Liuti Lixue Xuexi Fudao Yu Xiti Jieda

# 流体力学

## 学习辅导与习题解答

邹正龙 李宝玉 李意民 陈更林 主编

中国矿业大学出版社
China University of Mining and Technology Press

Liuti Lixue Xuexi Fudao Yu Xiti Jieda

# 流体力学

## 学习辅导与习题解答

# 流体力学学习辅导与习题解答

主编 邹正龙 李宝玉
李意民 陈更林
参编 李德玉 刘 颀
李嘉薇 杨春敏

中国矿业大学出版社

## 内容提要

本书系统介绍了流体力学的学习要点与难点，分析讲解了流体力学习题的解题思路与技巧，以加深学生对基本概念、基本原理的理解，使学生得到足够的基本技能训练。

本书可作为热能、机自、通风安全、采矿、环境科学、水文、建筑等专业的教学用书和学生自学参考书，也可作为工程技术人员阅读参考。

**图书在版编目(CIP)数据**

流体力学学习辅导与习题解答/邹正龙等主编．—徐州：中国矿业大学出版社，2007.11

ISBN 978-7-81107-790-2

Ⅰ.流… Ⅱ.邹… Ⅲ.流体力学—高等学校—教学参考资料 Ⅳ.O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 175985 号

**书　　名**　流体力学学习辅导与习题解答

**主　　编**　邹正龙　李宝玉　李意民　陈更林

**责任编辑**　钟　诚

**出版发行**　中国矿业大学出版社

（江苏省徐州市中国矿业大学内　邮政编码 221008）

**网　　址**　http://www.cumtp.com　**E-mail**:cumtpvip@cumtp.com

**排　　版**　中国矿业大学出版社排版中心

**印　　刷**　徐州中矿大印发科技有限公司

**经　　销**　新华书店

**开　　本**　850×1168　1/32　**印张** 8.25　**字数** 214 千字

**版次印次**　2007 年 11 月第 1 版　2007 年 11 月第 1 次印刷

**定　　价**　15.00 元

# 目　录

# 第一章　概　　述

## 一、主要内容

（一）流体的定义

流体是一种受任何微小的剪切力作用时，都会产生连续变形的物质。能够流动的物体称为流体，包括气体和液体。

（二）流体力学的研究内容

流体力学是以流体为研究对象，研究流体处于平衡和运动状态时的力学规律（如：压力与速度分布等），以及流体与固体的相互作用及流动过程中的能量损失。

（三）流体的三个基本特征

1. 易流性

流动性是流体的主要特征。组成流体的各个微团之间的内聚力很小，任何微小的剪切力都会使它产生连续的剪切变形——流动。

2. 形状不定性

流体没有固定的形状，它取决于盛装它的容器的形状，只能被限定为其所在容器的形状。

3. 受力特性（绵续性）

流体能承受压力，但不能承受拉力，对切应力的抵抗较弱，只有在流体微团发生相对运动时，才显示其剪切力，因此，流体没有静摩擦力。

（四）流体的三个基本特性

1. 流体的惯性

物质维持原有运动状态的特性称为惯性，它是物质本身固有的属性，运动状态的任何变化都必须克服惯性的作用。

流体力学中衡量惯性大小的物理量是密度，即单位体积的质量。

2. 流体的压缩性与膨胀性

流体的体积随压力变化的特性称为流体的压缩性。流体的体积随温度变化的特性称为流体的膨胀性。

3. 流体的黏性

流体的黏性是阻止其发生剪切变形的一种特性，是由流体分子的结构及分子间的相互作用力所引起的。流体的黏性是流体的固有属性。

（五）流体力学中的三个力学模型

1. 连续介质模型

流体由大量的分子组成，当从宏观角度来研究流体的机械运动，而不涉及微观的物质结构时，就可以认为流体是由无穷多个连续分布的流体微团组成的连续介质。

2. 不可压缩流体模型

通常把液体视为不可压缩流体，即忽略在一般工程中没有多大影响的微小的体积变化，而把液体的密度视为常量。

3. 理想流体模型

理想流体就是完全没有黏性的流体。

## 二、本章难点

（1）对于三个基本特征中的流体形状的不定性，要注意区分液体与气体的区别。液体具有一定的体积，有一自由表面；而气体没有固定体积，没有自由表面，易于压缩。

（2）温度对流体的黏性影响，对于液体和气体是截然不同的，

温度升高时，液体的黏性降低，而气体的黏性增加。

(3) 连续介质模型的主要内容是：由大量的分子组成的流体，分子与分子间是有间隙的；而由大量的流体微团（包含有许多流体分子）组成的流体，微团与微团间是没有间隙的。

(4) 在压力不是很高、速度不是很快的情况下，气体也可看成是不可压缩流体。

## 三、习题与解答

**1-1**　一容积为 $V=4.6\ \mathrm{m^3}$ 的液压油，重量是 $G=5\ 260\ \mathrm{N}$，求其重度、密度、比容及相对密度。

**解**：根据公式有：

重度：$\gamma=\dfrac{G}{V}=\dfrac{5\ 260}{4.6}=1\ 143\ (\mathrm{N/m^3})$

密度：$\rho=\dfrac{\gamma}{g}=\dfrac{1\ 143}{9.8}=116.6\ (\mathrm{kg/m^3})$

比容：$\upsilon=\dfrac{1}{\rho}=\dfrac{1}{116.6}=0.008\ 6\ (\mathrm{m^3/kg})$

相对密度：$s=\dfrac{\gamma}{\gamma_0}=\dfrac{\rho}{\rho_0}=\dfrac{116.6}{1\ 000}=0.116\ 6$

**1-2**　已知某种物质的密度 $\rho=2.94\ \mathrm{g/cm^3}$，试求其相对密度 $s$。

**解**：

由其定义，该种物质的相对密度为：

$$s=\frac{\rho}{\rho_0}=\frac{2.94\times100^3/1\ 000}{1\ 000}=2.94$$

**1-3**　已知某厂1号炉水平烟道中烟气组分的体积百分数为 $\alpha_{CO_2}=13.5\%$，$\alpha_{SO_2}=0.3\%$，$\alpha_{O_2}=5.2\%$，$\alpha_{N_2}=76\%$，$\alpha_{H_2O}=5\%$。试求烟气的密度。

**解**：

根据混合流体密度的定义，烟气的密度为：

$$\begin{aligned}\rho &= \sum_{i=1}^{n}\rho_i\alpha_i \\ &= 1.976\times 13.5\% + 2.927\times 0.3\% + 1.429\times \\ &\quad 5.2\% + 1.251\times 76\% + 0.804\times 5\% \\ &= 1.341(\mathrm{kg/m^3})\end{aligned}$$

**1-4** 当压强增量为 50 000 Pa 时，某种流体的密度增加了 0.02%。试求该流体的体积弹性模量。

**解：**

压缩系数为：

$$\beta_p = \frac{1}{\mathrm{d}p}\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} = \frac{1}{50\ 000}\times 0.02\% = 0.4\times 10^{-8}(\mathrm{Pa^{-1}})$$

则流体的体积弹性模量为：

$$E = \frac{1}{\beta_p} = \frac{1}{0.4\times 10^{-8}} = 2.5\times 10^{8}(\mathrm{Pa})$$

**1-5** 厚壁容器中盛有 $V_0 = 0.5\ \mathrm{m^3}$ 的水，初始压力为 $p_0 = 2\times 10^6$ Pa。当压力增至 $p = 6\times 10^6$ Pa 时，问水的体积减少了多少？

**解：**

取水的体积弹性模量 $E = 2\times 10^9$ Pa，由压缩系数公式得：

$$\beta_p = -\frac{1}{V_0}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}p} = -\frac{V - V_0}{V_0(p - p_0)} = \frac{1}{E}$$

体积减少量为：

$$\begin{aligned}V_0 - V &= \frac{V_0(p - p_0)}{E} \\ &= \frac{0.5\times(6-2)\times 10^6}{2\times 10^9} = 10^{-3}(\mathrm{m^3})\end{aligned}$$

**1-6** 体积为 $V_0 = 1.5\ \mathrm{m^3}$ 的某种流体，当压力增加了 $\mathrm{d}p = 49\ 000$ Pa 时，体积减少了 $\mathrm{d}V = -3.6\times 10^{-5}\ \mathrm{m^3}$。试求该流体的体积弹性模量 $E$ 和压缩系数 $\beta_p$。

**解：**

压缩系数为：

$$\beta_p = -\frac{dV}{V_0}\frac{1}{dp} = \frac{3.6 \times 10^{-5}}{1.5} \times \frac{1}{49\ 000}$$

$$= 0.49 \times 10^{-9}(\mathrm{Pa}^{-1})$$

则流体的体积弹性模量为：

$$E = \frac{1}{\beta_p} = \frac{1}{0.49 \times 10^{-9}} = 2.04 \times 10^9(\mathrm{Pa})$$

**1-7** 充满石油的油槽内的压强为 $p=4.903\ 3\times10^5$ Pa，今由槽中排出石油 40 kg，使槽内压强降到 $p'=9.806\ 7\times10^4$ Pa，设石油体积弹性模量为 $E=1.32\times10^9$ Pa。试求油槽的体积。（石油的密度为：$\rho=885$ kg/m³）

**解：**

压强的变化为：

$$\Delta p = p - p' = 490\ 330 - 98\ 067 = 392\ 263(\mathrm{Pa})$$

体积的变化为：

$$\Delta V = V - V' = -\frac{m}{\rho} = -0.045(\mathrm{m}^3)$$

根据公式，石油的体积弹性模量为：

$$E = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{V\Delta p}{\Delta V}$$

则油槽的体积为：

$$V = -\frac{\Delta V}{\Delta p}E = \frac{0.045}{392\ 263} \times 1.32 \times 10^9 = 152(\mathrm{m}^3)$$

**1-8** 空气（$R_0=287.1$ N·m/kg·K）的压强为 $p=10^5$ Pa、温度为 $t=20$ ℃时，分别求其压缩系数 $\beta_p$ 和膨胀系数 $\beta_t$。

**解：**

由气体状态方程 $p=R_0\rho T$ 得：

$$\rho = \frac{p}{R_0 T} = \frac{10^5}{287.1 \times (273+20)} = 1.188\ 774(\mathrm{kg/m}^3)$$

当温度不变，$dp=1, \rho'=\dfrac{p}{R_0 T}=1.188\ 786(kg/m^3)$

则：$\beta_p=\dfrac{1}{\rho}\dfrac{d\rho}{dp}=0.000\ 009\ 74=9.74\times10^{-6}(Pa^{-1})$

当压强不变，$dT=1, \rho'=1.184\ 730(kg/m^3)$

$$\beta_t=\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}=-0.003\ 40=-3.4\times10^{-3}\ 1/K$$

**1-9** 流量 $Q=50\ m^3/h$，温度为 70 ℃的水流进热水锅炉，经加热后水温上升到 90 ℃，而水的体积膨胀系数 $\beta_t=0.000\ 64(1/℃)$，问从锅炉中每小时流出多少立方米的水？

**解：**

由：$\beta_t=\dfrac{\Delta V}{V}\dfrac{1}{\Delta T}=\dfrac{V_2-V_1}{V_1(T_2-T_1)}$

得：$V_2=V_1[1+\beta_t(T_2-T_1)] \Rightarrow Q_2=Q_1[1+\beta_t(T_2-T_1)]$

即从锅炉中每小时流出的水为：

$$Q_2=Q_1[1+\beta_t(T_2-T_1)]=50.64(m^3/h)$$

**1-10** 压缩机压缩空气，绝对压强从 $p_1=9.806\ 7\times10^4$ Pa 升高到 $p_2=5.884\times10^5$ Pa，温度从 $t_1=20$ ℃升高到 $t_2=78$ ℃，问空气体积减少了多少？

**解：**

由气体状态方程：$\dfrac{p_1V_1}{T_1}=\dfrac{p_2V_2}{T_2}\qquad(\rho_1V_1=\rho_2V_2=m)$

得：
$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{p_1T_2}{p_2T_1}$$

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{V_1-V_2}{V_1}=1-\frac{V_2}{V_1}=1-\frac{p_1T_2}{p_2T_1}$$
$$=1-0.199\ 7=80\%$$

**1-11** 如图中相距为 $h=10$ mm 的两固定平板间充满动力黏度为 $\mu=1.49$ Pa·s 的甘油，若两板间甘油的速度分布为 $u=$

$4\ 000y(h-y)$，则：

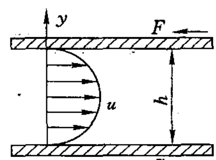
(1) 若上板的面积 $A=0.2\ m^2$，求使上板固定不动所需的水平作用力 $F$；

(2) 求 $y=h/3$ 和 $y=2h/3$ 处的内摩擦应力，并说明正负号的意义。

**解：**

(1) 先求内摩擦应力的分布，由牛顿内摩擦定律公式得：

$$\tau=\mu\frac{du}{dy}=4\ 000\mu(h-2y)$$




题 1-11 图

设上板处流体所受的内摩擦应力为 $\tau_0$，则上板所受的内摩擦应力 $\tau_0'=-\tau_0$，将 $y=0.01$ m 代入上式得固定上板所需的力为：

$$\begin{aligned}F&=-A\cdot\tau_0\\&=-0.2\times4\ 000\times1.49\times(0.01-2\times0.01)\\&=1.92(\text{N})\end{aligned}$$

(方向如图示)

(2) $y=h/3$ 时，内摩擦应力为：

$$\tau=\mu\frac{du}{dy}=4\ 000\mu(h-2y)=19.9(\text{N/m}^2)$$

$y=2h/3$ 时，内摩擦应力为：

$$\tau=\mu\frac{du}{dy}=4\ 000\mu(h-2y)=-19.9(\text{N/m}^2)$$

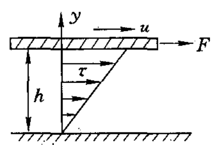
$y=h/3$ 时，$\tau=19.9\ \text{N/m}^2>0$，这说明若用平面在 $y=h/3$ 处截开，下一层流体(靠坐标原点一侧的流体)受到上层的拖动，$\tau$ 与 $u$ 同向。

$y=2h/3$ 时，$\tau=-19.9\ \text{N/m}^2<0$，这表明该处以下(靠坐标原点)的流层受阻于上层流体，$\tau$ 与 $u$ 反向。

**1-12** 面积 $A=0.5\ \mathrm{m}^2$ 的平板，水平地放在厚度为 $h=10$ mm 的油膜上。用 $F=4.8$ N 的水平力拉它，以 $u=0.8$ m/s 的速度移动。若油的密度 $\rho=856\ \mathrm{kg/m^3}$。求油的动力黏度和运动黏度。

**解**：平板所受切应力为：

$$\tau=\frac{F}{A}=\frac{4.8}{0.5}=9.6(\mathrm{N/m^2})$$




题 1-12 图

设速度分布为线性分布，则：

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}=\frac{u}{h}=\frac{0.8}{0.01}=80(1/\mathrm{s})$$

由牛顿内摩擦定律：

$$\tau=\mu\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\quad\Rightarrow\quad\mu=\tau/\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$$

得油的动力黏度和运动黏度为：

$$\mu=\tau/\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}=9.6/80=0.12(\mathrm{Pa\cdot s})$$

$$\nu=\frac{\mu}{\rho}=\frac{0.12}{856}=1.4\times10^{-4}(\mathrm{m^2/s})$$

**1-13** 有一面积 $A=0.024\ \mathrm{m}^2$ 的平板在油面上作水平运动，平板与固定底面距离 $h=1$ mm，油的运动黏度 $\nu=14.1\ \mathrm{cm^2/s}$，油的重度为 $\gamma=8\ 338.5\ \mathrm{N/m^3}$，若板的运动速度 $u=1.1$ m/s，由平板带动的油的速度成直线分布，求平板所受的阻力。

**解**：

设速度分布为线性分布，则：

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}=\frac{u}{h}=\frac{1.1}{0.001}=1\ 100(1/\mathrm{s})$$

油的动力黏度为：

$$\mu=\nu\rho=14.4\times10^{-4}\times\frac{8\ 338.5}{9.8}=1.2(\mathrm{Pa\cdot s})$$

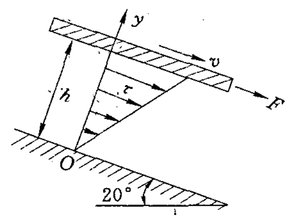
由牛顿内摩擦定律得：

$$\tau = \mu \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} = 1.2 \times 1\,100 = 1\,319.7(\mathrm{N/m^2})$$

平板所受的阻力为：

$$F = \tau \cdot A = 1\,319.7 \times 0.024 = 31.7(\mathrm{N})$$

**1-14** 重量 $G=20$ N，面积 $A=0.12\ \mathrm{m}^2$ 的平板置于斜面上。其间充满黏度 $\mu=0.65$ Pa·s的油液。当油液的厚度 $h=8$ mm 时，问匀速下滑时平板的速度 $v$ 是多少？




题 1-14 图

**解**：平板沿斜面向下的作用力为：

$$F = G \times \sin 20^\circ = 6.8\ (\mathrm{N})$$

则平板上的切应力为：

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{6.8}{0.12} = 57(\mathrm{N/m^2})$$

根据牛顿内摩擦定律：$\tau = \mu \dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$

设速度分布为线性分布，则：

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} = \frac{v}{h} = \frac{\tau}{\mu}$$

则匀速下滑时平板的速度 $v$ 是：

$$v = \frac{\tau}{\mu} \times h = \frac{57}{0.65} \times 8 \times 10^{-3} = 0.7(\mathrm{m/s})$$

**1-15** 直径 $d=50$ mm 的活塞在直径为 $D=50.1$ mm 的缸体内运动，当润滑油的温度由 $t_1=0$ ℃升高到 $t_2=120$ ℃时，求推动活塞所需的力减少的百分数。（润滑油的相对密度为 $s=0.855$，当 $t_1=0$ ℃时，$\mu_1=0.012$ Pa·s，当 $t_2=120$ ℃时，$\mu_2=0.002\,1$ Pa·s）

**解**：由牛顿内摩擦定律知：

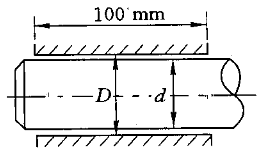
$$t_1=0\ ℃\text{时},\ F_1 = A\mu_1 \cdot \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$$

$$t_2=120\ ℃\text{时},\ F_2 = A\mu_2 \cdot \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$$

$$F_2/F_1 = \mu_2/\mu_1$$

则：$\dfrac{F_1 - F_2}{F_1} = 1 - F_2/F_1 = 1 - \mu_2/\mu_1 = 82.5\%$

**1-16** 直径 $d=50$ mm 的轴颈同心地在 $D=50.1$ mm 的轴承中转动。间隙中润滑油的黏度 $\mu=0.45$ Pa·s。当转速 $n=950$ r/min 时，求因油膜摩擦而附加的阻力矩 $M$。




题 1-16 图

**解**：将接触面沿圆周展开，可得接触面的面积为：

$$A = \pi dl = \pi \times 0.05 \times 0.1 = 0.016(\text{m}^2)$$

接触面上的相对速度为：

$$u = \frac{d}{2}\omega = \frac{d}{2}\frac{2\pi n}{60} = 2.49(\text{m/s})$$

接触面间的距离为：

$$\delta = \frac{D-d}{2} = 0.05\ \text{mm} = 5 \times 10^{-5}(\text{m})$$

根据牛顿内摩擦定律知：$\tau = \mu \dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}$

设速度分布为线性分布，则：$\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} = \dfrac{u}{\delta}$

接触面之间的作用力为：

$$F = \mu \cdot A \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y} = \mu \cdot A \frac{u}{\delta} = 358.44(\text{N})$$

则油膜的附加阻力矩为：

$$M = F \cdot \frac{d}{2} = 8.9(\text{N} \cdot \text{m})$$

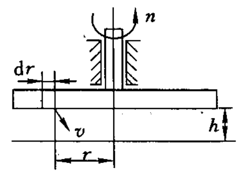
**1-17** 直径为 $D$ 的圆盘水平地放在厚度为 $h$ 的油膜上。当驱动圆盘以转速 $n$ 旋转时，试证明油的动力黏度 $\mu$ 与驱动力矩 $M$ 的关系为：

$$\mu = \frac{960h}{\pi^2 nD^4}M$$

**证：**

在圆盘上半径为 $r$ 处取一微元环，微元环的厚度为 $dr$，则微元环上接触面的面积为：

$$dA = 2\pi r dr$$




题 1-17 图

微元环接触面上的相对速度为：

$$v = r\omega = r\frac{2\pi n}{60}$$

设速度分布为线性分布，则：$\frac{du}{dy} = \frac{v}{h}$

由牛顿内摩擦定律知，微元环接触面上的作用力为：

$$dF = \mu \cdot dA\frac{du}{dy} = \mu \cdot 2\pi r dr\frac{v}{h}$$

$$= \mu \cdot 2\pi r dr\frac{2\pi n}{60h}r = \mu\frac{\pi^2 n}{15h}r^2 dr$$

则微元环接触面的作用力矩为：

$$dM = rdF = \mu\frac{\pi^2 n}{15h}r^3 dr$$

对整个圆盘积分，就可得到驱动力矩与油的动力黏度的关系为：

$$M = \int_0^{\frac{D}{2}} dM = \int_0^{\frac{D}{2}} \mu\frac{\pi^2 n}{15h}r^3 dr = \mu \cdot \frac{\pi^2 n}{60h}\frac{D^4}{2^4} = \frac{\pi^2 nD^4}{960h}$$

即：$\mu = \frac{960h}{\pi^2 nD^4}M$

**1-18** 内径为 $d=10$ mm 的开口玻璃管插入温度为 20 ℃的水中（$\sigma=0.0731$ N/m），已知水与玻璃管的接触角为 $\theta=10°$，试求水在玻璃管中的上升高度 $h$。

**解：**

根据表面张力的计算公式，水在玻璃管中的上升高度为：