

高等学校教材

流体力学

(第二版)

张也影



高等教育出版社

高等学校教材

流体力学

(第二版)

张也影

高等教育出版社

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/张也影. —2版. —北京:高等教育出版社,1999

高等学校教材

ISBN 7-04-007272-6

I. 流… II. 张… III. 流体力学—高等学校—教材
IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 29698 号

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 **邮政编码** 100009

电 话 010-64054588 **传 真** 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京地质印刷厂

开 本 850×1168 1/32 **版 次** 1986年11月第1版

印 张 14.125 **版 次** 1999年6月第2版

字 数 360 000 **印 次** 1999年6月第1次印刷

定 价 13.60 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

本书是1986年出版的张也影编著《流体力学》一书的第二版,原书曾获得国家教委第二届高等学校优秀教材一等奖。

本书第二版在修订中仍然保留原书的主要章节和习题,在内容上作了适当的精简,力求论述上更加精练和准确,同时改正了一些明显的疏漏和错误。书中物理量的单位和符号按照“GB 3100~3102—93 量和单位”作了统一订正。本书符合1995年修订的《工程流体力学课程教学基本要求(少学时)》。书中附有大量习题和例题可供选用。

本书适合本科机械类专业作为教材使用,也可作为广大工程技术人员的自学参考书。

D399/02

第二版前言

本书自 1986 年出版至今已经 12 年了,这期间我国经济建设和高等教育事业都取得了巨大的进步和发展。展望 21 世纪,培养高素质的科技人才向教育改革提出了更高的要求。作为高等学校教材,需要不断提高质量才能适应形势的发展。

本书第一版经过 11 次重印,累计发行 5 万余册,1992 年获得国家教委第二届高等学校优秀教材一等奖。作者向长期指导和关怀本书的原国家教委水力学及流体力学课程教学指导小组前辈专家和全国广大同行师友们表示衷心的感谢。本书的成长有赖于你们的帮助,过去如此,今后还是如此。

这次修订工作面临高等学校专业调整、加强基础、拓宽专业面的教育改革形势。原教材是按机械类专业 40 学时要求编写的,现在普遍减少学时,原书有些内容需要删削。此次作者在书中删除了速度势、流函数及简单势流等概念,并对粘度、静压强单位及压力棱柱概念等作了一些精简。不过从篇幅上来看,压缩得十分有限,这也是作者有意给教师在精选内容方面留一个较为广阔的回旋余地。有些章节适于学生课外阅读,改革教学方法有时也会取得事半功倍的效果。

这次修订按照国家标准统一本书物理量的符号和单位,原书中与“GB 3100~3102—93 量和单位”不符合的均一一予以订正。

本书初版中有许多明显的错误和疏漏,凡是已经发现的均加以改正,但由于工作不够仔细,第二版仍难完全避免差错,希望读者继续给以指正。

值此本书修订之际,作者向山东工业大学孔珑教授深表谢意,他在主审原书和复审修订稿时都提出过许多宝贵意见,他严谨的治学态度和认真负责的工作作风给作者以多方面的教益,对提高本书质量起了重大作用。

作者对给予本书修订工作大力支持和帮助的陈晋南教授表示谢意。

流体力学是古老而又新兴的科学,它的领域无限宽广,愿有志者共勉,为它的发展和应用,贡献出我们的智慧和力量。

张也影

1998年11月

地址:北京理工大学九单元8号

邮编:100081

电话:(010)68473858

第一版前言

本书是根据 40 学时的《工程流体力学教学大纲(草案)》编写的,可作为机械制造类专业工程流体力学课程教材使用,也可供有关工程技术人员作为自学参考书。

全书共分八章。绪论、流体静力学、流体动力学基础、管中流动、孔口出流等五章是机械类各专业的共同必修部分;相似原理和量纲分析、缝隙流动、气体的一元流动及散布于各章中的非定常流动则是供不同专业选修的部分。不带*号的条目是本课程的基本内容。有*号的通常是非基本内容,这部分在教学中可以精简或删削。根据本书在几所院校的试用情况来看,如果某些专业需要,可用 50 学时左右将本书全部内容讲完。

由于各院校教学、设备、师资和学生等条件的不同,每学时的课程容量不可能没有差异。有经验的教师往往能够根据具体情况确定适宜的教学进度和教学方法,有时可能删减一些繁琐的数学推导,有时可能对教材作某些必要的精简或补充。但是为了便于自学,教材中的公式证明及原理叙述似不宜过简。除却编者文字拙劣之外这也是使本书篇幅略有膨胀的一个原因。这是提请读者谅解的第一点。

其次在习题的设置上也有类似情况,本书编有习题 235 个,远超出学生应完成的作业数目。这一方面是为了留有较大的选择余地,另一方面也是为了鼓励学生自主地去扩大知识面,提高独立工作能力,部分地弥补不设思考题的缺欠。除教师布置的必做习题外,其余题目均可由学生自己选做,不过对于少数几个需要专业知识才能做的习题则不必勉强。这是提请读者谅解的第二点。

本书是在国家教委水力学课程教学领导小组指导下编写的，编者对夏震寰教授、吴持恭教授及小组全体委员所给予的教诲和鞭策表示衷心的感谢。

本书主审孔珑和李诗久两位教授仔细审阅了原稿，提出许多宝贵意见，帮助编者避免了不少错误。北京工业学院向文娟和张宏德副教授热情指导和组织大百科全书制图班的同学进行全书底图的描绘工作。这些都对本书质量的提高起了重大作用。对此表示感谢。

在本书编写过程中，荣幸地得到了许多院校的帮助和支持，试用本书的兰州铁道学院、成都科技大学、北京农机学院、洛阳工学院等院校的教师热情指正了原稿中的疵误。本院流体力学教研室的全体同志和两个班的同学积极承担原稿的整理工作。在此，编者向为本书作出贡献的一切同志深表谢意。

虽然有这许多优越的客观条件，但毕竟由于编者水平有限，本书的缺点和错误仍难完全避免。热忱期望读者给以批评指正。惠寄地址：北京工业学院流体力学教研室。

张也影

1985年7月

责任编辑

王晶

封面设计

于文燕

责任绘图

孟庆祥

潘曙光

版式设计

马静如

责任校对

陈荣

责任印制

宋克学

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 工程流体力学的研究对象、任务和方法	1
§ 1-2 流体质点与连续介质概念	3
§ 1-3 流体的密度、比体积和相对密度	5
§ 1-4 流体的压缩性和膨胀性	10
§ 1-5 流体的粘性	17
* § 1-6 流体的表面张力与汽化压强	36
习题	41
第二章 流体静力学	50
§ 2-1 平衡流体上的作用力	50
§ 2-2 流体平衡的微分方程式	55
§ 2-3 重力场中的平衡流体	60
§ 2-4 静压强的计算与测量	65
§ 2-5 平衡流体对壁面的作用力	74
* § 2-6 液压机械的工作原理	85
§ 2-7 液体的相对平衡	91
习题	103
第三章 流体动力学基础	126
§ 3-1 描述流体运动的两种方法	126
§ 3-2 流体运动中的几个基本概念	130
§ 3-3 连续方程式	143
* § 3-4 流体微元的运动分析	150
* § 3-5 实际流体的运动微分方程式(纳维-斯托克斯方程式)	156

§3-6 伯努利方程式及其应用	163
§3-7 动量方程式及其应用	180
§3-8 动量矩方程式	194
习题	197
第四章 相似和量纲分析	213
§4-1 相似原理	213
§4-2 π 定理和量纲分析的应用	226
习题	233
第五章 管中流动	239
§5-1 雷诺实验	239
§5-2 圆管中的层流	245
§5-3 圆管中的湍流	257
§5-4 管路中的沿程阻力	273
§5-5 管路中的局部阻力	284
§5-6 管路计算	293
* §5-7 管中水击现象	305
习题	313
第六章 孔口出流	326
§6-1 薄壁孔口出流	326
§6-2 厚壁孔口出流	333
§6-3 孔口及机械中的气穴现象	342
* §6-4 变水头作用下的孔口出流	347
习题	352
第七章 缝隙流动	358
§7-1 平行平面缝隙与同心环形缝隙	358
§7-2 偏心环形缝隙	370
§7-3 平行圆盘缝隙	374

§ 7-4 倾斜平面缝隙	380
习题	390
第八章 气体的一元流动	398
§ 8-1 声速和马赫数	398
§ 8-2 一元气流的流动特性	406
§ 8-3 等熵和绝热气流的基本方程式与基本概念	411
§ 8-4 收缩喷管与拉瓦尔喷管的计算	421
习题	429
附录 本书物理量的符号、单位与量纲	434
主要参考书目	439

第一章 绪 论

§ 1-1 工程流体力学的研究对象、任务和方法

在流体力学的发展史上,曾经出现过理论流体力学和工程流体力学这两门性质相近的学科,它们同是研究流体(包括液体和气体)平衡和运动规律及其应用的科学,但在研究内容和方法上却又稍有差异。前者偏重数理分析,是连续介质力学的一个组成部分,属于基础科学范畴;后者着眼于工程应用,是工程力学的一个组成部分,属于应用科学范畴。

从内容上来说,学科之间的分工可能越来越细,但从方法上来说,随着计算机的推广和应用,原来存在于理论流体力学和工程流体力学之间的差异已在逐步消失。现在是综合运用一切理论、实验和计算手段来促进流体力学发展及应用的时期。

在机械类专业教学计划中,工程流体力学是一门技术基础课,它的任务是为学生学习后续课程及从事专业工作奠定初步的流体力学理论基础。

机械制造行业中涉及流体力学知识的技术问题很多。例如:水轮机、燃气轮机、蒸汽轮机、喷气发动机、液体燃料火箭、内燃机等都是以流体能量作为原动力的动力机械;机床、汽车、拖拉机、坦克、飞机、船舶、工程机械、矿山机械等处广泛采用的液压传动、液力传动和气动传动都是以流体作为工作介质的传动机械;水压机、油压机、水泵、油泵、风扇、通风机、压气机等都是以流体为对象的工作机械。流体机械的工作原理、性能、使用和试验都是以流体力

学作为理论基础的。

机械工程中还有许多与流体力学有关的问题,例如测试计量中的测压计、流量计、水力测功计、水力制动器、气动量仪;铸造中的离心浇注、水力清砂、水力震捣;铸造中的锻压设备;焊接中的喷枪气流、金属流动;机床中的冷却通风、润滑密封、减震加载、静压支承、动压支承、射流原件、气动夹具;燃烧室中的燃料雾化、吹氧、燃烧、反应;发动机中的燃料供给系、冷却系、润滑系、增压系;车间中的供气供油、旋风除尘、机械手、自动生产线等等均或多或少与流体力学知识有关。

这许多问题的解决当然需要多方面的基础知识,但显然工程流体力学基础也是必不可少的。

流体力学在其它技术领域中的应用也十分广泛,例如航空航海、天文气象、地球物理、水利水电、热能制冷、土建环保、石油化工、气液输送、燃烧爆炸、冶金采矿、生物海洋、军工核能等等部门都有许多流体力学问题,流体力学是一门既古老又新兴的学科,存在着极为广阔的研究天地。

工程流体力学和其它学科一样大致有如前所述的三种研究方法。一种是理论方法,分析问题的主次因素提出适当的假定,抽象出理论模型(如连续介质、理想流体、不可压缩流体等等),运用数学工具寻求流体运动的普遍解。一种是实验方法,将实际流动问题概括为相似的实验模型,在实验中观察现象、测定数据并进而按照一定方法推测实际结果。再一种是计算方法,根据理论分析与实验观测拟定计算方案,通过编制程序输入数据用计算机算出数值解。这三种研究方法各有所长,也各有所短。需要相辅相成才有利于推进流体力学的发展。

§ 1-2 流体质点与连续介质概念

一、流体的物理属性

流体(包括液体和气体)与固体是物质的不同表现形式,它们都有下列三个物质基本属性:

1. 由大量分子组成;
2. 分子不断作随机热运动;
3. 分子与分子之间存在着分子力的作用。

不过这三个物质基本属性表现在气体、液体与固体方面却有量和质的差别。同样体积内的分子数目,气体少于液体,液体又少于固体;同样分子距上的分子力,气体小于液体,液体小于固体。于是气体的分子运动有较大的自由程和随机性,液体则较小,而固体分子却只能围绕自身位置作微小的振动。

这些微观的差异导致宏观表象是:

固体有一定的体积和一定的形状;

液体有一定的体积而无一定的形状;

气体既无一定的体积也无一定的形状。

微观结构、宏观表象归根到底使得流体在力学性能上表现出下述两个特点:

第一点是流体不能承受拉力,因而流体内部永远不存在抵抗拉伸变形的拉应力。

第二点是流体在宏观平衡状态下不能承受剪切力,任何微小的剪切力都会导致流体连续变形、平衡破坏、产生流动。

固体显然没有这两个特点。它能承受拉力、压力和剪切力,内部相应产生拉应力、压应力和切应力以抵抗变形,外力或应力不大到一定数值,固体形状不会被破坏。

流体的这两个特点简称为流体的易流动性,易流动性既是流体命名的由来,也是流体区别于固体的根本标志。

二、流体质点的概念

从微观结构上来看,流体分子自然有一定的形状,因而分子与分子之间必然存在着某些间隙。根据阿伏加德罗(Avogadro)定律推算,在标准状况($t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p=101\ 325\ \text{Pa}$)下,每 $1\ \text{cm}^3$ 体积中有气体分子 2.7×10^{19} 个,液体分子排列更加紧密,每 $1\ \text{cm}^3$ 体积中的液体分子数目为 3×10^{24} 个。由此可见分子间的间隙虽然很小,但毕竟是存在的。这是分子物理学研究物质属性及流体物理性质的出发点,否则无从解释物理性质中的许多现象(如体积压缩及质量的离散分布等等)。

但是对于研究宏观规律的流体力学来说,一般不需要探讨分子的微观结构,因而必须对流体的物理实体加以模型化,使之更适于研究大量分子的统计平均特性、更利于找出流体运动或平衡的宏观规律。

流体质点和连续介质的概念就是流体力学学科中必需引用的理论模型。

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,流体质点具有下述四层含义:

1. 流体质点的宏观尺寸非常小。甚至可以小到肉眼无法观察、工程仪器无法测量的程度,用数学用语来说就是流体质点所占据的宏观体积极限为零,简记为 $\lim \Delta V \rightarrow 0$, 极限为零并不等于零。

2. 流体质点的微观尺寸足够大。这种宏观为零的尺寸用微观仪器度量必然又很可观,所谓微观尺寸足够大,就是说流体质点的微观体积必然大于流体分子尺寸的数量级,这样在流体质点内任何时刻都包含有足够多的流体分子,个别分子的行为不会影响质点总体的统计平均特性。

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一定的宏观物理量。例如:

流体质点具有质量,这质量就是所包含分子质量之和;

流体质点具有密度,这密度就是质点质量除以质点体积;

流体质点具有温度,这温度就是所包含分子热运动动能的统计平均值;

流体质点具有压强,这压强就是所包含分子热运动互相碰撞从而在单位面积上产生的压力的统计平均值。

此外,流体质点也具有流速、动量、动能、内能等等宏观物理量,这些物理量的统计平均概念亦均类似,不一一详述了。

4. 流体质点的形状可以任意划定,因而质点和质点之间可以完全没有空隙,流体所在的空间中,质点紧密毗邻、连绵不断、无所不在。于是也就引出下述连续介质的概念。

三、连续介质的概念

既然假定组成流体的最小物理实体是流体质点而不是流体分子,因而也就等于假定流体是由无穷多个、无穷小的、紧密毗邻、连绵不断的流体质点所组成的一种绝无间隙的连续介质。

通常把流体中任意小的一个微元部分叫作流体微团,当流体微团的体积无限缩小并以某一坐标点为极限时,流体微团就成为处在这个坐标点上的一个流体质点,它在任何瞬时都应该具有一定的物理量,如质量、密度、压强、流速等等。因而在连续介质中,流体质点的一切物理量必然都是坐标与时间 (x, y, z, t) 变量的单值、连续、可微函数,从而形成各种物理量的标量场和矢量场(也称为流场),这样我们就可以顺利地运用连续函数和场论等数学工具研究流体运动和平衡问题,这就是连续介质假定的重要作用。

§ 1-3 流体的密度、比体积和相对密度

这是代表流体质量性质的几个基本概念,它们互有区别却又互有联系。如图 1-1,在流体中任取一个流体微团 A,其微元体积为 ΔV ,微元质量为 Δm 。当微元无限小而趋近 $P(x, y, z)$ 点成为一个质点时,定义: