

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

全国高校船舶类专业“九五”部委级重点教材

船舶流体力学

CHUANBO LIUTI LIXUE

夏国泽 编著 马乾初 主审

华中科技大学出版社

全国高校船舶类专业“九五”部委级重点教材

船舶流体力学

夏国泽 编著

马乾初 主审

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶流体力学/夏国泽 编著

武汉:华中科技大学出版社, 2003年1月

ISBN 7-5609-2587-1

I. 船…

II. 夏…

III. 船舶-流体力学-高等学校-教材

IV. U661.1

船舶流体力学

夏国泽 编著

责任编辑:叶见欣

封面设计:潘群

责任校对:张兴田

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录排:华中科技大学出版社照排室

印刷:湖北省通山县印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:15.25

字数:343 000

版次:2003年1月第1版

印次:2003年1月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-2587-1/U·17

定价:19.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

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;粘性流体动力学;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。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,结合专业有特色。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。

出版说明

根据国务院发(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，其中部省级重点选题 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

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。

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。全部授完本书的基本内容约需 60~70 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,在此谨向这些作者们表示感谢。

本书由武汉理工大学马乾初教授主审。

华中科技大学教务处、出版社和交通学院的有关同志,石仲堃教授对本书的出版给予了大力支持和鼓励,谨此一并致谢。

由于编者水平所限,书中缺点错误在所难免,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

2001 年 4 月

目 录

| | |
|--------------------------------|------|
| 第一章 流体的性质 | (1) |
| 1.1 流体的连续介质模型 | (1) |
| 1.1.1 流体 | (1) |
| 1.1.2 流体密度、流体质点 | (1) |
| 1.1.3 连续介质模型 | (2) |
| 1.2 流体的压缩性 | (2) |
| 1.2.1 状态方程 | (2) |
| 1.2.2 压缩性和膨胀性 | (3) |
| 1.2.3 可压缩流体和不可压缩流体 | (3) |
| 1.3 流体的粘性 | (4) |
| 1.3.1 牛顿内摩擦定律 | (4) |
| 1.3.2 粘性系数 μ 和 ν | (5) |
| 1.3.3 粘性流体和理想流体 | (5) |
| 1.4 作用在流体上的力 | (7) |
| 1.4.1 质量力及其分布强度 | (7) |
| 1.4.2 表面力及其分布强度 | (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 | (9) |
| 习题 | (10) |
| 第二章 流体静力学 | (12) |
| 2.1 流体静力学方程 | (12) |
| 2.2 流体平衡的一些要求 | (14) |
| 2.2.1 质量力的要求 | (14) |
| 2.2.2 流体的要求 | (15) |
| 2.3 平衡流体的等压面 | (16) |
| 2.4 重力场中流体的静压分布 | (17) |
| 2.5 压力计 | (19) |
| 2.5.1 液柱式压力计原理 | (19) |
| 2.5.2 压力计分类概述 | (20) |
| 2.6 静止流体在平板上的作用力 | (20) |
| 2.7 静止流体在曲面上的作用力 | (23) |
| 2.8 阿基米德原理 | (25) |
| 2.8.1 阿基米德原理 | (25) |
| 2.8.2 浮体的平衡 | (26) |
| 习题 | (26) |

| | |
|-----------------------------------|------|
| 第三章 流体运动的描述和基本方程 | (30) |
| 3.1 描述流体运动的方法..... | (30) |
| 3.1.1 拉格朗日法..... | (30) |
| 3.1.2 欧拉法..... | (31) |
| 3.1.3 质点加速度公式..... | (31) |
| 3.1.4 方程的张量表示法..... | (32) |
| 3.1.5 质点导数..... | (32) |
| 3.2 流场的几何描述..... | (33) |
| 3.2.1 定常流场和非定常流场..... | (33) |
| 3.2.2 流线、驻点、极限流线..... | (34) |
| 3.2.3 迹线..... | (36) |
| 3.2.4 流管..... | (37) |
| 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) |
| 3.6.1 质量守恒方程..... | (39) |
| 3.6.2 动量方程(运动方程)..... | (40) |
| 3.6.3 欧拉运动方程..... | (42) |
| 3.6.4 纳维-斯托克斯方程 | (42) |
| 习题 | (42) |
| 第四章 伯努利方程和积分型基本方程的应用 | (44) |
| 4.1 伯努利方程..... | (44) |
| 4.1.1 定常不可压缩流动的伯努利方程..... | (45) |
| 4.1.2 等熵气流的伯努利方程..... | (45) |
| 4.1.3 压缩性的影响..... | (45) |
| 4.2 定常流管的质量守恒方程..... | (47) |
| 4.2.1 定常流管的质量守恒方程..... | (47) |
| 4.2.2 一维管流速度和面积的关系..... | (47) |
| 4.3 空泡、船吸等现象的浅释 | (48) |
| 4.4 低速测量..... | (50) |
| 4.4.1 皮托管..... | (50) |
| 4.4.2 文特利管..... | (50) |
| 4.5 小孔口出流问题..... | (51) |
| 4.5.1 小孔口定常出流..... | (51) |
| 4.5.2 出口反压不断变化的出流..... | (52) |
| 4.6 定常流中积分型基本方程的应用..... | (53) |
| 4.6.1 弯管壁受到的流体动力..... | (54) |
| 4.6.2 射流对斜面的冲击力..... | (55) |
| 4.6.3 螺旋桨的动量理论..... | (56) |

| | | |
|------------|-----------------|------|
| 4.6.4 | 喷气推进 | (57) |
| 4.6.5 | 气垫船的飞高 | (58) |
| 4.6.6 | 喷水器 | (58) |
| | 习题 | (59) |
| 第五章 | 旋涡理论 | (62) |
| 5.1 | 旋涡运动的基本概念 | (62) |
| 5.1.1 | 涡量和平均旋转角速度 | (62) |
| 5.1.2 | 涡线、涡面和涡管 | (63) |
| 5.1.3 | 涡通量和涡管强度 | (64) |
| 5.2 | 速度环量和斯托克斯定理 | (64) |
| 5.3 | 汤姆逊定理 | (67) |
| 5.4 | 拉格朗日定理 | (68) |
| 5.5 | 海姆霍兹定理 | (69) |
| 5.6 | 旋涡的诱导速度 | (69) |
| 5.6.1 | 点涡 | (70) |
| 5.6.2 | 诱导速度公式 | (70) |
| 5.7 | 兰金涡 | (73) |
| 5.7.1 | 速度分布 | (73) |
| 5.7.2 | 压力分布 | (74) |
| 5.7.3 | 有自由面的情形 | (75) |
| | 习题 | (75) |
| 第六章 | 势流理论(一) | (78) |
| 6.1 | 无旋运动和速度势 | (78) |
| 6.2 | 不可压势流的基本方程和边界条件 | (79) |
| 6.2.1 | 不可压势流的质量守恒方程 | (79) |
| 6.2.2 | 欧拉方程的积分 | (79) |
| 6.2.3 | 边界条件和解法概述 | (81) |
| 6.3 | 二维流动和流函数 | (82) |
| 6.4 | 复势和复速度 | (83) |
| 6.5 | 不可压平面势流的基本解 | (85) |
| 6.5.1 | 直匀流 | (85) |
| 6.5.2 | 点源 | (86) |
| 6.5.3 | 点涡 | (87) |
| 6.5.4 | 偶极子 | (87) |
| 6.5.5 | 叠加的例子 | (89) |
| 6.6 | 绕圆柱体的流动 | (90) |
| 6.6.1 | 绕圆柱体无环量流动 | (90) |
| 6.6.2 | 绕圆柱体有环量流动 | (92) |
| 6.7 | 布拉修斯公式 | (94) |
| 6.8 | 库塔-儒柯夫斯基定理 | (96) |

| | | |
|------------|-------------------|--------------|
| 6.8.1 | 库塔-儒柯夫斯基定理 | (96) |
| 6.8.2 | 决定环量的后缘条件 | (97) |
| 6.9 | 保角变换方法的应用 | (97) |
| 6.9.1 | 平移变换和旋转变换 | (99) |
| 6.9.2 | 儒柯夫斯基变换 | (100) |
| 6.9.3 | 平板无环量绕流 | (102) |
| 6.9.4 | 平板有环量绕流 | (103) |
| 6.10 | 映像法 | (105) |
| 6.10.1 | 直壁的干扰 | (105) |
| 6.10.2 | 圆形壁的干扰 | (107) |
| 6.10.3 | 地面效应 | (108) |
| 6.10.4 | 风洞壁和水池壁产生的映像 | (108) |
| 6.11 | 基于奇点法的翼剖面理论 | (109) |
| 6.11.1 | 翼剖面的几何参数 | (109) |
| 6.11.2 | 基于奇点法的翼剖面理论概述 | (109) |
| 6.11.3 | 对称翼型绕流的数值解 | (110) |
| 6.11.4 | 薄翼理论 | (111) |
| 6.12 | 面元法 | (114) |
| 6.12.1 | 无升力体的面元法 | (114) |
| 6.12.2 | 升力体的面元法 | (116) |
| 6.13 | 附加质量 | (117) |
| 6.13.1 | 基本概念和公式 | (117) |
| 6.13.2 | 绝对速度势、相对速度势和牵连速度势 | (118) |
| 6.13.3 | 圆柱体的附加质量 | (119) |
| 6.13.4 | 一般情形 | (119) |
| | 习题 | (120) |
| 第七章 | 势流理论(二) | (123) |
| 7.1 | 轴对称流动 | (123) |
| 7.2 | 细长旋成体轴向流动的线性理论 | (124) |
| 7.2.1 | 空间点源 | (124) |
| 7.2.2 | 细长旋成体的线性理论 | (124) |
| 7.3 | 有限翼展机翼 | (127) |
| 7.3.1 | 机翼的几何参数 | (127) |
| 7.3.2 | 有限翼展机翼 | (127) |
| 7.3.3 | 下洗和诱导阻力 | (128) |
| 7.4 | 升力线理论 | (129) |
| 7.4.1 | 有限翼展机翼的升力模型 | (129) |
| 7.4.2 | 升力线理论的一般公式 | (130) |
| 7.4.3 | 椭圆机翼 | (131) |
| 7.4.4 | 其他无扭转机翼 | (133) |

| | | |
|------------|------------------------------|-------|
| 7.5 | 展弦比换算式 | (133) |
| 7.6 | 小展弦比机翼 | (136) |
| | 习题 | (137) |
| 第八章 | 波浪理论 | (139) |
| 8.1 | 波浪运动的基本方程与边界条件 | (139) |
| 8.1.1 | 基本方程 | (140) |
| 8.1.2 | 边界条件 | (140) |
| 8.1.3 | 小振幅波理论假设和边界条件的线性化 | (141) |
| 8.2 | 小振幅波的速度势 | (142) |
| 8.3 | 小振幅波的要素 | (143) |
| 8.3.1 | 波长 L 和波数 k | (143) |
| 8.3.2 | 周期 T 和圆频率 σ | (144) |
| 8.3.3 | 波速(相速度) | (144) |
| 8.4 | 流体质点的运动、压力分布 | (145) |
| 8.4.1 | 流体质点的运动速度 | (145) |
| 8.4.2 | 无限水深行波中质点的运动轨迹 | (146) |
| 8.4.3 | 有限水深行波中质点的运动轨迹 | (147) |
| 8.4.4 | 压力分布 | (147) |
| 8.5 | 波能及其传递 | (148) |
| 8.5.1 | 波能 | (148) |
| 8.5.2 | 波能的传递 | (149) |
| 8.6 | 波群和群速度 | (150) |
| 8.7 | 波浪的浅水效应 | (151) |
| 8.7.1 | 波峰守恒原理 | (151) |
| 8.7.2 | 波数 k 、波长 L 和波速 c | (152) |
| 8.7.3 | 浅水系数 H/H_0 | (152) |
| 8.8 | 二维船波 | (154) |
| 8.8.1 | 兴波阻力 | (154) |
| 8.8.2 | 两个扰源引起的兴波阻力 | (154) |
| *8.9 | 开尔文波 | (156) |
| | 习题 | (158) |
| 第九章 | 粘性流体动力学 | (160) |
| 9.1 | 纳维-斯托克斯方程 | (160) |
| 9.1.1 | 变形率张量 | (160) |
| 9.1.2 | 广义牛顿内摩擦定律 | (161) |
| 9.1.3 | 纳维-斯托克斯方程 | (162) |
| 9.2 | 粘性流体运动的相似律 | (163) |
| 9.2.1 | 流动相似 | (163) |
| 9.2.2 | 特征量和无量纲量 | (164) |
| 9.2.3 | 流动相似的充要条件 | (164) |

| | | |
|------------|--------------------------------------|--------------|
| 9.2.4 | 相似参数的物理意义 | (166) |
| 9.2.5 | 相似理论的应用 | (167) |
| 9.3 | 量纲分析 | (168) |
| 9.3.1 | 指数法 | (169) |
| 9.3.2 | Π 定理 | (170) |
| 9.4 | 粘性不可压缩流动的准确解 | (171) |
| 9.4.1 | 直圆管中充分发展的定常层流 | (172) |
| *9.4.2 | 平面驻点附近的流动 | (173) |
| 9.5 | 层流和湍流 | (177) |
| 9.6 | 湍流的基本方程 | (178) |
| 9.6.1 | 平均值、脉动值和湍流度 | (179) |
| 9.6.2 | 质量守恒方程的时均化 | (180) |
| 9.6.3 | N-S 方程的时均化 | (180) |
| 9.7 | 湍流模式理论 | (181) |
| 9.7.1 | 湍流粘性假设 | (181) |
| 9.7.2 | 混合长度理论 | (181) |
| 9.7.3 | 湍流模式和大涡模拟 | (183) |
| 9.8 | 圆管中充分发展湍流的速度分布 | (184) |
| 9.8.1 | 粘性底层 | (184) |
| 9.8.2 | 对数层(完全湍流层) | (185) |
| 9.8.3 | 过渡层 | (186) |
| 9.8.4 | 中心区 | (186) |
| 9.8.5 | 壁面律 | (186) |
| 9.8.6 | 实用的经验公式 | (186) |
| 9.9 | 光滑圆管的阻力系数 | (187) |
| 9.9.1 | 压力降 Δp 和阻力系数 λ | (187) |
| 9.9.2 | 光滑圆管的 λ 计算公式 | (187) |
| 9.10 | 管路计算 | (189) |
| | 习题 | (190) |
| 第十章 | 边界层理论 | (193) |
| 10.1 | 普朗特边界层方程 | (193) |
| 10.2 | 平板层流边界层的精确解 | (196) |
| 10.3 | 平板边界层的动量分析 | (201) |
| 10.4 | 平板层流边界层的近似解 | (202) |
| 10.5 | 湍流边界层的速度分布 | (203) |
| 10.6 | 平板湍流边界层计算 | (204) |
| 10.7 | 平板阻力的工程估算 | (206) |
| 10.7.1 | 平板混合边界层计算 | (206) |
| 10.7.2 | 船体摩擦阻力的估算 | (208) |
| *10.8 | 动量积分方程及其解法 | (208) |

| | | |
|--------|-------------------------------|-------|
| 10.8.1 | 动量积分方程 | (208) |
| 10.8.2 | 波尔豪森法及改进的单参数法 | (209) |
| 10.8.3 | 湍流边界层的积分法 | (211) |
| 10.9 | 曲面边界层内的流动和分离 | (212) |
| 10.9.1 | 压力梯度对速度剖面的影响 | (212) |
| 10.9.2 | 边界层分离 | (213) |
| 10.10 | 粘性阻力和边界层控制 | (215) |
| | 习题 | (217) |
| | 附录 | (218) |
| | 附录 A 运动粘性系数和密度表 | (218) |
| | 附录 B 常用公式 | (220) |
| | 附录 C 质量守恒方程、N-S 方程和流线方程(不可压流) | (221) |
| | 习题参考答案 | (222) |
| | 参考文献 | (227) |

第一章 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。

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、流体质点

密度是流体的一个基本物理量。若一块流体的体积为 ΔV , 质量为 Δm , 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, τ_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 ΔV 变化的示意图如图 1.1.1 所示。对于所有液体以及在 10^5Pa 压力下的气体, τ_0 大约是 10^{-9}mm^3 。

流体质点指的是极限体积流体,或者说,是 τ_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。

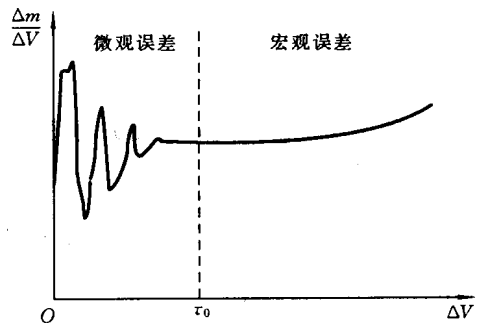


图 1.1.1 流体的密度

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。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 ρ 受温度 T 和压力 p 的影响,常见的气体大多数服从完全气体状态方程

$$\rho = \frac{p}{gRT} \quad (1.2.1)$$

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, $R=29.27 \text{ m/K}$;

p ——压力(Pa);

ρ ——密度(kg/m^3)。

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

$$\frac{p}{p_0} \approx (B+1) \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - B \quad (1.2.2)$$

式中, $p_0=101325 \text{ Pa}$;

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

$$\frac{d\rho}{\rho} = \alpha_T dp - \beta dT \quad (1.2.3)$$

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

β ——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

$$E = \frac{1}{\alpha_T} = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad (1.2.4)$$

先比较一下水和空气的压缩性。由(1.2.3)式和(1.2.4)式可得

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta p}{E} \quad (1.2.5)$$

水的 $E \approx 2.04 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, 在增加一个大气压, 即 $\Delta p = 101325 \text{ Pa}$ 的情况下, 由(1.2.5)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(1.2.1)式可得

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

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 $10 \sim 20^\circ \text{C}$ 时, 水的 β 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 1.5×10^{-3} , 对于空气, 可由状态方程导出

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{T} \quad (1.2.7)$$

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(Mach)数(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($t_0 = 15^\circ\text{C}$, $p_0 = 101325\text{Pa}$, $\rho_0 = 1.225\text{kg/m}^3$)下,海平面上的音速 $a_0 = 340.294\text{m/s}$,因此,速度 $v \leq 100\text{m/s}$ 的气流都可以认为是不可压缩的。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。

不可压缩流体的密度等于常数,即

$$\rho = \text{常数} \quad (1.2.8)$$

1.3 流体的粘性

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粘性。实际上,流体都有粘性,但只在运动过程中才有可能表现出来。

1.3.1 牛顿内摩擦定律

流体内部抵抗相互滑移的力称为粘性力或内摩擦力。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。由于流体具有粘性,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

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

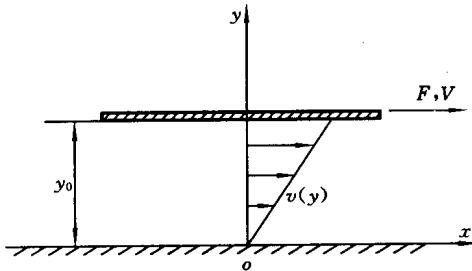


图 1.3.1 粘性力的测定

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 μ 称为粘性系数。

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。