



研究生教材

高等流体力学

费祥麟 主编 胡庆康 景思睿 编

西安交通大学出版社

研究生教材

高等流体力学

费祥麟 主编 胡庆康 景思睿 编

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书为层次高于大学工科流体力学内容的教材。全书共十章，前五章主要研讨理想流体流动问题，六~八章研讨粘性流体流动问题，最后两章内容考虑了专业的需要。本书特点：条理清晰，叙述深入浅出，便于阅读；既注重物理描述，又不忽视数学的严密性。

本书可作为非流体力学专业的工科动力、能源和化工等类各专业研究生的教材，亦可供从事有关流体力学工作的教师、科学工作者和工程技术人员参考。

高 等 流 体 力 学

费祥麟 主编 胡庆康 景思睿 编
责任编辑 高民军

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 19.875 插页 1 字数：501千字

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数：1—2000

ISBN7-5605-0194-X/O·39 定价：4.75元

《研究生教材》总序

研究生教育是我国高等教育的最高层次，是为国家培养高层次人才的人才。他们必须在本门学科中掌握坚实的基础理论和系统的专门知识，以及从事科学研究工作或担负专门技术工作的能力。这些要求具体体现在研究生的学位课程和学位论文中。

认真建设好研究生学位课程是研究生培养中的重要环节。为此，我们组织出版这套《研究生教材》，以满足当前研究生教学。主要是公共课和一批新型的学位课程的教学需要。教材作者都是多年从事研究生教学工作，有着丰富教学和科学研究经验的教师。

这套教材首先着眼于研究生未来工作和高技术发展的需要，充分反映国内外的最新学术动态，使研究生学习之后，能迅速接近当代科技发展的前沿，以适应“四化”建设的要求；其次，也注意到研究生公共课程和学位课程应有它最稳定，最基本的内容，是研究生掌握坚实的基础理论和系统的专门知识所必要的，因此在研究生教材中仍应强调突出重点，突出基本原理和基本内容，以保持学位课程的相对稳定和系统性，内容有足够的深度，而且对本门课程有较大的覆盖面。

这套《研究生教材》虽然从选题、大纲、组织编写到编辑出版，都经过了认真的调查论证和细致的定稿工作，但毕竟是第一次编辑这样的高层次教材系列，水平和经验都感不足，缺点与错误在所难免。希望通过反复的教学实践，广泛听取校内外专家学者和使用者的意见，使其不断改进和完善。

西安交通大学研究生院

西安交通大学出版社

1986年12月

AG 65/13

前 言

本书主要是为非流体力学专业的工科动力、能源、化工等类各专业的研究生编写的，目的在于为他们从事课题研究时提供必需的较为坚实的流体力学基础知识，同时也兼顾到其他有关人员的需要。在阅读本书时，读者应具备有普通流体力学的基本知识。

作为教材，本书篇幅有限，所以一些内容无法深入展开，而且也不能照顾到各个方面。

鉴于有些内容，例如边界层和流动的数值计算，在后续课程《边界层理论基础与数值计算》、《有限差分、有限元、边界元方法在流力中的应用》中有详细的论述，所以本书不拟铺开。此外，节号前有“*”号者为选讲内容。

编写时注意了专业的特点。

阅读本书所需的某些数学知识，以及某些拓宽性知识，已编入附录2~5，供读者使用和参考。

参加本书编写的有费祥麟、胡庆康、景思睿，费祥麟任主编。编写分工如下：二、五、九章和附录2由胡庆康编写；一、四、十章和附录1、4由景思睿编写；三、六、七、八章和附录3、5由费祥麟编写。

限于编者水平，加之编写时间短促，书中难免有不妥和疏误之处，希读者批评指正为荷。

编 者

1988年7月



作者简介

费祥麟，江苏无锡人，1929年生。1953年交通大学毕业留校后长期从事流体力学的教学和科研工作。现为西安交通大学副教授，*《水动力学研究与进展》*杂志编委。近年来论著有：教材*《流体力学》*（参编），论文*《二维曲壁扩压流道紊流边界层计算及试验研究》*等多篇。

胡庆康，1935年生于上海市。1957年交通大学毕业，1960年清华大学工程力学研究班毕业。现为西安交通大学副教授，流体力学教研室主任、省力学学会常务理事。近年来论著有：教材*《流体力学》*（参编），论文*《用有限元法计算绕后掠的后台阶的不可压层流流动》*等多篇。

景思睿，陕西榆林人，1944年生。1967年西北工业大学毕业，1981年研究生毕业，获硕士学位。现任西安交通大学流体力学教研室副主任，讲师。已发表*《亚、跨音速翼型设计》*、*《离心泵叶轮优化设计》*等论文。

431100

高等流体力学

借者单位 借者姓名

本社已出版的研究生系列教材:

计算方法	邓建中	葛仁杰
		程正兴
大系统的递阶与分散控制	李人厚	邵福庆
应用泛函分析	龚怀云	寿纪麟
		王绵森
数理统计		汪荣鑫
随机系统理论	韩崇昭	王月娟
		万百五
工程断裂力学		陆毅中
工程优化的算法与分析		张可村
英语精读	郝克琦	周光父
应用最优控制		吴受章
金属的晶界与强度		宋余九
数字系统诊断与综合		郑崇勋
电气测量技术		于轮元
非线性连续介质力学基础		匡震邦
随机过程		汪荣鑫
辩证逻辑与科学方法论		潘宇鹏
信息论		孟庆生
数值传热学		陶文铨
分析拓扑引论	寿纪麟	王绵森
微波无源和有源电路原理		傅君眉
《反杜林论》哲学编新解		马鼎璋
英语阅读和技能	华威	潘能
位错与材料强度		石德珂
振动力学		倪振华
高等流体力学		费祥麟
英文写作		张守樟
集值测度与随机集		张文修
往复式压缩机数学模型及应用		吴业正

1989年将出版的:

专家系统	施鸿宝	王秋荷
非电量测量		吴道梯
建筑热物理学		陈启高
应用数学基础		夏宗伟

目 录

前 言

第一章 流体及其物理性质	(1)
§ 1.1 流体与连续介质模型	(1)
1.1.1 流体	(1)
1.1.2 连续介质模型	(2)
1.1.3 流体物理量	(3)
§ 1.2 流体的压缩性	(5)
1.2.1 流体的压缩性	(5)
1.2.2 可压缩流体与不可压缩流体	(6)
§ 1.3 流体的粘性	(7)
1.3.1 粘性	(7)
1.3.2 粘性系数	(8)
1.3.3 实际流体与理想流体	(10)
§ 1.4 流体的导热性	(10)
1.4.1 流体的导热	(10)
1.4.2 导热系数	(11)
§ 1.5 流体的扩散性	(12)
1.5.1 流体的扩散	(12)
1.5.2 费克定律	(12)
§ 1.6 液体的表面张力	(13)
第二章 流体运动学	(16)
§ 2.1 拉格朗日法与欧拉法	(16)
2.1.1 两种方法	(16)

*2.1.2 拉格朗日变量与欧拉变量的相互转换·····	(20)
§ 2.2 流体微团运动的分解·····	(21)
2.2.1 微团运动的分解·····	(21)
2.2.2 正交曲线坐标系中的 $[S]$ 分量的表达式···	(24)
2.2.3 主相对直线变形速度, 主剪切变形速度···	(26)
§ 2.3 连续方程·····	(28)
2.3.1 正交曲线坐标系中的连续方程·····	(28)
2.3.2 有源、汇时的连续方程·····	(31)
2.3.3 有扩散时的连续方程·····	(31)
2.3.4 积分形式的连续方程·····	(32)
§ 2.4 流函数·····	(33)
§ 2.5 有旋流动的基本性质·····	(38)
2.5.1 有旋流动·····	(38)
2.5.2 涡线, 涡管, 涡管强度和速度环量·····	(38)
2.5.3 加速度环量·····	(42)
§ 2.6 不可压无旋流动的基本性质·····	(43)
2.6.1 单连通域和多连通域·····	(43)
2.6.2 速度势函数及其性质·····	(44)
2.6.3 加速度有势·····	(46)
2.6.4 不可压无旋流动的动能·····	(47)
§ 2.7 不可压无旋流动的求解问题·····	(48)
2.7.1 解法简述·····	(48)
2.7.2 唯一性定理简述·····	(50)
§ 2.8 给定旋涡场的不可压流动的求解问题·····	(55)
2.8.1 由旋涡场决定速度场·····	(55)
2.8.2 由涡线决定速度场·····	(58)
第三章 流体动力学基本方程 ·····	(61)
§ 3.1 运动流体内的应力状态, 本构方程·····	(61)

3.1.1 应力状态	(61)
3.1.2 本构方程	(68)
3.1.3 正交曲线坐标系中的本构方程	(72)
§ 3.2 纳维埃-斯托克斯方程 (N - S 方程)	(75)
3.2.1 以应力形式表示的运动方程(动量方程)	(76)
3.2.2 N - S 方程	(79)
3.2.3 N - S 方程的一般性质	(83)
3.2.4 其它坐标系中的 N - S 方程	(86)
3.2.5 积分形式的运动方程(动量方程)和动量矩方程	(88)
§ 3.3 能量方程	(89)
3.3.1 总能量方程	(89)
3.3.2 动能方程——流体力学能量方程	(97)
3.3.3 内能方程——热力学能量方程	(99)
3.3.4 能量方程的其它微分形式	(102)
3.3.5 积分形式的能量方程	(102)
§ 3.4 基本方程组和定解条件	(104)
3.4.1 基本方程组及其封闭性	(104)
3.4.2 定解条件	(106)
§ 3.5 理想不可压缩流体流动的基本方程组	(112)
3.5.1 基本方程组	(112)
3.5.2 其它有关方程	(114)
§ 3.6 粘性流体动力学基本方程组的无量纲化	(116)
3.6.1 无量纲物理量	(116)
3.6.2 无量纲基本方程组	(117)
3.6.3 无量纲定解条件	(122)
第四章 理想不可压缩流体的二维和三维流动	(125)
§ 4.1 复势理论基础知识	(125)

4.1.1	复势函数和复速度	(125)
4.1.2	一些简单流动的复势函数	(127)
*4.1.3	不可压平面势流中的几个定理	(133)
§ 4.2	镜像法	(140)
4.2.1	平面镜像	(142)
4.2.2	圆柱面镜像——圆定理	(144)
§ 4.3	保角变换方法	(147)
4.3.1	保角变换的某些性质	(148)
4.3.2	任意形状柱状物体绕流复势函数的一般形式	(150)
4.3.3	儒柯夫斯基翼型绕流	(151)
§ 4.4	奇点法	(158)
4.4.1	均匀流动和三维流动奇点	(158)
4.4.2	轴对称流动的叠加方法	(162)
§ 4.5	非惯性坐标系中的动量定理和动量矩定理	(169)
4.5.1	非惯性坐标系中的随体导数	(169)
4.5.2	非惯性坐标系中的动量定理和动量矩定理	(172)
§ 4.6	非定常运动物体所受的力和力矩	(178)
4.6.1	物体在无界流体中的任意运动	(179)
4.6.2	流体作用在物体上的力和力矩	(180)
4.6.3	物体的运动方程式	(182)
*4.6.4	附加动量和附加动量矩计算, 附加质量系数	(184)
4.6.5	非定常运动物体所受合力和合力矩的计算	(186)
第五章	可压缩流体动力学	(190)
§ 5.1	一维可压缩流动的基本方程, 等截面管中一维定常等温流动	(190)
5.1.1	一维可压缩流动基本方程	(190)

5.1.2 等截面管中一维定常等温流动	(191)
§ 5.2 平面可压缩势流方程及其线性化	(197)
5.2.1 势流方程	(197)
5.2.2 小扰动方法	(199)
§ 5.3 亚音速流动的相似律, 超音速气流中的薄翼	(206)
5.3.1 亚音速流动的相似律	(206)
5.3.2 超音速气流中的薄翼	(216)
§ 5.4 绕尖劈头部的跨音速流动, 跨音速流动的相似律	(222)
5.4.1 跨音速流动的定义与特点	(222)
5.4.2 绕尖劈头部的跨音速流动	(223)
5.4.3 跨音速流动的相似律	(225)
§ 5.5 特征线理论	(229)
5.5.1 单个偏微分方程的情况	(230)
5.5.2 两个偏微分方程的方程组的情况	(233)
§ 5.6 特征线法在平面定常无旋超音速流动中的应用	(236)
5.6.1 平面定常无旋超音速流动的特征线法	(236)
5.6.2 特征线法的数值计算	(242)
第六章 层流	(251)
§ 6.1 粘性流体运动的基本性质	(251)
6.1.1 粘性流体运动的有旋性	(251)
6.1.2 粘性流体运动的旋涡扩散性	(254)
6.1.3 粘性流体运动的机械能耗散性	(259)
§ 6.2 N-S 方程的精确解	(260)
6.2.1 突然加速无界平板附近的流动	(261)
6.2.2 二维定常滞止区域流动	(266)
6.2.3 可压缩 Couette 流动	(271)

§ 6.3 缓慢流动.....	(275)
6.3.1 斯托克斯(Stokes)流动.....	(276)
6.3.2 滑动轴承内润滑油的流动.....	(284)
6.3.3 奥森(Oseen)流动.....	(291)
* § 6.4 层流的稳定性及向紊流的过渡(转换)简介.....	(295)
6.4.1 层流的稳定性.....	(295)
6.4.2 层流向紊流的过渡(转换).....	(300)
第七章 紊流	(305)
§ 7.1 概述.....	(305)
7.1.1 紊流的特征.....	(305)
7.1.2 粘性流体运动微分方程组与紊流.....	(310)
7.1.3 紊流的描述方法.....	(311)
7.1.4 时均值与脉动值的性质.....	(314)
7.1.5 紊流理论与分子运动论的关系.....	(316)
§ 7.2 紊流的基本方程.....	(317)
7.2.1 紊流的平均连续方程.....	(317)
7.2.2 紊流的平均运动方程.....	(319)
7.2.3 紊流的平均总能量方程.....	(324)
7.2.4 紊流的平均动能方程(紊流平均的流体力学能量方程).....	(326)
7.2.5 紊流的平均内能方程(紊流平均的热力学能量方程).....	(328)
§ 7.3 紊流基本方程的若干导出方程.....	(329)
7.3.1 不可压缩流体紊流的雷诺应力输运方程.....	(330)
7.3.2 不可压缩流体紊流的平均脉动动能方程(紊流动能方程或 K 方程).....	(333)
7.3.3 紊流耗散方程(ϵ 方程).....	(333)
7.3.4 雷诺传热(热流)输运方程.....	(334)

§ 7.4 紊流模式理论简介	(334)
7.4.1 紊流平均运动方程组的封闭性问题	(334)
7.4.2 按方程组中所用紊流偏微分方程的数量 (紊流的平均连续方程和雷诺方程除外) 来划分的模式理论	(338)
*7.4.3 陈景仁模式理论*简介	(351)
*7.4.4 周培源的理论 (思路简述)	(359)
第八章 边界层	(361)
§ 8.1 边界层方程及其一般性质	(361)
8.1.1 边界层微分方程	(361)
8.1.2 边界层积分方程	(367)
8.1.3 边界层方程的某些一般性质	(370)
§ 8.2 层流边界层	(373)
8.2.1 二维定常不可压缩流体层流边界层的精确 解	(373)
8.2.2 二维定常不可压缩流体层流边界层的近似 解	(385)
8.2.3 二维定常可压缩流体层流边界层	(396)
8.2.4 边界层内流动由层流向紊流的过渡 (转换)	(406)
§ 8.3 紊流边界层	(406)
8.3.1 紊流边界层微分方程	(406)
8.3.2 紊流边界层积分方程	(409)
8.3.3 紊流边界层的一般特性	(409)
8.3.4 二维不可压缩流体紊流边界层的计算	(423)
§ 8.4 轴对称边界层和三维边界层简介	(427)
8.4.1 三维和轴对称边界层微分方程组	(428)
8.4.2 三维边界层的一些特点	(434)
8.4.3 轴对称尾流	(435)

8.4.4 定常轴对称边界层动量积分方程	(436)
8.4.5 Mangler 变换	(438)
第九章 射流	(441)
§ 9.1 基本概念	(441)
9.1.1 定义	(441)
9.1.2 流场描述	(442)
9.1.3 引射	(445)
9.1.4 非定密度体系	(446)
9.1.5 射流种类	(447)
§ 9.2 紊流射流的基本方程及其积分	(449)
9.2.1 平面射流	(449)
9.2.2 圆孔射流	(452)
§ 9.3 平面自由射流	(455)
§ 9.4 外流中的射流	(461)
9.4.1 平面射流初始段	(463)
9.4.2 平面射流主段	(466)
§ 9.5 旋转射流	(468)
9.5.1 基本方程	(470)
9.5.2 速度分布	(473)
9.5.3 实验数据	(475)
第十章 两相流动	(479)
§ 10.1 两相流概述	(479)
10.1.1 两相流动的分类及特点	(479)
10.1.2 两相流的处理方法	(482)
§ 10.2 基本方程组	(483)
10.2.1 局部(当地)瞬时方程组	(483)
10.2.2 瞬时空间平均方程	(490)
10.2.3 局部时均方程	(495)

10.2.4	复合平均方程	(497)
§ 10.3	管道中两相流动的模化	(499)
10.3.1	一些定义	(501)
10.3.2	简化模型中采用的限制	(504)
10.3.3	管道中两相流动的基本方程组	(506)
§ 10.4	气 - 液两相流动简介	(510)
10.4.1	流型及其分类	(510)
10.4.2	流型状态图	(513)
10.4.3	流型的转变	(514)
10.4.4	压降	(516)
10.4.5	含气率	(526)
§ 10.5	流体 - 粒子两相流简介	(530)
10.5.1	一般分析和粒子特性	(530)
10.5.2	管道中气体 - 固体粒子的两相流动	(534)
10.5.3	固体粒子的沉降和流态化	(537)
附录 1	一些流体的物理性质	(541)
附录 2	张量简介	(547)
附录 3	紊流质量加权平均的若干方程以及可压缩流体 紊流边界层的若干方程	(567)
附录 4	高斯公式和莱布尼茨公式的一些特殊形式	(587)
附录 5	流体动力学基本方程组的求解	(597)
	主要参考书	(616)

第一章 流体及其物理性质

流体力学是研究流体在外力作用下宏观平衡及运动规律，以及流体与固体相互作用规律的一门科学^{*1)}。本章扼要介绍流体的力学特点和重要物理性质，以及在流体力学中采用的一些基本物理模型。

§ 1.1 流体与连续介质模型

1.1.1 流体

物质常见的存在状态是固态、液态和气态，处在这三种状态下的物质分别称为固体、液体和气体^{*1)}。这些形态上的差别，是由于组成物质的分子间的距离和运动范围不同以及分子间的吸引力不同所致。固体中分子排列规则，分子间距离很小，吸引力很大，分子在其平衡位置附近振动，所以其结构致密，有固定的形状和一定的刚度。液体中分子间距离稍大于同种物质固体的分子距离，分子间吸引力较小，单个液体分子尽管在某种程度上受到周围分子的约束，但它可以摆脱这种约束，具有较大的运动自由度。液体中分子没有固定的排列，且结构较为松散。所以液体能够流动，随容器不同而其形状不同，有确定的体积和表面，且常有与气体接触的分界面——自由面。气体分子间的距离很大，吸引力极小，除了分子间碰撞及与容器壁的碰撞外，可以自由运

-
- * 本书不研究微观平衡规律。
 - * 极高温情况下，电离了的气体称为等离子体。它被认为是物质存在的第四种形态。本书不研究等离子体。