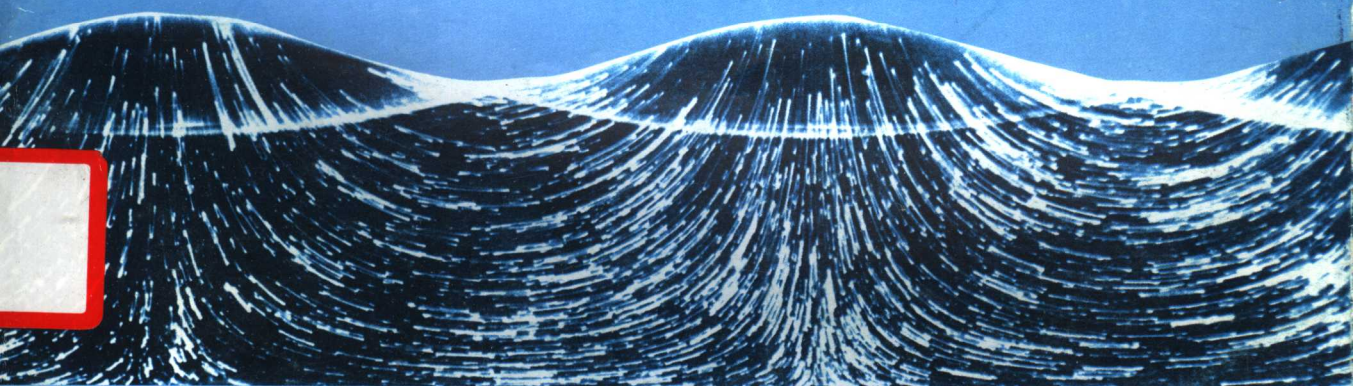


HYDRODYNAMICS

流体力学

李心铭 编著

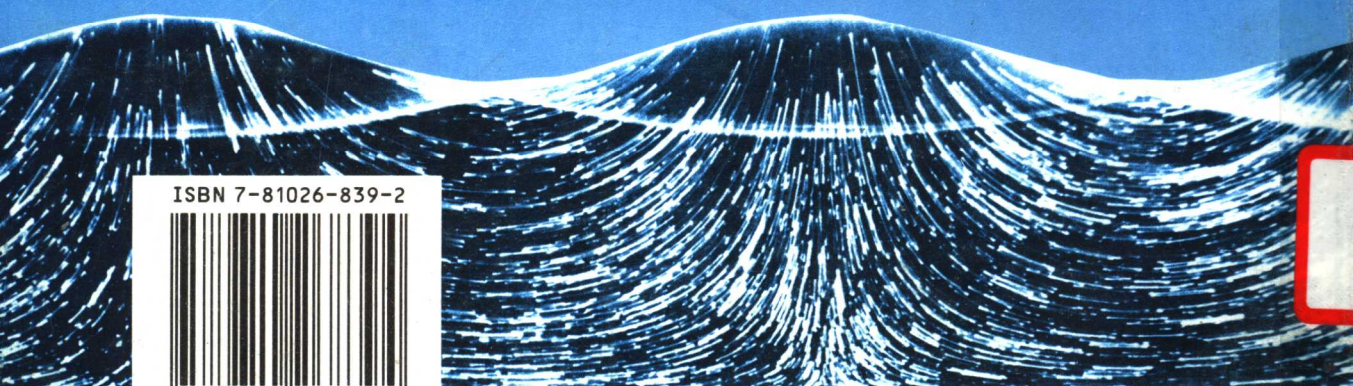


青岛海洋大学出版社

水
KKK

HYDRODYNAMICS

责任编辑 晓童 封面设计 杨宁



ISBN 7-81026-839-2



9 787810 268394 >

ISBN 7-81026-839-2/P · 37 定价: 30.00 元

流 体 动 力 学

李心铭 编著

青 岛 海 洋 大 学 出 版 社

(鲁)新登字 15 号

流 体 动 力 学
李心铭 编著

*

青岛海洋大学出版社出版发行

青岛市鱼山路 5 号

邮政编码 266003

新华书店经销

· 山东电子工业印刷厂印刷

*

1996 年 12 月第 1 版 1996 年 12 月第 1 次印刷

开本(787×1092)毫米 1/16 31.25 印张 700 千字

印数 1--1000

ISBN 7-81026-839-2

P·37 定价: 30.00 元

序

李心铭教授编著的《流体力学》一书除包括传统流体力学的内容外,还包括了地球物理流体力学的部分内容,考虑了流体力学在大气和海洋动力学中的应用。除粘性、重力外,书中还考虑了温差、分层和旋转等因素,从而使本书与物理海洋学的基础理论密切结合。显然,选材服务于进一步了解海洋与大气运动的这样一本书是需要的,这也许是本书与传统的流体力学的不同之处。

现代流体力学与地球物理流体力学的分支纷繁,资料文献浩如烟海,作者在有限的篇幅内实现了流体力学与地球物理流体力学的有机结合,是不容易的,也是花了功夫的。可以看出,由于作者有三十年教授“流体力学”与十年教授“地球物理流体力学”的丰富经验,有深入从事海洋科学研究的经历,才使得作者能编著出版具有这种特色的书。还需要指出的是,本书在某种程度上反映了近年来在对流、旋转流体动力学与湍流研究方面的进展,而这些在目前的一般流体力学教科书内反映得比较少。

本书关于物理概念的阐述是准确的,结构是合理的。书中关于理想流体的阐述在尽量维持流体力学自身完整的前题下,紧缩到了最小的篇幅;关于均匀不可压缩粘性流体运动的讨论是详细的;而关于边界层理论、稳定性理论、湍流以及不可压缩流体中的波动等问题的讨论,就本书的篇幅与范围而言恰到好处。预期本书的这种编排可以达到事半功倍的效果。

本书与许多教科书相比,列出了较多的参考文献,这将有利于读者进一步深究他们感兴趣的问题。

本书可作为教材使用。对于从事流体力学教学、从事海洋与大气科学研究的人员、高等学校的教师与研究生,本书均具有重要的参考价值。我相信本书的出版对于培养海洋科技人才,对于促进我国海洋科学事业的发展将发挥重要的作用。

本书凝结着李心铭教授多年的教学经验与科研成果。仅以此序将本书推荐给读者,并对与我共同工作多年的同事表示衷心的祝贺!

余宙文

1996年10月于北京

前 言

流体动力学是描述流体运动的科学。由于流体广泛地存在于人类的生存空间,水和空气更是人类赖以生存的命脉,因而认识流体、掌握流体运动的规律便成为人类永恒的主题;与此同时,流体动力学也随着人类生产活动的进步而发生、发展。在科学技术蓬勃发展的今天,流体动力学与其他学科相互渗透、相得益彰,使得这门古老的学科更加具有活力。

流体动力学是一门既具有基础理论性质又具有技术应用性质的科学。它是流体工程、机械、热能、航空航天、兵器、化工、冶金、水利、建筑、石油、采矿、农林、轻工、纺织、生物工程、气象、海洋、环境保护等专业领域内的重要理论基础之一,因而流体动力学在人类的生产活动与日常生活中有着广泛的用途。

流体动力学的分支纷繁,内容浩瀚。结合当前地球物理流体动力学即大气与海洋流体动力学的新发展,以研究诸多地球物理现象为出发点,介绍流体动力学的基础知识、基本概念及其基本的计算与研究成果构成了本书的基本内容。除了粘性、重力外,本书还考虑了温差、分层、旋转等因素,从而使本书与传统的流体力学教材相比较更富有针对性。

由于流体动力学所涉及的内容之广泛,以致任何一本书都必须对所考虑的题材范围作出某些限制。本书在题材取舍方面所作的限制如下:

1. 按照压强变化引起流体密度变化的显著与否可以将流动分成为可压缩流动与不可压缩流动。本书作为地球物理流体动力学的基础,其蕴含的研究对象是海水与大气。由于海水的压缩性系数很小,以致即使出现很大的压强变化也只能引起很小的密度变化。空气的压缩性系数并不那么小,但是在通常的大气运动中其压强变化是足够小的,以致密度的变化仍然很小。所以本书只讨论不可压缩流体的运动。

2. 沿直线运动着的两层粘性流体之间的摩擦切应力与沿运动法线方向上的速度梯度成正比的粘性定律称作 Newton 粘性定律。凡遵循 Newton 粘性定律的流体称作 Newton 流体;反之,称为非 Newton 流体。一切气体或由以简单方式相互作用的小分子所组成的液体,都可以观察到是非常接近 Newton 流体的。非 Newton 粘性定律的行为出现在大分子的液体(聚合物)中,聚合物溶液中,分子趋于聚集成比通常程度更高的结构的液体中,悬浊液(固体物质散布于液体中)以及乳化液(一种液体的液滴散布于另一种液体中)。因此,我们在实验室中用到的普通液体,以及在重要的应用中出现的流体都是 Newton 流体。综上所述,通常情况下的水和空气为 Newton 流体。因而,本书的研究对象限制在 Newton 流体的范围内。

本书的第 1 章至第 3 章讨论了流体的性质,提出了研究流体运动的方法,建立了控制流体运动的方程式,并从不同的角度初步地研究了流体的运动特征。希望通过这些章节的学习,使读者能够在流体动力学的基本概念方面获得足够的知识和深入理解由这些概念引出的各种推论的洞察力。

第 4 章讨论了理想流体动力学。所谓理想流体是对于运动流体所作的最简单的假设,在这种假设中,我们不考虑内摩擦——粘性的存在,而认为相对运动着的两个流体体积的接触面间只有垂直于接触面的压力作用。尽管在假设中没有考虑由于内部分子的传递所

产生的影响的量的一面,即表现为摩擦和热传导的那一面,但保留了现象的主要的一面,即质的一面——物理量分布的连续性(连续统假定)。对于低粘性不可压缩流体,由于边界层很薄,理想流体模型的结果在满意的近似程度内可以应用于许多实际的流动问题。

第5章讲述不可压缩理想流体的无旋运动。Euler方程是非线性的,然而在不可压缩理想流体无旋流动的研究中可以避免用到Euler方程。由于速度势满足Laplace方程,我们可以通过求解Laplace方程而给出速度场。在速度场确定后,压强可以通过无旋运动中的Bernoulli方程给出,Euler方程的非线性仅仅在这里才显示出来。有关调和函数的许多性质,即Laplace方程式的解的性质,都可以在不可压缩理想流体的无旋流动中找到应用和解释。由于平面不可压缩流体无旋运动中的速度势 ϕ 和流函数 ψ 满足Cauchy-Riemann条件,因此可以引入复变数 z 的解析函数 $w(z)=\phi+i\psi$ (流动的复势)而使得解析函数和平面不可压缩流体的无旋运动构成了一一对应。正是因为如此,解析函数的理论成为求解平面不可压缩流体无旋流动问题的有力工具。本书在最低限度的范围内介绍了解析函数论在求解这类流动问题中的应用。

第6章讨论均匀不可压缩粘性流体运动动力学。在本章中分别就定常单一方向的流动、非定常单一方向的流动、圆形流线的流动、旋转流体中的Ekman层和若干非线性情况下的Navier-Stokes方程式给出了问题的精确解,以及低Reynolds数情况下粘性流体运动的近似解。由于其本身的基本性质和实际的重要性,不可压缩粘性流体运动动力学是流体动力学的核心。正因为如此,本章关于所述运动的讨论相对说来是充分的。作者希望通过本章的学习,使读者在如何求解他们所关心的地球物理流体动力学问题中有所启发。

第7章简要地讨论了边界层理论。边界层理论是人类认识在应用中出现在不同情况下的小粘性流体运动的里程碑。空气动力学中的许多复杂问题已经由研究边界层内的流动以及它们对绕流物体的一般流动的影响而被阐明,这些问题包括机翼的最小阻力与最大升力随着Reynolds数,风洞湍流以及其他参量的变化,甚至对那些迄今为止完整的分析还不具备的问题,而边界层的概念与思想也已经显示出不同寻常的富有成效性。尽管边界层最初是指紧靠固体壁面的流体层,然而事实上它们也被用于射流或两不同流速的流束之间的薄的剪切层。边界层现象广泛地存在于地球物理环境中,诸如海洋与大气中的Ekman层、底栖边界层、侧边界层等。尽管这些边界层流动的形成机制与本章所讨论的边界层的形成机制可能不同,但是粘性在各类边界层内占优势这一点却是共同的。毫无疑问,这里所介绍的关于边界层的概念以及所讨论的关于边界层的研究方法对于地球物理环境中的边界层的研究有着很大的启发性。

第8章讲述流体动力学稳定性理论。它关联于层流在什么时候瓦解且如何瓦解以及它们后来的发展并最终过渡为湍流。稳定性理论在工程技术、气象学、海洋学,以及天体物理与地球物理学中有着许多用途。由于本书的篇幅所限,这里所给出的内容是非常初步的。

第9章简要地讨论了湍流流动。湍流是自然界和工程技术中普遍存在的一类流动。尽管湍流几乎是普遍存在的,然而“湍流”却不是那么容易定义的。湍流流动有着共同的特征,其最为明显的特征是“无序”。这种无序是如此严重以致无论人们如何细心地去保持不变的边界条件,流动状态却不能象层流那样完全地再现。我们倾向于把某些无序流体运动——例如某些水波场——排除在湍流的定义之外,这是因为这些流动只是形成非常小的混合,然而混合却是湍流的重要特征。如此,无序用以描述湍流是必要的但却不是充分的。湍流的进一步的特征是连续而又不规则地分布于整个三维空间的涡旋的出现。

湍流研究的困难之大,文献之多,以致本书的篇幅和性质都不允许有更进一步的阐述。在有限的篇幅内我们只是希望读者知道湍流究竟是什么,并且了解目前湍流研究中经常应用的基本概念,方程式与处理方法。

第10章介绍不可压缩流体中的波动。关于流体中的波动的理论是流体动力学的重要内容,也是一般波动理论的重要组成部分。在环境与工程科学中它们有着广泛的应用。尽管对于波动的认识贯穿于整个人类的历史,但是对于波动的理论描述却不是一件容易的事,而且只是在考虑到物理性质与现象特征复杂性的基础之上对于数学模型作出强有力的简化之后这样的描述才是可能的。本章只是就在地球物理流体动力学中具有明显应用价值的几种类型的波动作出简要说明,其更深入的讨论可参阅有关专门的论著。

本书的主要目的之一是满足教学工作的需要,所以选编了一些习题。这些习题决不是全面的,但却是我们在教学工作中反复使用过的。这些习题的难易程度不一,一些属思考题性质;而另一些则可能是某些概念与有关理论的深入发展。由于某些题目需要综合使用不同章节内的概念,因此把所有的习题都放在了书末。

本书与许多流体力学教科书相比有较充分的参考文献。希望这些文献能够有利于那些打算把有关问题详细研究到底的读者。

作者本人1961年毕业于天津南开大学,同年7月分配来青岛海洋大学(原山东海洋学院)任教。除1979年10月至1981年12月受张捷迁与黄云潮先生的邀请在美国天主教大学(The Catholic University of America)工作两年又两个月外,一直耕耘在青岛海洋大学的讲台上;先后为本科生与研究生讲授理论力学、流体力学以及地球物理流体动力学等课程。尽管敝人无所作为,然而我毕竟是尽职尽责的,况且还有人得益于我的授课,如此也就心安理得了。本书中的许多内容是我为海洋学系与海洋气象学系学生讲课的教材,部分内容有所扩大,这些扩大了的内容是针对从事地球物理流体动力学研究的工作者(海洋学家、气象学家以及有关专业的研究生)的需要的。我对他们的需要或许有比较直接的了解。

借本书出版之机,我要向那些曾经帮助过我的朋友们与同事们表示衷心的感谢。首先要感谢的是徐肇庭教授的慷慨支持和帮助,是他在百忙之中详细校阅了全部书稿,并且提出了许多宝贵意见,没有他的大力协助,本书的出版会是困难的。60年代初是一段非常值得回忆的时间,那时我有幸与王景明、余宙文等先生共事并切磋流体力学的教学工作,这对我后来的工作起了很大的影响。我还要感谢美国天主教大学的黄云潮先生,是他给我提供了更深入地了解流体力学的机会。

文圣常、余宙文先生,孙孚、待茂崇、李凤歧教授为本书的出版给予了很大的关心、支持和帮助,在此表示诚挚的谢意。最后,借此机会我要感谢我的家人蔡雁翎同志,没有她的忘我奉献,本书是难于面世的。

由于编写时间仓促,疏漏与不当之处在所难免,务望读者批评指正。

李心铭

1996年夏天于青岛

目 录

第一章 流体的物理性质	(1)
1.1 固体、液体与气体——物质三态.....	(1)
1.2 连续统假说	(3)
1.3 作用在流体上的力——体积力与表面力	(5)
1.3.1 体积力与表面力	(5)
1.3.2 应力张量	(6)
1.3.3 主应力与主方向	(9)
1.3.4 静止流体中的应力张量.....	(11)
1.4 流体的力学平衡.....	(12)
1.4.1 大气压公式.....	(14)
1.4.2 不可压缩液体的平衡·分界面上的条件.....	(16)
1.5 流体中的传输现象.....	(18)
1.5.1 物质传输、能量传输与动量传输	(19)
1.5.2 通量与标量强度之间的线性关系.....	(19)
1.5.3 扩散方程与热传导方程.....	(20)
1.5.4 流体动量的分子传输.....	(22)
1.6 两种介质界面上的条件.....	(23)
1.6.1 表面张力.....	(23)
1.6.2 二静止流体分界面的形状.....	(24)
1.6.3 直立固壁附近自由液面的形状.....	(26)
第二章 流体运动学	(28)
2.1 描述流体运动的两种方法.....	(28)
2.2 实质微商与流体质点的加速度.....	(30)
2.3 质量守恒与连续方程式.....	(33)
2.3.1 Lagrange 方法中的连续方程式	(34)
2.3.2 Euler 变数的连续方程式	(35)
2.3.3 柱面坐标、球面坐标以及曲线坐标的连续方程式	(37)
2.4 流函数.....	(39)
2.5 变形运动学.....	(45)
2.5.1 流体微团的运动分析——Helmholtz 速度分解定理	(45)
2.5.2 变形二次曲面.....	(50)
2.6 有旋(或旋涡)运动的运动学特征.....	(54)

2.6.1	旋(涡)度场、涡线、涡管与涡管强度	(54)
2.6.2	环流与 Stokes 定理	(56)
2.6.3	旋度在柱坐标与球坐标系中的分量表达式	(58)
2.7	无旋运动与速度势	(59)
2.7.1	速度势	(59)
2.7.2	空间区域的连通性,单值速度势与多值速度势	(60)
2.7.3	不可压缩流体的无旋运动	(62)
第三章	流体运动的基本方程	(70)
3.1	Navier-Stokes 方程	(70)
3.1.1	用应力表示的动力学方程	(70)
3.1.2	应力与变形率之间的关系	(71)
3.1.3	粘性系数	(74)
3.1.4	Navier-Stokes 方程	(76)
3.2	能量耗散	(78)
3.3	速度与应力在物质界面上的条件	(80)
3.4	环流变化定理	(83)
3.5	涡度方程	(86)
3.6	位涡与位涡守恒	(89)
3.7	流动的相似	(94)
3.8	量纲分析	(96)
3.8.1	量纲与量纲的齐次性原理	(96)
3.8.2	量纲分析与 Π -定理	(98)
3.8.3	量纲分析的举例	(100)
3.9	能量方程	(101)
3.10	旋转坐标系内的运动方程	(103)
3.10.1	旋转坐标系	(103)
3.10.2	旋转坐标内的运动方程	(105)
3.11	非匀速平动坐标系中不可压缩流体的运动方程式	(109)
第四章	理想流体动力学·基本方程式和一般定理	(112)
4.1	理想流体与 Euler 方程	(112)
4.2	理想流体运动的 Lagrange 方程	(114)
4.3	系统与控制体积的概念·Reynolds 输运定理	(116)
4.4	理想流体运动中质量与能量守恒定理,动量与动量矩定理	(119)
4.4.1	积分形式的质量守恒定理	(119)
4.4.2	能量守恒定律	(121)
4.4.3	动量与动量矩定理	(123)
4.5	定常正压运动中的 Bernoulli 方程	(125)
4.6	无旋运动中的 Bernoulli 方程	(129)

4.7	旋度为常值的不可压缩流体二维运动中的 Bernoulli 方程	(131)
4.7.1	旋度为常值的不可压缩流体的定常二维运动	(131)
4.7.2	旋度为常值的不可压缩流体的非定常二维运动	(131)
4.8	转动坐标系内定常运动的 Bernoulli 方程	(132)
第五章	不可压缩理想流体的无旋运动	(134)
5.1	引言	(134)
5.2	空间无旋运动中的简单流动	(135)
5.2.1	平行于某直线的均匀直线流动	(135)
5.2.2	强度为 m 的点源与汇	(136)
5.2.3	偶极子	(137)
5.2.4	空间中源、汇与偶极子的连续分布	(139)
5.3	均匀流动与奇点流动的叠加	(140)
5.3.1	均匀流动中的源	(140)
5.3.2	Rankine 体	(142)
5.3.3	绕球流动	(143)
5.4	像方法	(145)
5.4.1	关于平面边界的像	(146)
5.4.2	关于球面边界的像	(147)
5.5	由运动物体引起的无旋运动的一般特征	(148)
5.5.1	远离运动物体的速度势与速度	(149)
5.5.2	流体作用在等速直线运动的物体上的合力——D'Alenbert 疑难	(151)
5.5.3	物体在不可压缩理想流体中的一般运动	(152)
5.5.4	“附加质量”系数与“附加动能”	(155)
5.6	冲击运动	(158)
5.7	不可压缩流体的平面无旋运动与复势	(160)
5.8	保角映射的概念	(163)
5.9	简单的平面运动和它们的复势	(165)
5.10	绕圆柱的无环流与有环流流动	(170)
5.11	平面运动中的像方法	(176)
5.11.1	平面边界的像	(177)
5.11.2	Milne-Thomson 圆定理——圆柱边界的像	(180)
5.12	曲线坐标的应用, 绕圆柱体和平板的无环流与有环流流动	(181)
5.13	不可压缩理想流体平面运动的直接问题·保角变换方法的应用	(186)
5.13.1	把流动边界变为无限长直线的变换	(187)
5.13.2	任意封闭曲线边界到圆的变换	(188)
5.14	作用在定常二维流动中的柱体上的力与力矩	(197)
5.14.1	Blasius 定理	(197)
5.14.2	Kutta-Joukowski 定理	(200)

第六章 均匀不可压缩粘性流体动力学	(204)
6.1 引言	(204)
6.2 定常的单一方向的流动	(205)
6.2.1 平面 Couette 流动与平面 Poiseuille 流动.....	(205)
6.2.2 沿倾斜平板下泄的流动;重力的影响.....	(209)
6.2.3 柱形管中均匀不可压缩流体的定常流动	(212)
Poiseuille 流动	(213)
矩形截面管中的定常流动	(214)
6.3 非定常的单一方向的流动	(216)
6.3.1 二平行流束之间的过渡层	(218)
6.3.2 平板平行于自身运动引起的非定常流动	(219)
(a)平板在静止流体中的突然运动;Stokes 第一问题	(219)
(b)平面 Couette 流动的形成问题	(221)
(c)往复运动的平板引起的流动;Stokes 第二问题.....	(222)
6.3.3 振荡压强梯度推动的两固定平板之间的流动	(226)
6.3.4 圆形截面管内的非定常流动	(229)
(a)圆管内的起动机流	(229)
(b)振荡压强梯度推动的流动	(229)
6.4 圆形流线的流动	(233)
6.4.1 两同轴旋转圆柱面之间的定常流动	(234)
6.4.2 共轴旋转圆柱面之间的起动机流	(236)
6.4.3 线涡的涡度扩散	(237)
6.5 旋转流体中的 Ekman 层.....	(238)
6.5.1 自由面上的 Ekman 层.....	(239)
6.5.2 刚性平面边界上的 Ekman 层.....	(241)
6.5.3 简谐振荡 Ekman 层.....	(246)
6.6 非线性情况下的 Navier-Stokes 方程式的精确解	(247)
6.6.1 淹没射流	(247)
6.6.2 驻点流动	(252)
(a)平面驻点流动(Hiemenz 流动)	(252)
(b)轴对称驻点流动	(255)
6.6.3 旋转圆盘附近的流动—Von Kármán“粘性泵”	(257)
6.6.4 渐缩或渐扩渠道中的二维定常流动——Jeffery-Hamel 流动	(262)
6.7 低 Reynolds 数流动.....	(271)
6.7.1 二维 Stokes 流动	(272)
6.7.2 三维 Stokes 流动	(276)
6.7.3 Oseen-方程	(285)
第七章 边界层	(294)

7.1	大 Reynolds 数流动与边界层	(294)
7.2	二维不可压缩流动的边界层方程式	(297)
7.3	二维定常流动边界层方程的精确解	(300)
7.3.1	沿平板的边界层流动	(303)
7.3.2	沿楔形壁面的边界层; Falkner-Skan 解	(308)
7.3.3	沿均匀流动方向放置的平板后的尾流	(310)
7.3.4	二维层流射流	(313)
7.3.5	二平行流束之间的边界层	(316)
7.4	二维定常边界层方程式的近似解法	(320)
7.4.1	Von Kármán 动量积分定理与不可压缩流体流沿平板流动的边界层	(320)
7.4.2	具有压强梯度的边界层流动 · Von Kármán -Pohlhausen 方法	(325)
7.5	轴对称边界层	(331)
7.5.1	地面附近的旋转流动	(331)
7.5.2	轴对称射流	(334)
7.5.3	轴对称边界层与二维边界层之间的关系; Mangler 变换	(336)
第八章	流体动力学稳定性理论	(339)
8.1	引言	(339)
8.2	重力不稳定性	(339)
8.2.1	两互相叠置的流体层的不稳定性	(341)
8.2.2	Howard 对流问题	(343)
8.2.3	Stommel 盐指现象	(348)
8.3	均匀流体平行流动稳定性的初步知识	(350)
8.3.1	控制流动稳定性的方程式	(350)
8.3.2	Orr-Sommerfeld 方程	(352)
8.4	均匀不可压缩流体平行流动的无粘性稳定性理论	(353)
8.4.1	Rayleigh 拐点定理	(354)
8.4.2	FjØrtoft 定理	(354)
8.4.3	Howard 半圆定理	(355)
8.5	粘性流体平行流动的稳定性理论	(358)
8.5.1	关于能量的讨论	(358)
8.5.2	平面 Poiseuille 流动的不稳定性与 Orr-Sommerfeld 方程的解	(359)
8.6	分层流体平行流动的不稳定性	(363)
8.6.1	Kelvin-Helmholtz 不稳定性, 或二互相叠置的无粘性流体层的不稳定性	(363)
8.6.2	连续分层流体稳定性的基本方程	(365)
8.6.3	Miles 定理与 Howard 半圆定理	(366)
第九章	湍流	(369)

9.1	引言	(369)
9.2	层流向湍流的转换	(371)
9.3	湍流运动的基本方程	(374)
9.3.1	平均运动与脉动	(374)
9.3.2	平均运动的 Reynolds 方程	(375)
9.3.3	湍流能量方程	(378)
9.4	圆管中的湍流	(382)
9.5	湍流模型	(387)
9.5.1	湍流粘性系数的概念	(388)
9.5.2	Prandtl 混合长度理论	(389)
9.5.3	Von Karman 相似性假设	(392)
9.5.4	普适速度分布定律	(394)
9.5.5	微分的湍流粘性模型:1-方程模型与2-方程模型	(398)
第十章	不可压缩流体中的波动	(402)
10.1	引言	(402)
10.2	小振幅表面波	(402)
10.2.1	基本方程式与边界条件	(402)
10.2.2	无限深水中的进行波	(405)
10.2.3	有限深水中的进行波	(408)
10.2.4	两种流体界面上的进行波	(410)
10.2.5	表面张力对于重力波的影响·毛细波	(413)
10.2.6	群速度	(416)
10.2.7	波动的能量与能量传播	(418)
10.2.8	化进行波为定常运动·边缘波	(421)
10.2.9	造波机	(424)
10.3	非线性表面波	(426)
10.3.1	Gerstner 摆线波	(426)
10.3.2	Stokes 波	(429)
10.4	连续分层流体中的内波	(432)
10.5	旋转流体中的波动	(435)
10.5.1	Coriolis 力的回复作用与惯性波	(435)
10.5.2	Rossby 波	(438)
习题		(444)
附录		(460)
附录 1	物理量的单位与其标准国际当量	(460)
附录 2	常用量值	(461)
附录 3	流体的物理性质	(462)
A 3.1	纯水	(462)

A 3.2	干空气与标准大气	(463)
A 3.3	海水	(464)
A 3.4	15℃与1个大气压下若干流体的动量与热扩散系数	(467)
附录4	某些常用的向量微分量在正交曲线坐标系内的表达式	(467)
参考文献	(474)

第一章 流体的物理性质

1.1 固体、液体与气体——物质三态

液体与气体统称为流体,其定义性质是它们易于变形。一块固体物质具有一确定的形状,而且只有当外部条件发生变化时,其确定形状才会发生改变。相反,一团流体则没有一特定的形状,而且在不影响流体宏观性质的情况下一团均匀流体的不同部分,可以自由地重新配置。在力的作用下,一团流体的各部分之间出现相对运动的事实提出了流体力学的科学问题。

固体与流体之间的区别并不是绝对的。有许多物质在某些方面其行为像固体而在另外的方面则像流体。‘简单’固体可以被看作为一种物质,当作用力出现微小变化时,其形状与各部分之间的相对位置仅仅改变一个小量。与之相对照,‘简单’流体可以定义为一种物质,在适当选取作用力时,其各部分之间的相对位置可以改变一个不小的量,尽管作用力的量值是小的。虽然可以说这两个定义给得是十分简明扼要的,但是已经知道有些物质实际上具有两重性。诸如像胶与油漆那样的触变物质,在被放置一段时间之后它们就会变得像具有弹性的固体一样;但是如果经由摇动或涂刷使其严重地变形,它们就会失去弹性而如同流体一般。沥青在通常的情况下其行为像固体,但是当长时间有力作用其上时,它就会像流体一样,其变形无限制地增加。对于分析工作者来说,更困难的是那些像浓缩的聚合物溶液一样的物质,它们可以同时展现出类似于固体的性质与类似于流体的性质。

幸运的是,最普通的流体,特别是空气与水,就上述意义讲是完全准确‘简单’的,从而说明在入门的教科书内把注意力集中于简单流体是正确的。在本书内我们将假定讨论中的流体不能承受任何经由外力而使其变形但又维持其体积不变的趋势。在稍后当我们研究过促使流体元变形的力的性质之后,该定义的含意就会显露出来。与此同时,应该注意的是,简单流体能够抵抗使其变形的企图;而该定义的意思是说有阻力就有变形的出现,或等价地说,阻力随变形率的消失而消失。

因为我们将仅仅涉及这里所说的简单流体这类理想化的物质,就没有必要继续使用‘简单’这样的术语。所以在以后的章节里我们将只谈及流体。

就动力学的研究而言,液体与气体之间的区别不是很重要的。依据分子间作用力的性质,大部分物质能够以展现流动性或易变形性的二稳定相中的任何一种存在。处于液相的物质的密度通常比处于气相的物质的密度大得多,但是,这并不是区分液体与气体的重要依据,因为它只会导致要产生出给定量值的加速度所需力的量值的不同而不能导致运动类型的不同。液体与气体的力学性质之间的最重要的不同在于它们的体积弹性,也就是说在于它们的压缩性。气体比液体容易被压缩得多,因而对于任何伴有大的压强变化的运动来说,与液体的情况相比较,在气体的情况中比容将有大的变化。

固体、液体与气体的基本性质直接关联于它们的分子结构,并且关联于分子间作用力

的性质。我们可以粗浅地通过考虑两个典型的孤立分子之间的作用力的一般形式了解这一点。作为两分子间距离 d 的函数,分子间的相互作用力表示在图 1.1.1 中。如图所示,当分子间的距离为 d_0 时,相互作用力改变符号,并且一个分子相对于另一个分子的位置

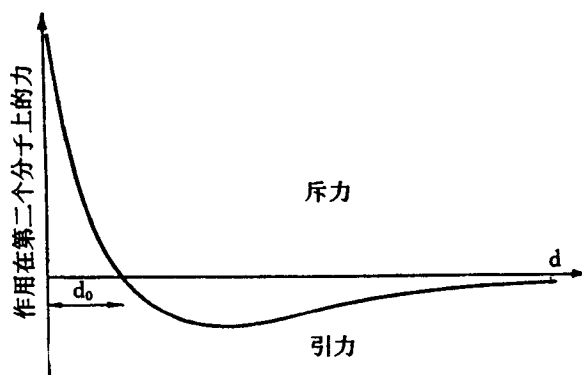


图 1.1.1 一个(非离子化的)简单分子作用于另一个分子的作用力的示意图;
作用力为两分子中心间距的函数

处于稳定的平衡位置。对于大部分简单分子, d_0 有 $3 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-8} \text{cm}$ 的量级。

通过有关分子质量与对应物质密度的知识,可以计算出相邻分子间的平均距离。对于由简单分子组成的物质,计算表明,在通常的温度与压力下处于气体状态的物质,分子间的平均距离的量级为 $10d_0$;与之相对照,处于固态与液态的物质,其分子间平均距离的量级为 d_0 。如此,对于通常条件下的气体,分子之间的距离远到足以使它们之间只有极微弱的内聚力彼此相互作用,只是在非常少的情况下,两个分子才能偶然地碰在一起。于是,在气体运动论里,习惯上作出‘完全气体’的假说。对于完全气体,一个分子在其毗邻分子的力场中的势能与它的动能相比较是可以忽略的,也就是说对于完全气体,除了偶然的碰撞外,每一个分子均独立于其毗邻分子在运动。在另一方面,对于处于固态与液态的物质,一个分子在任何时候都处于几个与其相毗邻的分子的强力场之内,这里在斥力允许的范围分子几乎是堆积在一起。对于固体,分子间的配置实际上是永久性的,当然也可能有简单的周期性结构,就像在晶体中那样,分子的平衡位置不停地振动(该振动的动能是固体热能的一部分),但直到固体的温度升高至熔点前,分子晶格是保持完整的。

大部分物质在熔化时,密度会减小几个百分点(由冰溶化为水时密度的增加是一种例外),如此微小的分子间隙的改变导致物质流动性的惊人变化,这是一个疑题。关于液态的知识仍然是不完善的。但是,对于液体分子的排列是部分有序的。许多分子群作为一个整体具有可移动性,有时候这些分子群可以与其他分子群形成规则的阵列,有时候它们又会分裂成更小的分子群。分子之间的排列是连续变化的,因此任何作用于液体的力(非体积压缩)都会产生一个变形,变形的量值随着力的持续而增加。液体分子某些性质所处的状态位于,固体与气体分子之间见下表。就最简单的宏观量而言,例如密度,液体更接近固体;而就易流性而言,液体完全与气体相一致。