



华腾教育
HUA TENG EDUCATION

高等学校教材经典同步辅导丛书力学类
配高教社《流体力学》(第二版) 张也影 编著

流体力学

(第二版)

同步辅导及习题全解

华腾教育教学与研究中心

丛书主编 清华大学 李 丰

本书主编 清华大学 宋 波

赠学习卡
考试宝典



- ◆ 紧贴教材: 精讲重点 点拨方法 联系考研
- ◆ 考试宝典: 教材精华 经典试卷 常考试题
- ◆ 学习卡: 资料下载 信息交流 互动论坛
- ◆ 课后习题: 三级突破 分析要点 总结难点

中国矿业大学出版社

高等学校教材经典同步辅导丛书

流体力学

(第二版)

同步辅导及习题全解

华腾教育教学与研究中心

丛书主编 清华大学 李 丰

本书主编 清华大学 宋 波

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

流体力学同步辅导及习题全解/宋波主编. —徐州:
中国矿业大学出版社, 2006. 8

(高等学校教材经典同步辅导丛书)

ISBN 7 - 81107 - 397 -8

I. 流… II. 宋… 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(2006)第 086943 号

书 名 流体力学同步辅导及习题全解

主 编 宋 波

责任编辑 罗 浩

出版发行 中国矿业大学出版社

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

印 刷 北京市昌平百善印刷厂

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 **本册印张** 10 **本册字数** 220 千字

版次印次 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

总 定 价 117.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

高等学校教材

经典同步辅导丛书编委会

主任：清华大学 王 飞

副主任：清华大学 夏应龙

中国矿业大学 李瑞华

编 委(按姓氏笔画排序):

于志慧	王 焯	甘 露	师文玉
吕现杰	朱凤琴	刘胜志	刘淑红
严奇荣	李 丰	李凤军	李 冰
李 波	李炳颖	李 娜	李晓光
李晓炜	李雅平	李燕平	何联毅
邹绍荣	宋 波	张旭东	张守臣
张国良	张鹏林	张 慧	陈晓东
范亮宇	孟庆芬	唐亚楠	韩国生
韩艳美	曾 捷		

前言

PREFACE

《流体力学》是土木工程专业、热能专业、空气动力学等专业的重要课程之一,也是报考上述专业硕士研究生的考试课程。张也影编写的《流体力学》(第二版)以体系完整、结构严谨、层次清晰、深入浅出的特点成为这门课程的经典教材,被全国许多院校采用。为了帮助读者更好地学好这门课程,掌握更多知识,我们根据多年的教学经验编写了这本与此教材配套的《流体力学同步辅导及习题全解》。本书旨在使广大读者理解基本概念,掌握基本知识,学会基本解题方法与解题技巧,提高应试能力。

本书作为一种辅助性的教材,具有较强的针对性、启发性、指导性和补充性的特点。考虑到读者的不同情况,我们在内容上做了以下安排:

1. 内容提要:串讲概念,总结性质和定理,知识全面系统。
2. 典型例题与解题技巧:精选各类题型,涵盖本章所有重要知识点,对题目进行深入、详细的讨论与分析,并引导学生思考问题、能够举一反三,拓展思路。
3. 历年考研真题评析:精选历年考研真题进行深入的讲解。
4. 课后习题全解:本书给出了张也影编写的《流体力学》(第二版)各章习题的答案。我们不仅给出了详细的解题过程,而且根据难易程度把课后习题分成三个等级,针对不同的等级我们给出了不同程度的讲解。

编写本书时,依据大学本科现行教材及教学大纲的要求,参考了清华大学、北京大学、同济大学、浙江大学、人民大学、复旦大学等高等院校的教材,并结合教学大纲的要求进行编写。

我们衷心希望本书提供的内容能够对读者在掌握课程内容、提高解题能力上有所帮助。同时,由于编者的水平有限,本书难免出现不妥之处,恳请广大读者批评指正。

华腾教育教学与研究中心

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	1
内容提要	1
典型例题与解题技巧	6
历年考研真题评析	7
课后习题全解	8
第二章 流体静力学	31
内容提要	31
典型例题与解题技巧	34
历年考研真题评析	38
课后习题全解	41
第三章 流体动力学基础	99
内容提要	99
典型例题与解题技巧	106
历年考研真题评析	109
课后习题全解	111
第四章 相似和量纲分析	147
内容提要	147

典型例题与解题技巧	149
历年考研真题评析	150
课后习题全解	151
第五章 管中流动	162
内容提要	162
典型例题与解题技巧	165
历年考研真题评析	167
课后习题全解	169
第六章 孔口出流	203
内容提要	203
典型例题与解题技巧	206
历年考研真题评析	207
课后习题全解	209
第七章 缝隙流动	224
内容提要	224
典型例题与解题技巧	227
历年考研真题评析	229
课后习题全解	231
第八章 气体的一元流动	249
内容提要	249
典型例题与解题技巧	252
历年考研真题评析	254
课后习题全解	256

第一章

绪 论

内 容 提 要

一、工程流体力学的研究对象、任务和方法

工程流体力学是工程力学的一组成部分,属于应用科学范畴,是研究流体机械运动规律及其在工程实际中应用的一门学科。它研究流体流动的基本规律:流体流过某种通道或绕过某种物体时速度分布、压力分布、能量损失及流体同固体间的相互作用。同时,作为基础和满足工程实际需要,它也研究流体平衡时的条件及其压力分布规律。

流体力学有三种研究方法,分别是理论方法、实验方法和计算方法,对应三个学科方向为理论流体力学、实验流体力学及计算流体力学。

二、流体质点与连续介质概念

1. 流体质点

所谓流体质点就是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,流体质点具有下述几层含义:



- (1) 流体质点的宏观尺寸非常小；
- (2) 流体质点的微观尺寸足够大；
- (3) 流体质点是包含有足够多分子在内的一个物理实体，因而在任何时刻都应该具有统计规律的宏观物理量；
- (4) 流体质点的形状可以任意划定。

2. 连续介质概念(假设)

任意流体都由无数分子组成的，分子之间有空隙，从微观上看，流体并不是连续分布的物质。但是，流体力学并不研究微观分子的运动，而只研究流体的宏观机械运动。

在研究流体的宏观运动中，所取的最小的流体微元是体积为无穷小的微团，或称流体质点。流体微团虽小，但却包含了为数甚多的分子。这样，可以不考虑、分子间存在的空隙，而把流体视为无数连续分布的流体微团所组成的连续介质。这就是流体的连续介质假设。

当流体力学中把流体作为连续介质处理后，那么表征流体属性的物理量一般在空间也是连续分布的。如密度 ρ 、速度 v 、压强 P 、温度 T 等。

三、流体的密度、比体积和相对密度

流体的密度(均质)

$$\rho = \frac{m}{V} (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

流体的比体积

$$v = \frac{V}{m} (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-2)$$

流体的相对密度

$$d = \frac{m}{m_w} = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{v_w}{v} \quad (1-3)$$

其中比体积与密度存在倒数关系

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (1-4)$$



四、流体的压缩性和膨胀性

随着压强的增高,体积便缩小,随着温度的升高,体积便膨胀,这就是所有流体的共同属性,即流体的压缩性和膨胀性。

1. 方程表示法

反映气体压缩性和膨胀性的关系式就是物理上已学过的理想气体的状态方程式

$$pV = mR_g T \quad (1-4)$$

$$\text{或: } pv = R_g T \quad (1-5)$$

$$\frac{p}{\rho} = R_g T \quad (1-6)$$

其中 R_g 为气体常数 $R_g = \frac{8314}{M} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

2. 系数表示法

(1) 压缩系数

流体的压缩性用单位压强所引起的体积变化率表示,称为压缩系数,以 k 表示之。当温度不变时,压缩系数由下式确定

$$k = \frac{\delta V/V}{\delta p} = \frac{\delta V}{V \delta p} \quad (1-7)$$

式中 δp 为压强的增量, $\delta V/V$ 流体相应的体积变化率。 k 的单位为 Pa^{-1} 。式(1-7)表明,对于同样的压强增量, k 值大的流体,其体积变化率大,较易压缩; k 值小的流体,其体积变化率小,较难压缩。

(2) 体积模量

压缩系数的倒数为体积模量,用 K 表示

$$K = \frac{1}{k} = \frac{V \delta p}{\delta V} \quad (1-8)$$

工程上常用体积模量去衡量流体压缩性的大小。显然, K 值大的流体的压缩性小, K 值小的流体压缩性大。 K 的单位



与压强相同,为 Pa。

(3) 体胀系数

流体的膨胀性用增加单位温度所引起的体积变化率表示,称为体胀系数,以 α_v 表示。当压强不变时

$$\alpha_v = \frac{\delta V/V}{\delta T} = \frac{\delta V}{V\delta T} \quad (1-9)$$

式中 δT 为温度的增量, $\delta V/V$ 仍为流体相应的体积变化率。由于温度升高,体积膨胀的 δT 与 δV 同号, α_v 单位为 $1/K$ 或 $1/^\circ C$ 。

3. 不可压缩流体的概念

为了研究问题的方便,规定等温压缩率和体胀系数完全为零的流体叫不可压缩流体。这种流体受压体积不减小,受热体积不膨胀,因而其密度、比体积和相对密度均为恒定常数。这样讨论运动和平衡规律简单得多。

绝对不可压缩的流体实际上并不存在,但是在通常条件下,液体以及低速运动的气体的压缩性对其运动和平衡问题并无太大影响,忽略其可压缩性,而直接用不可压缩流体理论分析,所得结果与实际情况有时是非常接近的。

五、流体的粘性

流体的粘性是指流体微团间发生相对滑移时产生切向阻力的性质。粘性是固体所没有的性质,流体处于平衡状态时,其粘性无从表现,只有当流体运动时,流体的粘性才显示出来。

1. 牛顿内摩擦定律

为理解流体的粘性,取两块相互平行的平板进行粘性流体内摩擦实验。实验证明,流体内摩擦阻力的大小 F 与速度 v 成正比,与接触面 A 成正比,而与两板间的距离 h 成反比

$$F = \mu A v / h \quad (1-10)$$

式中, μ 为流体的动力粘度,单位为 $Pa \cdot s$ 。在一定温度和压强下,它是个常数。



单位面积上的切向阻力称为切向应力,用 τ 表示,单位为 Pa。

$$\tau = \mu v / h \quad (1-11)$$

一般情况下,流体截面速度分布不一定是直线规律,将上式推广应用到各个薄层,即得牛顿(I. Newton)内摩擦定律

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-12)$$

凡是切应力与速度梯度关系符合上式的叫做牛顿流体,不符合上式的叫做非牛顿流体。非牛顿流体切应力与速度梯度关系的通式为

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (1-13)$$

2. 流体的粘度

(1) 对牛顿流体, τ 与 $\frac{dv}{dy}$ 成比例,比例系数 μ 即为流体的动力粘度。

$$\mu = \frac{\tau}{dv/dy}$$

(2) 在流体力学中还常引用动力粘度与密度的比值,称为运动粘度。用 ν 表示,它的单位 m^2/s 。

$$\nu = \mu / \rho$$

流体的粘度与温度和压强有关,由于分子结构及分子运动机理的不同,液体和气体的粘度变化规律是不一样的。

3. 理想流体

不具有粘性的流体称为理想流体,即 $\mu = \nu = 0$ 。

理想流体实际中并不存在,但这种理论模型对分析问题起很大作用。对于实际流体,总是先研究理想流体的流动,而后再研究粘性流体的流动。

六、液体的表面张力与汽化压强

由于表面层中的液体分子都受到指向液体内部的拉力,所以任何



液体分子在进入表面层时都必须反抗这种力的作用。当自由表面收缩时,在收缩的方向上必定有拉力对自由表面作用,把单位长度上的这种拉力定义为表面张力,用 σ 表示,它的单位为 N/m 。

毛细管现象正是液固接触面表面张力的一种体现。



典型例题与解题技巧

- 【例 1】** 如图 1-1(a) 所示,液面上有面积 $A = 1200\text{cm}^2$ 的平板 H ,以 $v = 0.5\text{m/s}$ 的速度作水平移动,形成平行板间液体的层液运动,平板下液体分两层,它们的动力粘性系数与厚度分别为 $\mu_1 = 0.142\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2, h_1 = 1.0\text{mm}; \mu_2 = 0.235\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2, h_2 = 1.4\text{mm}$;试绘制平面间液体的流速分布图和切应力分布图,并计算平板 H 上所受的总摩擦力 F 。

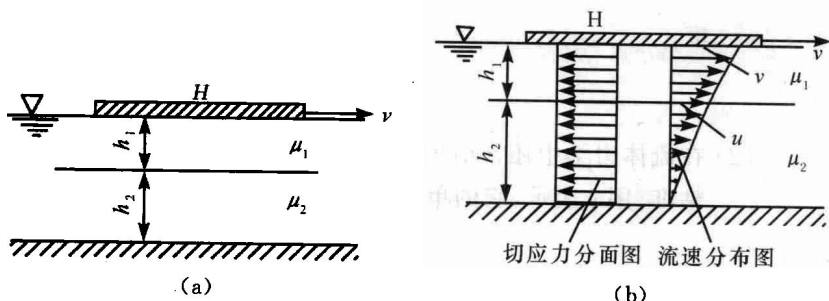


图 1-1

解题分析 本题考察平行平板间的速度及切应力分布,可直接利用牛顿内摩擦定律。

解题过程 平板间为层流,服从牛顿内摩擦定律: $\tau = \mu(du/dy)$,设在液面分界面上,流速为 u ,切应力为 τ ,因 h_1, h_2 很小,可以近似认为流速按直线分布,则

$$\text{上层液体的切应力} \quad \tau_1 = \mu_1 \frac{v-u}{h_1} \quad (1)$$

$$\text{下层液体的切应力} \quad \tau_2 = \mu_2 \frac{u-0}{h_2} \quad (2)$$



在液层分界面上,切应力是相等的,即

$$\tau = \tau_1 = \tau_2 \quad (3)$$

$$\mu_1 \frac{v-u}{h_1} = \mu_2 \frac{u}{h_2}$$

解得

$$u = \frac{\mu_1 h_2 v}{\mu_2 h_1 + \mu_1 h_2} = \frac{0.142 \times 0.0014 \times 0.5}{0.235 \times 0.001 + 0.142 \times 0.0014} = 0.23 \text{ m/s}$$

$$\tau = \tau_1 = \mu_1 \frac{v-u}{h_1} = 0.142 \times \frac{0.5-0.23}{0.001} = 38.34 \text{ N/m}^2$$

可以绘出流速分布图及切应力分布图如图 1-1(b) 所示。

平板 H 所受的内摩擦力 $F = \tau_1 A = 38.34 \times 1200 \times 10^{-4} = 4.6 \text{ N}$ 。



历年考研真题评析

【题 1】 (清华大学 2005 年) 1 千克质量的氢气, 温度为 -40°C , 密闭在 0.1 m^3 的容器中, 问压强为多少 KN/m^2 。

解题分析 本题可以直接利用气体的状态方程。

解题过程 因氢分子量 $M = 2.016$, 氢的气体常数为

$$R_g = \frac{8312}{M} = \frac{8312}{2.016} = 4123 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{氢气的密度 } \rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{0.1} = 10 \text{ kg/m}^3$$

将已得各值代入, 得氢气的压强为

$$\begin{aligned} p &= \rho R_g T \\ &= 10 \times 4123 \times (273 - 40) \\ &= 9.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2 = 9600 \text{ KN/m}^2 \end{aligned}$$

【题 2】 (华南理工大学 2006 年) 一无限大平板在另一固定平面上作如图 1-2 所示的平行运动, $v = 0.3 \text{ m/s}$, 间隙高



$h = 0.3\text{mm}$, 其中充满比重为 $\sigma = 0.88$ 、粘度为 $\mu = 0.65 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 的流体, 间隙中的流速为线性分布。试求: (1) 流体的运动粘度 ν ; (2) 上平板壁面上的切应力 $\tau_{\text{上}}$ 及其方向; (3) 下平面壁面上的切应力 $\tau_{\text{下}}$ 及其方向。

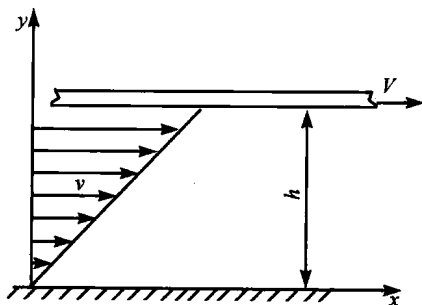


图 1-2

解题分析 本题用牛顿摩擦定律计算切应力。

解题过程 (1) $\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{65 \times 10^{-5}}{0.88 \times 10^3} = 7.4 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$

$$\begin{aligned} (2) \tau_{\text{上}} &= \mu dv/dy \big|_{y=h} = \frac{\mu V}{h} \\ &= \frac{65 \times 10^{-5} \times 0.3}{0.3 \times 10^{-3}} \\ &= 0.65 \text{N/m}^2. \end{aligned}$$

顺 y 轴的方向看去, 上平板壁面为一负平面, 故所得 τ 的正值应指向负 x 轴方向, 即指向左边。

$$(3) \tau_{\text{下}} = \frac{\mu V}{h} = 0.65 \text{N/m}^2.$$

下平面为一正平面, 故正 τ 应指向 x 轴的正方向, 即指向右边。



课后习题全解

○ 1-1. 几种流体的相对密度、密度、比体积的已知值如下表 1-1 所示, 试填写表 1-1 中空白各项数值(取三位有效数字)。



表 1-1

流 体	相对密度 d	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	比体积 $v/(\text{m}^3/\text{kg})$
20℃ 的润滑油	0.880		
20℃ 的液压油		860	
15℃ 的水	0.999		
15℃ 的空气			0.813
燃气轮机燃气			
柴油机废气			0.557
火箭发动机燃料	1.31		
航空汽油		650	
1 200℃ 的熔生铁			

解:答案见表 1-2

表 1-2

流 体	d	ρ	v
20℃ 的润滑油	0.880	880	0.00114
20℃ 的液压油	0.860	860	0.00116
15℃ 的水	0.999	999	0.001
15℃ 的空气	0.00123	1.23	0.813
燃气轮机燃气			
柴油机废气	0.00180	1.80	0.557
火箭发动机燃料	1.31	1310	0.000763
航空汽油	0.650	650	0.00154
1 200℃ 的熔生铁			

◎ 1-2. 整桶机油质量 300 kg, 油桶直径 0.6m, 高 1.2m, 试求机器油的密度。

[答: $\rho = 844 \text{ kg}/\text{m}^3$]