流体力学

山东建筑大学热能工程学院

张浩：

电话： **13156191582**

Email: qdzhanghao@126.com

流体力学的研究对象

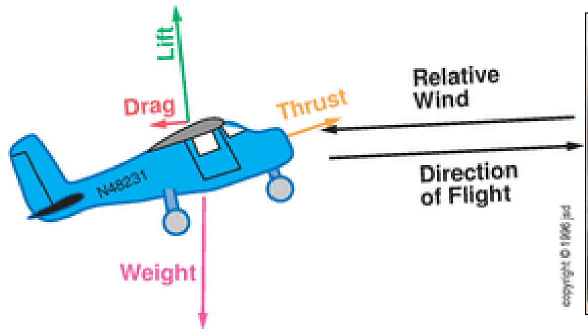
流体力学是近代力学的一大分支，它是研究流体的平衡和机械运动规律以及流体与周围物体之间相互作用的科学，主要是确定流体的速度分布，压强分布与能量损失，以及流体与固体相互间的作用力与作用力矩。

流体力学中研究得最多的流体是水和空气。除水和空气以外流体还包括作为汽轮机工作介质的水蒸汽、润滑油、石油、含泥沙的水体、血液、熔化状态下的金属和燃烧后产生的成分复杂的气体，高温条件下的等离子体等等。

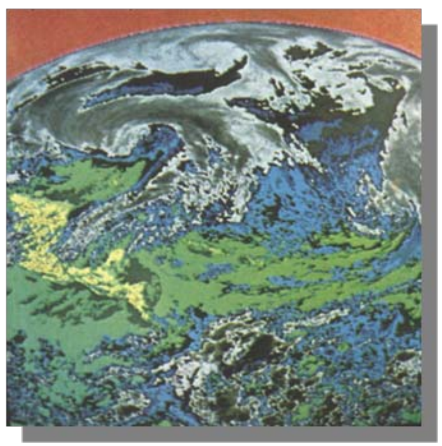
流体力学在工程中的应用

航空航天航海

海洋平台

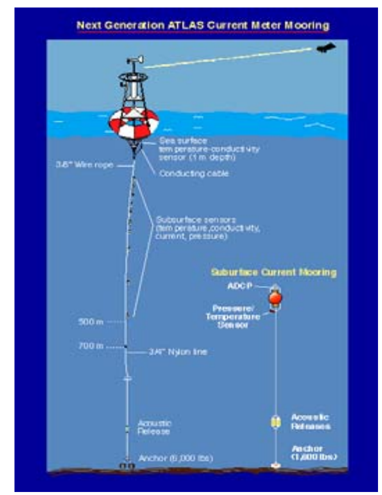


船舶运动



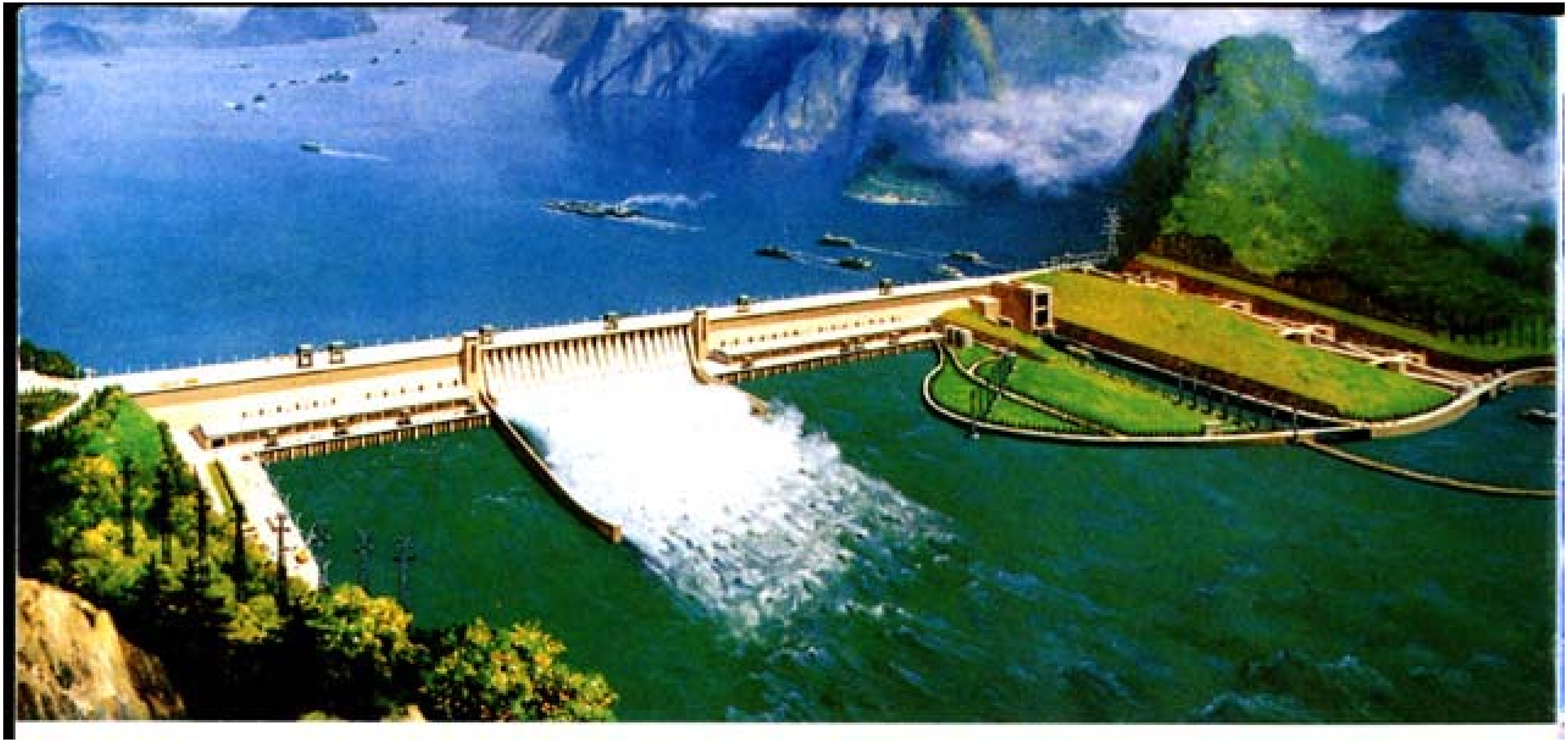
气象云图

潜器



浮标

例一：水利工程一三峡工程

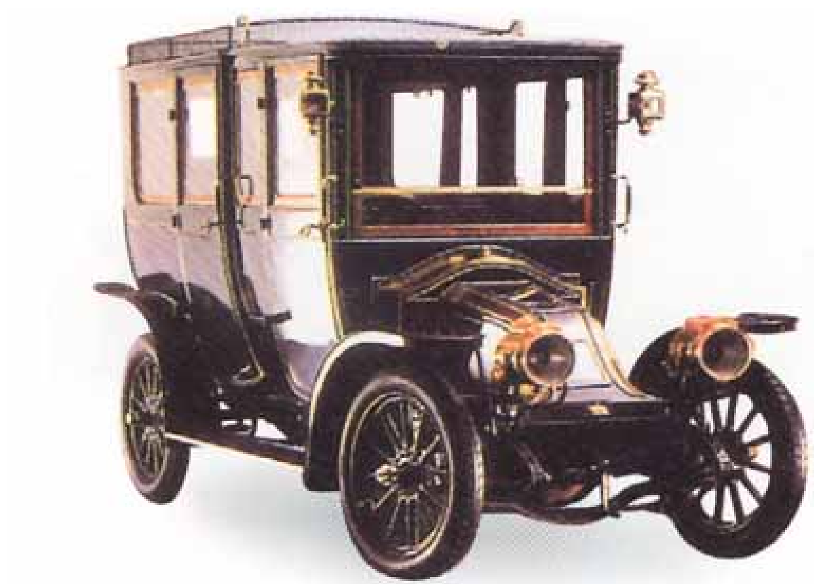


当渲泄洪水时，必须确定校核大坝所能够通过流量，以确保大坝安全泄洪；或已知泄量，确定大坝的溢流宽度。

例二：应用高压水射流技术对油井岩石割缝

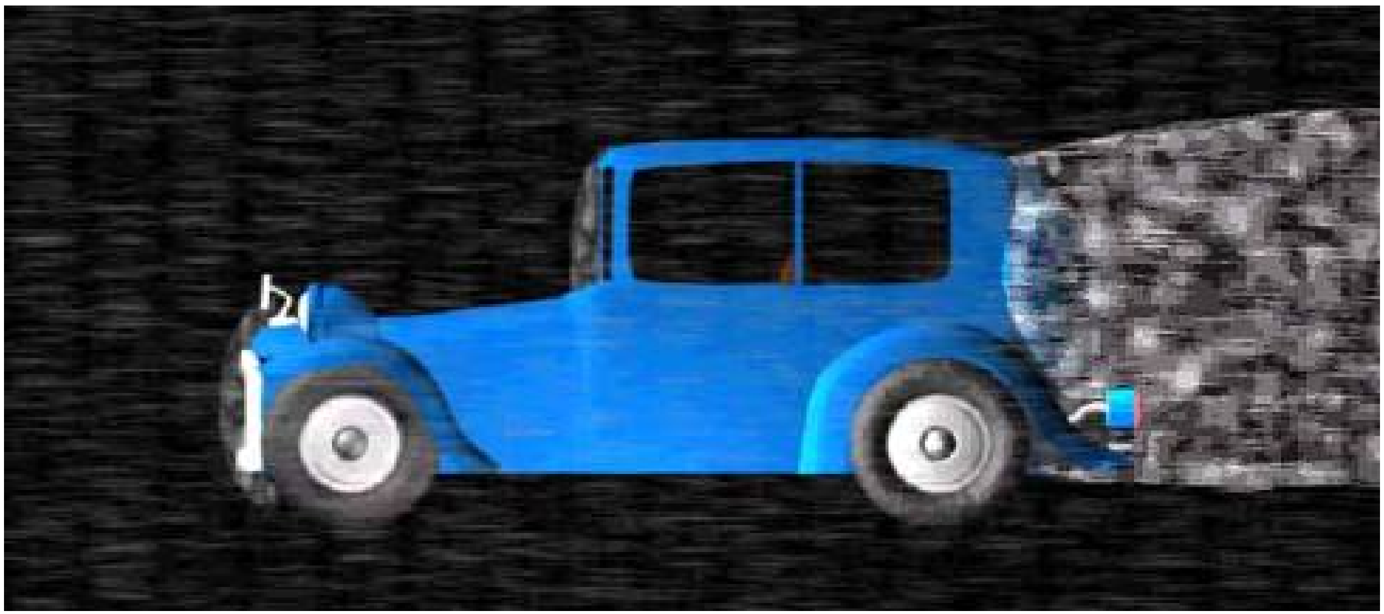
例三：汽车阻力来自前部还是后部？

- 汽车发明于19世纪末，当时人们认为汽车的阻力主要来自前部对空气的撞击，因此早期的汽车后部是陡峭的，称为箱型车，阻力系数C_D很大，约为0.8。



例三：汽车阻力来自前部还是后部？

- 实际上汽车阻力主要来自后部形成的尾流，称为形状阻力。



例三：*汽车阻力来自前部还是后部？*

- 20世纪30年代起，人们开始运用流体力学原理改进汽车尾部形状，出现甲壳虫型，阻力系数降至0.6。

例三：汽车阻力来自前部还是后部？

- 20世纪50－60年代改进为船型，阻力系数为0.45。

例三：汽车阻力来自前部还是后部？

- 80年代经过风洞实验系统研究后，又改进为鱼型，阻力系数为0.3。

- **以后进一步改进为楔型，阻力系数为0.2。**

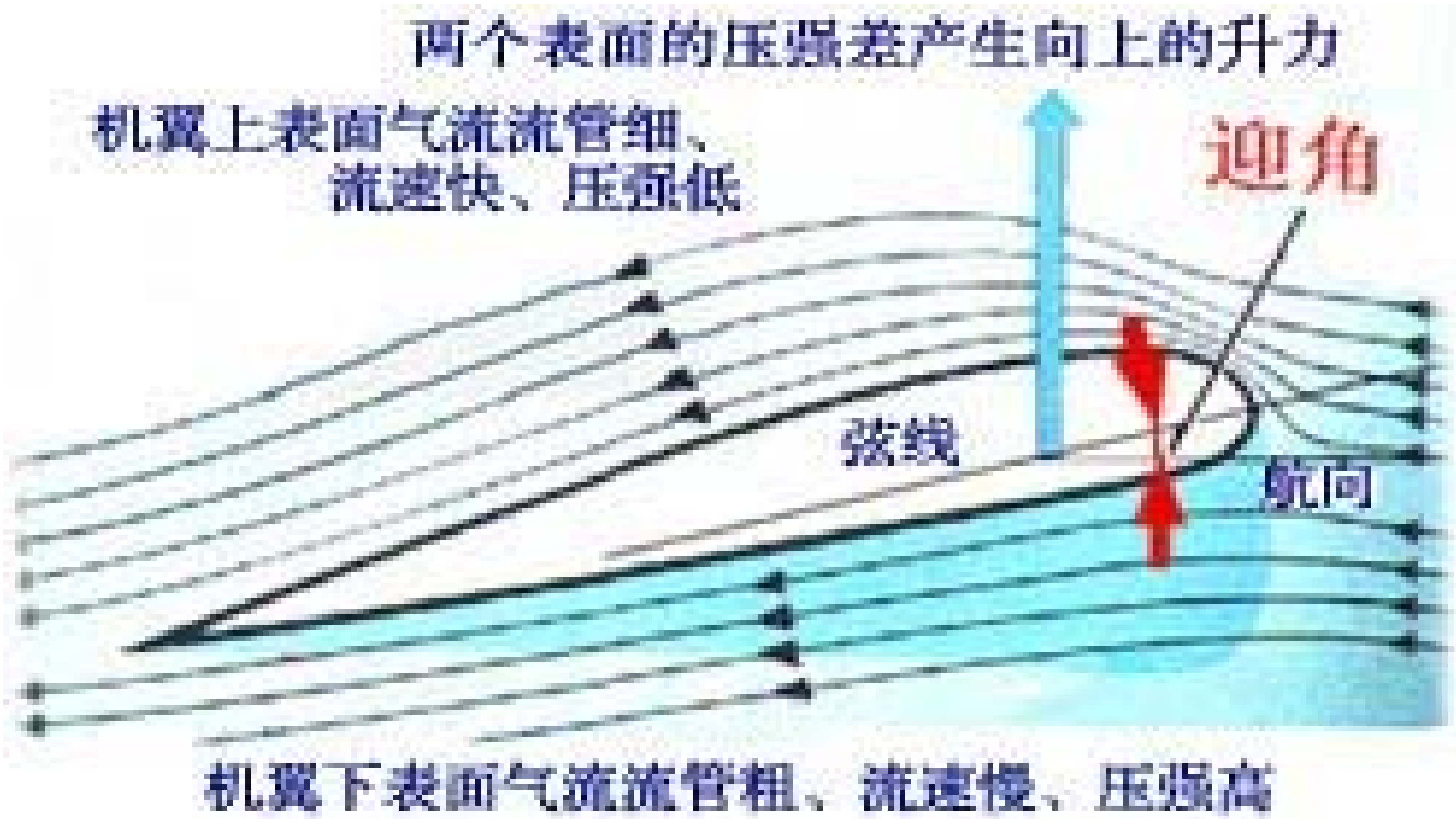
例三：汽车阻力来自前部还是后部？

- 90年代后，科研人员研制开发的未来型汽车，阻力系数仅为0.137。

经过近80年的研究改进，汽车阻力系数从0.8降至0.137，阻力减小为原来的1/5 。

目前，在汽车外形设计中流体力学性能研究已占主导地位，合理的外形使汽车具有更好的动力学性能和更低的耗油率。

例四：机翼升力来至下部还是上部?



足球

乒乓球

羽毛球

排球

网球

例五：大部分竞技体育项目与流体力学有关

赛艇

游泳

铁饼

赛车

赛跑

标枪

高尔夫球

例六：生物仿生学

信天翁滑翔

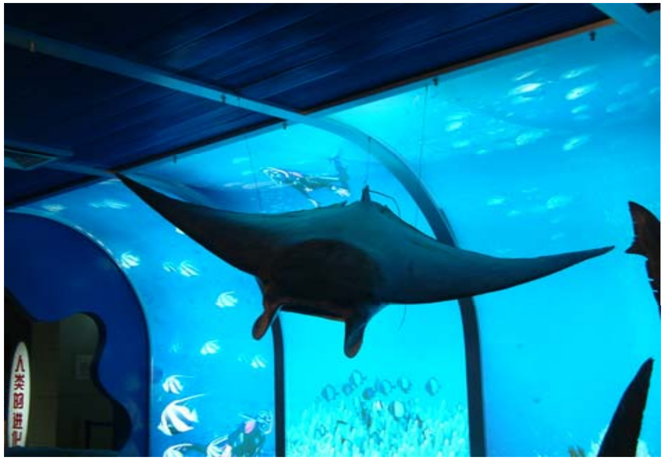
应用广泛已派生出很多新的分支：

电磁流体力学、生物流体力学

化学流体力学、地球流体力学

高温气体动力学、非牛顿流体力学

爆炸力学、流变学、计算流体力学等



- 建环、土木、给排水专业中的流体力学问题：

- 热的供应、空气的调节、燃气的输配
- 排毒除湿、除尘降温的计算等
- 通风系统工程设计、通风管网设计
- 供、排水系统的设计、排水泵的选择等
- 压气的供应、压气的输配
- 城市防洪工程设计、城市给排水管网设计
- 水塔高度的计算、水泵的选择等
- 室内给排水设计、地基降水和抗渗设计
- 桥涵孔径水力设计、隧道地下工程的通风等

流体力学的研究方法

理论分析、实验研究和数值计算相结合。三个方面是互相补充和验证，但又不能互相取代的关系。

理论分析：基本假设 → 数学模型 → 解析表达

数值计算：数学模型 → 数值模型 → 数值解

实验研究：模型试验 → 量测数据 → 换算到原型

目　录

流体力学

第一章 绪论

第一章 绪论

- §1—1 作用在流体上的力
- §1—2 流体的主要力学性质
- §1—3 流体的力学模型
- §1—4 本章习题

§1-1 作用在流体上的力

流体每一质点无论处于运动或平衡状态，都受到各种力。按力的表现形式分为质量力和表面力两类。取体积为ΔV的任意微团进行研究。

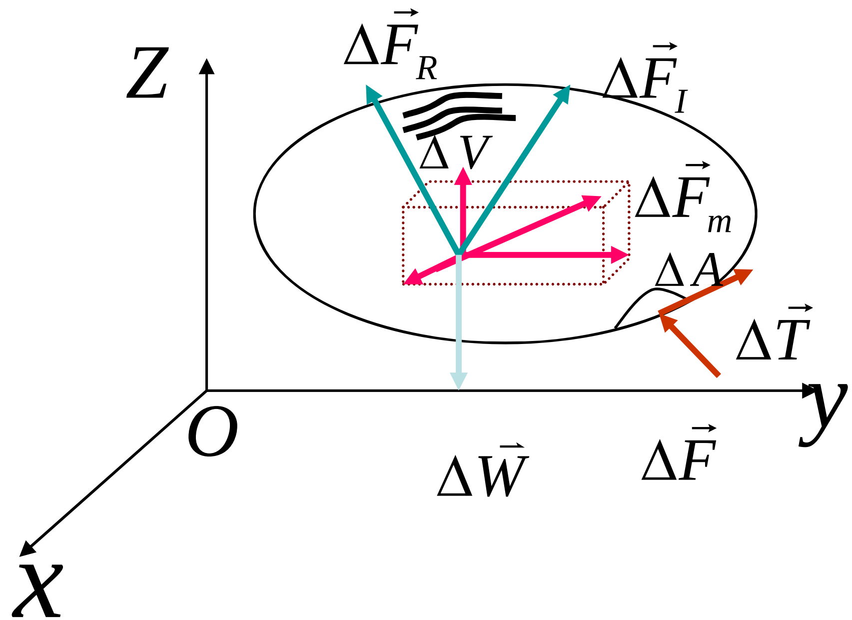


图 质量力与表面力

一、质量力

与流体微团质量成正比并且集中作用在微团质量中心上的力称为质量力。

质量力：

- 重力 $\Delta\vec{W} = \Delta m\,\vec{g}$
- 直线运动惯性力 $\Delta\vec{F} = \Delta m\,\vec{a}$
- 离心惯性力 $\Delta\vec{F}_R = \Delta m\,\vec{r}\,\omega^2$
- --- ---

单位质量流体所受的质量力称为单位质量力，记作

$$\overrightarrow{f_m} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

$$\overrightarrow{f_m} = \lim_{\Delta m \to 0} \frac{\Delta \vec{F}_m}{\Delta m} = \frac{d\vec{F}_m}{dm}$$

式中

Δm——流体微元体的质量；

$\Delta \vec{F}_m$——作用在该微元体上的质量力；

$$d\vec{F}_m = dm \cdot \overrightarrow{f_m} = dm \cdot (X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k})$$

X、Y、Z 为单位质量力在 x, y, z 轴的投影。

二、表面力

大小与流体表面积成正比而且分布作用在流体表面上的力称为表面力。

按其作用方向分类：

a.沿表面内法线方向的压力；

b.沿表面切向的摩擦力。

在流体微团上取微元面积ΔA，设作用在 ΔA上的微小压力 $\Delta\vec{F}$，微小切力$\Delta\vec{T}$。

则各点处的压应力为：

$$\vec{p}=\lim_{\Delta A\to 0}\frac{\Delta\vec{F}}{\Delta A}$$

故表面上的压力为：

$$\vec{F}=\vec{p}\cdot A$$

各点处的切应力为：

$$\vec{\tau}=\lim_{\Delta A\to 0}\frac{\Delta\vec{T}}{\Delta A}$$

故表面上的切力为：

$$\vec{T}=\vec{\tau}\cdot A$$

§1-2 流体的主要力学性质

一、惯性

二、重力特性

三、粘性

四、压缩性和热涨性

五、表面张力特性

一、惯性

在流体中任取一个流体微团A，其微元体积为 ΔV, 微元质量为Δm 。当微元无限小而趋近$P(x, y, z)$ 点成为一个质点时，

定义:

一点上流体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

一点上流体的比容为

$$\upsilon = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta V}{\Delta m} = \frac{dV}{dm}$$

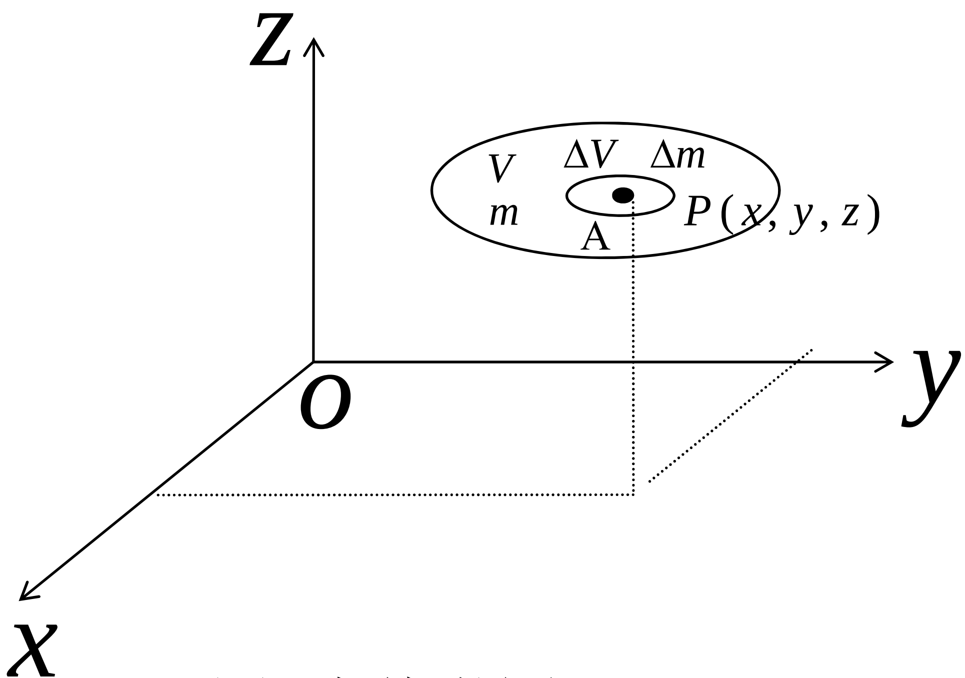


图 流体微团

二、相对密度

相对密度：液体质量与同体积 $4^{o}C$ 蒸馏水质量之比。即

$$d=\frac{m}{m_w}=\frac{\rho}{\rho_w}=\frac{\upsilon_w}{\upsilon}$$

式中

d —流体相对密度；

w — $4^{o}C$ 蒸馏水的相应物理量。

三、粘滞性

粘性是流体抵抗变形的能力，它是流体的固有属性。

一、牛顿内摩擦定律

流体粘性是由于流体分子间的引力以及分子热运动产生动量交换，而形成的并因此产生内摩擦力。

1686年牛顿提出牛顿内摩擦定律。

- 当液体处在运动状态时，质点间要产生抵抗相对运动的内摩擦力，这种性质称为液体的粘滞性，此内摩擦力也称为粘滞力。
- 粘滞性产生的物理原因是分子引力。
- 由于分子引力的存在，出现边界滞水作用。
- 边界滞水作用导致流速分布不均匀，相邻液层之间出现相对运动，从而产生抵抗相对运动的内摩擦力。
- 内摩擦切应力总是对运动的水流做负功，导致机械能损失。
- 粘滞性的存在是水流运动过程中能量损失的根源。

实验方法:

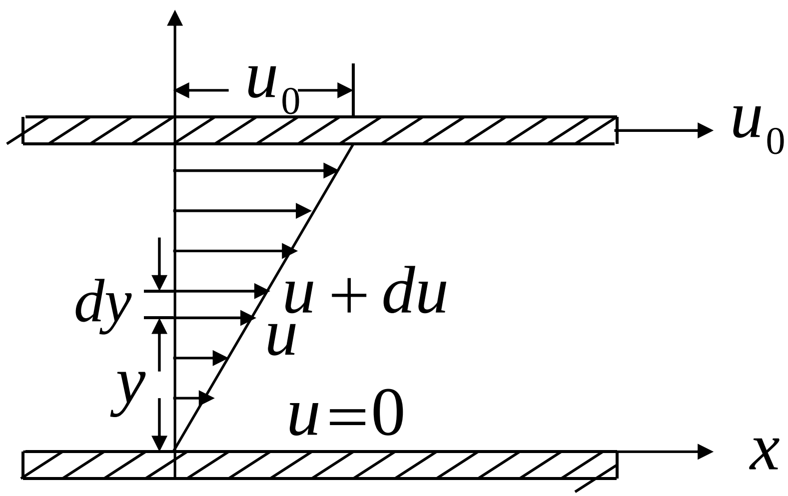


图 速度分布规律

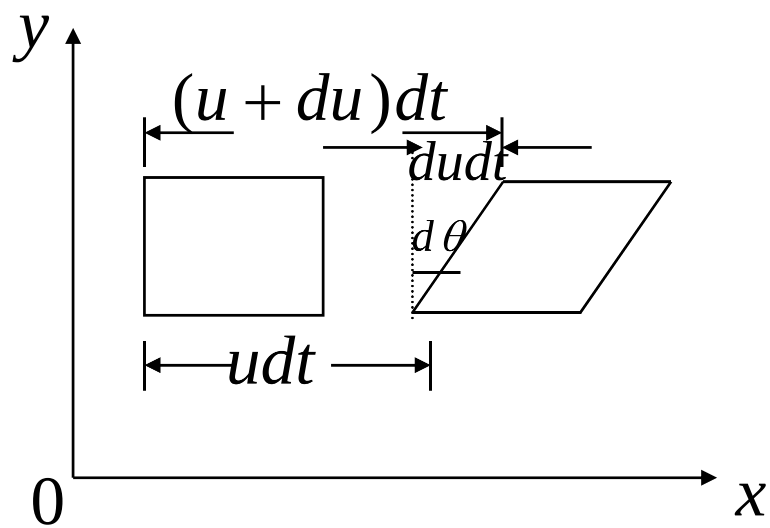
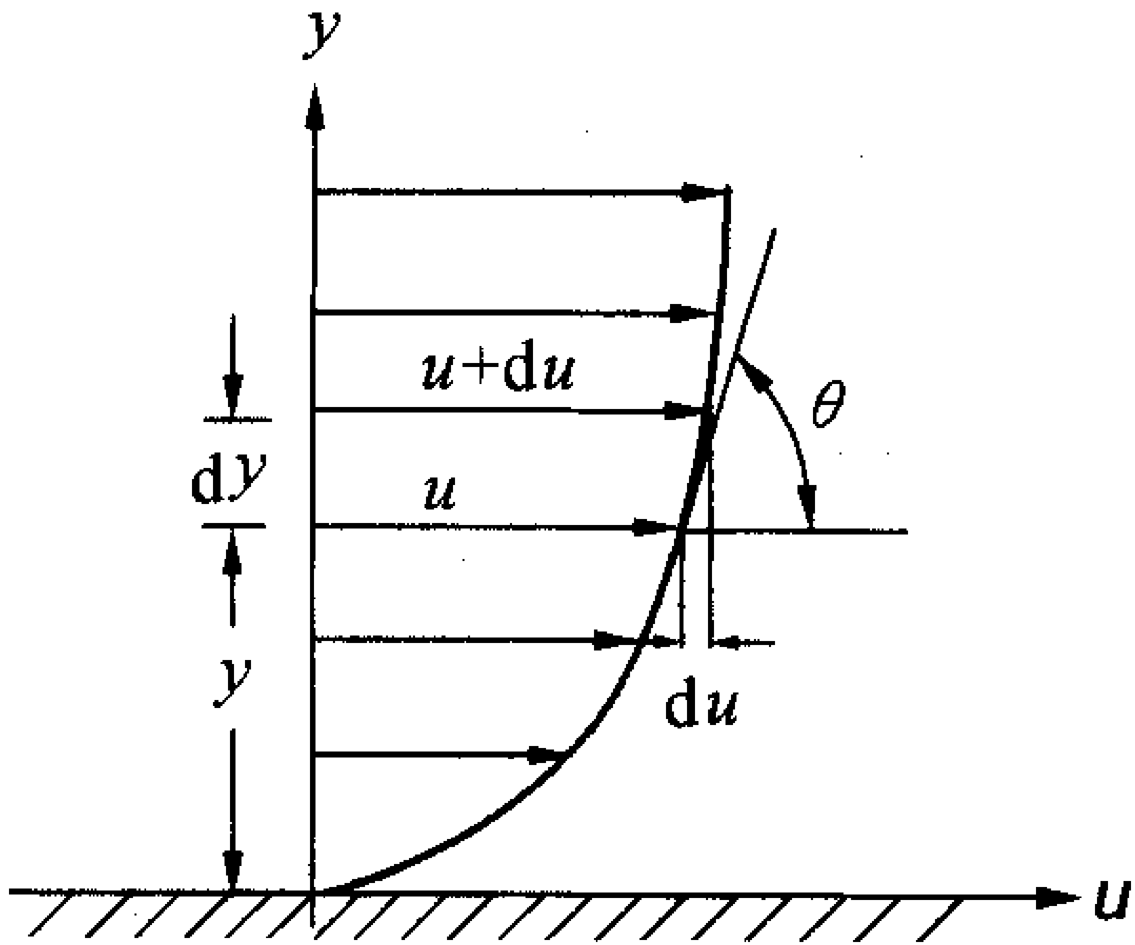


图 速度梯度

牛顿内摩擦定律：

$$T = \mu A \frac{du}{dy}$$

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



μ 的物理意义：

单位速度梯度下的切应力，根据 μ 的大小可直接判断同种流体粘性的大小。

v 的物理意义：

单位速度梯度下的切应力对单位体积质量作用产生的阻力加速度。衡量流动性的大小依据。只具有运动学的要素。P6

例题 在相同温度下 $\mu_{水} > \mu_{空气}$，试论证在 20^oC时，水和空气相比，哪种流体易于流动（用数据说明）

解： 在 20^oC时，从水和空气物理特性表中查取

$$\rho_{水} = 998.2\,\mathrm{kg/m^3}, \quad \rho_{空气} = 1.205\,\mathrm{kg/m^3}$$

$$\mu_{水} = 1.002 \times 10^{-3}\,\mathrm{Pa\cdot s}, \quad \mu_{空气} = 1.81 \times 10^{-5}\,\mathrm{Pa\cdot s}$$

$$\upsilon_{水} = 1.003 \times 10^{-6}\,\mathrm{m^2/s}, \quad \upsilon_{空气} = 15.0 \times 10^{-6}\,\mathrm{m^3/s}$$

$$\frac{\mu_{水}}{\mu_{空气}} = \frac{1.002 \times 10^{-3}}{1.81 \times 10^{-5}} = 55.34\text{（倍）}$$

$$\frac{\rho_{水}}{\rho_{空气}} = \frac{998.2}{1.205} = 828.39\text{（倍）}$$

$$\frac{\upsilon_{空气}}{\upsilon_{水}} = \frac{15.0 \times 10^{-6}}{1.003 \times 10^{-6}} = 14.96\text{（倍）}$$

结论：在相同温度下，$\upsilon_{空气} > \upsilon_{水}$，空气与水相比较，空气不易于流动。

此例题说明：在相同温度下，只从 μ 值的大小不能直接判断流体的流动性，而应由 υ 值的大小才能够直接判别流体的流动性。因为 υ 值排除了流体密度的影响，只保留其运动特征参数，这也是引入粘性系数的意义所在。

粘性与温度的关系

气体：　$T\uparrow$,粘性$\uparrow$

液体：　$T\uparrow$,粘性$\downarrow$

四、流体的压缩性和膨胀性

流体相对密度、密度、比容随温度与压强变化，其原因是由于流体内部分子间存在着间隙。压强增大，分子间距减小，体积压缩；温度升高，分子间距增大，体积膨胀。流体都具有这种可压缩、能膨胀的性质。

一、压缩性

压缩性—在温度不变的条件下，流体在压力作用下体积缩小的性质称为压缩性。

压缩性大小，用体积压缩系数 β_p表示。即

$$\beta_p = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dp}$$

式中

V – 原有体积, m^3;

dV – 体积改变量，m^3;

dp – 压强改变量，Pa;

β_p – 体积压缩系数，Pa^{-1};

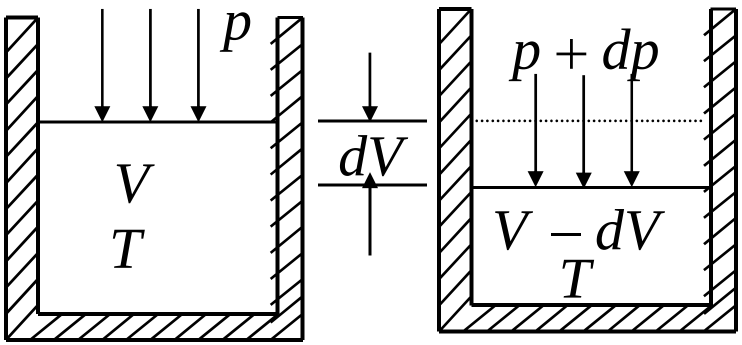
dV/dp – 压强改变时的体积变化率，m^3Pa^{-1}.

β_p的物理意义：

当温度不变时每增加单位压强所产生的流体体积相对变化率。

流体压缩系数的倒数称为流体的弹性模量，用E表示。

$$E = \frac{1}{\beta_p}$$



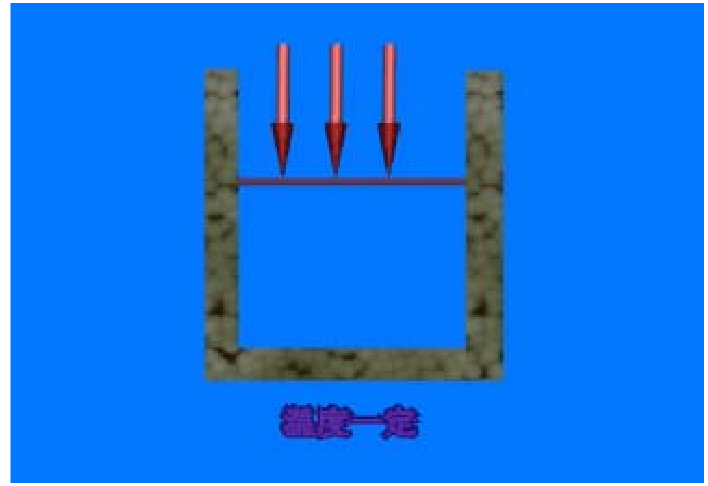


图1—2流体在等温下的体积压缩

气体的等温压缩率亦可由气体状态方程（令 $T=C$）求得。

$$\beta_p = -\frac{1}{V}\frac{d}{dp}\left(\frac{mR_gT}{p}\right) = -\frac{mR_gT}{V}\left(-\frac{1}{p^2}\right) = \frac{1}{p}$$

β_p与p成反比。如图 1—3 所示。

在气体状态方程式适用 的范围内：

$p\uparrow \rightarrow \beta_p \downarrow$ 压缩困难

$p\downarrow \rightarrow \beta_p \uparrow$ 压缩容易

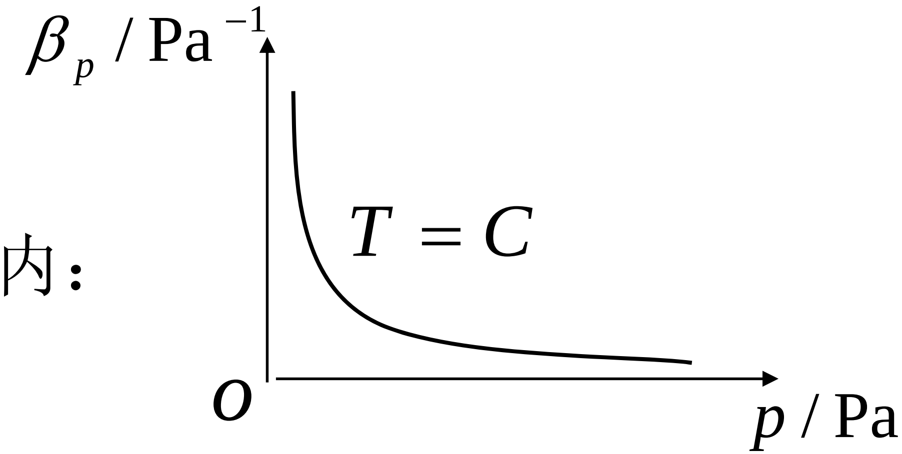
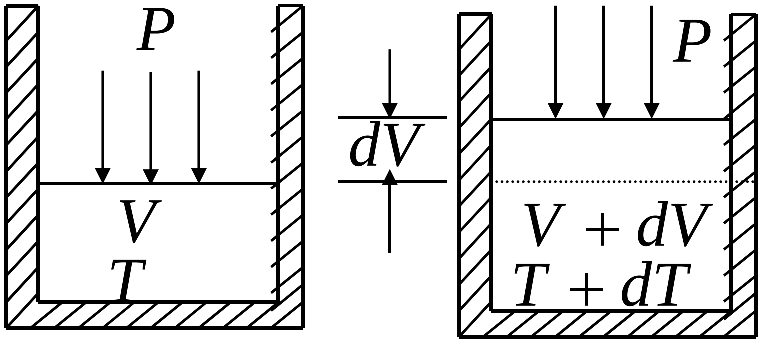


图-气体压缩率曲线

二、膨胀性

在压力不变的条件下，流体温度升高，其体积增大的性质称为膨胀性。



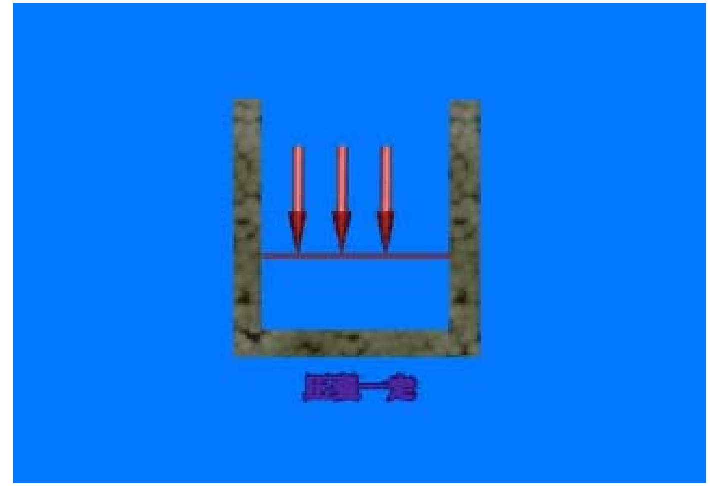


图 流体在定压下的体积膨胀

在气体状态方程式的适用范围内： $T\downarrow \rightarrow \beta_t \uparrow$

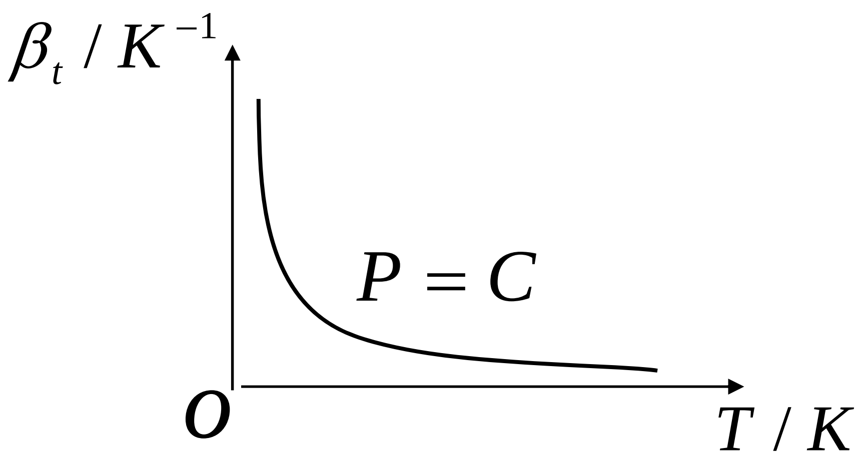


图 气体膨胀系数

膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_t 表示。即

$$\beta_t = \frac{1}{V}\frac{dV}{dT}$$

式中

dT — 温度改变量， K；

β_t — 体积膨胀系数， K^{-1}；

$\frac{dV}{dT}$ — 温度变化时的体积变化 率， m^3/K.

β_t 当压强不变时每增加单位温度所产生的流 体体积相对变化率。

气体膨胀系数可由气体 状态方程式（令 $p=C$）求得：

$$\beta_t = \frac{1}{V}\frac{dV}{dT} = \frac{d}{dT}\left(\frac{mR_gT}{p}\right) = \frac{mR_g}{Vp} = \frac{1}{T}$$

β_t 与 T 成反比．

水的压缩系数

表1—1

压强（at）	5	10	20	40	80
$\beta_p \times 10^{-9} (m^2/N)$	0.538	0.536	0.531	0.528	0.515

水的膨胀系数

表1—2

温度 ^oC	1～10	10～20	40～50	60~70	90~100
$\beta_t \times 10^{-4} (1/^oC)$	0.14	0.15	0.42	0.55	0.72

例题 水在常温下由5at增加到10at时，求水的密度的相对变化率。

解：此题是液体在常温下压缩性系数公式的应用。

解法一：

$$\beta_p = \frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$$

则 $$\frac{d\rho}{\rho} = \beta_p dp = 0.538\times 10^{-9}\times(10-5)\times 9.81\times 10^{4} = 0.0264\ \%$$

解法二：

对 $\dfrac{d\rho}{\rho}=\beta_p dp$ 进行积分

有 $\ln\rho-\ln\rho_0=\beta_p(p_2-p_1)$

则 $\dfrac{\rho}{\rho_0}=\exp[\beta_p(p_2-p_1)]$

$=\exp[0.538\times 10^{-9}(10-5)\times 98100]$

$=1.000264$

所以 $\dfrac{\rho-\rho_0}{\rho_0}=0.000264=0.0264\%$

故水密度的相对变化率 为0.0264％。

五、表面张力特性

由于分子间的引力，在液体自由表面上能承受微小的张力称表面张力。

毛细管现象：将两端开口的细玻璃管竖立在液体中，在表面张力作用下，管中液体将上升或下降一个高度，称为毛细管现象。

由于重力与表面张力产生的附加压力在垂直方向分力平衡，所以有：

$$\frac{\pi}{4} d^2 h\gamma = \pi d\sigma \cos\alpha$$

则

$$h = \frac{4\sigma \cos\alpha}{\gamma d}$$

式中：

h—液面上升高度，m;

d—玻璃管直径，m;

γ—液体重度，$\mathrm{N/m^3}$;

σ—表面张力系数，$\mathrm{N/m}$;

α—接触角。

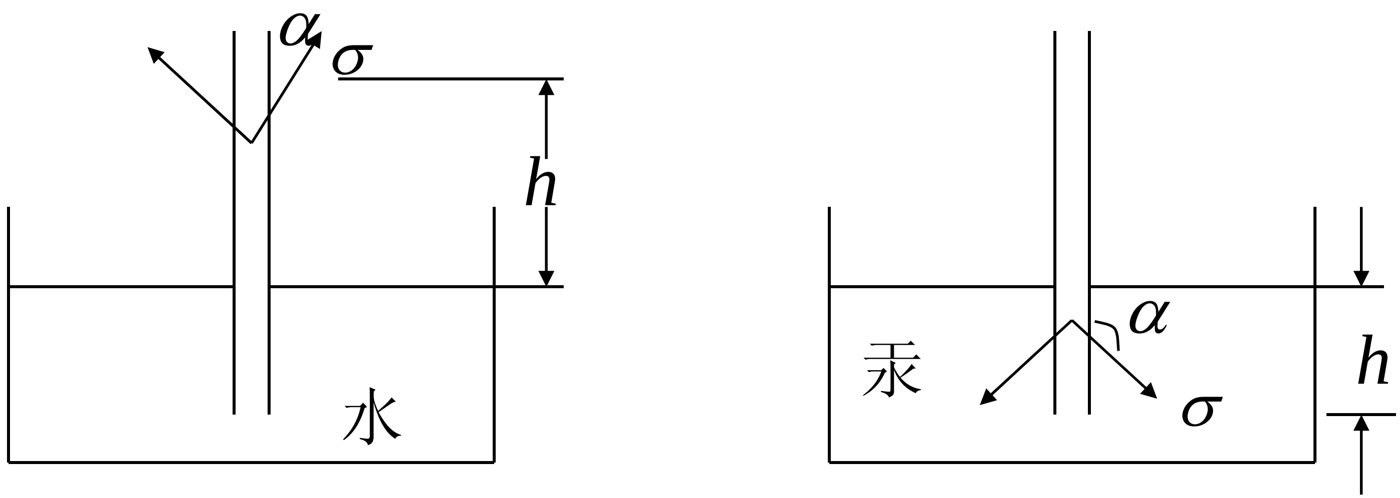


图 表面管现象

试验测得：20°C时水与玻璃的接触角 $\alpha = 3^o \sim 9^o, \sigma = 0.0728\,\mathrm{N/m}$

汞的接触角 $\alpha = 139^o \sim 140^o, \sigma = 0.51\mathrm{N/m}$。

§1-3 流体的力学模型

一、流体质点的概念

从微观结构来看，流体分子与分子之间存在着较大间隙，是不连续的但是对于研究宏观规律的流体力学来说，一般不需要讨论分子的微观结构，而是对流体的物理实体加以模型化。

流体微团——流体中宏观尺寸非常小而微观尺寸又足够大的任意一个物理实体，具有自己的体积和质量。

二、连续介质假设

欧拉在1753年提出连续介质力学模型的假设：

a.不考虑分子间隙，认为流体是由相互间没有间隙的微团组成，连续分布于流体所占据的整个空间；

b.表征流体属性的诸物理量，如密度、速度、压强、切应力、温度等在流体连续流动时是时间与空间坐标变量的单值、连续可微函数，从而形成各种物理量的标量场和矢量场（流场）。

三、不可压缩流体

压缩系数和膨胀系数为零的流体叫做不可压缩流体。

这种流体受压体积不减小，受热体积不膨胀，因而 ρ，υ，d 均为常数，讨论其平衡和运动规律自然简单得多。

四、理想流体

假定不存在粘性，即其粘度 $\mu = \nu = 0$ 的流体为理想流体或无粘性流体。 $\mu = \nu = 0$

实际上，一切流体都具有粘性，提出理想流体的概念在于研究流体运动规律时，对理论方程的推导大为简化。

第一章 习 题

1—1 空气初始状态为 $t_0 = 15^oC$，$p_0 = 101.3\text{kPa}$，在汽缸内绝热压缩后体积减少了一半，求终态温度和压强。

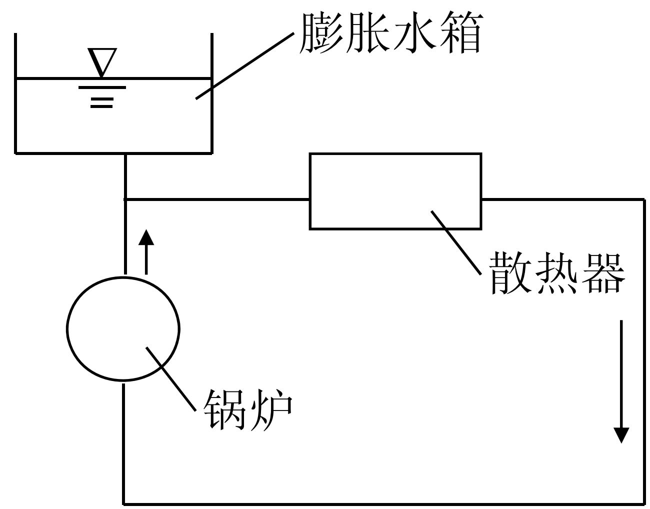
解： 绝热压缩时，其过程方程为 $pV^k = Const$，式中k=1.4,称为空气绝热指数。联立理想气体状态方程可得

$$p = p_0(\frac{\rho}{\rho_0})^k = p_0(\frac{V_0}{V})^k = 101.3\times 2^{1.4} = 267.3\ \text{kPa}$$

$$T = T_0(\frac{\rho}{\rho_0})^{k-1} = T_0(\frac{V_0}{V})^{k-1} = (273+15)\times 2^{0.4} = 380\text{k} = 107^oC$$

1—2 采暖系统在顶部设一膨胀水箱，系统内的水总体积为 $8m^3$，最大温升 $50°C$，膨胀系数 $\beta_t = 0.005$，求该水箱的最小容积？

解： 该题为求解系统内水体积净增量的问题，可依（1—9）式进行求解。



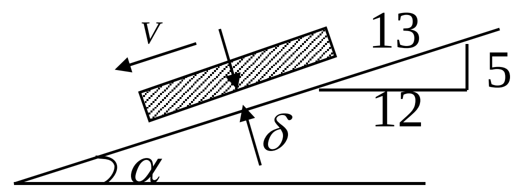
$$\beta_t = \frac{1}{V}\frac{dV}{dT}$$

则 $$dV = \beta_t V dT$$

$$= 0.005 \times 8 \times 50 = 2m^3$$

故膨胀水箱的最小体积应为2立方米，但在工程设计中，应注意按照设计规范增加一定的富裕量，以确保系统安全。

1—3 一木块底面积为 $14\times45\,cm^2$，厚度为 $1cm$，质量为 $5kg$，沿着涂有润滑油的斜面以速度 $V=1m/s$ 等速度下滑，油层厚度 $1mm$，求润滑油的动力粘性系数。



解： 这是牛顿内摩擦定律在工程中应用的一个简单而又常见的例子。求解此题有两个重点，一是对油层内速度梯度进行简化，即认为是线性分布规律；二是正确列出力的平衡方程。

由于是等速下滑，故重力分力与粘性阻力相等

平衡方程为 $T = mg\sin\alpha$， 速度梯度为 $\dfrac{du}{dy} = \dfrac{V}{\delta}$

代入式（1—11） $\mu A\dfrac{du}{dy} = mg\sin\alpha$

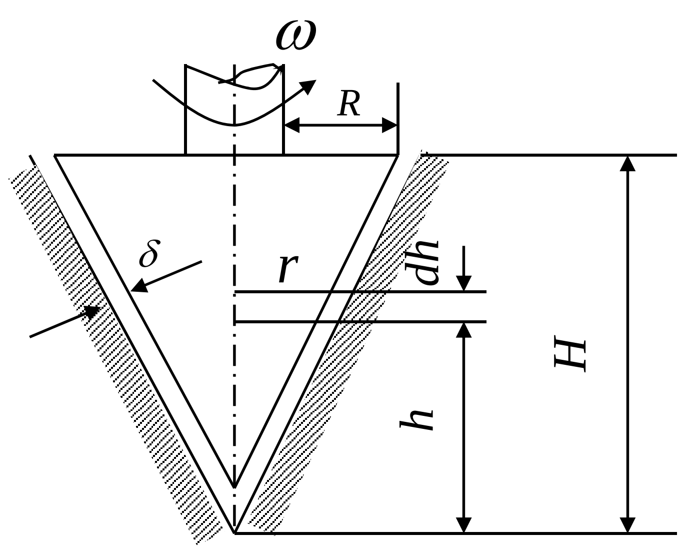
解出 $\mu = \dfrac{mg\sin\alpha}{A\dfrac{V}{\delta}}$

代入已知数据，解得μ=0.1047Pa·s

注意：在解题时，所有物理量的单位必须采用相同单位制，避免出现换算错误。

1—4　一圆锥体绕竖直中心轴等速旋转，锥体与固定的外锥体之间的隙缝 $\delta = 1\text{mm}$ ，其中充满 $\mu = 0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的润滑油。已知锥体顶面半径，$R = 0.3\text{m}$ 锥体高度 $H = 0.5\text{m}$ ，当旋转角速度 $\omega = 16\ 1/\text{s}$ 时，求所需要的旋转力矩。

解： 此题属于牛顿那摩擦定律应用。该题的特点是作用半径，液体和固壁接触面积及锥体旋转线速度都随高度变化，应逐个找出其变化规律并贯彻物理方法解题的思想。



习题　1—2图

如图所示，旋转力矩的微元表达式

$$dM = \tau \cdot dA \cdot r = \mu \frac{du}{dy} dA \cdot r$$

(1)锥体半径r的变化规律 $r = h \cdot \tan\theta$

(2)对应 dh 的 dA 表达式

$$dA = 2\pi r \cdot \frac{dh}{\cos\theta} = 2\pi h \tan\theta \frac{dh}{\cos\theta}$$

（3）因为 δ很小，可把速度梯度按 线性变化考虑

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{\delta} = \frac{\omega r}{\delta} = \frac{\omega}{\delta} h \tan\theta$$

将上三式代入 dM表达式中，整理得

$$dM = \mu \cdot \frac{\omega}{\delta} = 2\pi \tan^3\theta \frac{1}{\cos\theta} h^3 dh$$

（4）求总力矩

$$M=\int dM=2\pi\mu\frac{\omega}{\delta}\frac{\tan^{3}\theta}{\cos\theta}\int_{0}^{H}h^{3}dh=\frac{\pi\mu\omega}{2\delta}\frac{\tan^{3}\theta}{\cos\theta}H^{4}$$

代入已知数据，解得

$$M=39.6\ (\mathrm{N}\cdot\mathrm{m})$$

(其中 $\tan\theta=\dfrac{R}{H}$ ，求得 $\theta=31^{o}$)

本章结束