

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

高等流体力学

(第二版)

Advanced Fluid Mechanics

刘应中 缪国平 编著

上海交通大学出版社

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

高等流体力学

Advanced Fluid Mechanics

(第二版)

刘应中 缪国平 编著



上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书是供研究生用的带有总纲性的流体力学教材,基本内容包括基本方程和界面条件及其物理本质的描述,着重于常密度的牛顿流体,具体内容有:基本方程、不可压缩流体的准一维流动、势流理论基础、地球流体力学基础、分层流、流体动力声学、气体动力学初阶、湍流引论、湍流模式、流动分离、环境流体力学、多相流体力学基础等。

本教材可供有关专业硕士和博士研究生使用,也可供有关专业的科技工作者提高理论修养之用。

图书在版编目(CIP)数据

高等流体力学/刘应中,缪国平编著.—2版.—上海:上海交通大学出版社,2002

ISBN 7—313—02332—4

I. 高… II. ①刘…②缪… III. 流体力学—研究生—教材 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 15843 号

高等流体力学

(第二版)

刘应中 缪国平 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市华通印刷有限公司 印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:22.5 字数:419 千字

2000 年 6 月第 1 版 2002 年 12 月第 2 版 2002 年 12 月第 3 次印刷

印数:921—2970

ISBN 7—313—02332—4/O·155 定价:36.00 元

再序

人类生活在流体之中,流体被抽象为连续介质,这种介质的流动、传输、绕流、波动、扩散、涡动、耗散、发声等等是自然界或人类与自然界相处中广泛存在的现象,无所不在。流体力学是研究流体运动及其作用的科学,这类知识在国外是作为基础物理的一部分传授给学生的,从中学、大学到研究生院,由浅入深,逐步深化。

本书是供研究生层次阅读的一本风格别致的教材。众所周知,流体力学学科经过一个多世纪的发展,已拓展出许多分支。每一分支均可自成体系,构筑成一厚本教材,有的分支甚至早已出版了成套的丛书。因此,要在这样浩瀚的材料中整理出一个头绪来,实非易事。首先,遴选哪些分支就是一个难题。作者们根据多年教学和研究工作的经验,深感对于以水为背景的一些专业的学生,在开阔视野中,既要考虑到他们今后有可能从事学科交叉工作,又要照应到必要时适应专业改变。当然,在这种遴选中难免包含有个别的偏爱,这不仅无伤大雅,或许正是构成特色的一种表现。其次,如何选定分支范围的内容又是一个难题。对此,本书贯彻了基本、实用、简练、前沿四条原则。基本者,将建模与控制方程交代清楚;实用者,向商用程序选材贴近;简练者,着重介绍概念而摒弃繁琐的推导;前沿者,尽可能反映当前研究和发展动态。这些原则的贯彻,表明作者的造诣深厚与匠心独运。再者,全书要形成特色,必须有独立不群的见解、构思巧妙的推导、深入浅出的表达、画龙点睛的点拨、详略得体的剪裁、前后呼应的编排,本书在许多方面体现了这种精神,足见作者的博洽多闻、造微入妙的功力。

深信本书的出版不仅为后学们提供一本内容丰富、材料翔实、视野宽广、有据可查的高层次教材,而且对于主要谙熟流体力学单一分支的同行们也不无启迪,有所裨益。

承作者抬爱,邀作序;有感于当前科技书籍出版太少,甘于寂寞、苦心写书者日减,有此佳作出版,不禁欣然命笔。是为序。

何友声

1999年5月

再版前言

本书脱胎于作者以前为研究生开课的讲义,1999年完稿,受上海市研究生教育专项经费的资助,作为上海研究生教育用书,由上海交通大学出版社于2000年6月正式出版。嗣后,本书在上海交通大学相关专业的研究生教学中又使用了两届;其他院校亦有选用本书为教学用书或教学参考用书者。由于需求和印数两方面的原因,书一出版,即告售罄。幸蒙同仁抬爱,本书于2001年经教育部遴选为全国研究生教学用书,得以再版。

纵观世传,流体力学专著和教材版本繁多,其中不乏佳作。作者成书的初衷,试图在教材的内涵、容量与理论深度、视界广度、对后续课程和相关研究的支撑力度等矛盾的诸多方面间觅得一个适合研究生教学的平衡。遗憾的是,经两年的教学实践,自觉很难说已经做到了这一点。

本书出版以来,赖众多同仁的器重,鼓励之余,见仁见智,提出了不少非常中肯的意见和建议;特别是上海大学戴世强教授,他的建议是富有远见和建设性的。原拟趁此次修订再版的机会,按诸位同仁的意见和作者实践中的一些新的认识,对本书作全面的改动。然而,“理有固然,势无必至”,考虑到本书问世日浅,流传未广,实践有限,限于作者的见识和修为,贸然从事,难免顾此失彼,反有画虎类犬之虞。权衡再三,仅限于在文字和叙述方面校订全书,修正疏失,包括笔误和印误;“如今收拾归来,依然水连天碧”,全书的结构体系仍然保持其本来面目,以期更广泛地求正于专家与读者。本书的全面修订,容俟来日之机缘。

在再版印行之际,略述大概经过,并向在修订过程中对本书提供种种帮助的诸位同仁致以深切的谢意,同时作者也要衷心地感谢上海交通大学出版社承担了本书再版的全部费用和风险。

缪国平 刘应中 再识

2002年9月1日

前 言

本书是作者在近几年为研究生开设的流体力学课程讲义的基础上,经过整理补充而成,为与本科生所学的基础流体力学相区别,取名为《高等流体力学》。它原来的任务主要是为船舶与海洋工程流体力学专业的研究生学习专业课程奠定基础。

经过多年的实践、讨论和酝酿,随着时代的变迁和认识上的升华,我们感到有必要对原有教材作出重大的修改。

首先,应该加强本课程的基础性,给研究生一个更加广阔的视野,为他们将来进行学科交叉创造条件,而不要局限于为专业课程的学习服务。相反,应该尽量避免与基础流体力学和专业课程重复,腾出学时和内容来扩大知识面。但是,流体力学是一门基础性很强、应用范围异常广阔的学科,在十分有限的学时内,本课程只能选择部分内容予以介绍,问题是如何选择扩大内容的方向和范围。作为从事船舶与海洋工程事业的研究和技术人员来说,我们认为,应该以海洋为依托,并有可能介入、与人合作或参与相邻学科的工作。根据这个想法,我们开辟专门章节介绍了河流及洪水(第二章)、海洋和大气(第四章)、分层流(第五章)、流动声学(第六章)、气体动力学(第七章)、环境污染(第十一章)和多相流体(第十二章)等方面的初步知识,并穿插地介绍了有关流固耦合、海岸动力学(第三章)、传热和传质(第十一章)的某些概念。这些内容的引入,使这本教材与国内目前流行的高等流体力学教材有着很大的不同。

其次,内容要更新。近些年来,流体力学在应用范围上越来越广泛,它的某些基础方面也有了相当的发展。由于学时限制,我们在基础流体力学中所介绍的有些概念显得含糊,也难以反映近代流体力学的基本进展。比如,边界层分离是个极其重要的概念,但基础流体力学所介绍的只限于二维、层流的分离;谈到湍流分离时,只交代了湍流会增加边界层内流体的动能,从而可使分离点后移,但完全忽略了湍流的混沌性和三维性。至于三维分离的基本形态都无法涉及,于是可能给学生造成一个模糊的概念,觉得三维分离也许和二维分离是一样的。为此,在本教材中我们用相对较多的篇幅介绍了层流稳定性、基本的湍流概念(第八章)和分离流动(第十章)。再者,由于计算机的普遍应用,以及一些商用流体力学软件包的逐步流行,已经或者正在给流体力学的研究和教学带来很大的冲击,这些尚不能在基础流体力学中反映。有鉴于此,我们强调了数值计算流体力学的前景,并穿插地介绍

了多种情况下的数学模型,集中介绍了湍流模式(第九章),也顺便介绍了浮力湍流模式(第十一章)、多相流体的颗粒模型和连续介质模型等,为读者了解商用程序的说明提供了一定基础。另一方面,近几年国内外在流体力学的许多方面出版了一批优秀专著,为我们更新教材创造了条件。因为我们的研究生一般在本科阶段只读过一门基础流体力学,我们就以这些专著的材料为基础,选择一些符合需要的、基本的和更接近实用的内容,纳入这本教材中来。从某种意义上说,本书其实是一本内容广泛些的流体力学入门书。虽然,本教材中的许多内容都可在相应的专著中查到,但作为高等流体力学教材,在这样的篇幅下接纳这么多的材料,对我们来说,不能不是一种大胆的尝试。

最后,信息量要大。对于一般以流体力学为背景的学生或者工程技术人员来说,他们需要在有限的学时内,掌握较多的信息,以开阔思路,指引方向;同时要有—定的基础,在需要时能够在某一方面深入下去。这是我们编写这本教材时的另—点希望。为了包含更多的信息,我们采用了简化、概括和渗透的手法。比如,在第三章势流中,我们没有讨论许多基本解,而是以边界积分为主线,概括地介绍了无界流场中的无环量和有环量的物体绕流,而且渗透了变形物体、附加质量、涡线和涡环等概念,也谈到了新出现的混合边界积分方程。在波浪问题中,除了通常的线性波浪、辐射、绕射问题外,我们夹带了流固耦合、渗流、浮泥等知识,此外还介绍了弱非线性波中的孤立波和椭圆余弦波。在地球流体力学一章(第四章)中,我们简述了定常解、波动解,还罗列了深度平均的水平面二维和三维的数学模型,特别是概括性地介绍了混沌的某些有关概念。流体动力声学在海洋中有着特殊的重要性,为此我们设立了第六章,但没有重复经典的声学和水声学的内容,而是直接导出 Lighthill 方程,进一步介绍了比较新的 FWH 方程和近来流行的 Powell 方程。作为应用,给出了有一定实用参考价值的螺旋桨桨叶负荷造成的声辐射。气体动力学中有着丰富的和经典的内容,我们只选择了几个线性的解作为示例(第七章),但特意把非定常问题保留了下来,以与流体动力声学的部分内容相呼应;同时没有忘记强调数值计算可压缩流体的欧拉方程和 NS 方程的可能性,等等。

以上是作者近几年在教材改革中的一点尝试。在编写中作者虽然作了很大努力,但限于水平和时间,一时难以做得更好,敬请有关专家和读者批评指正。

在本书编写过程中,得到盛振邦教授的热情关心、一再鼓励和多方支持。何友声院士耐心地阅读了书稿,对文字逐章地进行了修改,并就一些章节的安排提出了中肯的建议;特别是应作者的请求为本书作了序,提出了一本有特色的书应该具备的条件。遗憾的是,本书离这些要求相差很远,而又交稿在即,无法进行大的修改,希望以后有机会时再对照这些精神加以改进。朱文蔚教授组织了部分听课的同学,对学习手稿中的感受和遇到的问题发表了意见。李谊乐同志不仅阅读了手稿,

对文字和公式提出了修改意见,还对文字的编辑给予很大的帮助。本书受到上海交通大学有关领导的关心和支持,得到上海交通大学研究生院和上海市教委的基金资助。作者在此向他们表示衷心的感谢。

刘应中 缪国平

1999年7月于上海交通大学

第一章 基本方程	(1)
1.1 轴对称方程	(1)
1.2 矢量方程	(3)
1.3 连续体方程	(5)
1.4 本构关系	(8)
1.4.1 广义牛顿流体	(9)
1.4.2 线性粘弹性体	(10)
1.4.3 粘塑性	(11)
1.5 能量方程	(12)
1.6 边界条件	(14)
第二章 平面应力问题的基本方程	(19)
2.1 平面应力问题的基本方程	(19)
2.2 平面问题的基本方程	(20)
2.2.1 应变能	(21)
2.2.2 位移	(23)
2.2.3 线性弹性	(25)
2.3 弹性问题的基本方程	(26)
2.4 弹性问题的基本方程	(27)
2.5 弹性问题的基本方程	(28)
2.6 弹性问题的基本方程	(29)
2.7 弹性问题的基本方程	(30)
2.8 弹性问题的基本方程	(31)
2.9 弹性问题的基本方程	(32)
2.10 弹性问题的基本方程	(33)
2.11 弹性问题的基本方程	(34)
2.12 弹性问题的基本方程	(35)
2.13 弹性问题的基本方程	(36)
2.14 弹性问题的基本方程	(37)
2.15 弹性问题的基本方程	(38)
2.16 弹性问题的基本方程	(39)
2.17 弹性问题的基本方程	(40)
2.18 弹性问题的基本方程	(41)
2.19 弹性问题的基本方程	(42)
2.20 弹性问题的基本方程	(43)
2.21 弹性问题的基本方程	(44)
2.22 弹性问题的基本方程	(45)
2.23 弹性问题的基本方程	(46)
2.24 弹性问题的基本方程	(47)
2.25 弹性问题的基本方程	(48)
2.26 弹性问题的基本方程	(49)
2.27 弹性问题的基本方程	(50)
2.28 弹性问题的基本方程	(51)
2.29 弹性问题的基本方程	(52)
2.30 弹性问题的基本方程	(53)
2.31 弹性问题的基本方程	(54)
2.32 弹性问题的基本方程	(55)
2.33 弹性问题的基本方程	(56)
2.34 弹性问题的基本方程	(57)
2.35 弹性问题的基本方程	(58)
2.36 弹性问题的基本方程	(59)
2.37 弹性问题的基本方程	(60)
2.38 弹性问题的基本方程	(61)
2.39 弹性问题的基本方程	(62)
2.40 弹性问题的基本方程	(63)
2.41 弹性问题的基本方程	(64)
2.42 弹性问题的基本方程	(65)
2.43 弹性问题的基本方程	(66)
2.44 弹性问题的基本方程	(67)
2.45 弹性问题的基本方程	(68)
2.46 弹性问题的基本方程	(69)
2.47 弹性问题的基本方程	(70)
2.48 弹性问题的基本方程	(71)
2.49 弹性问题的基本方程	(72)
2.50 弹性问题的基本方程	(73)
2.51 弹性问题的基本方程	(74)
2.52 弹性问题的基本方程	(75)
2.53 弹性问题的基本方程	(76)
2.54 弹性问题的基本方程	(77)
2.55 弹性问题的基本方程	(78)
2.56 弹性问题的基本方程	(79)
2.57 弹性问题的基本方程	(80)
2.58 弹性问题的基本方程	(81)
2.59 弹性问题的基本方程	(82)
2.60 弹性问题的基本方程	(83)
2.61 弹性问题的基本方程	(84)
2.62 弹性问题的基本方程	(85)
2.63 弹性问题的基本方程	(86)
2.64 弹性问题的基本方程	(87)
2.65 弹性问题的基本方程	(88)
2.66 弹性问题的基本方程	(89)
2.67 弹性问题的基本方程	(90)
2.68 弹性问题的基本方程	(91)
2.69 弹性问题的基本方程	(92)
2.70 弹性问题的基本方程	(93)
2.71 弹性问题的基本方程	(94)
2.72 弹性问题的基本方程	(95)
2.73 弹性问题的基本方程	(96)
2.74 弹性问题的基本方程	(97)
2.75 弹性问题的基本方程	(98)
2.76 弹性问题的基本方程	(99)
2.77 弹性问题的基本方程	(100)
2.78 弹性问题的基本方程	(101)
2.79 弹性问题的基本方程	(102)
2.80 弹性问题的基本方程	(103)
2.81 弹性问题的基本方程	(104)
2.82 弹性问题的基本方程	(105)
2.83 弹性问题的基本方程	(106)
2.84 弹性问题的基本方程	(107)
2.85 弹性问题的基本方程	(108)
2.86 弹性问题的基本方程	(109)
2.87 弹性问题的基本方程	(110)
2.88 弹性问题的基本方程	(111)
2.89 弹性问题的基本方程	(112)
2.90 弹性问题的基本方程	(113)
2.91 弹性问题的基本方程	(114)
2.92 弹性问题的基本方程	(115)
2.93 弹性问题的基本方程	(116)
2.94 弹性问题的基本方程	(117)
2.95 弹性问题的基本方程	(118)
2.96 弹性问题的基本方程	(119)
2.97 弹性问题的基本方程	(120)
2.98 弹性问题的基本方程	(121)
2.99 弹性问题的基本方程	(122)
2.100 弹性问题的基本方程	(123)
第三章 轴对称问题的基本方程	(124)
3.1 轴对称问题的基本方程	(124)
3.1.1 不可压缩流体	(125)

目 录

第一章 基本方程	(1)
1.1 输运定理	(1)
1.2 动量方程	(3)
1.3 连续性方程	(5)
1.4 本构关系	(8)
1.4.1 广义牛顿流体	(9)
1.4.2 线性粘弹性体	(10)
1.4.3 触变性	(11)
1.5 状态方程	(14)
1.6 能量方程	(14)
第二章 不可压缩流体的准一维流动	(19)
2.1 准一维流动方程	(19)
2.2 明渠流动	(20)
2.2.1 定常流	(21)
2.2.2 水跃	(23)
2.2.3 线性长波	(25)
2.2.4 洪水波计算	(29)
2.3 浅水非线性动力学波	(32)
2.3.1 膨胀波	(32)
2.3.2 涌波	(34)
2.3.3 黎曼问题	(35)
2.4 Boussinesq 方程和 KdV 方程	(37)
2.5 孤立波和椭圆余弦波	(39)
第三章 势流理论基础	(43)
3.1 动量方程的一次积分和伯努利方程	(43)
3.1.1 不可压缩流体	(44)

3.1.2	可压缩流体	(45)
3.2	不可压缩流体的势流流动	(46)
3.2.1	Green 第三公式	(46)
3.2.2	边界积分方程	(47)
3.2.3	两类 Green 函数	(49)
3.3	无界流场中绕无升力体的势流	(50)
3.3.1	流动分解	(52)
3.3.2	无界流场中无升力体上的力和力矩	(54)
3.3.3	附加质量	(55)
3.4	无界流场中绕升力体的势流	(58)
3.5	单层势与双层势	(62)
3.5.1	单层势	(62)
3.5.2	双层势	(63)
3.5.3	分片单双层势	(63)
3.5.4	混合单双层势	(63)
3.6	带自由面的势流问题	(64)
3.7	基本的线性波浪	(66)
3.8	直立柱体上的辐射问题	(69)
3.8.1	辐射问题	(69)
3.8.2	直立梁的振动模态	(71)
3.8.3	广义流体动力	(73)
3.9	交界面上的波浪	(76)
3.9.1	密度不同的界面	(76)
3.9.2	多孔底床上的波浪	(78)
3.9.3	浮泥上的波浪	(81)

第四章 地球流体力学基础 (84)

4.1	地球流体的运动方程	(84)
4.2	地转效应	(86)
4.2.1	气旋	(87)
4.2.2	位势涡度	(87)
4.2.3	地转流和风	(88)
4.2.4	Ekman 漂流	(89)
4.3	大尺度长波	(91)

4.3.1	长波方程	(91)
4.3.2	惯性重力长波	(93)
4.3.3	Rossby 波	(96)
4.4	数值模式	(99)
4.4.1	三维原始方程模式	(100)
4.4.2	深度平均模式	(102)
4.5	Lorenz 方程与混沌	(104)
第五章	分层流	(111)
5.1	静力稳定性	(111)
5.2	大洋中的内波	(113)
5.3	定常、无粘、不可压缩分层流	(118)
5.4	异重流	(124)
第六章	流体动力声学	(129)
6.1	基本知识	(129)
6.2	Lighthill 方程	(130)
6.3	声辐射点源的基本解	(135)
6.3.1	点声源	(135)
6.3.2	偶极子源	(138)
6.3.3	四极子源	(139)
6.4	格林函数	(139)
6.5	不均匀介质对声波的散射	(144)
6.6	敞水螺旋桨桨叶负荷造成的声辐射	(146)
6.7	Ffowcs Williams-Hawking (FW-H) 方程	(148)
6.8	流动发声与 Powell 方程	(151)
第七章	气体动力学初阶	(154)
7.1	气流的一些性质	(154)
7.1.1	马赫数与特征曲面	(154)
7.1.2	定常等熵气流参数的变化关系	(155)
7.1.3	间断面与激波	(156)
7.2	准一维的气体流动	(158)
7.2.1	定常变断面管流	(158)

7.2.2	不定常流	(160)
7.2.3	激波管问题	(162)
7.3	可压缩势流	(164)
7.3.1	全势流方程	(164)
7.3.2	小扰动的势流方程	(166)
7.3.3	可压缩气体欧拉方程的紧凑写法	(167)
7.4	定常薄物体绕流	(168)
7.4.1	定常亚音速三维薄翼绕流	(168)
7.4.2	细长旋成体的超音速绕流	(169)
7.5	线性非定常流的基本解	(172)
7.6	升力面非定常的空气动力学	(174)
7.6.1	亚音速升力面	(175)
7.6.2	超音速升力面	(176)
7.7	跨音速流动特点	(177)
第八章 湍流引论 (180)		
8.1	流动稳定性和湍流转变	(181)
8.2	粘性平行流的线性稳定性	(184)
8.3	弱非线性对二维稳定性的影响	(190)
8.4	平行流稳定性的三维非线性理论	(192)
8.5	湍流结构	(195)
8.5.1	自由切变湍流	(195)
8.5.2	壁面湍流	(196)
8.6	湍流平均与数学描述	(198)
8.6.1	湍流的统计概念	(198)
8.6.2	Reynolds 平均与 RANS 方程	(204)
8.6.3	网格平均和大涡模拟	(206)
8.6.4	相平均	(210)
第九章 湍流模式 (212)		
9.1	RANS 方程和 Boussinesq 的涡粘性假设	(212)
9.2	零方程模式	(213)
9.2.1	自由剪切层	(213)
9.2.2	二维壁面边界层	(214)

9.2.3 壁面湍流	(216)
9.3 一方程模式	(217)
9.4 两方程模式	(218)
9.5 非线性模式	(220)
9.6 雷诺应力模式	(222)
9.6.1 微分应力模式	(222)
9.6.2 代数应力模式	(225)
9.7 壁面函数和壁面影响	(227)

第十章 流动分离..... (230)

10.1 边界层与二维边界层的分离.....	(230)
10.2 二维剖面的绕流.....	(234)
10.2.1 翼型绕流.....	(234)
10.2.2 钝体绕流.....	(237)
10.3 离散涡法.....	(239)
10.4 三维分离.....	(243)
10.5 三维物体绕流.....	(249)
10.5.1 后掠梯形翼的绕流.....	(249)
10.5.2 三角翼的绕流.....	(249)
10.5.3 细长旋成体的绕流.....	(251)
10.5.4 三维钝体的绕流.....	(252)
10.6 非定常涡流.....	(253)

第十一章 环境流体力学..... (255)

11.1 单相混合流体的运动方程.....	(255)
11.2 不可压缩流体中的传热问题.....	(258)
11.2.1 二维平板边界层的强迫对流.....	(259)
11.2.2 垂直平板(二维)的自然对流.....	(262)
11.3 扩散理论.....	(264)
11.4 浮力射流.....	(268)
11.5 河流污染带与浮力湍流模式.....	(273)
11.6 河水中的有机污染物与(BOD-DO)水质模型	(278)
11.7 海上油膜的扩展和漂移.....	(279)

第十二章 多相流体动力学基础	(284)
12.1 颗粒动力学模型	(284)
12.1.1 刚性球体小颗粒在均流中的绕流(Stokes 公式)	(284)
12.1.2 一个简单的推广	(287)
12.1.3 刚性球体小颗粒在非均流中的受力	(291)
12.1.4 分散颗粒群模型	(294)
12.2 多相流体连续介质模型	(295)
12.3 气固系统的一维定常流动	(298)
12.3.1 变截面管中的准一维定常流动	(298)
12.3.2 正激波弛豫	(300)
12.4 二维水平管道中的颗粒输运	(302)
12.5 液体小球等速下落	(307)
12.6 单个球形空泡的运动	(311)
12.7 气体泡状流	(314)
12.8 一维气体泡状流	(317)
12.8.1 定常流	(318)
12.8.2 流的间断	(320)
12.9 蒸汽泡状流	(320)
附录	(324)
[附录 A] 古典热力学的某些概念	(324)
A.1 系统	(324)
A.2 平衡状态	(324)
A.3 状态变量	(324)
A.4 状态方程	(325)
A.5 热力学第一定律	(325)
A.6 焓(enthalpy)	(326)
A.7 热容 C 和比热容 c	(326)
A.8 热力学第二定律	(327)
A.9 熵(entropy)	(328)
[附录 B] 常用的一些矢量公式	(329)
B.1 矢量积	(329)
B.2 矢量算子——梯度、散度和旋度	(329)
B.3 圆柱坐标系和球面坐标系	(330)

本课程的主要部分在基础流体力学中已讨论过,为完整起见,仅略略提及,以便于参考。流体力学是一门涉及范围广泛的学科,我们的任务是讨论其中的一些基本的内容,为进一步研究流体力学打下基础。为确切起见,本课程中我们作下述基本的定义:

(1) 将流体力学分成两大部分。第一部分为流体力学,一般不直接讨论分子的运动,仅将流体力学中的分子运动论,即把分子运动对宏观流体性质的影响,按传统的理想化方法引进来,如粘性系数,传热系数和扩散系数等。二是描述流体运动的各种物理量,如速度,压强,密度,温度等都被看作是空间和时间的函数,若不特别说明,都是无限可微的函数。

(2) 本课程限于牛顿力学的范围,专题不讨论相对论流体力学和量子流体力学问题,也不将范围内的流体力学看作是非相对论力学在流体介质上的应用,这也就是我们限定流体运动方程的范围。

(3) 绝大多数情况下,我们只讨论单相流体,只有少数地方涉及两相流体处理的问题(见第十一章)。遇到多相的问题时(见第十二章),我们将单相和流体的基础上给予适当推广。

在上述假定下,我们将依次讨论牛顿流体运动方程组的基本方程,从数学的角度看,流体力学是在各种不同的定解条件下,求解偏微分方程,如果它们总是可解的。从数学的严格性,尚待严格证明,由于分子运动论,在一定范围内,相对比较简单的问题,如不可压缩流体,这中虽然体现了牛顿力学的一些内在的和谐关系,从物理和工程的角度看,它仍然需要针对各种实际问题,提出所提出的方程,并给出合理的定解条件,从一方面讲,其次则是给出一个手段,包括硬件和软件,求解方法,数值方法和数值方法,以控制方程和定解条件为工具,去寻求问题的解答,最后则从物理角度定解问题,不仅给出直接需要的数据,而且应该根据所解的特定问题,力求找出可能发生的物理现象,如湍流等现象(从特殊到一般)。

1.1 输运定理

为了导出控制方程,我们将首先考虑用统计力学关系,它是数学分析中对含参变量函数的积分求导的推广。在数学分析中我们有:

第一章 基本方程

这些内容的主要部分在基础流体力学中已经讨论过,为完整起见,仅简略提及,以便于参考。流体力学是一门涉及面异常广泛的学科,我们的任务只是讨论其中的一些基本的内容,为进一步研究或学习打下基础。为确切起见,本课程中我们作下述基本约定。

(1) 将流体看作连续介质。这至少有两重含意,一是不直接讨论分子的运动,像稀薄空气动力学和分子运动论,而把分子运动对宏观流体运动的影响,按传统的参数化方法引进来,如粘性系数、传热系数和物质的扩散系数等。二是描述流体运动的各种物理量,如速度、压强、密度、温度等都被看作是空间和时间的函数,若不加说明,都是无限可微的函数。

(2) 本课程限于牛顿力学的范畴。本课程不讨论相对论流体力学和量子流体的力学行为,把本课程内的流体力学看作是牛顿力学在流体介质上的应用,这也是我们建立流体运动方程的依据。

(3) 绝大多数情况下,我们只讨论单相流体,或者能简化为单相流体处理的情形(见第十一章)。遇到多相的问题时(见第十二章),我们将在单相流体的基础上给予适当推广。

在上述约定下,我们在这一章将逐次给出制约单相流体运动的基本方程。从数学的角度看,流体力学将是在不同的定解条件下,求解这些方程,如果它们总是可解的话。从美学的角度看,能把极端复杂、变化万千的流体世界,按照一定的、相对比较简单的数学规律给予描述,这本身就体现了客观世界的一种内在的和谐和美。从物理和工程的角度看,首先就是要针对各种现实问题,简化所提出的方程,并构造合理的定解条件(从一般到特殊);其次则是动员一切手段,包括硬件和软件,解析方法、模型试验和数值方法,以控制方程和定解条件为依据,去寻找问题的解答。最后则又回到所设定的问题,不仅给出直接需要的数据,而且应该根据所解的特定问题,力求找出可能带普遍性的规律,指导以后的研究(从特殊到一般)。

1.1 输运定理

为了导出控制方程,我们需要一个经常用到的数学关系,它是数学分析中对含参变量函数的积分求导的推广。在数学分析中我们有

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{a(t)}^{b(t)} f(x, t) dx = \int_{a(t)}^{b(t)} \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} dx + f[b(t), t] \frac{\partial b(t)}{\partial t} - f[a(t), t] \frac{\partial a(t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

式中: t 是参变量; $f(x, t)$ 是含参变量 t 的函数, 它对自变量 x 积分后, 得到的仍然是参变量 t 的函数, 而且积分的上下限也与 t 有关。这样的积分对参变量 t 的求导, 不仅可以把对参数 t 的求导移入积分号内, 变为函数 $f(x, t)$ 对参变量 t 的偏导数 $\partial f / \partial t$ 的积分, 而且还包含有对上下限的求导与该函数在上下限的数值的乘积。这个关系本身在流体力学的许多公式推导中有着重要的应用, 应十分熟悉它; 也许应该指出: 数学上, 公式左端只要求含参数的积分可微, 右端则要求被积函数对参数可微, 积分存在(当然上下限也是要可微的)。实用上, 我们很可能对被积函数 f 的性态事先一无所知, 只能默认所有条件都满足, 用了再说; 往往是出了问题, 再寻找问题所在, 并予检验和解决。我们要建立的输运定理是它在三维空间中的推广。

研究下列形式的体积分:

$$I(t) = \int_{V(t)} f(\mathbf{x}, t) dV, \quad \mathbf{x} = (x, y, z) = (x_1, x_2, x_3)$$

式中: $f(x, y, z, t)$ 含参数 t , 设它在随参数 t 变化的体积 $V(t)$ 上的积分是存在的, 记为 $I(t)$ 。 $V(t)$ 的表面记为 $S(t)$ 。考察差分

$$\Delta I = \int_{V(t+\Delta t)} f(\mathbf{x}, t+\Delta t) dV - \int_{V(t)} f(\mathbf{x}, t) dV$$

再设函数 $f(x, y, z, t)$ 和体积 $V(t)$ 对参数 t 是可微的, 将函数 $f(\mathbf{x}, t+\Delta t)$ 和体积 $V(t+\Delta t)$ 在 t 处展开, 其结果将是

$$\Delta I = \Delta t \int_{V(t)} \frac{\partial f}{\partial t} dV + \int_{\Delta V} f dV + O[(\Delta t)^2]$$

最后一项表示是与 $(\Delta t)^2$ 成比例的项, 或者说它是量级为 $(\Delta t)^2$ 的项, 这种表示法在文献中经常采用, 宜熟记。这里 O 是大写; 与它对应的还有小写的 o , 即 $o[(\Delta t)]$ 。两者的差别是: $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} O(\Delta t) / \Delta t = \text{const}$, 而 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} o(\Delta t) / \Delta t = 0$ 。 ΔV 是体积 $V(t+\Delta t)$ 和 $V(t)$ 之差, 即表面 $S(t+\Delta t)$ 和 $S(t)$ 之间所包含的、与 Δt 成比例的薄层体积, 大致上等于

$$\int_{\Delta V} f dV = \int_{S(t)} (\Delta d) f dS = \int_{S(t)} (U_n \Delta t) f dS + O[(\Delta t)^2]$$

如果将参数 t 理解为时间, 其中 Δd 就是表面 $S(t+\Delta t)$ 和 $S(t)$ 之间的距离, 它基本上等于表面 $S(t)$ 上任何一点的法向速度分量 U_n 乘时间增量 Δt ; 之所以是法向速度分量是因为表面上切向速度分量不会对表面的移动有贡献。代入并取极限, 得