4应用（测压计）

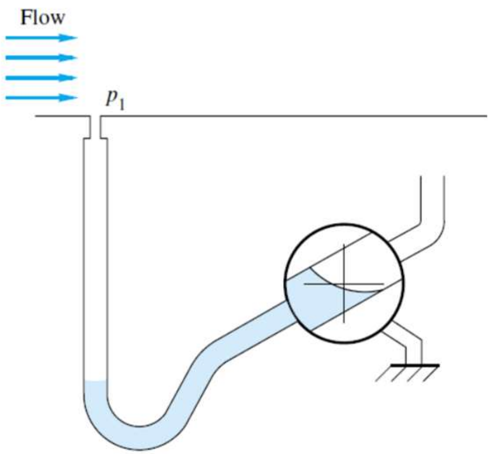
液柱式测压计：

3. 斜管式测压计



$$p_A = \rho_2 g l \sin\theta - \rho_1 g h_1 \approx \rho_2 g l \sin\theta$$

基于重力（gravity-based）

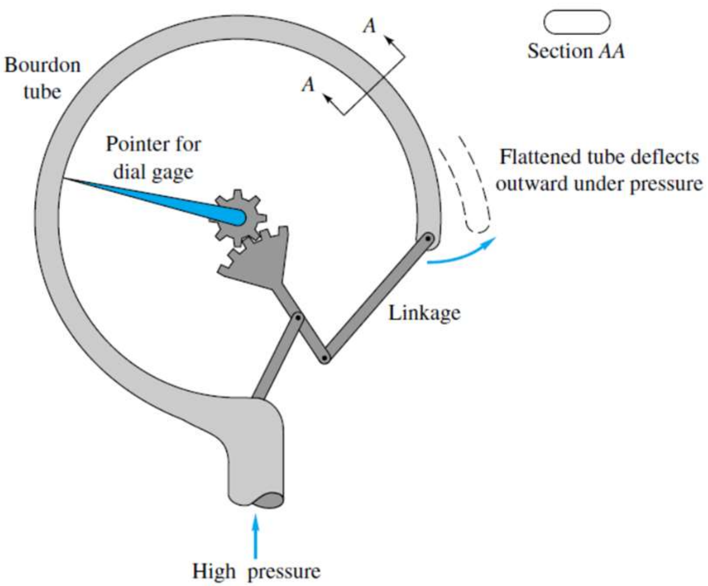


(a)

2.4应用（测压计）

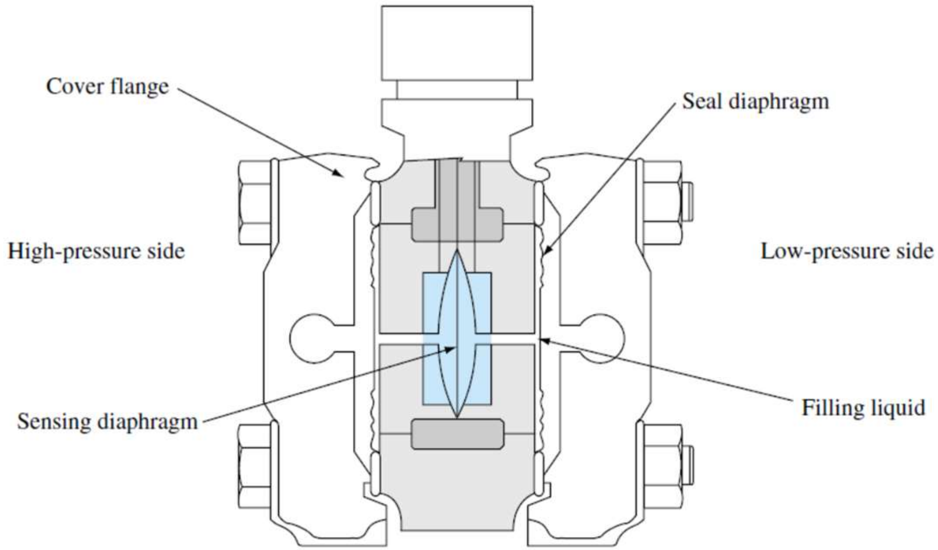
弹性变形（elastic deformation)

Elastic deformation: bourdon tube (metal and quartz), diaphragm, bellows, strain-gage, optical beam displacement.



压电传感器（electric output)

Electric output: resistance (Bridgman wire gage), diffused strain gage, capacitative, piezoelectric, magnetic inductance, magnetic reluctance, linear variable differential transformer (LVDT), resonant frequency.



作业:

复习笔记!

P27 . 1.16， 1.19,

P29. 1.37， 1.38

1. An early viscosity unit in the cgs system is the poise (abbreviated P), or g/(cm·s), named after J. L. M. Poiseuille, a French physician who performed pioneering experiments in 1840 on water flow in pipes. The viscosity of water (fresh or salt) at 293.16K=20°C is approximately μ=0.01 P. Express this value in SI。

作业：

复习笔记！

P64 . 2.8，2.10，2.13

回顾：

1.理想气体、流体可压缩性、热膨胀性、完全气体

2.流体受力分类、量纲与单位

3.静平衡微分方程$\frac{dp}{dz}$=-ρg、均质流体平衡方程$(p_2-p_1)=-\rho g(z_2-z_1)$、大气压强变化

4.测压计应用、绝对压强、计示压强、真空压强