

429

流体力学

[美] J.W. 戴莱

D.R.F. 哈里曼 著

郭子中 陈玉璞 等译



人民教育出版社

52.712
822

流 体 动 力 学

J. W. 戴 莱 著
[美] D. R. F. 哈里曼
郭子中 陈玉璞 等译

人 民 教 育 出 版 社

2788/07

流体力学

J. W. 戴莱 著
[美] D. R. F. 哈里曼

郭子中 陈玉璞 等译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 15.75 字数 380,000

1981年10月第1版 1983年6月第1次印刷

印数 00,001—10,700

书号 15012·0369 定价 2.00元

译者前言

自勃兰特在本世纪初发表边界层理论以来,随着这一理论的日趋完善以及近代实验与计算技术的不断发展,流体力学在工程上的应用已日益广泛。综观我国已出版的流体力学专著或译著中,供理科用的较多,而为工科用的则很少。本书的翻译出版,其目的就是为工科大学生提供一本合适的教学参考书。

美国 J. W. 戴莱、D. R. F. 哈里曼著《流体力学》作为工科大学生的一本流体力学的入门教科书,曾在美国某些著名大学内广为采用。它着重于实际流体的动力学,取材甚为丰富;且在基本概念与专题相结合、一般基础与特例相结合、力学普遍定律与对流体特殊应用相结合等方面,都有其一定的特色。本书更适合于大学高年级学生阅读。

本书一至九章译稿,曾作为华东水利学院研究生流体力学课程的参考书和工程力学专业本科生的基本教材。使用情况表明,作为研究生参考教材并不存在困难;但作为低年级本科生的基本教材,则可能偏深,需对若干先行的基本内容进行适当增补。本书虽采用英制,但学生在学习中并不因此而发生特殊困难。因此我们认为,在当前情况下,本书作为工科大学生的流体力学参考书,还是适用的。

流体力学中的某些名词,理科与工科本来就有不同的习惯提法,本书既为工科学生应用,在译名上也就按照工科习惯;但为避免误会,凡首次出现这类名词时,均另行加注理科习用名词。本书译自原著一九七三年六月的第二次印行版。

参加本书翻译工作的除郭子中(译第九、十、十一、十二、十六

章),陈玉璞(译第三、四、八章)外,尚有刘润生(译第一、二、七章),马法三(译第五、六、十五章)和许荫椿(译第十三、十四章),在提供初稿以后,全书均由郭子中和陈玉璞共同进行全面校订、修改和整理。

但限于时间和译者水平,缺点、错误在所难免,希望读者指正。

译 者

于南京华东水利学院

一九八一年九月

序 言

本书是为初学流体力学的工科学生而编写的。这是为着一定目标提供的一本入门书,它与现代工科课程的教育过程,以及未来工程师的需要之间的联系,已经越来越密切。这一目标对内容和论述方法上都产生了一些重要的观点。

在内容上,本书着重于可压缩和不可压缩的实际流体动力学。此外,本书试图从传统的入门书中吸取重要的基本概念,并且把它们和通常不讲或留给后继课程再讲的一些重要而有趣的专题结合起来。这就在某些方面改变了惯常的方式,并且在编排上提出了一些打破常规的做法,但是可以相信只有通过这些步骤才能使今天的教育适合明天的需要。

在论述上,本书反映出这种认识,即现代技术问题的复杂性既需要具备求解的一般基础,也需要求解的特殊根据。更为重要的是必须懂得“特殊”解的各种限制。作者们相信,在注重一般形式的基本关系方面,以及作为从一般中导出的特殊情况来处理的特例方面,今天的学生应该有较好的训练。因此,本书的一个特色是尽早介绍纳维埃-斯托克斯这一普遍运动方程,并继以说明它们在各种特殊情况下的应用。对于普遍运动方程的推导,作者们选择了一种基于学生已有固体力学基础知识的方法。这样就为力学的这两个基本分支提供了有益的联系。运用普遍运动方程的共同解析基础,就有可能更为一致地表达流体力学的专门概念。的确,对于表达蠕动及边界层流动概念,还难于想象有何成功的替代方法。此外,这种方法还避免了不必要的重复,而这种重复在先讲特殊或简化方程再讲普遍方程的一般入门书中,为了建立严密性和通用

性是必不可少的。在编写新题材时，由此提高效率使得有可能在一本入门书中收集了更多的问题。作者们认为，对一切技术领域来说，流体学科范围内的基本要求都是一样的。因此，尽量在跨学科的基础上来介绍本学科。

就实际意义而言，流体动力学涉及流体物质及其各种特性的分布与扩散，以及流体在一系统中的运动。因此它与一个系统中质量、能量、动量的逐点流动和传输以及其它特性有关。根据问题种类的不同，可采用两种探讨途径。其一是使整体或总体作用与边界条件相连系的有限控制体积法，另一是采用无限小的流体元和控制体积来研究流体质点的运动，从而得出微分关系式和积分关系式。本书使用两种方法导出基本方程式。特别着重于明确区分这些方程式以及由它们导出的关系式的依据和限制。这种区分是很重要的，因为在少数情况下具有相同形式的关系式，虽然其前提不同，可以由两种途径获得。所谓伯诺里方程各种推导之间的混淆不清就是例证。

本书很容易分成两个部分。头八章讨论流体动力学的基本概念和基本方程。其余八章则注重专题和应用。原稿曾从广泛的课堂教学中得到改进，首先在麻省理工学院土木工程系，其后在密执安大学工程力学系。课文及习题均由此得到重要的订正，并得以有机会估计课堂有效学习的合理进度，作者发现相当于十一章的内容能够在一个正常的学期中以每周上三次课的方式有效地教完。全书用不到两个学期就可以方便地教完，并留有时间增授专题或对书内的一些课题作更深入的讨论。对于以一学期为限的课程，教学内容可包括第一至第八章以及选自第九至第十三章中的若干章节，结果令人满意，而且还不致流于形式。

作者们对麻省理工学院及福特基金会在原稿编写期间给予的支持表示谢意。前者表现于工学院院长布朗和土木工程系米勒教

授不断的鼓励和合作，在关键时刻并曾给以专用的时间。后者则从福特基金会拨给麻省理工学院作为发展大学工科课程的赠款中提供了资助。作者们还要对麻省理工学院和密执安大学的同事们致谢。他们曾是建设性意见和评论的源泉。在麻省理工学院，特别要感谢依本教授的意见和建议，此外还有郡克、艾塔拉、肯尼迪、雷许兰、小拉莫尔和白京斯教授等，他们既参加了教学，而且还对本书在初创阶段的改进作过贡献。在以后各阶段中，艾格森、麦克劳林、吉尔哈和派森奈德教授等对初期版本的教学计划进行了合作。在密执安大学，戴勒、莫雷、史密斯、耶格教授等和徐·林·基德博士等曾采用初期版本教学，并提出过不少有益的建议。习题的搜集和题解对于教科书的编写是件大事。在这方面，对华莱士、海斯、纳斯、西奈纳斯和海派拉各位的大力协助深表谢意。怀契特和奥波莎小姐协助准备原稿也深为感谢。写作此书时我们的妻子儿女非常耐心，对此更为感激。

密执安，安阿伯
麻省，剑桥

戴 莱
哈理曼
一九六五年十一月

目 录

第一章 流体特性	1
1-1 引言	1
1-2 量测单位	3
1-3 流体的特性和状态	5
1. 流体动力学中的重要特性	6
2. 状态方程	15
3. 气体的状态变化过程	17
1-4 流体的平衡	19
1. 平衡流体中一点处的应力	19
2. 重力场中的平衡	20
3. 毛细作用	30
第二章 运动学	47
2-1 速度场	47
2-2 恒定运动与均匀运动	49
2-3 旋转坐标系与加速坐标系	50
2-4 流线与迹线	54
2-5 速度梯度和剪切	55
第三章 动力特征与分析方法	58
3-1 引言	58
3-2 质量传输	59
3-3 热量传输	60
3-4 动量传输	61
3-5 传输类比	62
1. 动量传输	63
2. 热量传输	64
3. 质量传输	64
3-6 质点与控制体积的概念	65

1. 无限小单元与控制体积	65
2. 有限控制体积	66
3-7 解析处理的范围	67
第四章 有限控制体积的连续性方程、能量方程与动量方程	68
4-1 均质流体中的物质守恒	68
1. 任意控制体积	68
2. 流管控制体积	70
3. 与管道边界重合的控制体积	71
4-2 普遍能量方程	72
1. 热力学第一定律	72
2. 普遍能量方程	75
3. 一维恒定流方程	78
4. 能坡线(总水头线)与水力坡度线(测压管水头线)	83
4-3 有限控制体积的线动量方程	85
1. 动量原理	85
2. 普遍线动量方程	87
3. 概化装置的惯性控制体积	88
4-4 有限控制体积的动量矩方程	94
1. 惯性参照系的动量矩原理	94
2. 普遍动量矩方程	95
3. 涡轮机的恒定流方程	96
第五章 应力-应变关系	107
5-1 一般的应力-应变系统	107
1. 表面应力	107
2. 应变分量	109
5-2 弹性体的应力应变关系	110
5-3 牛顿流体的应力与应变率关系	113
第六章 连续性方程和运动方程	117
6-1 连续性方程	117
6-2 二维不可压缩流动的流函数	119
6-3 有旋运动与无旋运动	121
1. 旋转和涡量	121

2. 环量	122
6-4 运动方程	122
1. 纳维埃-斯托克斯方程	124
6-5 层流运动范例	127
1. 两平行平板间的层流	128
2. 等直径圆管中的层流	130
6-6 无旋运动方程	131
1. 速度势函数和流函数	132
2. 伯诺里方程	134
6-7 无摩阻流动方程	137
1. 沿流线的流动方程	137
2. 伯诺里方程各种形式的提要	139
3. 无摩阻流动的若干范例	139
6-8 涡运动	143
1. 强迫涡	144
2. 无旋涡或自由涡	145
第七章 动力相似	152
7-1 引言	152
7-2 几何相似	153
7-3 动力相似	154
7-4 不可压缩流体的相似条件, 佛汝德数和雷诺数	157
1. 封闭系统	160
2. 自由表面系统	163
7-5 可压缩流体的相似条件。马赫数	168
7-6 提要	170
第八章 流体动力学中一些基本概念与专门方程	176
8-1 流动分类	176
1. 层流与紊流	176
2. 蠕动	178
3. 边界层概念	179
8-2 蠕动与二维边界层方程	181
1. 蠕动	181

2. 二维边界层方程	182
3. 边界层厚度定义	184
4. 二维边界层的积分动量方程	185
8-3 阻力、曳力与升力的概念	187
第九章 蠕动	191
9-1 斯托克斯运动	191
9-2 粘性对总压管的作用	196
9-3 通过孔隙介质的流动	198
1. 孔隙介质的蠕动方程	198
2. 各向同性介质范例	203
3. 二维流动的图解法	205
第十章 层流边界层	213
10-1 引言	213
10-2 平面上的二维层流边界层	213
1. 一般特性	213
2. 层流的布拉修解	216
10-3 二维边界层中边界曲率的作用	221
1. 压强梯度的作用	221
2. 非零压强梯度的范例	223
10-4 三维边界层	224
1. 旋转圆盘上的斜边界层	225
第十一章 紊流的起源和紊流切应力	233
11-1 紊流的起源	233
11-2 紊流的速度, 能量和连续性	237
11-3 紊流切应力和旋涡粘性系数	239
11-4 不可压缩流体的雷诺方程	242
11-5 剪切流中的混合长和相似性假说	246
第十二章 附壁紊流, 边界层流动	250
12-1 引言	250
12-2 紊流边界层的结构	250
12-3 平均流动特征	254

1. 流速和摩阻的普适定律: 光滑壁面	254
2. 指数律公式: 光滑壁面	268
3. 粗糙壁面定律	270
12-4 具有压强梯度的紊流边界层	276
1. 压强梯度的作用	276
2. 边界层发展的计算	279
第十三章 附壁紊流·管渠中的均匀流	285
13-1 进口段流动与完全发展的流动	285
13-2 管道中不可压缩流	288
1. 轴对称流动的雷诺方程	288
2. 管流的运动方程和能量方程	289
3. 管道中均匀剪切流的结构	292
4. 速度和摩阻定律: 光滑管	294
5. 粗糙的影响	297
6. 管流计算	303
13-3 非圆形管道中的不可压缩流	309
1. 封闭管道中的摩阻损失	309
2. 二维流动	311
13-4 管中可压缩均匀流	314
1. 可压缩流的一维方程	314
2. 有摩阻的等温气流	317
3. 管中有摩阻的绝热气流	318
13-5 棱柱形明渠均匀流	322
1. 一维明渠方程	323
2. 水头损失方程	326
3. 二维明渠的流速和摩阻定律	329
4. 均匀流的计算	329
第十四章 管渠非均匀流	340
14-1 引言	340
14-2 封闭管渠中不可压缩非均匀流, 流动特征和损失	341
1. 非均匀流中的能量消耗	344
2. 扩散流	345

3. 收敛流	349
4. 流量计	350
5. 流向的改变	352
6. 管系	353
14-3 可压缩非均匀流	359
1. 气体动力学中的多维分析	359
2. 一维等熵管流	363
3. 激波	370
14-4 有自由表面的非均匀流	378
1. 急变流	378
2. 短渠道渐变段中的变速流	383
3. 渐变流	387
4. 自由表面激波	392
第十五章 潜体·阻力与升力	405
15-1 引言	405
15-2 恒定无旋运动中流体动力学的力	408
15-3 加速运动中流体动力学的力	410
15-4 对称物体的阻力	413
1. 二维对称物体	414
2. 三维物体	421
15-5 非对称物体的升力和阻力	424
1. 环量和升力	424
2. 二维翼剖面	426
3. 三维的影响	429
15-6 气蚀对阻力的影响	432
15-7 界面对阻力的影响	439
15-8 压缩性对阻力的影响	442
第十六章 紊动射流和扩散过程	452
16-1 自由紊流	452
1. 平面射流动力学	454
2. 轴对称射流	458
3. 尾流中的自由紊流	462

16-2 非均质流体中的扩散过程	463
1. 双元系统中的分子扩散	464
2. 迁移-扩散方程	468
3. 紊流中的扩散和迁移	470
4. 一维运动的弥散	472
奇数习题的答案	482

第一章 流 体 特 性

1-1 引言

一般而言,物质可以按其存在的物理形式予以分类。称做相的这些形式,有固体、液体和气体(或蒸汽)。流体包括液相和气相(或蒸汽相)的物质。我们完全熟悉这些相与固相有所区别的特征。而且,我们也知道液体与气体有着完全不同的外观,所以,我们必须找出能够把它们都归入流体这一类的共同特征。在研究流体动力学时,我们感兴趣的是处于运动中的流体性态以及这种性态对作用力和力矩的关系。当受到切应力作用时,液体、气体和蒸汽都有一种明显的反应形式,这说明了它们的“流动性”,从而为阐明流体动力学原理提供了关键的依据。流体的这种共同的以及与固体有所区别的特征叙述如下:

在剪切(切向)应力作用下,无论这个应力多么小,流体将连续不断地变形。以后将讨论到,应力的大小取决于角变形率。

另一方面,固体的变形与作用的应力成比例,经一段变形后,达到静态平衡。切应力的大小取决于角变形量。

并非所有流体都具有完全相同的应力和应变率的关系。如果从没有应力和没有变形的状态开始,切应力和角变形率成正比,这种流体就称为牛顿*流体。在此情况下,比例常数定义为绝对粘性系数或动力粘性系数 μ 。因此,牛顿流体具有这样一种性质,即它的动力粘性系数与流体所处的运动状态无关。最常见的流体,如

* 以伊萨克牛顿的名字命名。他曾采用绝对粘性不变的假定研究流体运动。

空气和水，均为牛顿流体。在牛顿流体和服从虎克定律的固体之间有类似之处，前者具有一个把应力和变形率联系起来的不变的粘性系数，后者则有一个把应力和变形量联系起来的不变的弹性模量。

在应力与变形率之间具有变比例系数的流体称为非牛顿流体。在此情况下，比例系数可能与承受切力的时间长短以及切力的大小有关。然而，大量不常遇到但却是极为重要的流体是非牛顿流体。有些物体，突出的如一些塑体，当应力低于其屈服应力时，它们状如固体，而当高于其屈服应力时，它们就具有流体般的性态。流变学就是研究塑体和非牛顿流体的学科。近年来，在工程应用中，非牛顿流体的重要性正在日益增加，因而在工程文献中已经越来越受到重视。在图 1-1 中，各种流体和塑体的特性分别示于变形率——应力和时间——应力关系图上。

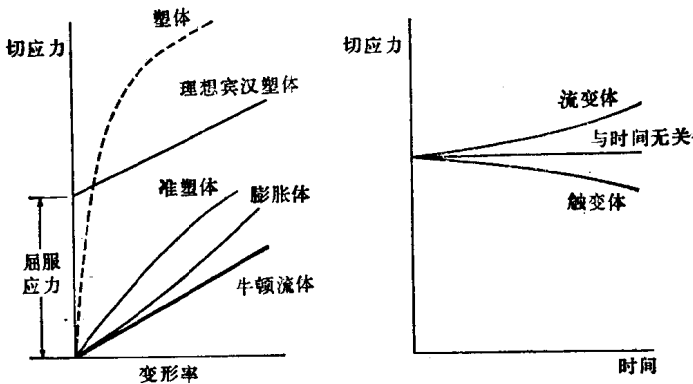


图 1-1 流变性态类型

可以根据对于压(正向)应力的反应把流体进一步划分为两大类，即可压缩流体和不可压缩流体。所有的气体和蒸汽都极易压缩。比较起来，液体的压缩性是很小的。我们将会看到，压缩性使得在流体运动问题中需要引入热力学的内容。如能假定流体是不