

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/王家楣,张志宏,马乾初编著. —2版(修订本). —大连:大连海事大学出版社,2002.3

ISBN 7-5632-1536-0

I. 流… II. ①王…②张…③马… III. 流体力学 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 001196 号

大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮政编码 116026 电话 4728394 传真 4727996)

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连理工印刷有限公司 大连海事大学出版社发行

2002年3月第1版 2002年3月第1次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 20.25

字数: 505 千 印数: 0001 ~ 2000 册

责任编辑: 程策群 封面设计: 王 艳

定价: 32.00 元

内 容 提 要

本书是为船舶与海洋工程专业以及结构工程专业编写的流体力学课程授课教材,内容包括:绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学、旋涡基本理论、势流理论、波浪理论、粘性流体动力学基础、相似理论、粘性流体的一元流动、边界层理论、机翼理论、明渠均匀流、渗流等十四章。适用学时为 60~80 学时。打“*”号的内容,船舶与海洋工程专业根据学时数的多少可不讲或少讲,结构工程专业则应根据需要自行选择内容讲授。

本书对流体力学的基本概念、理论和方法作了深入浅出、繁简适当的叙述,并对能结合专业的章节作了精心选材和内容更新,使之更具特色。各章都附有例题、思考题和习题。全书编排层次分明,兼顾了多学时专业和少学时专业的需要。

本书第一版于 1999 年获交通部“科技进步三等奖”。

本书也可作为相关专业的参考书,同时适用于体育院校水上运动专业。

前 言

本书是在马乾初、王家楣主编的《流体力学》基础上修订而成的。原书于1999年获交通部“科技进步三等奖”。

本书的修订是在原武汉交通科技大学流体力学教研室和海军工程大学流体力学教研室共同进行的湖北省立项的教学研究课题中提出的。修订之前,两校分别向军队和地方的船舶与海洋工程方面的科研人员和工程技术人员就原书进行问卷调查,根据两校同类专业的需要,经编者多次讨论后制定了本书修订的技术路线和内容。

考虑到结构工程专业对流体力学课程的需要,本次修订增加了明渠均匀流和渗流两章,第十章中增加了管路中的水击以及孔口出流、管嘴出流等内容。同时为适应教学改革、课程整合的需要,在流体静力学中增加了船舶浮性与稳性、船舶正浮状态下排水体积和浮心坐标的计算、流体密度变化对船舶浮态的影响等内容。

本次修订还在编排上作了适当调整,例如将流函数、势函数从第六章调至第三章,使之更系统,并在部分章节中补充了例题、思考题和习题。

本次修订中也反映了流体力学本学科的进展,例如湍流及其特性等内容。

本次修订中还反映了编者多年教学研究工作的成果,建立了与之配套的试题库。

本书的前五章主要是流体力学本学科的基础内容(除增加了船舶静力学的部分内容外),介绍了流体力学的一些最基本的概念,讲述了流体运动的规律、静力学和理想流体动力学的一般原理,建立一些基本方程和阐明一些最主要的定律和定理。本书对这些内容作了认真、清晰的讲述,特别是对附加惯性力与附加质量有很好的阐述。在选择例题、习题时注意到了理论联系实际和结合专业。特别是每章后的思考题,反映了编者多年的教学经验,希望对启迪学生思维、提高学生分析问题和解决问题的能力有所裨益。

第六章叙述了理想不可压缩流体平面无旋运动的经典理论。

第七章波浪理论,在编排上作了一些更新,使得讲法较为明快。

第八章主要建立了粘性流体动力学的基本方程即N-S方程式,并讨论了该方程的两个精确解:二元平板间粘性流体的流动以及圆柱滑动轴承的润滑问题。

第九章讲述了相似概念、相似理论、方程分析法、量纲分析法与 Π 定理,并结合实例讲述了相似理论对实验研究的指导意义。

第十章研究粘性流体在管道中流动的一般规律,明确粘性流体存在层流和湍流两种流动状态,推导了粘性流体总流的伯努利方程,并进一步讨论这两种情况下的速度分布、阻力规律等,对湍流理论及特性作了适度的展开。在此基础上结合几个实例讨论了简单管路和并联管路的水力计算。最后对孔口出流和管嘴出流的水力特性以及计算作了详细介绍,并对管路中的水击现象及计算作了介绍。

第十一章介绍了边界层的概念,对边界层基本微分方程和动量积分方程的建立与求解都进行了详细讲述,也对摩擦阻力的计算、压差阻力的产生机理作了详细叙述。

第十二章机翼理论,介绍了翼剖面的几何特性与流体动力特性,推荐了NACA和ИАГП翼型;推导了儒可夫斯基升力定理并阐述了机翼产生环量获得升力的机理。此外还详细讲述了升力线理论,并增加了绕翼剖面流动数值解的内容。

第十三章为明渠均匀流,介绍了明渠均匀流的水力特性和基本公式,详细讲述了梯形断面、矩形断面、无压圆管和复式断面明渠均匀流的水力计算。

第十四章为渗流,讲述了渗流的基本概念、渗流模型,并详细讲述了单口井、井群、大口井以及集水廊道的渗流计算。

本书部分内容和习题引自国内外出版的有关著作,编者在此谨向这些作者表示感谢。

本书修订分工如下:1~6章由张志宏执笔,7~14章由王家楣执笔,全书由王家楣主编。本书由华中科技大学许汉珍教授主审,并对本书的修订提出了宝贵意见。

由于编者水平有限,缺点错误在所难免,望广大读者批评指正。

编 者

2001年12月

符 号 规 定

- a 加速度, 音速
 A 面积
 b 翼弦长
 C 常量, 波形传播速度
 C_L 升力系数
 C_D 阻力系数
 d 管直径
 D 阻力
 $e(E)$ 能量
 F 力
 Fr 弗劳德数
 g 重力加速度
 h 高度, 水头, 水深
 H 波高
 J 旋涡强度
 K 动量
 k 波数
 l 长度, 翼展
 L 升力, 波长
 m 质量
 Ma 马赫数
 n 法线方向
 p 压力
 P 总压力
 Q 体积流量
 r 半径
 R 阻力, 反作用力
 Re 雷诺数
 s 流线方向
 S 面积
 t 时间
 T 周期
 U 管道截面平均流速, 无穷远来流速度
 $U(x)$ 边界层外势流速度, 质量力的势函数
 V 船舶(物体)运动速度
 v_x, v_y, v_z 沿 x, y, z 方向的分速度

W 复势
 X x 方向质量力
 Y y 方向质量力
 Z z 方向质量力
 z 复变数
 σ 管道截面积, 面积, 圆频率
 γ 重度, 剪切变形速度
 $\alpha(\text{alpha})$ 攻角
 $\delta(\text{delta})$ 边界层厚度, 层流底层厚度
 δ^* 边界层排挤厚度
 $\zeta(\text{zeta})$ 局部阻力系数
 $\eta(\text{eta})$ 波面抬高
 $\theta(\text{theta})$ 角度, 边界层动量损失厚度
 $\lambda(\text{lambda})$ 沿程阻力系数, 展弦比
 $\mu(\text{mu})$ 动力粘性系数
 $\nu(\text{nu})$ 运动粘性系数
 $\rho(\text{rho})$ 密度
 $\tau(\text{tau})$ 切向应力
 $\varphi(\text{phi})$ 速度势
 $\psi(\text{psi})$ 流函数
 $\omega(\text{omega})$ 角速度

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 流体力学与各专业的关系	(1)
§ 1-2 连续介质模型	(3)
§ 1-3 流体的性质	(4)
§ 1-4 作用于流体上的力	(8)
思考题	(12)
习题	(13)
第二章 流体静力学	(15)
§ 2-1 欧拉平衡微分方程式	(15)
§ 2-2 流体静力学基本方程式	(17)
§ 2-3 常用的测压仪表	(17)
§ 2-4 静止流体对平板的作用力及压力中心	(19)
§ 2-5 静止流体对曲面的作用力	(21)
§ 2-6 阿基米德原理	(22)
* § 2-7 浮性与稳性	(25)
* § 2-8 船舶正浮时排水体积和浮心坐标的计算	(30)
* § 2-9 流体密度变化对船舶浮态的影响	(33)
思考题	(35)
习题	(37)
第三章 流体运动学	(41)
§ 3-1 研究流体运动的两种方法	(41)
§ 3-2 几个基本概念	(45)
§ 3-3 连续性方程式	(49)
§ 3-4 流体微团运动的分析	(52)
§ 3-5 旋涡运动与无旋运动	(56)
§ 3-6 速度势函数与流函数	(58)
思考题	(65)
习题	(66)
第四章 理想流体动力学	(69)
§ 4-1 欧拉运动微分方程式	(69)
§ 4-2 拉格朗日积分式	(70)
§ 4-3 伯努利积分式及其应用	(72)

§ 4-4 伯努利方程的几何意义和能量意义	(78)
§ 4-5 动量定理及动量矩定理	(80)
思考题	(87)
习 题	(87)
第五章 旋涡理论	(90)
§ 5-1 旋涡运动的基本概念	(90)
§ 5-2 汤姆逊定理	(94)
§ 5-3 海姆霍兹定理	(96)
§ 5-4 毕奥-沙伐尔定理	(97)
§ 5-5 旋涡诱导速度场的一般提法	(100)
§ 5-6 兰金组合涡	(101)
思考题	(104)
习题	(105)
第六章 势流理论	(108)
§ 6-1 几种简单的平面势流	(109)
§ 6-2 绕圆柱体的无环量流动 达朗贝尔谬理	(113)
§ 6-3 绕圆柱体的有环量流动 麦格鲁斯效应	(117)
§ 6-4 附加惯性力与附加质量	(119)
* § 6-5 复变函数的简要复习	(122)
* § 6-6 复势	(125)
* § 6-7 作用在物体上的流体动力和力矩	(127)
* § 6-8 保角变换方法	(130)
思考题	(140)
习题	(140)
第七章 波浪理论	(143)
§ 7-1 微振幅波的基本方程与边界条件	(143)
§ 7-2 波速 波长 周期	(145)
§ 7-3 水波按水深进行分类	(148)
§ 7-4 流体质点的轨道运动	(148)
§ 7-5 前进水波中的压力分布	(150)
§ 7-6 波群与群速度	(151)
§ 7-7 船波	(153)
§ 7-8 波能的传递及兴波阻力	(154)
思考题	(159)
习题	(159)
第八章 粘性流体动力学基础	(161)
§ 8-1 粘性流体的运动微分方程式	(161)
§ 8-2 二元平板间粘性流体的流动	(165)
* § 8-3 圆柱滑动轴承的润滑问题	(166)

思考题	(171)
习题	(171)
第九章 相似理论	(173)
§ 9-1 相似概念	(173)
§ 9-2 相似理论	(175)
§ 9-3 方程分析法	(176)
§ 9-4 因次分析法与 Π 定理	(179)
思考题	(185)
习题	(186)
第十章 粘性流体的一元流动	(187)
§ 10-1 管路计算的基本方程式	(187)
§ 10-2 流体的两种流动状态及判别方法	(190)
§ 10-3 圆管中的层流运动	(191)
§ 10-4 湍流流动及其特征	(193)
§ 10-5 直圆管内的湍流流动	(199)
§ 10-6 沿程阻力系数	(202)
§ 10-7 局部阻力	(204)
* § 10-8 薄壁孔口出流	(206)
* § 10-9 管嘴出流	(209)
* § 10-10 管路水力计算	(211)
* § 10-11 有压管道中的水击	(216)
思考题	(221)
习题	(222)
第十一章 边界层理论	(225)
§ 11-1 边界层的概念	(225)
§ 11-2 边界层基本微分方程	(227)
§ 11-3 边界层动量积分方程	(233)
§ 11-4 边界层的排挤厚度和动量损失厚度	(235)
§ 11-5 平板层流边界层	(236)
§ 11-6 平板湍流边界层	(238)
§ 11-7 平板混合边界层	(240)
§ 11-8 船体摩擦阻力的计算	(242)
§ 11-9 曲面边界层的分离现象 形状阻力	(243)
§ 11-10 物体的阻力	(245)
§ 11-11 减小粘性阻力的方法	(247)
思考题	(249)
习题	(250)
第十二章 机翼理论	(252)
§ 12-1 机翼的几何特性	(252)

§ 12-2 库塔-儒可夫斯基定理	(255)
* § 12-3 绕翼剖面流动的数值解	(257)
§ 12-4 机翼的流体动力特性	(261)
§ 12-5 有限翼展机翼	(264)
思考题	(277)
习题	(277)
* 第十三章 明渠均匀流	(280)
§ 13-1 概述	(280)
§ 13-2 明渠均匀流的水力特性和计算公式	(283)
§ 13-3 梯形断面明渠均匀流的水力计算	(286)
§ 13-4 无压圆管均匀流的水力计算	(290)
§ 13-5 复式断面明渠均匀流的水力计算	(292)
思考题	(293)
习题	(294)
* 第十四章 渗流	(295)
§ 14-1 渗流的基本概念	(295)
§ 14-2 渗流达西定律	(297)
§ 14-3 单井的渗流计算	(300)
§ 14-4 集水廊道的渗流计算	(302)
§ 14-5 大口井的渗流计算	(303)
§ 14-6 井群的渗流计算	(304)
思考题	(307)
习题	(308)
附录 预备知识(矢量运算及场论公式)	(309)
参考文献	(311)

第一章 绪 论

§ 1-1 流体力学与各专业的关系

流体力学是研究流体的宏观平衡和流体的宏观机械运动规律及其在工程实践中的应用的一门科学。流体力学研究的对象是流体,包括液体和气体。

流体最基本的特征是它具有流动性,也就是说流体在一个微小的剪切力作用下就能够连续不断地发生变形,即发生流动,只有在外力作用停止后变形才能停止。这正是流体不同于固体的最基本特征。固体则不同,固体能维持它固有的形状,它可以承受一定的拉力、压力和剪切力。液体由于具有流动性,因此没有一定的形状,它随容器的形状而变。液体具有自由表面,不能承受拉力,静止时不能承受剪切力。气体不能承受拉力,静止时不能承受剪切力,具有明显的压缩性,因此也不具有一定的体积,可以充满整个容器。

流体作为物质的一种基本形态,必须遵循自然界物质运动的普遍规律,如牛顿的力学定律、质量守恒定律和能量守恒定律等有关物体宏观机械运动的一般规律。因而,流体力学中的基本定理实质上都是这些普遍规律在流体力学中的具体体现和应用。

流体力学在许多工业部门中都有着广泛的应用。航空工业中的飞机制造离不开空气动力学,造船工业也要用到水动力学。空气动力学、水动力学都是流体力学的一个分支。电力工业中,无论是水电站、火电站,还是核电站、地热电站,工作介质都是流体。机械工业中的润滑、冷却、液压传动都要用到流体力学基本原理。冶金工业中,炉内气体的流动、冷却、通风等也都涉及许多流体力学问题。水利工程中的水资源运用、泄洪消能、河道整治、灌溉排水等涉及大量水力学问题。此外,化工流程、石油输送、环境保护、交通运输等等也都遇到不少流体力学问题。可以说,流体力学几乎在所有的工业部门中都有广泛应用。

流体力学与土建类各专业的关系更加密切。在土建工程中,城市生活和工业用水,从开拓水渠到取水口布置、水的净化与消毒、水泵选择、水塔修建、管路布置等需要解决一系列水力学问题。在公路与桥梁工程中,路基的沉陷、崩塌、滑坡、排水,以及桥梁、涵洞甚至虹吸管和透水路堤的修建都与水力学密切相关。采暖通风工程中,热风采暖、冷风降温、燃气输送,都以流体为工作介质。土建工程施工中,修建围堰、基坑排水、污水排放都要用到水力学的原理。因此,必须掌握好流体的各种力学性质和运动规律,才能有效地、正确地解决实际工程中所遇到的各种流体力学问题。

结构工程(无论是钢结构还是钢筋混凝土结构)中,也有大量的流体力学问题。例如船舶结构设计和计算中涉及水动力学;桥梁结构设计中要考虑风致振动以及水动力问题;海洋工程中的石油钻井平台、防波堤受到的外力除了风的作用力外还有波浪、潮汐的作用力等;高层建筑的设计要考虑抗风能力;船闸的设计直接与水动力有关,等等。

流体力学是人类在同自然界作斗争的长期生产实践中,通过科学实验逐步发展起来的。早在几千年以前,随着农业、航运事业的发展,人们逐渐认识了一些水流运动规律。我国古代

劳动人民早在春秋战国时期和秦朝就已修建了都江堰、郑国渠和灵渠。以后则有汉渠和唐徕渠,大大发展了灌溉事业。特别是都江堰工程所总结的“深淘滩,低作堰”,反映了当时人们对明渠水流和堰流已有了一定的认识。公元前 485 年开始修建的、隋朝最后完成的从杭州到北京的大运河长达 1 782 km,大大改善了我国南北运输的条件,特别是在运河上大量地使用船闸,更表明了我国劳动人民的高度智慧。公元 1363 年制作的我国古代计时工具——铜壶滴漏就是利用孔口出流和水位随时间变化的规律制成的,反映当时人们对孔口出流已有相当高的认识。与我国相类似,早在几千年前,在埃及、巴比伦、希腊和印度等地,为了发展农业和航运事业,也修建了大量的渠系。古罗马人则修建了大规模的供水管道系统。这些事例说明当时的人们在大量的生产实践中已掌握了一些水流运动的规律。但是,最早真正对流体力学学科形成做出贡献的是古希腊的阿基米德(Archimedes),他在公元前 3 世纪撰写了“论浮体”,奠定了流体静力学的基础。

公元 15 世纪至 17 世纪,达·芬奇、伽利略、E·托里拆利、B·帕斯卡、I·牛顿等人用实验方法研究了水的静压力、大气压力、孔口出流、压力传递和水的切应力等问题。公元 18 世纪以后,流体力学得到了较快的发展,对流体运动规律的研究大致可分为两大类:一类是用数学分析的方法进行比较严格的推导,建立流体运动的基本方程,包括伯努利方程、欧拉方程、纳维-斯托克斯方程、雷诺方程等等。但是由于这些纯理论的推导所作的某些假定与实际不尽相符,或由于数学上难于求解,所以无法用于解决实际工程中的一些复杂问题。另一类研究是为了解决生产实际问题,从大量的实验和实际观测中总结出一些经验关系式,并根据简化后的一维方程进行数学分析,建立各运动要素间的定量关系。从事这类研究并做出贡献的主要有:H·毕托、G·B·文丘里、A·D·谢才、R·曼宁等人。使上述两类研究得到统一的是由德国人 L·普朗特在 1904 年创立的边界层理论。这一理论既明确了理想流体的适用范围,又能计算实际物体运动时的摩擦阻力。

20 世纪以来,随着生产和科学技术的发展,特别是航空技术的迅速发展,使理论分析和实验方法日益结合,形成了现代流体力学。根据不同侧重,将侧重于理论分析的流体力学称为理论流体力学,将侧重于应用研究的流体力学称为工程流体力学。

对造船业而言,船舶航行时和周围流体(包括空气和水)发生了相对运动,因此流体力学和造船业有着密切的关系:

首先遇到的是“浮性”问题。我们把几克重的铁扔入水中它就会下沉,而像船这样一个钢铁制造的庞然大物居然能够浮于水面,乃借助于阿基米德浮力定律。这一点在今天看起来十分简单,但在古时候,人们甚至不敢用比水重的材料来造船,其原因就是当时并没有真正懂得阿基米德浮力原理。

其次,造船工程师在进行船舶稳性计算时,要搞清楚风压的大小及风压中心的位置,这也是一个流体力学问题。

还有阻力问题。船舶航行时要受到水的阻力,为了较好地理解阻力产生的原因以及进行计算,都必须研究水和船的相互作用。按照目前阻力的划分来看,船受到的阻力有摩擦阻力、旋涡阻力及兴波阻力等。对这些阻力的深入研究表明它与流体力学的一些领域,如边界层理论和兴波理论也有很大的关系。

为了克服阻力使船舶获得前进的速度,必须装置推进器,因此我们要研究推进器产生推力的原理并计算推力。大家知道,螺旋桨(见图 1-1)叶片剖面具有机翼的形状,因此应用流

体力学中机翼理论的典型方法(旋涡法)来研究推进理论时,取得了很大的成功。

此外,舵的剖面形状为对称翼型,因此舵的设计特别是高性能舵的研究与流体力学密切相关。

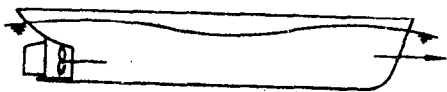


图 1-1

以上只是谈了一般性的问题,其他如船舶摇摆和船舶操纵问题的深入研究,更富有流体力学的特色。船舶原理许多领域的进展,发展了“船舶流体力学”这门学科。

新型特种船舶的研制,如水翼船、气垫船等,以及当今世界关注的高速大吨位船舶的开发,又给流体力学提出了许多新的研究课题。

§ 1-2 连续介质模型

流体是由流体分子组成的,流体分子无时无刻不在进行无规则的、随机的布朗运动。从微观角度看,流体分子之间是不连续的、有间隙的,流体分子之间存在着比分子尺度大得多的间隙。因此,流场中各空间点上的流体物理量本质上是不连续的。

流体不连续将会给数学处理带来很大的麻烦。我们并不关心单个流体分子从哪里来、要到哪里去,也不可能去研究单个流体分子的热运动,我们感兴趣的是许许多多大量流体分子运动的宏观统计特性。流体力学本质上是一门宏观力学。

为了避免由于流体分子之间本质上的不连续所带来的数学处理上的困难,1953年欧拉提出了连续介质模型。为了给出连续介质模型这个概念,首先引入流体质点的概念。

(1) 流体质点(或称流体微团):是“既大又小”的点,所谓大,是指该流体质点内部包含了大量流体分子,能够反映流体分子的宏观统计特性;所谓小,是指流体质点的体积无限小,小到就是空间上一个没有尺度的点。

(2) 连续介质模型:流体由流体质点组成,流体质点连续地、无间隙地分布于整个流场中。由于此假设将流体看成是由流体质点组成的连续流场,因此表征流体属性的压力、速度、密度等物理量可以表述成空间坐标和时间变量的函数,并可方便地利用高等数学中连续函数和微积分这一强有力的工具计算。

以上对流体质点所作的定义和对流体所作的连续介质假设,在我们通常遇见的工程问题中是合理的。从直观上我们也可以感觉到,河水和风的流动都是连续的。这是因为在标准状态下,在非常小的流体体积内,确实含有大量的流体分子。

例如:空气分子, 2.7×10^{16} 个/ mm^3 ;水分子, 3.4×10^{19} 个/ mm^3 。

由于流体质点在很小的体积内包含有足够多的流体分子,因此能够反映流体的宏观统计特性。但在研究高空大气层外航天飞船的运动时,由于空气稀薄,不能满足在一个流体质点内含有足够多的流体分子的条件,因此连续介质的假设就不能适用。另外,在高速掺气水流(两相流)中,水下爆炸时产生的冲击波波面上连续介质假设也不成立。

§ 1-3 流体的性质

一、真实流体和理想流体

就宏观来看,流体具有流动性、压缩性和粘性。液体的压缩性非常小,低速流动的气体其压缩性亦不显著。因此在处理液体的流动和气体的低速流动问题时,可以假设该流体为不可压缩的。这样做引起的误差较小,是合理的。

流体粘性的表现之一,是流体运动时相互接触的流体层之间存在剪切应力的作用;流体粘性的另一表现是流体质点附着于固体表面。在某些流动问题中,流体的粘性力比惯性力小得多,我们将这样的流体称为理想流体或非粘性流体。

真实流体与理想流体的主要差别如下:

- (1) 流体运动时,真实流体相互接触的流体层之间有剪切应力作用,而理想流体没有。
- (2) 真实流体附着于固体表面,即在固体表面上其流速与固体的速度相同,而理想流体在固体表面上发生相对滑移。

二、流体的密度和重度

单位体积流体的质量称为流体的密度,以 ρ 表示,其单位为 kg/m^3 。

流体体积 ΔV 中某一点 A 的密度 ρ_A 可表示为

$$\rho_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

式中: Δm 为 ΔV 流体体积中所包含的流体质量。

单位体积流体的重量称为流体的重度,以 γ 表示,其单位为 N/m^3 。

流体体积 ΔV 中某一点 A 的重度 γ_A 可表示为

$$\gamma_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-2)$$

式中: $\Delta G = g\Delta m$, g 为重力加速度。

因此密度和重度之间的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

流体的密度随流体所受的压强和温度而变化,液体的变化比气体的小,特别是随压强不同而产生的变化更小。例如,压强增加 $9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$, 水的密度增加的相对值约为 $1/20\,000$ 。其他液体的密度随压强不同而产生的变化也非常小。所以在一般情况下,可将液体作为不可压缩流体处理。

气体在高速流动时的密度与流场中的压力和温度有密切的关系,可表示为 $\rho = (\rho, T)$ 。船舶工程中遇到的气体流动问题,大多属于气体的低速流动(远低于音速)。这类问题中气体密度的变化非常小,也可将气体作为不可压缩流体处理。

压力为 0.1 MPa (1 个大气压)、温度为 15°C 时,淡水、海水和空气的密度和重度分别为

淡水: $\rho = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ $\gamma = 9\,800 \text{ N}/\text{m}^3$

海水: $\rho = 1\,020 \text{ kg}/\text{m}^3$ $\gamma = 9\,996 \text{ N}/\text{m}^3$

空气: $\rho = 1.226 \text{ kg}/\text{m}^3$ $\gamma = 12 \text{ N}/\text{m}^3$

在其他温度下的情形,见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 水的物理性质

温 度 ℃	重 度 γ kN/m ³	密 度 ρ kg/m ³	粘 度 $\mu \times 10^{-3}$ N · s/m ²	运动粘度 $\nu \times 10^{-6}$ m ² /s	弹性系数 $E_s \times 10^6$ kN/m ²	表面张力 σ N/m
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.075 6
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.074 9
10	9.804	999.7	1.307	1.306	2.10	0.074 2
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.073 5
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.072 8
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.072 0
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.071 2
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.069 6
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.067 9
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.066 2
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.064 4
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.062 6
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.060 8
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.058 9

表 1-2 在标准压力下空气的物理性质

温 度 ℃	密 度 ρ kg/m ³	重 度 γ N/m ³	粘 度 $\mu \times 10^{-6}$ N · s/m ²	运 动 粘 度 $\nu \times 10^{-6}$ m ² /s
-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.203	11.82	1.81	1.50
30	1.165	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.060	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.81	2.09	2.09
100	0.946	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	3.45

三、流体的压缩性与膨胀性

1) 流体的压缩性

如果温度不变,流体的体积随压强增加而缩小,这种特性称为流体的压缩性,通常用体积压缩系数 β_p 来表示。它指的是在温度不变时,压强增加一个单位所引起的流体体积相对缩小量,即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{d\rho} \quad (1-4)$$

流体体积压缩系数的倒数就是流体的体积弹性模量 E 。它指的是流体的单位体积相对变化量所需的压强增量,即

$$E = \frac{1}{\beta_p} \quad (1-5)$$

通常可取水的 E 值为 $19\,613 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

2) 流体的膨胀性

如果压强不变,流体的体积随温度增高而增大,这种特性称为流体的膨胀性,通常用体积膨胀系数 β_t 表示。它指的是在压强不变时,温度增加一个单位所引起的流体体积相对增量,即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} \quad (1/^\circ\text{C}) \quad (1-6)$$

例如,在 0.1 MPa (1 个大气压)、温度 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 时,水的 β_t 值为 $1.5 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$ 。

四、流体的粘性

著名科学家牛顿(Newton)在 17 世纪论述了流体的粘性。他提出了“流体内部的剪切应力与垂直于流体运动方向的速度梯度成正比”的论断,其示意图如图 1-2 所示。

相距为 h 的上、下两平行平板之间充满均质粘性流体。两平板的面积均为 A , 其值足够大,以致可略去平板四周边界的影响。将下板固定不动,而以力 F 拖动上板使其作平行于下板的匀速直线运动。实验发现:

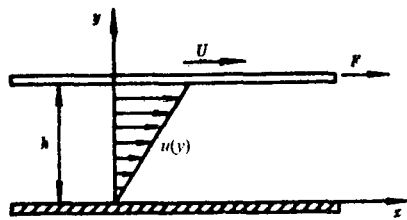


图 1-2

(1) 由于流体的粘性,与平板直接接触的流体质点将与平板一起移动而无滑移,因此与上板接触的流体质点速度为 U ,而与下板接触的流体质点速度为零。测量表明,两板之间的速度呈线性分布,即

$$u(y) = \frac{U}{h} y$$

(2) 比值 F/A 与 U/h 成正比

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h}$$

式中: μ 为比例系数,称为动力粘性系数,简称粘性系数;比值 F/A 也就是流体内部的剪切应力 τ 。

以后进一步的实验表明,当两板间具有其他(非直线)速度分布 $u(y)$ 时,有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

由于上板的移动,作用于下板的剪切应力为

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} \quad (1-8)$$

式(1-7)称为牛顿内摩擦定律。粘性系数 μ 是对流体粘性大小的度量,它是与流体物性有关的物理常数,其单位可由式(1-7)直接导出。

在国际单位制(SI制)中

$$[\mu] = \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

在工程单位制中

$$[\mu] = \text{kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

换算关系为

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.101972 \text{ kgf} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

在研究流体的运动时,还常采用所谓运动粘性系数,其定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

式中: ρ 为流体的密度。

在国际单位制中, ν 的单位为 $[\nu] = \text{m}^2 / \text{s}$ 。

把 ν 称为运动粘性系数的原因是它的单位只包含运动学的量:长度 $[L]$ 及时间 $[T]$ 。

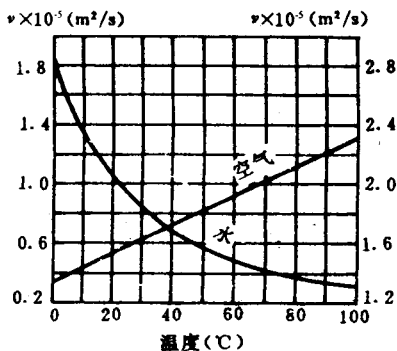


图 1-3

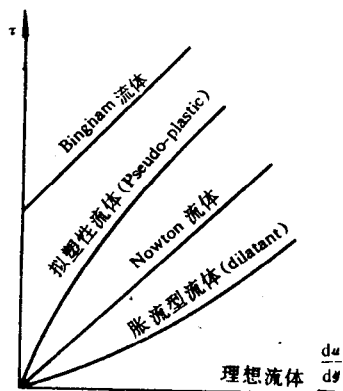


图 1-4

实验表明,粘性系数 μ 主要与温度有关,而与压力的关系不大。但须指出,液体与气体的粘性系数随温度变化的趋势是不同的。一般液体的 μ 和 ν 值随温度的升高而减小,而气体的 μ 和 ν 值则随温度的升高而增大(见图 1-3)。液体和气体的粘性系数随温度升高呈不同变化规律的原因是因为气体的粘性主要是由分子间的动量交换形成的,而对于液体粘性主要是分子内聚力的结果。

表 1-1 与表 1-2 列出了水与空气的 ρ 、 γ 、 μ 、 ν 值。

最后还必须指出,凡遵循牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,例如空气、水、汽油、煤油、甲醇、乙醇、甲苯等。凡不遵循牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体,例如泥浆、有机胶体、油漆、污水等。图 1-4 是牛顿流体与各种非牛顿流体的应力与变形速度之间的关系。