

普通高等教育船舶与海洋工程学科“十三五”规划系列教材



# 船舶流体力学

(第二版)

◎ 夏国泽 杨丹 主编



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等教育船舶与海洋工程学科“十三五”规划系列教材

# 船舶流体力学(第二版)

主 编 夏国泽 杨 丹

华中科技大学出版社  
中国·武汉

## 内 容 简 介

本书是全国高等院校船舶专业“九五”部委级重点教材。

本书论述了流体力学的基本原理,重点讨论了不可压缩流体的运动规律和绕流问题,内容包括:流体的性质;流体静力学;流体运动的描述和基本方程;伯努利方程和积分型基本方程的应用;旋涡理论;势流理论;波浪理论;黏性流体动力学;边界层理论。各章均有适量的习题,书后有附录和习题参考答案。

本书资料丰富,内容翔实,分量适当。结合专业特色,在势流理论、波浪理论和边界层理论等章节中有许多改进和更新,全书思路清晰、论述精练、流畅。

本书可作为船舶、海洋工程专业的教材,也可供其他专业的大学生用作学习流体力学的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

船舶流体力学/夏国泽,杨丹主编.—2版.—武汉:华中科技大学出版社,2018.11

普通高等教育船舶与海洋工程学科“十三五”规划系列教材

ISBN 978-7-5680-4689-3

I. ①船… II. ①夏… ②杨… III. ①船舶流体力学-高等学校-教材 IV. ①U661.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 242234 号

## 船舶流体力学(第二版)

夏国泽 杨 丹 主编

Chuanbo Liuti Lixue

策划编辑:万亚军

责任编辑:吴 晗

封面设计:刘 卉

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:15.25

字 数:395千字

版 次:2018年11月第2版第1次印刷

定 价:38.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

## 出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的《关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定》，中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业规划教材编审、出版的组织工作。

为做好教材编审组织工作，中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组，聘请了有关院校的教授、专家50余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设研究、指导、规划和评审方面的专家组织，主要任务是协助船舶总公司做好高等学校船舶类专业教材的编审工作，为教材质量审查把关。

经过前四轮教材建设，共出版教材300余种，建立了较完善的规章制度，扩大了出版渠道，在教材的编审依据、计划体制、出版体制等方面实行了有成效的改革，这些为“九五”期间船舶类专业教材建设奠定了良好基础。根据国家教委对“九五”期间高校教材建设要“抓好重点教材，全面提高质量，继续增加品种，整体优化配套，深化管理体制和运行机制的改革，加强组织领导”的要求，船舶总公司于1996年又制定了“全国高等学校船舶类专业教材‘九五’选题规划”。列入规划的选题共133种，其中部委级重点选题49种，一般选题84种。

“九五”教材规划是在我国发展社会主义市场经济条件下第一个教材规划，为适应社会主义市场经济外部环境，“九五”船舶类专业教材建设实行指导性计划体制。即在指导性教材计划指导下，教材编审出版由主编学校负责组织实施，教材委员会(小组)进行质量审查，教材编审室组织协调。

“九五”期间要突出抓好重点教材，全面提高教材质量，为此教材建设引入竞争机制，通过教材委员会(小组)评审、择优确定主编，实行主编负责制。教材质量审查实行主审、复审制，聘请主编校以外的专家审稿，最后教材委员会(小组)复审，复审合格后由有关教材委员会(小组)发出版推荐证书，出版社方可出版。全国高校船舶类专业规划教材，就是通过严密的编审程序和高标准、严要求的审稿工作来保证教材质量。

为完成“九五”教材规划，主编学校应充分发挥主导作用。规划教材的立项是由学校申报，立项后由主编校组织实施，教材出版后由学校组织选用，学校是教材编写与教材选用的行为主体，教材计划的执行主要取决于主编校工作情况。希望有关高校切实负起责任，各有关方面积极配合，为完成“九五”船舶类专业教材规划、为编写出版更多的精品教材而努力。

由于水平和经验局限，教材的编审出版工作和教材本身还会有很多缺点和不足，希望各有关高校、同行专家和广大读者提出宝贵意见，以便改进提高。

中国船舶工业总公司教材编审室

一九九七年四月

## 序

海洋是孕育生命的“摇篮”，也是养育生命的“牧场”，人类社会发展的历史进程与海洋息息相关。自古以来，人类在利用海洋获得“鱼盐之利”的同时，也获得了“舟楫之便”，仅海上运输一项，就占到了目前国际贸易总运量中的 2/3 以上。而今随着科学技术的发展，海洋油气开发、海洋能源开发、海水综合利用和海洋生物资源开发及保护等拉开了 21 世纪——海洋新世纪的帷幕。传统的船舶工程因海洋开发而焕发青春，越来越明朗地成为 21 世纪一道亮丽的风景线。

船舶与海洋工程学科是一个有着显著应用背景的学科。大型船舶和海上石油钻井平台是这个学科工程应用的两个典型标志。它们就如同海上的城市，除了宏大的外观，其上也装备有与陆上相类似的设施，如电站及电网系统、起吊设备、生活起居设施、直升机起降平台等，还装备有独特的设施，如驾控室、动力装置、推进系统、锚泊设备等。因此，该学科与其他相关学科有着密切的联系，如土木工程、动力工程及工程热物理、机械工程、电气工程、控制科学与工程等学科。将现代化的船舶与海洋工程的产品称为集科技大成之作，毫不夸张。

为了满足船舶与海洋工程学科本科生的学习需要，我们在多年教学、科研工作的基础上，并参考兄弟院校的相关教材及国内外有关资料文献，编写了本系列教材。本系列教材涵盖了船舶与海洋工程专业和轮机工程专业的主要学习课程，包括船舶与海洋工程概论、轮机工程概论、船舶流体力学、船舶设计原理、船舶与海洋工程结构力学、船舶摇摆与操纵、海洋平台设计原理、海洋资源与环境、舰船电力系统及自动装置、船舶动力装置原理与设计、深海机械与电子技术、舰船液压系统等。本系列教材的编写，旨在为船舶与海洋工程学科相关专业的本科生提供系统的学习教材，同时也向从事造船、航运、海洋开发的科技工作者及对船舶与海洋工程知识有兴趣的广大读者提供一套系统介绍船舶与海洋工程知识的参考书。

教材建设是高校教学中的基础性工作，是一项长期的工作，需要不断吸取人才培养模式和教学改革成果，吸取学科和行业的知识、新技术、新成果。本套教材的编写出版只是近年来华中科技大学船舶与海洋工程学院教学改革的初步总结，还需要各位专家、同行提出宝贵意见，以进一步修订、完善，不断提高教材质量。

华中科技大学船舶与海洋工程学科规划教材编写组

2014 年 8 月

# 再版前言

“船舶流体力学”是船舶与海洋工程专业的一门重要技术基础课。一方面,本专业许多后续课程要以它为基础;另一方面,随着海洋工程和高性能船舶技术的发展,流体力学方面会有更多、更迫切的问题提出来,所以,书中力图贯彻“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则,在传授知识的基础上尽量注意到能力的培养,以适应科技发展和教育改革的需要。

《船舶流体力学》自 2003 年出版以来至今已有 15 年,在船舶与海洋工程专业广泛使用,对专业的发展做出了积极贡献。本版修订考虑到目前的教学状态,仍保留了首版的基本内容和本专业特色,内容由浅入深、循序渐进,便于独立学习。

根据教材使用单位意见,本次修订的主要工作有:进一步修正了各概念的定义和诠释,并对全书进行了较全面的总结;对公式、变量表达和推导中的不妥和笔误之处进行了修改;第五章增加卡门涡街内容(5.8 节);各章节的内容进一步增强专业领域内的实际工程应用,使读者易于理解。

本书论述了流体力学的基本原理,重点讨论了不可压缩流体的运动规律和绕流问题,介绍了一些基本理论方法和结果。全部授完本书的内容需 70~80 学时。选学内容均在标题前面以“\*”号注明。为便于学习,书后有附表、附录和习题答案。

在编写本书过程中参考了许多有关著作,从中获益匪浅,在此谨向这些作者表示感谢。

华中科技大学出版社和船舶与海洋工程学院的有关同志对本书的出版给予了大力支持和帮助,谨此表示感谢。

由于编者水平所限,书中的缺点和错误在所难免,恳请使用本书的教师和读者予以批评指正。

编者

于华中科技大学

2018 年 5 月

# 目 录

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| <b>第 1 章 流体的性质</b> .....            | (1)  |
| 1.1 流体的连续介质模型 .....                 | (1)  |
| 1.2 流体的压缩性 .....                    | (2)  |
| 1.3 流体的黏性 .....                     | (4)  |
| 1.4 作用在流体上的力 .....                  | (7)  |
| 1.5 应力张量 .....                      | (8)  |
| 1.6 理想流体中压力的大小与方向无关.....            | (10) |
| 习题 .....                            | (10) |
| <b>第 2 章 流体静力学</b> .....            | (12) |
| 2.1 流体静力学方程.....                    | (12) |
| 2.2 流体平衡的一些要求.....                  | (14) |
| 2.3 平衡流体的等压面.....                   | (16) |
| 2.4 重力场中流体的静压分布.....                | (18) |
| 2.5 压力计.....                        | (19) |
| 2.6 静止流体在平板上的作用力.....               | (21) |
| 2.7 静止流体在曲面上的作用力.....               | (23) |
| 2.8 阿基米德原理.....                     | (25) |
| 习题 .....                            | (27) |
| <b>第 3 章 流体运动的描述和基本方程</b> .....     | (30) |
| 3.1 描述流体运动的方法.....                  | (30) |
| 3.2 流场的几何描述.....                    | (33) |
| 3.3 流体运动的基本方程(拉格朗日型).....           | (37) |
| 3.4 系统导数——雷诺输运公式.....               | (38) |
| 3.5 积分形式的基本方程(欧拉型).....             | (39) |
| 3.6 微分形式的基本方程.....                  | (39) |
| 习题 .....                            | (43) |
| <b>第 4 章 伯努利方程和积分型基本方程的应用</b> ..... | (45) |
| 4.1 伯努利方程.....                      | (45) |
| 4.2 定常流管的质量守恒方程.....                | (48) |
| 4.3 空泡、船吸等现象的浅释 .....               | (50) |
| 4.4 低速测量.....                       | (51) |
| 4.5 小孔口出流问题.....                    | (53) |
| 4.6 定常流中积分型基本方程的应用.....             | (54) |
| 习题 .....                            | (61) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| <b>第 5 章 旋涡理论</b> .....    | (64)  |
| 5.1 旋涡运动的基本概念 .....        | (64)  |
| 5.2 速度环量和斯托克斯定理 .....      | (67)  |
| 5.3 汤姆逊定理 .....            | (69)  |
| 5.4 拉格朗日定理 .....           | (70)  |
| 5.5 海姆霍兹定理 .....           | (71)  |
| 5.6 旋涡的诱导速度 .....          | (72)  |
| 5.7 兰金涡 .....              | (76)  |
| 5.8 卡门涡街 .....             | (78)  |
| 习题 .....                   | (79)  |
| <b>第 6 章 势流理论(一)</b> ..... | (81)  |
| 6.1 无旋运动和速度势 .....         | (81)  |
| 6.2 不可压势流的基本方程和边界条件 .....  | (82)  |
| 6.3 二维流动和流函数 .....         | (85)  |
| 6.4 复势和复速度 .....           | (87)  |
| 6.5 不可压平面势流的基本解 .....      | (88)  |
| 6.6 绕圆柱体的流动 .....          | (94)  |
| 6.7 布拉修斯公式 .....           | (98)  |
| 6.8 库塔-儒可夫斯基定理 .....       | (100) |
| 6.9 保角变换方法的应用 .....        | (101) |
| 6.10 映像法 .....             | (109) |
| 6.11 基于奇点法的翼剖面理论 .....     | (114) |
| 6.12 面元法 .....             | (119) |
| 6.13 附加质量 .....            | (122) |
| 习题 .....                   | (125) |
| <b>第 7 章 势流理论(二)</b> ..... | (128) |
| 7.1 轴对称流动 .....            | (128) |
| 7.2 细长旋转体轴向流动的线性理论 .....   | (129) |
| 7.3 有限翼展机翼 .....           | (132) |
| 7.4 升力线理论 .....            | (134) |
| 7.5 展弦比换算式 .....           | (139) |
| 7.6 小展弦比机翼 .....           | (141) |
| 习题 .....                   | (143) |
| <b>第 8 章 波浪理论</b> .....    | (144) |
| 8.1 波浪运动的基本方程与边界条件 .....   | (144) |
| 8.2 小振幅波的速度势 .....         | (147) |
| 8.3 小振幅波的要素 .....          | (148) |
| 8.4 流体质点的运动、压力分布 .....     | (150) |



|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 8.5 波能及其传递 .....                    | (153) |
| 8.6 波群和群速度 .....                    | (155) |
| 8.7 波浪的浅水效应 .....                   | (156) |
| 8.8 二维船波 .....                      | (159) |
| * 8.9 开尔文波 .....                    | (161) |
| 习题 .....                            | (164) |
| <b>第 9 章 黏性流体动力学</b> .....          | (165) |
| 9.1 纳维-斯托克斯方程 .....                 | (165) |
| 9.2 黏性流体运动的相似律 .....                | (168) |
| 9.3 量纲分析 .....                      | (173) |
| 9.4 黏性不可压缩流动的准确解 .....              | (176) |
| 9.5 层流和湍流 .....                     | (182) |
| 9.6 湍流的基本方程 .....                   | (184) |
| 9.7 湍流模式理论 .....                    | (186) |
| 9.8 圆管中充分发展湍流的速度分布 .....            | (189) |
| 9.9 光滑圆管的阻力系数 .....                 | (192) |
| 9.10 管路计算 .....                     | (194) |
| 习题 .....                            | (195) |
| <b>第 10 章 边界层理论</b> .....           | (197) |
| 10.1 普朗特边界层方程 .....                 | (197) |
| 10.2 平板层流边界层的精确解 .....              | (200) |
| 10.3 平板边界层的动量分析 .....               | (205) |
| 10.4 平板层流边界层的近似解 .....              | (207) |
| 10.5 湍流边界层的速度分布 .....               | (208) |
| 10.6 平板湍流边界层计算 .....                | (210) |
| 10.7 平板阻力的工程估算 .....                | (211) |
| * 10.8 动量积分方程及其解法 .....             | (213) |
| 10.9 曲面边界层内的流动和分离 .....             | (217) |
| 10.10 黏性阻力和边界层控制 .....              | (220) |
| 习题 .....                            | (222) |
| <b>附录</b> .....                     | (224) |
| 附录 A 运动黏性系数和密度表 .....               | (224) |
| 附录 B 常用公式 .....                     | (226) |
| 附录 C 质量守恒方程、N-S 方程和流线方程(不可压流) ..... | (226) |
| <b>习题参考答案</b> .....                 | (228) |
| <b>参考文献</b> .....                   | (233) |

# 第 1 章 流体的性质

流体是液体和气体的统称。流体力学研究流体的宏观运动规律,以及流体和与之接触的物体之间的相互作用问题。根据研究对象的不同,流体力学可分为水动力学和空气动力学。

船舶流体力学是一门研究与船舶及海洋结构物有关的流体流动的学科,又称船舶水动力学。随着造船行业的发展,围绕船舶理论逐步形成了船舶水动力学,应用流体力学理论与实验的方法研究船舶的快速性与运动性能。船舶流体力学的研究内容主要包括:船舶的阻力性能;船舶的推进性能;船舶的操纵与摇摆;船舶的适航性能;船舶的浮性和稳性;计算流体力学;水波理论;流体动力测试技术等。此外,船舶流体力学的研究对象还扩展到海洋工程结构物、潜器、水下鱼雷和导弹等,研究的内容还包括了水弹性力学(结构与流体的动力学及其耦合问题)。船舶流体力学的实验设备主要是船舶拖曳水池、操纵性水池、水槽、风洞、螺旋桨空泡水筒等。

## 1.1 流体的连续介质模型

### 1.1.1 流体

从力学观点看,流体和固体的差别主要在于它们对剪力的承受能力不同。固体能够产生一定的变形来承受剪应力;流体则不能。无论剪应力多么小,流体都将连续不断地变形——流动,直到剪应力变为零为止。这时流体只承受压力而处于平衡状态。

液体和气体之间也有差别,从力学观点看,差别仅在于它们的可压缩程度不同。液体在常温常压下有确定的体积,很难压缩,因此,当空间容积比液体体积大时,它会出现自由液面。气体容易压缩,又能够均匀充满整个给定的有限空间,因而它不会出现自由面。当压缩性和自由面的影响可以忽略不计时,液体和气体的流动规律就完全一样了。

### 1.1.2 流体密度与流体质点

密度是流体的一个基本物理量。若均匀流体中流体的体积为  $\Delta V$ ,质量为  $\Delta m$ ,则比值

$$\rho_{\text{平均}} = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1.1)$$

称为平均密度。如果流体质量分布不均匀,就需要取极限来确定各点的质量分布密度,简称流体密度,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \tau_0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1.2)$$

式中,  $\tau_0$ ——包含任意指定点  $A(x, y, z)$  在内的极限体积。当  $\Delta V < \tau_0$  时,其中所含流体分子数过少,分子运动的随机性会影响质量的统计平均值;当  $\Delta V > \tau_0$  时,宏观的质量分布不均匀会带来误差。 $\Delta m/\Delta V$  随  $\Delta V$  变化的示意图如图 1.1.1 所示。对于所有液体以及在  $10^5$  Pa 压力下的气体,  $\tau_0$  大约是  $10^{-9}$  mm<sup>3</sup>。

流体质点指的是极限体积流体,或者说,是 $\tau_0$ 内流体分子的总和。从宏观看,流体质点要多小就可有多小,从微观看,它又足够大,其中大量分子运动的统计平均量应足以代表流体的宏观属性,例如体积为 $10^{-10} \text{ mm}^3$ 的水中含有大约 $3.3 \times 10^9$ 个分子。

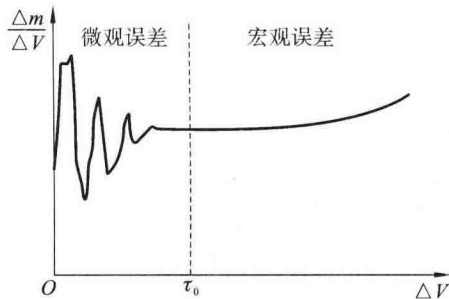


图 1.1.1 流体的密度

### 1.1.3 连续介质模型

流体力学在远远大于分子运动尺度的范围内研究流体的运动,而不考虑流体分子的个别行为,因此,可以将流体视为连续介质,这就是所谓的连续介质模型或者连续介质假设。连续介质的概念源于数学。从数学上讲,实数系是一个连续集。在任意两个不同的实数之间必定存在另一个不同的实数,因而,在任何两个不同的实数之间就有无穷多个实数。时间可以用一个实数系 $t$ 代表,三维空间可以用三个实数系 $x, y, z$ 来代表,于是可以将时间和空间看成一个四维的连续集。将连续集的概念推广到物质时,认为物质在空间是连续分布的,这种物质就是连续介质。

在假设流体为连续介质的条件下,流体的密度可以定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1.3)$$

用类似的方法还可以定义动量密度、能量密度等。因此也可以说,如果某种物质的质量、动量、能量密度在上述数学意义上存在,则这种物质就是连续介质。

流体的连续介质模型有如下特性:

(1) 流体可以无限分割为任意小的流体质点。质点的质量分布是均匀的,其流体状态服从热力学关系;

(2) 除特殊情况外,流体的力学和热力学参数在时空中是连续分布的,而且通常认为是无限可微的。

因此,可以应用连续函数的数学方法对流体的运动及动力学问题进行分析。

## 1.2 流体的压缩性

### 1.2.1 状态方程

气体的密度 $\rho$ 受温度 $T$ 和压强 $p$ 的影响显著,气体密度通常随压强的增高而增大,随温度的升高而减小,它们之间的关系可以用热力学状态方程表示,即

$$p = p(\rho, T) \quad (1.2.1)$$

常见的气体大多数服从完全气体状态方程

$$\rho = \frac{p}{gRT} \quad (1.2.2)$$

式中:  $g$ ——重力加速度,  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ;

$T$ ——绝对温度(K);

$R$ ——气体常数, 对于空气,  $R=29.27 \text{ m}^2/\text{K}$ ;

$p$ ——压强(Pa);

$\rho$ ——密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

水的密度随温度升高而略微降低(见附表 A.1), 随压强增加而加大。不计温度的影响时, 有下列的经验关系式:

$$\frac{p}{p_0} \approx (B+1) \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - B \quad (1.2.3)$$

式中:  $p_0=101325 \text{ Pa}$ ;

$\rho_0=999.2 \text{ kg}/\text{m}^3$  (淡水),  $1026 \text{ kg}/\text{m}^3$  (海水);

$B \approx 3000$ ;

$n \approx 7$ 。

### 1.2.2 压缩性和膨胀性

流体密度随压力而改变的性质称为压缩性, 随温度而改变的性质称为热膨胀性。流体密度的一般函数关系式为

$$\rho = \rho(p, T)$$

由此可求得密度随压力和温度变化的改变量, 即

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial p} dp + \frac{\partial \rho}{\partial T} dT$$

或

$$\frac{d\rho}{\rho} = \alpha_T dp - \beta dT \quad (1.2.4)$$

式中:  $\alpha_T$ ——等温压缩系数,  $\alpha_T = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$ ;

$\beta$ ——等压热膨胀系数,  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$ 。

等温压缩系数的倒数称为体积弹性模量, 记为

$$E = \frac{1}{\alpha_T} = \rho \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad (1.2.5)$$

先比较一下水和空气的压缩性。由(1.2.4)式和(1.2.5)式可得

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta p}{E} \quad (1.2.6)$$

水的  $E \approx 2.04 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^2$ , 在增加一个大气压, 即  $\Delta p = 101325 \text{ Pa}$  的情况下, 由(1.2.6)式可得水密度的相对变化量  $\Delta \rho/\rho \approx 0.5 \times 10^{-4}$ , 可见水的压缩性是极小的。在同样的温度条件下, 空气的可压缩性要大得多, 这时由(1.2.2)式可得

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta p}{p} \quad (1.2.7)$$

它表明压力加大一倍密度也加大一倍。从以上对比可知,空气比水容易压缩得多。

再比较水和空气的膨胀性。在  $10^5$  Pa 压力下,温度为  $10\sim 20$  °C 时,水的  $\beta$  值为  $1.5\times 10^{-4}(\text{°C})^{-1}$ ,因此,当温度从  $10$  °C 增加到  $20$  °C 时,水的密度相对下降约为  $1.5\times 10^{-3}$ ,对于空气,可由状态方程导出

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T} \quad (1.2.8)$$

由此关系可得

$$\left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = - \left( \frac{\Delta T}{T} \right) = -\frac{10}{283} = -3.5\%$$

可见,空气的膨胀性也比水的大得多。

### 1.2.3 可压缩流体和不可压缩流体

从上面空气和水的压缩性比较可知,水不容易压缩,空气容易压缩。这只是从物理性质比较得到的概念,不能由此简单地得出结论:水是不可压缩流体,空气是可压缩流体。

流体力学中,不可压缩流体系指运动引起的密度变化可以忽略不计的流体。分析表明,当马赫数(Mach number)(气流速度  $v$  和当地音速  $a$  的比值)  $Ma = v/a \leq 0.3$  时,无需考虑空气的压缩性影响,可将空气视为不可压缩流体。在标准大气条件( $t_0 = 15$  °C,  $p_0 = 101325$  Pa,  $\rho_0 = 1.225$  kg/m<sup>3</sup>)下,海平面上的音速  $a_0 = 340.294$  m/s,因此,速度  $v \leq 100$  m/s 的气流都可以认为是不可压缩的。水下声速约为  $1400$  m/s,水流一般都认为是不可压缩的,但也有例外,在水下强烈爆炸的情况下,压力的急剧变化将引起密度的显著改变,这时水也是可压缩流体。因此,流体的可压缩性和可压缩性对流体的影响并不是一回事,前者仅仅是一种物性,后者则与流动的条件有关,因而也与流场本身的特性有关。

不可压缩流体的密度等于常数,即

$$\rho = \text{常数} \quad (1.2.9)$$

## 1.3 流体的黏性

流体运动时,流体内部具有抵抗相互滑移的能力,这种属性称为流体的黏性。实际上,流体都有黏性,但只在运动过程中才有可能表现出来。黏性作为流体的一种宏观物理属性,它与流体分子的热运动、分子间的相互作用以及由此在非均匀速度场中产生的动量输运密切相关。

### 1.3.1 牛顿内摩擦定律

流体内部抵抗相互滑移的力称为黏性力或内摩擦力。这种力可以通过实验测出来。如图 1.3.1 所示,水平放置的下平板是固定不动的,上面的平行平板在力  $F$  作用下以速度  $V$  向右运动。由于流体具有黏性,故紧贴平板的流体运动速度应与平板相等,在两平板之间,各层流体的运动速度都不同。如果两平行平板相距很近,那么各层流体的速度矢端曲线(通常称为速度剖面或速度型)可以认为是一条直线,因此,有

$$v = \frac{V}{y_0} y \quad (1.3.1)$$

式中: $y_0$ ——两平板之间的距离。具有这种速度剖面的流动称为线性剪切流动。

实验表明,加在上平板上的力  $F$  与速度  $V$  以及上平板面积  $S$  成正比,与两平板之间的距

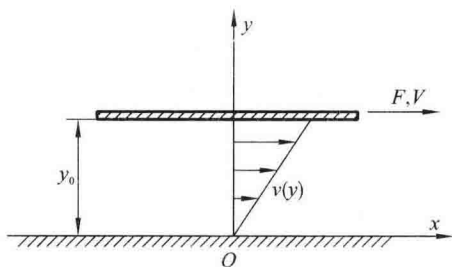


图 1.3.1 黏性力的测定

离  $y_0$  成反比,即

$$F \propto \frac{VS}{y_0} \quad \text{或} \quad \frac{F}{S} \propto \frac{V}{y_0}$$

写成等式,考虑到(1.3.1)式有

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{V}{y_0} = \mu \frac{v}{y} \quad (1.3.2)$$

显然  $\tau = F/S$  就是为克服流体的内摩擦必须加在上平板单位面积上的力。此力通过上平板又加在流体顶层表面上,然后向下逐层传递,一直传递到下面的平板为止。流体内部这种与运动方向平行的单位面积上的力称为剪应力。式中的比例系数  $\mu$  称为黏性系数。

进一步的实验证实,一般情况下,流体的剪应力(内摩擦应力)

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.3.3)$$

式中:  $dv/dy$ —— $x$  方向的速度在  $y$  方向的变化率,通常称其为  $y$  方向的速度梯度。剪应力方向和速度梯度方向是垂直的。这个公式是由实验得到的,通常称为牛顿内摩擦定律。符合此定律的流体称为牛顿流体,空气和水是自然界最典型的牛顿流体。牛顿流体最典型的特征是:剪应力和速度梯度呈线性关系。

### 1.3.2 黏性系数 $\mu$ 和 $\nu$

流体的黏性系数  $\mu$  常和密度  $\rho$  一起,以  $\mu/\rho$  的形式出现,为方便起见,令

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.3.4)$$

并称  $\nu$  为运动黏性系数。它的量纲  $[\nu] = L^2 T^{-1}$ , 其中,  $L$  是长度量纲,  $T$  是时间量纲。 $\mu$  又称为动力黏性系数,其量纲为  $[\mu] = ML^{-1} T$ , 其中  $M$  是质量的量纲。

空气的黏性系数  $\mu$  可按 Sutherland 公式计算:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + T_s}{T + T_s} \quad (1.3.5)$$

式中,  $T_s = 110.4 \text{ K}$ ,  $T_0 = 288.15 \text{ K}$ ,  $\mu_0 = 17.89 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ , 数值计算结果如附表 A.2 所示。

水(淡水和海水)的运动黏性系数随温度的变化而变化,其数据如附表 A.1 所示。

现将空气、淡水、海水在  $15^\circ\text{C}$ 、一个大气压 ( $p = 101325 \text{ Pa}$ ) 下的密度、黏性系数的常用值列于表 1.3.1 中。

空气和水的  $\nu$  值随温度变化而变化的曲线如图 1.3.2 所示。两条曲线的变化趋势相反,这是因为气体的黏性与分子热运动有关,温度升高,分子热运动加强,动量交换增加,各流层之

间的相互制约加强,因而黏性系数变大;液体的黏性主要取决于液体分子间的聚集力,当温度升高时,液体分子振动加强,分子间聚集力变小,因而黏性系数随温度上升而减小。

表 1.3.1 常用黏性系数表 ( $t=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1.01325\times 10^5\text{ Pa}$ )

|    | $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $\mu\times 10^6/(\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}))$ | $\nu\times 10^6/(\text{m}^2/\text{s})$ |
|----|-------------------------------|--|--|
| 空气 | 1.225                         | 17.89  | 14.60                                  |
| 淡水 | 999.2                         | 1139   | 1.14                                   |
| 海水 | 1026                          | 1221   | 1.19                                   |

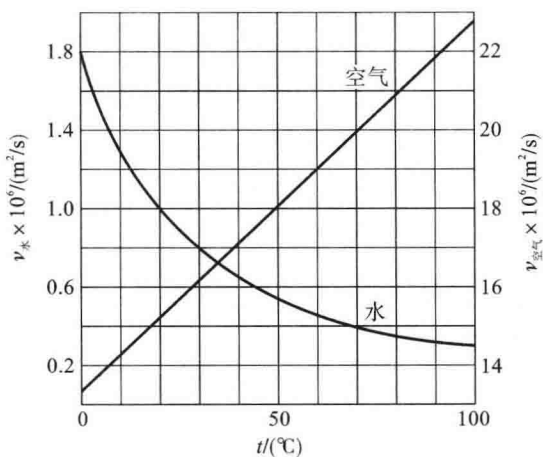


图 1.3.2  $\nu$  随温度的变化而变化的曲线

### 1.3.3 黏性流体和理想流体

现在来考察黏性对流体运动的影响。图 1.3.3 所示的是半无限长平板上的均匀直线流动,远前方来流与板面平行,速度记为  $v_{\infty}$ 。当流体流经平板时,平板对流体有阻滞作用,紧靠平板的流体速度趋于零,远离平板的流体速度大。平板板面法线上各点的水平速度  $v = v(x, y)$ , 可以用测速仪测量出来。可以发现,当  $y \geq \delta(x)$  以后,  $\partial v / \partial y \rightarrow 0, v \rightarrow v_{\infty}$ 。图 1.3.3 中用虚线表示  $\delta(x)$  随  $x$  的变化。在  $\delta(x)$  和板面之间的流体运动,因为  $\partial v / \partial y \neq 0$ , 剪应力  $\tau \neq 0$ , 这是流体黏性影响的必然结果。在  $\delta(x)$  以外的流场,因为  $\partial v / \partial y = 0$ , 剪应力  $\tau = 0$ , 这表明流体黏性的影响完全可以忽略,流体可以看成是无黏(性)的。无黏的流体称为理想流体。运动过程中要考虑黏性影响的流体则称为黏性流体。

可以从数量上对  $\delta(x)$  作一估计。设来流从平板前缘流到下游  $x$  处所用时间为  $t$ , 它与  $x/v_{\infty}$  同一数量级。在  $t$  时间内,平板对流体的阻滞作用通过内摩擦传向流体内部的垂直距离记为  $\delta(x)$ , 它的大小与黏性系数  $\nu$  及时间  $t$  有关。从量纲看,  $\sqrt{\nu t}$  有长度量纲,因此,可以认为  $\delta(x)$  和  $\sqrt{\nu t}$  是同一数量级的,于是

$$\frac{\delta(x)}{x} \sim \frac{\sqrt{\nu t}}{x} \sim \frac{\sqrt{\nu x / v_{\infty}}}{x} = \frac{1}{\sqrt{Re_x}} \quad (1.3.6)$$

式中:

$$Re_x = \frac{v_{\infty} x}{\nu} \quad (1.3.7)$$

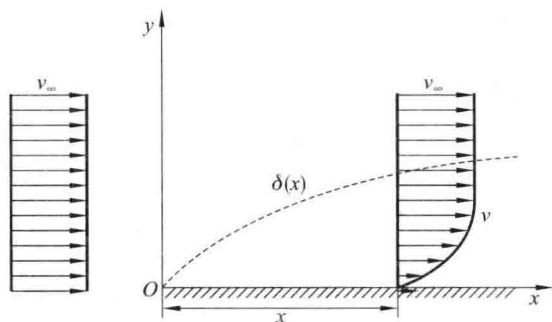


图 1.3.3 平板上的黏性流动

称为雷诺数(常写成  $Re$  数);波浪号 $\sim$ 用来表示两边的量数量级相等。可以看出,在大  $Re$  数时,黏性影响区相对很薄,这一薄层称为边界层(或附面层,详见第 10 章)。在边界层以外是主流区,这个区域的流体运动自然应采用理想流体这一简化模型(即  $\mu=0$ )来加以处理。

运动物体所受到的流体动力可以分成:①与运动方向垂直的分力——升力;②与运动方向相反的分力——阻力。解决升力问题用的是理想流体运动理论。解决阻力问题需要对边界层内的流动进行分析,即便如此,也少不了先进行无黏流动的计算。所以,理想流体的运动理论占有十分重要的地位。

理想流体流经固壁时不会黏附于壁面上,它将一滑而过。如果半无限长平板上方做均匀直线运动的是理想流体,壁面法线方向的速度分布将如图 1.3.4 所示。确切地说,其特征就是,壁面切线方向的分速  $v_t \neq 0$ 。因此,理想流体绕物体的无分离流动所要满足的物面边界条件为

$$\text{物面法线方向分速 } v_n = 0 \quad (1.3.8)$$

这个条件称为可滑移条件。

黏性流体在物面上不能滑移,相应的边界条件称为无滑移条件(或黏附条件),即

$$\begin{aligned} \text{物面法线方向分速} & \quad v_n = 0 \\ \text{物面切线方向分速} & \quad v_t = 0 \end{aligned} \quad (1.3.9)$$

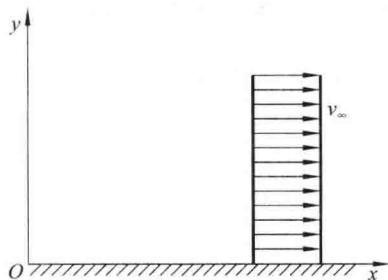


图 1.3.4 平板上的理想流体运动

## 1.4 作用在流体上的力

作用在流体上的力分为两类:质量力和表面力。

### 1. 质量力

这是超距离作用力,作用在流体的每个质点上。例如重力、惯性力、电磁力等。

### 2. 表面力

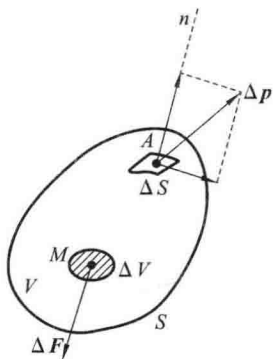
这是接触作用力,即周围流体或固体作用在该流体表面上的力,例如压力、摩擦力等。

流体是连续介质,因此质量力和表面力都是连续的分布力,需要定义它们的分布强度,以便衡量其大小。



### 1.4.1 质量力及其分布强度

在体积为  $V$ , 表面积为  $S$  的一块流体中, 包含任意指定点  $M(x, y, z)$  在内取微元体积  $\Delta V$ , 作用在该微元体上的质量为  $\Delta F$  (见图 1.4.1), 当  $\Delta V \rightarrow 0$  时, 下列极限值就是质量力在  $M$  点的分布强度



$$f = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\rho \Delta V} = \frac{dF}{\rho dV} \quad (1.4.1)$$

显然,  $f$  是空间和时间的连续函数, 即

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

已知  $f$  就可以计算整块流体受到的质量力:

$$F = \int_V \rho f dV \quad (1.4.2)$$

在重力场中, 质量为  $\rho dV$  的流体的重力为

$$dG = \rho dV \cdot g \quad (1.4.3)$$

图 1.4.1 质量力和表面力

将(1.4.3)式和(1.4.1)式比较可知, 重力加速度  $g$  就是重力的分布强度。由(1.4.1)式可知, 质量力的分布强度也就是

单位质量流体所受到的质量力, 简称为单位质量力。

### 1.4.2 表面力及其分布强度

如图 1.4.1 所示, 在流体表面上包含指定点  $A(x, y, z)$  在内取微元面积  $\Delta S$ , 其上作用的表面力记为  $\Delta P$ ,  $n$  为  $\Delta S$  在  $A$  点的外法线单位矢量。用下式定义表面力在  $A$  点的分布强度, 并称为  $A$  点的应力:

$$p_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (1.4.4)$$

$p_n$  和  $n$  一般不共线, 所以通常将  $p_n$  按下列定义分解成几个分量。

**定义 1** 应力矢量  $p_n$  在作用面外法线方向的分量  $p_m$  称为正应力。

约定正值的正应力和  $n$  同向, 并称之为拉应力; 负值的正应力则称之为压应力, 简称为压力(即压强)。流体几乎不能承受任何拉应力, 只承受压力。

**定义 2** 应力矢量  $p_n$  在作用面的切平面上两个相互垂直的分量  $p_\pi$  和  $p_m$  为剪应力(或切应力)。

应力分量使用了两个下标, 第一下标表示作用面的方向, 第二下标表示应力分量的方向。

请注意, 过  $A$  点的微元面有无限多个, 这里  $p_n$  仅仅是外法线单位矢量为  $n$  的那个微元面上  $A$  点的应力矢量。同一点上不同方向的应力矢量是不同的。简而言之, 应力和它的作用面的方向有关。

按照(1.4.4)式的定义, 应力矢量  $p_n$  是外界对流体施加的应力, 那么  $p_{-n}$  就是该流体对外界的反作用, 二者大小相等方向相反, 因此,

$$p_n = -p_{-n} \quad (1.4.5)$$

## 1.5 应力张量

1.4 节曾指出, 一点的应力和它的作用面的方向有关。下面来证明: 只要知道通过该点相