



普通高等教育“十一五”力学精品教材

工程流体力学

(第二版)

Engineering Fluid Mechanics

莫乃榕 主编

■ 华中科技大学出版社

普通高等教育“十一五”力学精品教材

工程流体力学

(第二版)

主 编 莫乃榕

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书介绍流体力学的基本原理及其在工程实际中的应用。全书包括流体力学基础、一元流动、二元流动、流体流动的数值计算和测量技术等四个部分。为适应模块式课程设置的需要,多数篇章的内容都具有相对的独立性。各章配置了较多的例题、练习题(思考题)和习题,书末附有部分习题答案。本书可作为机械、动力类专业工程流体力学课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学(第二版)/莫乃榕 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年7月
ISBN 978-7-5609-2003-0

I.工… II.莫… III.工程力学:流体力学 IV.TH126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 122573 号

工程流体力学(第二版)

莫乃榕 主 编

策划编辑:徐正达

责任编辑:姚同梅

责任校对:周 娟

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:武汉市新华印刷有限责任公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:20.25

字数:395 000

版次:2009年7月第2版

印次:2009年7月第9次印刷

定价:26.80元

ISBN 978-7-5609-2003-0/TB·45

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

再版前言

本书第一版出版以来,得到了有关高校师生和相关专家的关注、支持,并被广泛采用。为了更加适应人才培养的新形势,我们对原书进行了修订。修订版仍然保持了原书的体系和特色。其中第3章集中阐述流体力学的基本方程,其余各章分别研究某一种工程实际流动,各章均具有相对的独立性。每章的阐述均按照介绍基本概念、推导相关方程、解决工程实际问题等三大步骤进行。

本书的物理量名称和符号全部采用国家标准 GB3102.3—1993 规定的名称和符号,科学技术名词采用全国自然科学名词审定委员会审定的规范名称。

在这次修订中,我们对一些流体力学的概念、公式、分析方法作了适当改动。在 3.5 节推导得出的沿流线的伯努利方程的基础上,在 6.1 节中又对伯努利方程作了进一步的阐述和推导,说明在无旋条件下伯努利方程处处成立。在 5.6 节中,我们修改了绝热摩擦可压缩管流公式的推导过程,使之更加简明易懂。在第 4 章中,我们对柯列勃洛克公式的来源作了介绍,使读者对这个著名的经验公式有更深入的了解。第 9 章已按照国家标准《量和单位》的规定重新编写,规范了量纲的名词术语及表述方法。对流体力学试验相似准则的选择也作了更明确的说明。

许多高校的教师都非常关心本书的修订,并提出了许多好的建议,对此我们表示衷心的感谢。愿本书能够最大限度地满足各校的教学要求。本书的修订工作是在征询各位参编者关于本书的体系、理论、公式、习题的修改意见的基础上,由主编执笔完成的。

由于学术水平和编写水平有限,书中尚有不足之处,恳请读者和专家指正。

编者

2008 年 8 月

前 言

本教材是根据机械、动力类各专业“工程流体力学”课程的教学要求,并参考1997年教育部水力学和流体力学教学指导小组制订的《工程流体力学课程教学基本要求》和《工程流体力学模块汇总》编写的。全书共分四篇,第1篇阐述流体力学的基本理论和基本方程,第2、3篇介绍工程中的一元流动和二元流动,第4篇介绍数值计算和测量方法。除第1篇是全书的理论基础之外,其余各篇、各章的内容均具有相对的独立性,取、舍其中任何一章都不会影响体系的完整性。因此,对本教材所介绍的教学内容可根据需要组合成为不同形式的教学模块。

面对科学技术的不断发展,应该对工程流体力学的教学内容和教学方法进行改革,以适应21世纪对人才培养的需要。工程流体力学是高等学校机械、动力类各专业的技术基础课程。在编写本教材的时候,我们力图突出加强基础、强调应用、提高素质的精神,除了介绍基本理论之外,还用很大篇幅介绍了工程应用问题,并增加了数值计算和现代测试技术的内容。对工程流体力学中一些常见的传统的计算方法也作了改进,如在管流和一元等熵流动的计算中引入牛顿迭代法,使能够解题的工程问题更加广泛,并为编程电算提供计算基础。

本教材是根据近几年的教学实践和经验,由华中理工大学流体力学教研室的教师集体编写的。初稿完成后,经过多次讨论和修改,最后才形成定稿。各章的编写分工如下,莫乃榕编写第1、2、3、4、5、8、11章;李万平编写第6章;李光正编写第9章;瞿大熙、李光正合编第7章;吴建康、莫乃榕合编第10章。全书由莫乃榕主编。

我们先后请哈尔滨工业大学陈卓如教授、清华大学李玉柱教授、华中理工大学蔡兆麟教授和山东工业大学杜广生副教授审查了全稿,他们在课程体系、教学方法、编写技巧等方面提出了许多宝贵的意见,本书的一些章节就是根据他们的意见进行修改的,在此对他们治学严谨的作风表示赞赏,对他们热情帮助表示衷心的感谢。华中理工大学教务处对本书的出版给予了大力支持,华中理工大学出版社的龙纯曼老师对本书的出版给予了热情的帮助,在此一并致谢。

由于编者的知识和水平有限,书中缺点和错误在所难免,殷切希望读者与专家批评、指正。

编 者

1999.7

主要符号表

A	面积
a	加速度
B, b	宽度
C_p	压强系数
c_p	等压比热容
c_v	等容比热容
C_D	阻力系数
c	光速, 波速, 声速
D, d	直径
E	(固体)弹性模量, 电势
Eu	欧拉数
e	内能
F	力
Fr	弗劳德数
f	质量力, 频率
G	重量
g	重力加速度(9.807 m/s ²)
H, h	高度
I	电流
K	热力学温度单位(开)
K	(流体)体积模量
k	热传导系数
L, l	长度
m	质量
Ma	马赫数
P	功率
p	压强
p_g	表压强
p_v	真空压强
Q	热量
q	体积流量
q_m	质量流量

R	气体常数,电阻
Re	雷诺数
Sr	斯特劳哈尔数
s	比熵
T	热力学温度
t	摄氏温度,时间
U	速度,电压
U_{eff}	有效冷却速度
V	体积,平均速度
W	功,复位势
α	动能修正系数
β	动量修正系数
κ	体积压缩系数
α_v	热膨胀系数
Γ	速度环量
γ	比热比
Δ	绝对粗糙度
δ	边界层厚度
δ^*	边界层位移厚度
δ^{**}	边界层动量损失厚度
ϵ	线变形速率
ζ	局部损失因数
Δ	(气体)速度系数
λ	沿程损失因数
μ	动力粘度,流量系数,泊松比,马赫角
ν	运动粘度
ρ	密度,电阻率
σ	正应力,表面张力系数
τ	切应力,体积
φ	速度势函数
ψ	流函数
Ω	涡量
ω	角速度

目 录

第 1 篇 流体力学基础

第 1 章 导论	(3)
1.1 流体力学的研究任务和研究方法	(3)
1.2 连续介质假设	(4)
1.3 流体的密度	(5)
1.4 流体的粘性	(6)
1.5 表面张力	(10)
练习题	(12)
习 题	(13)
第 2 章 流体静力学	(15)
2.1 静止流体的应力特征	(15)
2.2 流体静止的微分方程	(16)
2.3 静止液体的压强分布	(17)
2.4 液柱式测压计	(19)
2.5 静止大气的压强分布 国际标准大气	(21)
2.6 静止液体作用在平面壁和曲面壁上的总压力.....	(22)
2.7 液体的相对静止	(27)
2.8 浮体的平衡.....	(29)
练习题	(31)
习 题	(32)
第 3 章 理想流体动力学基本方程	(38)
3.1 描述流体运动的两种方法	(38)
3.2 流线和流管.....	(41)
3.3 连续性方程 控制体的概念.....	(43)
3.4 动量方程和运动方程	(46)
3.5 伯努利方程.....	(49)
3.6 压强沿流线法向的变化	(50)
3.7 总流的伯努利方程	(51)
3.8 伯努利方程应用举例	(52)

3.9 叶轮机械内相对运动的伯努利方程	(53)
3.10 非定常流动的伯努利方程	(54)
3.11 动量方程和动量矩方程及其应用	(55)
练习题	(63)
习 题	(64)

第 2 篇 一元流动

第 4 章 不可压缩粘性流体的一元流动	(73)
4.1 粘性流动的伯努利方程	(73)
4.2 流体运动的两种流态	(74)
4.3 圆管中的层流	(77)
4.4 明渠中的层流	(79)
4.5 层流向紊流的过渡	(80)
4.6 紊流的速度分布	(82)
4.7 圆管紊流的沿程损失因数 λ	(84)
4.8 沿程损失因数的实验研究	(86)
4.9 局部水头损失	(91)
4.10 工程应用举例	(95)
4.11 管流中的水击	(103)
练习题	(105)
习 题	(107)
第 5 章 可压缩流体的一元流动	(112)
5.1 热力学基本公式	(112)
5.2 绝热流动的能量方程	(115)
5.3 微弱扰动波的传播 声速	(116)
5.4 一元等熵流动的基本关系式	(119)
5.5 一元等熵气流在变截面管道中的流动	(123)
5.6 有摩擦和热交换的一元流动	(131)
练习题	(138)
习 题	(140)

第 3 篇 二元流动

第 6 章 理想不可压缩流体的平面势流和旋涡运动	(147)
6.1 流体微团运动分析	(147)
6.2 速度环量和旋涡强度	(151)

6.3	速度势函数和流函数	(155)
6.4	不可压缩流体平面无旋流动的复变函数表示	(161)
6.5	基本的平面有势流动	(162)
6.6	有势流动叠加	(169)
6.7	理想流体的旋涡运动	(177)
	练习题	(182)
	习 题	(184)
第7章	不可压缩粘性流体的流动	(189)
7.1	粘性流体中的应力	(189)
7.2	不可压缩粘性流体运动的基本方程	(192)
7.3	精确解	(195)
7.4	边界层的概念	(200)
7.5	边界层微分方程	(203)
7.6	边界层动量积分关系式	(209)
7.7	平板边界层的近似计算	(212)
7.8	曲面边界层的流动分离	(219)
7.9	绕流物体的阻力	(219)
7.10	自由淹没射流	(222)
7.11	管道入口和弯道中的边界层	(225)
	练习题	(226)
	习 题	(228)
第8章	膨胀波和激波	(233)
8.1	膨胀波	(233)
8.2	正激波的形成和传播	(237)
8.3	正激波前后的参数关系	(238)
8.4	斜激波	(242)
8.5	激波的反射和相交	(247)
8.6	拉伐尔喷管内的正激波	(250)
	练习题	(253)
	习 题	(254)
第4篇 流体流动的数值计算和测量技术		
第9章	量纲分析和相似理论	(259)
9.1	量纲和单位	(259)
9.2	量纲分析法	(261)

9.3 流动相似原理	(265)
9.4 相似准则的选择	(268)
练习题	(270)
习 题	(271)
第 10 章 工程流体力学的计算方法	(273)
10.1 代数方程的牛顿迭代法	(273)
10.2 差分法	(275)
10.3 差分法应用实例	(276)
10.4 特征线法	(279)
10.5 有限元的插值函数	(284)
10.6 一维有限元法	(287)
第 11 章 流动测量技术	(291)
11.1 压强的测量	(291)
11.2 压力传感器	(294)
11.3 毕托管	(297)
11.4 流量计	(298)
11.5 热线测速技术	(300)
11.6 激光测速技术	(304)
附录	(309)
习题答案	(311)
参考文献	(314)



第 1 篇
流体力学基础

第 1 章 导 论

1.1 流体力学的研究任务和研究方法

流体力学是研究流体在外力作用下平衡和运动规律的一门学科,它是力学的一个分支。

流体和固体是物质存在的主要形式。从力学分析的角度来看,流体和固体的主要差别在于抵抗外力的能力不同。固体在静止状态时能抵抗一定数值的拉力、压力和剪力。当固体受到外力作用时,它将产生相应的变形以抵抗这个外力,其相应的学科是材料力学和弹性力学。而静止的流体不能抵抗无论多么小的拉力和剪力。流体在剪力的作用下将发生连续不断的变形运动,直至剪力消失为止。流体的这种性质称为易流动性。流体是气体和液体的总称。两者的差别是气体比液体更易压缩。

流体力学是人类在征服自然、改造自然的实践中产生和发展起来的。古代的人们在兴修水利、灌溉农田的实践中开始认识和利用水流的规律,在利用风能的实践中认识空气的运动规律。当时,虽然缺乏系统的流体力学知识,但凭借直觉的观察和不断的实践,古人逐渐认识和掌握了流体运动的一些规律,建造了许多伟大的工程。

流体力学的初步形成可以追溯到 17 世纪。1653 年, B. 帕斯卡(B. Pascal)发现静止液体的压强可以均匀地传遍整个流场的帕斯卡原理。后来,通过现场测量,他还提出了流体静力学的基本公式。1687 年牛顿(Newton)用实验方法研究了运动平板所受的流体阻力,提出了流体的切应力与速度梯度成正比的计算公式,为以后研究粘性流体的运动奠定了基础。1738 年, D. 伯努利(D. Bernoulli)对管流进行大量的观察和测量,提出了著名的伯努利定理。1775 年欧拉(Euler)提出了无粘性流体的运动方程,为理论流体力学的研究奠定了理论基础。随着生产的发展,人们不断探索粘性流动的规律,1823 年法国人 L. 纳维(L. Navier)、1845 年英国人 G. 斯托克斯(G. Stokes)分别用不同的方法建立了粘性流体运动的微分方程,从此,流体力学得到迅速的发展。到 19 世纪末,水力学和水动力学已达到相当高的水平。进入 20 世纪以后,随着航空、航天事业的发展,边界层理论、紊流理论、可压缩流体力学都获得了巨大的成就。1904 年提出边界层理论的德国人普朗特(Prandtl)是现代流体力学的先驱。1910 年俄国科学家儒可夫斯基(Joukowski)用保角变换法获得一种理想的翼型,使人类的航空、航天事业得到迅猛的发展。超声速飞机的出现,人造卫星和航天飞机进入太空,使流体力学理论发展成为一个严密、系统的学科。20 世纪 60 年代以后,由于人类飞行的愿望已基本实现,流体力学的发展方向有了一些明显的转变,出

现了许多新的分支或交叉学科,如工程流体力学、稀薄气体力学、磁流体力学、非牛顿流体力学、生物流体力学、物理-化学流体力学等。

纵观流体力学的发展历史,可以清楚地看出,生产的发展和需要是流体力学发展的动力。流体力学的任务就是解决科学研究和工农业生产中遇到的有关流体流动的问题。人类的生产和科学技术发展到今天,对流体力学提出的问题越来越多,很多工农业部门中都存在大量的与流体流动有关的问题。现在很难找出一个技术部门,它的发展能够与流体力学无关,除了航空、水利之外,机械、动力、航海、冶金、建筑、环境等部门都存在大量的流体力学问题有待深入研究。例如,动力工程中流体的能量转换,机械工业中的润滑、液压传动、气力输送,船舶的行波阻力,高温液态金属在炉内或铸模内的流动,市政工程中的通风、通水,高层建筑受风的作用,铁路、公路隧道中的压力波传播,汽车的外形与阻力的关系,燃烧中的空气动力学特征,血液在人体内的流动,污染物在大气中的扩散等,这些都是工程技术人员经常遇到的流体力学问题。工程流体力学的任务则是为从事这些工程技术工作的人员提供必要的流体力学理论知识。本课程除了介绍流体力学的基本概念、基本原理之外,还介绍如何将这些基本概念和原理应用于工程实际,推导一些工程上常用的公式,使读者掌握流体力学在工程中的分析方法、计算方法和实验技能。

工程流体力学和其他物理学科一样,其研究方法主要有理论分析、实验研究和数值计算三种。理论分析法是根据工程实际中的流动现象的特点,建立流体运动的方程及边界条件,运用各种数学工具准确地或近似地求出方程的解的方法。理论分析法的特点在于科学的抽象,能够用数学方法求出理论结果,揭示出流体运动的内在联系。实验研究在工程流体力学中占有极重要的地位,它是理论真伪的最终判决依据。在实验研究中根据模化理论进行观察和测量,由此所得出的研究结果十分可靠。用这种方法能直接解决工程中的复杂问题,并能发现新的流动现象。数值计算是伴随电子计算机而出现的一种方法,应用这种方法时,首先将流体力学方程和边界条件进行离散化,然后选取算例,编制程序,用计算机求出数值解。数值计算方法的优点在于它能得到许多用理论分析方法无法求解的复杂流动的数值解。以上三种方法相辅相成,促使流体力学学科得到迅速的发展。在学习本课程时也要很好地掌握这些研究方法。

本课程主要介绍理论分析法和实验研究,也介绍一些工程中常用的计算方法。至于流体力学的数值计算,由于涉及较多的数学知识和数值方法,本书只能介绍一些基本方法,为学习计算流体力学打下基础。

1.2 连续介质假设

流体是由分子组成的,分子之间保持一定的距离,流体的分子处在永无休止的运动状态中。因此,从微观的角度来看,流体的物理量如质量、温度在空间上的分布是不连续的。另外,由于分子运动的随机性,流体的物理量在时间上的分布也是不连续

的。因此,如果从微观方面研究流体力学问题,就要用分子运动学说,研究每一个分子的微观运动规律。但工程流体力学所讨论的问题的特征尺寸远大于流体的分子平均自由程,人们所感兴趣的问题并不是流体分子的微观运动特征,而是其宏观特性,即大量分子的统计平均特性,例如流体的密度、温度、压强等。因此,从宏观上研究流体的运动规律时,有理由把流体视为连续介质,即流体是在空间上和时间上连续分布的物质。1775年欧拉在建立流体运动的微分方程时,采用的就是连续介质这样一个基本假说,即认为液体和气体充满一个体积时不留任何空隙,其中没有真空,没有分子间的间隙,流体的密度、温度等物理量是连续分布的。实践证明,采用连续介质模型来解决一般工程实际问题,其结果是能满足要求的。例如,在正常情况下,1 mm³的体积里,水有 3.3×10^{19} 个分子,空气有 2.7×10^{16} 个分子,即使在 10^{-10} mm³ 的体积(相当于一粒灰尘体积)里,空气也还有 2.7×10^6 个分子。这么多的分子,其物理量仍然具有统计平均的特性。因此,在流体力学中采用连续介质模型是合理的。这样,流体的一切特性,例如压强、温度、密度、速度等,都可以看成是时间和空间连续分布的函数,流体力学的问题可以用连续函数这个有力的数学工具来进行研究。当然,在一些特殊的情况下,连续介质的假设是不能成立的。例如,航天器在高空稀薄气体中飞行时,气体分子的平均距离与航天器的尺寸具有相同的量级,超声速气流中的激波厚度与气体分子平均自由程为同一量级,血液在微血管里(直径约为 10^{-4} cm)的运动,这些情况都不能采用连续介质模型来研究。

1.3 流体的密度

流体的密度是单位体积里流体具有的质量,在均质流体中,如果体积 V 内的流体质量是 m ,则密度 ρ 为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

在国际单位制中, ρ 的单位是 kg/m³。

对于非均质流体,各点的密度是不同的,这时,密度 ρ 定义为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2)$$

式中, $\Delta V \rightarrow 0$ 只能视作趋于足够小,不能理解为数学上的趋于零。因为,从微观上看,分子之间存在空隙,如果 ΔV 取在空隙里, ρ 就会是零;如果 ΔV 取在原子内, ρ 就会非常大。因此,对 $\Delta V \rightarrow 0$ 应理解为 ΔV 是一个很小的值,这样一个微体积,宏观上足够小,微观上足够大。例如,一粒灰尘的体积(10^{-10} mm³),比工程中常见的物体小得多,但仍比分子占据的体积大得多。这种宏观上足够小、微观上足够大的微体积内的流体称为**流体微团**,或称为**流体质点**。

密度的倒数称为**比体积**,记作 v ,即 $v=1/\rho$,其单位为 m³/kg,它表示单位质量流

体占有的体积。

流体的密度与温度和压强有关。温度或压强变化都会引起密度的变化,即

$$d\rho = \frac{\partial\rho}{\partial p}dp + \frac{\partial\rho}{\partial T}dT \quad (1.3)$$

密度的相对变化率为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial p}dp + \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial T}dT = \kappa dp - \alpha_v dT \quad (1.4)$$

式中, κ 称为流体的体积压缩率,它表示在温度不变的情况下,增加单位压强所引起的密度变化率。当压强增加时,体积减小,密度增加,因此有

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{\partial\rho}{\partial p} = -\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial p} \quad (1.5)$$

对于液体, κ 近似为常数,这时,上式中的微分可用增量代替。 α_v 称为体膨胀系数,它表示在压强不变的条件下,增加单位温度所引起的体积变化率。

液体的体积压缩率 κ 很小,工程中常使用它的倒数,称为体积模量,也称弹性模量,记作 K ,有

$$K = \frac{1}{\kappa} = -v \frac{\Delta p}{\Delta v} = \rho \frac{\Delta p}{\Delta\rho} \quad (1.6)$$

K 的单位与压强单位相同,即为 Pa。

对于气体,其密度、压强、温度应满足状态方程

$$p = \rho RT \quad (1.7)$$

式中, p 为压强,单位是 Pa; T 为热力学温度,单位是 K(开); R 是气体常数,对于空气, $R=287 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。由状态方程可以求得气体的体积压缩率和体膨胀系数分别为 $\kappa=1/p$ 和 $\alpha_v=1/T$ 。

例 1.1 在常温下,水的体积模量 $K=2.81\times 10^9 \text{ Pa}$,如果水的压强从 10^5 Pa 增至 $12\times 10^6 \text{ Pa}$,求水的体积变化率。

解 由定义得

$$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta p}{K}$$

将 $\Delta p=119\times 10^5 \text{ Pa}$ 及 K 的值代入上式,得 $\Delta v/v=-0.424\%$,负号说明体积减小。

1.4 流体的粘性

粘性是流体抵抗变形的能力。它是流体的固有属性。粘性切应力则是粘性的具体表现。

流体在运动时,如果相邻两层流体的速度不同,则在它们的界面上将产生切应力,运动快的流层对运动慢的流层施以拖力,而运动慢的流层则对运动快的流层施以