

物理流体力学

D. J. 特 里 顿 著

科 学 出 版 社



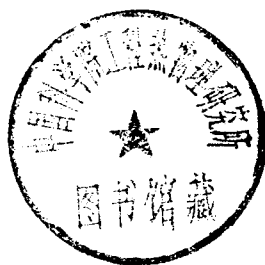
52.7
487

物 理 流 体 力 学

D. J. 特里顿 著

董务民 张志新 李汝庆 译
金 和 王清泉 许慧己

游镇雄 董务民 校



科 学 出 版 社

1 9 8 6

√101916

2-F56/22-1

内 容 简 介

本书是流体力学方面的一本优秀著作，是美国“现代大学物理丛书”之一。其特点是强调流体运动现象的物理机理，强调通过实验所了解到的事实及其物理解释。全书除包含传统流体力学的基本内容外，还概述了当代流体力学研究的某些最新成果，特别是与地球物理和天体物理有关的新成果，包括对流、分层流、旋转流体力学、流动的稳定性等。

本书可供数学、物理、力学、地球物理、天体物理、生物物理、环境科学等方面的研究工作者、工程技术人员以及高等学校有关专业的教师和学生参考。

D. J. Tritton

PHYSICAL FLUID DYNAMICS

Van Nostrand Reinhold Company, 1977

物 理 流 体 力 学

D. J. 特里顿 著

董务民 张志新 李汝庆 译
金 和 王清泉 许慧己

游镇雄 董务民 校

责任编辑 陈大宁

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1986 年 12 月 第 一 版 开本：787 × 1092 1/32

1986 年 12 月 第一次印刷 印张：15

印数：0001—4,400 字数：336,000

统一书号：13031 · 3388

本社书号：5027 · 13—2

定 价： 3.50 元

中 译 本 序

传统的流体力学教本，一般着重数学的理论分析。本书的特点，在于回避了严格细致的数学处理，强调流体现象中的物理机理。从基本流动方程出发，对应于特定的自然条件，从动力相似的要求，求出控制流场特性的无量纲参数。然后把这种参数的变化和实验的观测对照。这样做，对于流场突变现象的理解和深入探讨，是非常有益的。

结合当前对于地球物理流体力学，即大气和海洋流体力学的发展，本书除粘性、重力和可压缩性外，还考虑了温差、分层、旋转等因素，从而将以下十二个无量纲参数的变化都和实验观测做了对比，并进行了讨论和分析。这些参数包括：指示粘性力和惯性力比的 Reynolds 数 Re ，流速和声速比的 Mach 数 Ma ，惯性力和重力比的 Froude 数 Fr ，携带热和传导热比的 Péclet 数 Pe ，动量扩散和热扩散比的 Prandtl 数 Pr ，浮力和粘性力比的 Grashof 数 Gr ，浮力和惯性力比的 Richardson 数 Ri ，控制热对流稳定性的 Rayleigh 数 Ra ，粘性力和 Coriolis 力比的 Ekman 数 Ek ，惯性力和 Coriolis 力比的 Rossby 数 Ro ，以及热输入和热传导比的 Nusselt 数 Nu 和相应于尾流涡街的 Strouhal 数 St 。

通过实验观测数据与相应于主要矛盾而出现的无量纲参数之间的函数依赖关系，可以对流场中出现的突变取得定量的判据，对它的物理机理作出定性的解释。在这方面，作者的努力是值得赞扬的，成功也是明显的。

1978 年我在中国科学院研究生院首届研究生班主讲理

论流体力学,当时这本书被推荐作为主要补充读物。今天回头看,这个推荐是很明智的。因为作为一个应用数学工作者,我自己的讲稿必然是在数学处理上比较严格细致,而在物理机理的阐述上有所不足。当时能有这样一本书相配合,确实非常理想。

现在由游镇雄、董务民、张志新、李汝庆、金和、王清泉、许慧己等同志通力合作,将本书译成中文,由科学出版社出版。我深信它将对我国高等院校的力学教学起到积极的推进作用。对广大的流体力学工作者,它也是一本值得推荐的优秀的参考读物。

中国科学院学部委员 谈镐生

1984年3月于北京

序

称一本书为“实验”的而不是“理论”的，或称其为“纯理论”而不是“应用”的，往往隐含一些不真实的差别。然而作出某种分类是必要的，它可以告诉感兴趣的读者，该书是不是供他阅读的。根据这一精神，可以说本书是把流体动力学作为物理学的一个分支，而不是作为应用数学或工程学的一个分支来对待的。我时常听到需要这样一本书的反映，在我自己的教学工作中也确实感到有此需要。

我主要是给学物理的以及以物理为基础的应用科学的学生写这本书的，不过，我也希望其他读者会发现它有用。本书和现有“基础”书籍的不同，在于它更加强调了我们通过实验室实验所了解到的那些事实及其物理解释，而较少强调数学上的形式化。本书和现有的“应用”书籍的不同，在于它的选材是为了深入了解流体运动时的行为，而不是为了实用上的重要性。本书对有些学科分支的处理也和许多现有的流体动力学书籍有所不同，在某种程度上反映了近些年来兴趣的转移。特别是，地球物理和天体物理方面的应用，已经促使对流、分层流、旋转流体动力学之类的课题有了根本性的重大发展。到目前为止，教科书里反映这些发展还非常有限。

本书中许多内容是以我在英国泰因河畔纽卡斯尔大学给物理专业毕业班学生讲课的讲稿为基础的，但有些部分的材料大为扩充了。我同时也受到了给地球物理和行星物理低年级学生和研究生讲授流体动力学课程的影响。我曾力求了解，采用哪些方法讨论各种课题才会使学生们感到最有教益。希

望这种经验已使我写的内容有了改进。

在假定读者具有什么样的基础知识时，我特别考虑了物理专业毕业班的学生们。对这些学生来说，书中使用的数学方法应当都是他们所熟悉的（即使对没有学过那么多数学的读者来说，书中的大部分内容还是可以理解的）。此外，由于是针对物理专业学生而写的书，所以关于基本的物理学知识（例如热力学方面）的说明，要比其他流体动力学教科书少一些。这样的做法的确并不是违背常情，因为可以合理地认为，我们已有了这方面的知识。

尽管这样，我仍希望，本书对其他各种读者也有价值。凡是在可能的地方，只要不背离原来的目标，我都设法扩大它的适用范围。应用科学领域中广泛而不同类型的工作者需要了解流体运动的现象。我特别但又不仅仅把地球物理学家和行星物理学家（气象学家、海洋学家以及学习有关行星内部的知识的学生）的需要放在我的心上，我对他们的需要或许有最直接的了解。在把流体动力学的题材作为地球物理学课程的一部分来讲授的地方，我相信，本书将是一本合适的教科书。我还相信，正在从事涉及流体动力学的课题的研究生和其他科研人员，也会发现本书是有价值的。常常有这样的情况，有些地球物理学论文本来是值得注意的，但由于在使用流体动力学的概念时对这些概念的意义有严重的误解而损害了其价值。在资料来源不方便的情况下，发生这些误解是不足为奇的。这些读者不应当设想有一条容易了解流体运动现象的捷径。但我相信，本书可以使这条漫长的道路变得较为平坦。

如何选择这种书的题材一定是有争议的。学科的广泛性要求作出许多主观的省略。希望知道本书包括哪些内容和略去哪些材料的读者，可以参看目录及 1.2 节。最主要的限制是局限于不可压缩流动。我知道，这会使本书对某些课程来

说是不合适的。然而,可压缩流动是个很大的题目,实际上要专门用一本书来进行论述;只用一章来讲它,或许比完全略去不讲还要不公平些。就连在不可压缩流动的范围内,我也很清楚,所做的省略会使一些读者感到遗憾。我所希望的是我已完成了这样的一本教科书,它在流体力学的基本概念方面能给学生们以足够的知识和深入这些概念的各种推论的充分洞察能力,使他们能够利用其他(可能更先进的)来源去获得这里所略去的那些知识。

在第一章引论之后,第二、三、四章用描述的方法(但希望不至于太肤浅)讨论了三个特殊的问题。第五章到第二十二章系统地论述了本学科的内容。上述三个特殊问题放在系统的讨论之前有两个原因。首先是想用它们来使读者对所涉及现象的类型有一些了解;假如在学习第五章到第八章的基本概念的时候,却并不知道所学的一切究竟是为了什么目的,那将会使人感到,这个学习是一条漫长的沉闷的旅程。另外,我还希望,第二、三、四章放在早期的学习阶段,可以使本书较易为学生们所接受。

第二十三章讨论实验方法。把各种实验方法放在一起讨论,要比和实验结果一起讨论方便些。第二十四章列举了流体力学在地球物理学、生物物理学、工程技术等方面的应用,其性质在 24.1 节中作了较充分的说明。在某种意义上说,这一章是为了增加读者的兴趣而写的;不过,流体力学应用范围的某些知识,应当使读者增加对它的发展情况的了解。

本书中许多说明材料来自研究论文。流体力学的一个特点(也许比物理学的大多数分支更为突出)是,即使对于相当简单的特定问题来说,其细节也是很复杂的,并且仍然是未完全了解清楚的。(其他人一定也有过和我相同的经验,那就是,很难使研究生相信,给他的课题长期以来并没有被阐明

过。)因此,即使为了入门的目的(例如第二、三、四章),取用仍然在研究着的题材作为本书的内容常常是合适的。题材的这一特点,也使得一本书较容易地做到既可作为大学生的教科书,也可为研究人员提供原始资料。

插图的说明往往包含着学生们想要忽略的一些细节。这些细节是提供给想知道取得各种数据的特殊条件的水平较高的读者使用的,然而,我却希望它们有时可以让学生们领略到一点实验流体动力学的“滋味”。

本书和许多大学教科书相比有较充分的参考资料。有些参考文献指出了材料的(实例上的或概念上的)来源。(有时我想,对一个特定问题有一篇参考文献是合适的,因为为了初学者而把讨论的内容作了合理的简化,有可能会使经历较为丰富的读者提出这样的问题:究竟为什么要这样做?)另外一些参考文献则是为了那些想把本书作为原始资料,并希望把问题详细研究到底的读者而提出的,我并不打算搞得很完备,因为那样做会使参考文献太多了。我试图对一个课题给出合适的人门文献,较为经常的是给出最近的综述文章或重要的论文,而不一定是首创的研究工作。总之,参考文献的作用,根据上下文内容来看应当是一目了然的。除了具有特殊作用的文献外,还包括了有关的书目(以及电影片目录)。

本书写了好些年。因此,在选取实例和参考文献方面,有些部分比其他一些部分较新。我曾试图按照每一重要的新进展来修改较早写出的那些部分。但是,终归要到必须说“那是最后的定稿”的时候,否则,改写的过程就会总是没完没了。

本书的主要目的是供教学之用,所以我给学生们编选了一些习题;但本书着重的是以实验为基础的资料,这意味着并非所有的题材都直接有助于解题。由于有些题目需要综合使用不同几章里的概念,因此把所有的习题都放在书末。习题

的难易程度差别悬殊,与其说它们是给学生自己使用的,倒不如说是用来供教师选用。少量的题目几乎只是把一些数字代入方程而已;所选的物理量的数值是符合实际的,其目的是希望学生们去设想实际的情况,而不只是机械地把数字代入。习题难易程度的另一端是,少量题目只有那些具有本书没有用到的一些数学方法知识的学生才能解出。有些题目是根据泰因河畔纽卡斯尔大学物理系学生考试的试题编出的,学校允许我把它们选入本书,谨在此表示感谢。

最后,非常欢迎读者对本书提出任何意见。

作 者

寂静的流水为他编织着
一个变幻无常的朦胧世界，
逡巡的水波时而跃起
随后又神秘地溅裂，
千姿百态、百态千姿
瞬息间在漩涡中逝去，
型、线、体和体、线、型
沿着永恒的溪流宣泄，
宛如奇异的梦境；
一个莫测的世界，一个变化的世界，
或如球茎，或为细长，或呈弯曲，
有的蜿蜒如蛇行，有的笔直如箭驰，
有的神态若飘云，有的气势若三月山峡。

取自 Rupert Brooke, “鱼”

目 录

第一章 引论	1
1.1 前言	1
1.2 本书的范围	2
1.3 符号和定义	6
第二章 管流和槽流	9
2.1 引言	9
2.2 槽流的层流理论	10
2.3 管流的层流理论	13
2.4 Reynolds 数	15
2.5 进口长度	17
2.6 向湍流转捩	19
2.7 流量和压力梯度之间的关系	23
第三章 绕圆柱体的流动	25
3.1 引言	25
3.2 Reynolds 数	26
3.3 流动图案	27
3.4 阻力	36
第四章 水平层中的对流	40
4.1 形态	40
4.2 运动的起始	41
4.3 流动状态	44
第五章 运动方程	54
5.1 引言	54
5.2 流体质点和连续介质力学	54
5.3 Euler 坐标和 Lagrange 坐标	57

5.4	连续方程	58
5.5	实质导数	60
5.6	Navier-Stokes 方程	62
5.7	边界条件	70
5.8	不可压缩性条件	74
	附录: 动力学方程粘性项的推导	79
第六章	其他的基本概念	82
6.1	流线、流管、质点路线和条纹线	82
6.2	圆柱体绕流的计算结果	84
6.3	流函数	90
6.4	涡量	90
6.5	涡量方程	95
6.6	环量	97
第七章	动力相似	98
7.1	引言	98
7.2	动力相似条件: Reynolds 数	100
7.3	因变量	103
7.4	其他的无量纲控制参数	105
第八章	低 Reynolds 数和高 Reynolds 数	107
8.1	Reynolds 数的物理意义	107
8.2	低 Reynolds 数	108
8.3	高 Reynolds 数	109
第九章	粘性流动方程的某些解	116
9.1	引言	116
9.2	Poiseuille 流动	116
9.3	旋转 Couette 流动	117
9.4	绕圆球的 Stokes 流动	119
9.5	低 Reynolds 数圆柱绕流	120
第十章	无粘性流动	123
10.1	引言	123

10.2	Kelvin 环量定理	123
10.3	无旋运动	123
10.4	Bernoulli 方程	126
10.5	无粘性流动中的阻力: d'Alembert “疑题”	127
10.6	Bernoulli 方程的应用	129
10.7	几个定义	131
第十一章	边界层及有关课题	133
11.1	边界层的形成	133
11.2	边界层近似	133
11.3	零压梯度解	136
11.4	边界层分离	139
11.5	钝体的阻力	143
11.6	流线型化	144
11.7	尾流	145
11.8	射流	147
11.9	粘性流动的动量与能量	151
第十二章	升力	155
12.1	引言	155
12.2	二维机翼	156
12.3	三维机翼	161
12.4	自转物体	162
第十三章	热流动的基本方程和基本概念	165
13.1	引言	165
13.2	对流方程	166
13.3	对流流动的分类	169
13.4	强迫对流	170
13.5	有浓度变化的流动(传质问题)	173
第十四章	自由对流	176
14.1	引言	176
14.2	无量纲控制参数	177

14.3	绝热温度梯度	181
14.4	把自由对流看作一个热机	184
14.5	竖直的热平板所引起的对流	186
14.6	热卷流	193
14.7	流体层中的对流	194
	附录: 自由对流的 Boussinesq 近似	201
第十五章	旋转流体中的流动	210
15.1	引言	210
15.2	离心力和 Coriolis 力	210
15.3	地转流动与 Taylor-Proudman 定理	212
15.4	Taylor 柱	214
15.5	Ekman 层	222
15.6	固有稳定性和惯性波	228
15.7	Rossby 波	230
15.8	旋转环形套筒中的对流	236
第十六章	分层流	238
16.1	基本概念	238
16.2	阻塞	242
16.3	背风波	247
16.4	内波	248
16.5	分层和旋转	256
第十七章	不稳定现象	259
17.1	引言	259
17.2	表面张力引起的液柱不稳定性	259
17.3	由于产生内热而引起的对流	262
17.4	由于表面张力变化而引起的对流	264
17.5	旋转 Couette 流动的不稳定性	265
17.6	剪切流动的不稳定性	270
第十八章	流体动力学稳定性理论	275
18.1	线性稳定性理论的性质	275

18.2	Bénard 对流的起始	277
18.3	超稳定性	282
18.4	旋转的 Couette 流动	283
18.5	边界层的稳定性	284
第十九章	向湍流转换	290
19.1	边界层转换	290
19.2	射流和其他自由剪切流动中的转换	294
19.3	管流的转换	299
第二十章	湍流	307
20.1	湍流运动的性质	307
20.2	湍流运动统计描述的引言	311
20.3	统计描述法的数学提法	313
20.4	湍流方程	315
20.5	计算方法	321
20.6	对关联的解释	321
20.7	谱	324
20.8	涡的概念	326
第二十一章	均匀各向同性湍流	328
21.1	引言	328
21.2	空间关联和封闭问题	328
21.3	谱和能量级串	331
21.4	能量级串的动力学过程	335
第二十二章	湍流的结构	338
22.1	引言	338
22.2	Reynolds 数相似和自保存	340
22.3	间歇现象和挟带现象	343
22.4	湍流尾流的结构	347
22.5	靠近壁面的湍流运动	355
22.6	边界层中的大涡	364
22.7	Coanda 效应	367

22.8 分层的剪切流动	370
22.9 逆转旋	377
第二十三章 实验方法	379
23.1 实验流体力学的概貌	379
23.2 速度测量	382
23.3 压力和温度的测量	387
23.4 流动显示	388
第二十四章 某些实际情况	393
24.1 引言	393
24.2 云的图案	393
24.3 大气环流中的波	395
24.4 大陆漂移和地幔中的对流	397
24.5 太阳的米粒组织	400
24.6 废水的扩散	401
24.7 风对结构的影响	404
24.8 边界层控制: 涡旋发生器	408
24.9 射流技术	409
24.10 波式游动	414
24.11 由人体所产生的对流	417
24.12 回飞棒的飞行	418
符号	422
习题	427
书目和文献	451