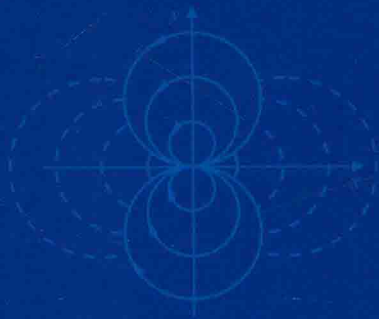




LIUTI LIXUE
JICHU YU YINGYONG

流体力学 基础与应用

魏 岗 关 晖 编著

流体力学基础与应用

魏 岗 关 晖 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 简 介

本教材系统地阐述了流体力学的基本概念、基本原理和基本方法,主要内容包括:绪论、流体运动学基础、理想流体动力学基础、流体涡旋运动基础、流体波动理论基础和黏性流体动力学基础。教材力求做到突出基础、强调应用、注重实践。教材内容编排科学合理,叙述精练准确,有利于读者自主学习和教师因材施教。书后列出了矢量分析、笛卡儿张量和正交曲线坐标系三个附录,以及常用专业词汇的中英文索引。

本教材可作为高等院校大气、海洋科学类专业本科生的基础课程教材,也可作为相关专业工程科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学基础与应用/魏岗,关晖编著. —北京:
气象出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-5029-6291-3

I. ①流… II. ①魏… ②关… III. ①流体力学-高
等学校-教材 IV. ①035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 290579 号

LIUTI LIXUE JICHU YU YINGYONG

流体力学基础与应用

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室: 010-68407112

网 址: <http://www.qxcbs.com>

责任编辑: 黄海燕 黄红丽

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 三河市鑫利来印装有限公司

开 本: 720 mm×960 mm 1/16

字 数: 373 千字

版 次: 2016 年 1 月第 1 版

定 价: 48.00 元

邮政编码: 100081

发 行 部: 010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审: 汪勤模

责任技编: 赵相宁

印 张: 18

印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷

前言

本教材是在杨增普、魏岗等 1995 年出版的《流体力学》一书基础上,结合作者多年的教学实践,以及学科在大气、海洋等应用领域的发展需求,经修订补充而成。

流体力学应用于大气和海洋科学已有 100 多年的历史。一方面,流体力学学科面临重大的发展机遇,传统的理论方法、现代实验技术和先进 CFD(计算流体动力学)技术与工程及军事应用领域的相互融合对学科发展提出了更高要求;另一方面,流体力学课程教学面临着严峻挑战,尤其是军队院校人才战略工程正在由学历教育为主向任职教育为主转变,使得实际课堂教学课时压缩、知识消化理解周期变短,传统课程教学模式面临适应新转变的改革。为此,流体力学课程教材必须在体系和内容上做出相应的调整,在确保“基本概念、基本理论、基本技能”的教学质量前提下,要求在内容编排上更加科学合理、叙述精练准确,有利于读者自主学习和教师因材施教。

作为针对大气和海洋科学类本科教学基础教材,本书保持了原版的经典,兼顾了取材针对性、学科系统性和内容科学性,着重阐述流体力学的概念、原理和方法,做到突出基础、强调应用和注重实践。新版教材对传统结构体系进行了调整,将每章内容分为基础篇、应用例和实践题三个部分,每个部分具有相对独立性和可扩展性。基础篇阐述流体力学的知识点,应用例为对应主要知识点的典型例题,实践题为应用例的实践练习题。教学过程中,可根据不同专业对流体力学知识的需求,在各自部分增减相应内容。本书也可作为其他专业师生和工程科技人员的教学参考书。

全书共分为六章:第 1 章绪论,第 2 章流体运动学基础,第 3 章理想流体动力学基础,第 4 章流体涡旋运动基础,第 5 章流体波动理论基础,第 6 章黏性流体动力学基础。此外,每章结束都编写有本章小结,便于读者对本章基本要求的把握。新版教材的学习需要具备微积分、矢量分析、线性代数、微分方程和复变函数论等数学基础知识,此外,还要用到张量和正交曲线坐标系概念。为方便阅读,已将矢量分析、笛卡

儿张量和正交曲线坐标系的基本内容以附录形式编入本书,书末还列出了名词索引。

新版教材由魏岗教授主笔。关晖副教授负责第2章和第4章的修编,研究生杜辉、张原铭和陈祥瑞以及气象和海洋专业部分本科学员参加了书稿的录入工作,在此表示感谢。

限于作者水平,加上时间仓促,书中存在不当和谬误之处,恳请专家与读者批评指正。

作 者

2015 年 9 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 流体力学研究对象和研究方法	(1)
1.2 流体连续介质模型	(3)
1.3 流体黏性和可压缩性	(5)
1.4 流体力学发展简史	(7)
应用例	(12)
实践题	(13)
本章小结	(14)
第 2 章 流体运动学基础	(15)
2.1 流体运动的两种描述方法与几何表示	(15)
2.2 连续性方程	(23)
2.3 流体微团运动	(28)
2.4 无旋运动和速度势	(33)
2.5 不可压缩流体平面运动和流函数	(37)
2.6 不可压缩流体平面无旋运动和复势	(40)
应用例	(47)
实践题	(57)
本章小结	(60)
第 3 章 理想流体动力学基础	(62)
3.1 作用在流体上的力	(62)
3.2 理想流体动量方程	(63)
3.3 理想流体能量方程	(68)
3.4 理想流体动力学微分方程组完备性和定解条件	(71)
3.5 不可压缩理想流体一维流动	(76)
3.6 特殊情形下欧拉方程积分	(77)
3.7 圆柱绕流	(80)
3.8 积分形式动量方程和动量矩方程应用	(84)

3.9 流体静力平衡	(86)
应用例	(91)
实践题	(106)
本章小结	(110)
第4章 流体涡旋运动基础	(112)
4.1 涡旋运动概念	(112)
4.2 涡旋运动学性质	(115)
4.3 涡旋动力学性质	(117)
4.4 涡量场确定速度场	(127)
4.5 兰金组合涡	(130)
应用例	(133)
实践题	(138)
本章小结	(140)
第5章 流体波动理论基础	(142)
5.1 波动基本概念	(142)
5.2 重力表面波	(144)
5.3 平面重力表面波	(148)
5.4 波群和群速度	(157)
5.5 波动能量及其传递	(160)
5.6 浅水长波	(164)
5.7 分层流与内波	(168)
应用例	(173)
实践题	(180)
本章小结	(182)
第6章 黏性流体动力学基础	(184)
6.1 应力张量及其与形变率张量之间的关系	(184)
6.2 黏性流体动力学基本方程和边界条件	(190)
6.3 黏性流动基本特性	(196)
6.4 不可压缩黏性流体层流精确解	(199)
6.5 相似理论与量纲分析	(203)
6.6 不可压缩黏性流体小雷诺数流动近似解	(209)
6.7 不可压缩黏性流体大雷诺数流动——层流边界层理论	(213)
6.8 湍流引论	(219)
应用例	(229)

实践题.....	(237)
本章小结.....	(240)
实践题参考答案.....	(244)
参考文献.....	(250)
附录 A 矢量分析概述.....	(251)
附录 B 笛卡儿张量简介.....	(258)
附录 C 正交曲线坐标系.....	(270)
名词索引.....	(277)

第1章 绪论

流体力学是力学学科的分支,是一门基础性强、应用性广的学科。本章首先阐明流体力学的研究对象和研究方法,然后讨论流体的连续介质模型以及流体的黏性和可压缩性,最后介绍流体力学的发展简史。

1.1 流体力学研究对象和研究方法

1.1.1 流体力学研究对象

地球表面的71%覆盖着海水,它是一种液体;而整个地表外面又覆盖着一层空气,空气是由多种气体混合而成的。液体和气体是自然界中人们最具感性认识的两类物质,它们具有共同的性质——易流动性,故统称为流体。所谓易流动性,是指当液体和气体处于静止时不能抵抗切向力。在切向力的作用下,液体和气体将发生任意大的变形,直到切向力消失为止。这种不断变形的运动就称为流动。正是由于流体的易流动性,所以流体没有固定的形状。

与流体不同的另一类物质是固体,它对外力的响应则是采取另外一种形式,即当切向力作用于固体时,固体在弹性限度范围内将发生相应的形变以产生切向应力来抵抗外力,使之达到平衡状态,所以固体是具有一定形状的。例如钢铁、岩石和玻璃等都是固体,它们在常温下都具有一定的形状。

流体和固体这两种有着完全确定而又互不相同力学性质的物质构成了力学的两大分支学科,即流体力学和固体力学。力学是研究客观实体的宏观机械运动及其相互作用规律的一门学科,顾名思义,流体力学是研究流体机械运动规律以及流体与流体、流体与固体之间相互作用规律的一门学科。

必须说明,流体和固体之分并不是绝对的。实际上,有些物质如某些树胶、油漆等,长期静置后会呈现固态的性质,如果加以摇晃或搅拌,又会显示出流动性;更有甚者,某些高分子聚合物会同时呈现流体和固体双重力学的特性,于是就有了黏弹性体和黏塑性体等概念,出现了黏弹性力学和黏塑性力学等新变形体的力学分支。

流体力学与经济建设、国防生产以及日常生活有着密切的联系。例如,研究大气和海洋的运动,可以做好天气和海洋预报,以便为农业、渔业、航空和航海等服务;研究各种飞行体和水面及水下物体的运动,了解它们的气动和水动力学性能,可以设计

出阻力小、稳定性高的飞机、导弹、船舰和潜艇等;研究河流、渠道和各种管路内的流动,掌握它们的运动规律,可以获得耗能少、安全性高的工程设计。此外,油气田的开发、地下水的利用、机械的润滑、动力设备的改进等,都与流体力学密切相关。近半个多世纪以来,流体力学与其他学科相结合,形成了许多新的边缘学科,大大地充实和扩展了流体力学的研究和应用领域。

1.1.2 流体力学研究方法

流体力学的研究方法分为四个方面:现场观测、实验室模拟、理论分析和数值计算。

现场观测方法是对自然界固有的流动现象或已有工程的全尺寸流动现象,利用各种仪器进行系统观测,从而总结出流体运动的规律,并借以预测流动现象的演变。例如,天气、海浪等现象的观测和预报,舰船在海洋中航行的各种设计指标的实际效果等,都是通过现场观测进行的。不过现场流动现象的发生往往不能控制,发生条件几乎不可能完全重复出现,会影响到对流动现象和规律的研究;此外,现场观测还要花费大量物力、财力和人力。

实验室模拟方法是通过建立实验室,使实际流动现象能在完全相同或相似条件再现,以便观察和测量。自然界有些流动现象难以靠理论计算解决,而有些则不可能完成原型实验(成本太高或规模太大)。模型实验是指根据理论指导,把研究对象的尺度改变(放大或缩小),利用模型实验所得数据,再用相似理论换算出原型数据。实验室模拟可以对发生或没有发生的现象(如待设计的工程、机械等)进行观察,使之得以再现或改进。流体力学离不开实验,尤其是对流动新现象的认识,它能够揭示新现象的特点和主要趋势,有助于形成概念,还可检验新理论的正确性。

理论分析方法是根据流体运动的普遍规律如质量守恒、动量守恒、能量守恒等,利用数学分析的手段,研究流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。理论分析的关键步骤如下:通过对流体物理性质和流动特性的科学抽象,提出合理的力学模型;再根据机械运动的普遍规律,建立控制流体运动的完备方程组,将具体的流动问题转化为数学问题;在相应的定解条件下求解。理论分析方法的关键在于建立力学模型,并能运用数学方法求出理论结果,达到揭示流体运动规律的目的。

数值计算方法是通过对计算机对流体力学中的控制方程进行数值求解。数值研究的一般过程为:采用各种离散方法,如有限差分法、有限元法、有限体积法、边界元法、谱分析法等,建立各种数值计算模型,编制计算程序,通过计算机对控制流体运动的数学物理方程(多为偏微分方程)进行数值计算和数值试验,再将计算结果与实验室实验或理论解析结果比较,最终获得定量描述流场的数值解。数值计算方法的优点是能够计算理论分析无法求解的流动问题,能够对许多实验室模拟无法完成的实验

进行数值模拟,且十分经济。但数值计算方法毕竟是一种近似求解方法,适用范围受数学模型的正确性、计算精度和计算机性能所限制。数值计算方法已成为流体力学现代分析手段中发展最快的方法之一,并已发展成专门的分支学科——计算流体力学。

解决流体力学问题时,现场观测、实验室模拟、理论分析和数值计算几方面是相辅相成的。实验需要理论指导,才能从分散的、表面上无联系的现象和实验数据中得出规律性的结论。反之,理论分析和数值计算也要依靠现场观测和实验室模拟给出物理图案或数据,以建立流动的力学模型和数学模式;最后,还须依靠实验来检验这些模型和模式的完善程度。此外,实际流动往往异常复杂(例如湍流),理论分析和数值计算会遇到巨大的数学和计算方面的困难,得不到具体结果,只能通过现场观测和实验室模拟进行研究。

1.2 流体连续介质模型

处于流体状态的物质无论是液体还是气体,都是由大量的、不断地做无规则热运动的分子所组成。例如,在标准状况下,一个立方厘米的气体包含 2.7×10^{19} 个分子,分子的有效直径约为 10^{-8} cm,通过简单计算不难得出,所有这些分子的体积之和仅约占十万分之一立方厘米。可见分子间存在着间隙,且间隙尺寸大于分子本身,它导致流体物理量在空间分布的不连续性。同时,由于分子的随机运动,还导致任一空间点上流体物理量对时间的不连续性。所以从微观的角度来看,流体内部是不连续的,流体的物理量分布在空间和时间上也是不连续的。

流体力学并不研究个别分子的运动,而是研究流体的宏观特性,即大量分子的统计平均特性。它所讨论的流动特征尺度往往比分子平均自由程(例如,作为气体分子运动的尺度,在标准状况下空气分子的平均自由程约为 6.3×10^{-6} cm)大得多,用仪器测量或用肉眼观察到的流体结构和运动明显地表现出连续性。所以,在流体力学中完全有理由把所研究的流体看成是连绵不断的连续物质,称为连续介质。

所谓连续介质模型就是把流体抽象为大量流体质点所组成的介质,这些流体质点一个挨着一个,充满着流体所占有的空间而没有任何间隙。也就是说,流体力学认为流体是由连续分布的流体质点所组成。

流体质点指的是微观上充分大、宏观上充分小的分子团。一方面,流体质点的尺度和所讨论问题的特征尺度相比较已足够微小,从宏观上来看,完全可以将它看成是无体积的质点;另一方面,每个流体质点在微观上又是充分大,包含很多分子,从而都具有对大量分子运用统计方法才能表征出来的宏观物理量,如密度、温度等,为了建立流体质点的确切概念,接下来观察一个实验结果。

取包含点 $C(x, y, z)$ 的微体积元 $\Delta\tau$, 体积内的流体质量为 Δm , 则体积元中的平均密度为

$$\bar{\rho} = \frac{\Delta m}{\Delta\tau}$$

为了确定点 C 处的流体密度, 应该尽量缩小微体积元 $\Delta\tau$ 。现在的问题是: 所取微体积元究竟能小到什么程度? 取不同大小的 $\Delta\tau$, 测量其中的质量 Δm , 计算出平均密度 $\bar{\rho}$, 图 1.1 表明了平均密度 $\bar{\rho}$ 随微体积元 $\Delta\tau$ 的变化情况。

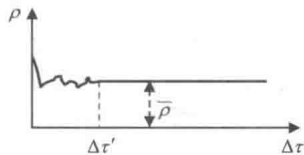


图 1.1 流体密度随体积的变化

从图中曲线可知, $\Delta\tau$ 向 $\Delta\tau'$ 逐渐收缩过程中, 其平均密度逐渐趋近一个稳定的极限值 ρ 。但是, 当 $\Delta\tau$ 收缩到比 $\Delta\tau'$ 更小时, $\Delta\tau$ 内的分子数目已经很少, 由于分子无规则运动, 随机进入和飞出的分子数不能随时保持平衡, 从而引起平均密度 $\bar{\rho}$ 的涨落现象, 即随时间发生不规则变化, 不再存在一个确定值。由此可见, $\Delta\tau'$ 是一种特征体积, 它是 $\Delta\tau$ 的极限值, 流体在某点处的物理特性, 实质上是包含该点的微体积元 $\Delta\tau'$ 内大量分子的统计平均特性, 把体积为 $\Delta\tau'$ 的分子团称为流体质点。这样, 流体质点的密度就可以定义为

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow \Delta\tau'} \frac{\Delta m}{\Delta\tau}$$

它就是流体质点所在位置 $C(x, y, z)$ 处的密度。由于 $\Delta\tau'$ 很小, 宏观上相当于一个点, 即体积为零, 因而流体质点的密度又可以表达为

$$\rho = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta\tau}$$

上述两种表达式是等价的。以上讨论对于其他物理量也适用。

综上所述, 流体的连续介质模型要求所讨论问题的特征长度要远远大于流体质点的特征长度, 而流体质点的特征长度又必须大于分子运动的特征长度。对于气体, 引入分子平均自由程 $\bar{\lambda}$ 和流动的特征长度 L 之比, 并称之为克努森 (Kundson) 数, 记为 Kn , 即

$$Kn = \frac{\bar{\lambda}}{L}$$

只要满足 $Kn \ll 1$, 气体的连续介质模型就成立。从表 1.1 可以看出, 当取特征长度 $L = 10 \text{ cm}$ 时, 对于 50 km 左右的高空, 大气的连续介质模型一般是成立的, 至于更高的高空, 由于分子平均自由程比较大, Kn 不能保持远小于 1, 大气就不能再看作是连续介质, 而是非连续的稀薄气体。不过, 如果研究的是大范围问题, 例如特征长度 L 取 10^6 m , 那么即便是 150 km 高空的大气, 也可以视为连续介质。所以连续介质是一个具有相对意义的概念。

表 1.1 不同高度层大气的 Kn 数

海拔高度 (km)	$\bar{\lambda}$ (cm)	Kn
0	$<10^{-5}$	$<10^{-6}$
50	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-3}$
100	10	~ 1
150	10^4	$\sim 10^3$
200	10^7	$\sim 10^6$

连续介质模型的引入将大量离散的分子运动问题转化为连续分布的流体质点问题,因而在每个空间点和每个时刻都有确定的物理量,这就提供了流体物理量连续分布的可能性。在连续介质模型的基础上,假定流体物理量是空间位置和时间的连续可微函数,只有在个别点、线和曲面上允许不连续。由这一假定所得到的结果与实验结果相吻合。因此,可以充分利用数学分析工具来研究流体的运动。所以,连续介质模型及上述假定是流体力学中最根本的假定,本书所讨论的结果都是以连续介质模型为前提的。

1.3 流体黏性和可压缩性

除了前面提到的流体易流动性外,真实流体还具有黏性、扩散性、热传导性及可压缩性。黏性、扩散和热传导都是分子的输运现象,其中动量输运表现为黏性现象,质量输运表现为扩散现象,能量输运表现为热传导现象,三种现象具有相似的宏观特性和微观结构。这里着重讨论流体的黏性和可压缩性。

1.3.1 黏性

前面已经讲过,流体在静止时不能承受切向力,但是当流体内部相邻两层间发生相对运动时就会出现相互约束作用的切向应力来抵抗相对运动,快的一层给慢的一层以拉力,而慢的一层给快的一层以阻力。流体的这种抵抗两层流体相对运动的性质称为黏性。

可以通过牛顿黏性实验来进一步研究流体的黏性应力(又称黏性力)。如图 1.2 所示,两块相距为 d 的平板间充满均匀的真实流体。下板固定不动,上板在力 F 的作用下平行于下板运动。实验发现,当上板速度增加到某一数值 U 后就不再增加,最后上板以速度 U 做匀速直线运

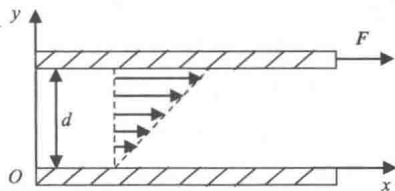


图 1.2 黏性现象

动,表明上板一定受到一种与拉力 F 等值反向的阻力作用。这种阻力就是由于流体黏性而产生的。

随着上板以速度 U 运动,由于黏性,与上板接触的一层流体黏附在上板上,而与下板接触的一层流体黏附在下板上。由于黏性应力存在于两板之间各流体层,其速度自下而上由零变到 U ,呈线性分布,即

$$u = \frac{U}{d}y$$

从而

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{d}$$

实验发现,作用力大小 F 与上板面积 A 之比 F/A 与速度梯度 du/dy 成正比。即

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

显然,平板每单位面积上所受到的黏性应力必与 F/A 数值相等,也等于流体内部的相邻两层流体之间的黏性应力。1686年,牛顿(Newton, 1643—1727)根据实验得出:流体黏性切应力与垂直于流体运动方向的速度梯度成正比。这就是著名的牛顿黏性定律,其数学表达式可写成

$$p_{yx} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

式(1.1)中的比例系数 μ 称为动力黏性系数,简称黏度系数,其单位是($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。下标“ yx ”表示应力分量 p_{yx} 的作用面元法向为正 y 轴、作用方向沿正 x 轴。

牛顿黏性定律是在二维线性层状流速场中建立的,对于一般流动的黏性应力问题,将在第6章讨论。历史上把符合牛顿黏性定律的流体称为牛顿流体,一般的气体和分子结构简单的液体都可以看作牛顿流体。具有复杂分子结构的流体,如蜂蜜、果酱、沥青、树胶和动物血液等,大都不遵从牛顿黏性定律,它们被称为非牛顿流体。

式(1.1)中黏度系数 μ 是对黏性大小的一种量度,它与运动性质无关,取决于流体的物理性质和状态。同一种流体的黏度系数随温度而变化,与压力大小无关。对于液体,当温度升高时,黏度系数 μ 减小;气体则相反,它的黏度系数随着温度升高而增大。这是因为流体黏性一方面是由于分子间的相互吸引力所致,另一方面是分子做无规则运动引起动量输运的结果。对于液体来说,分子间的相互吸引力这一因素是主要的,随着温度的升高,分子间的吸引力减小,因而黏性减弱,黏度系数减小;对于气体,则分子无规则运动引起动量输运这一因素是主要的,随着温度升高,无规则运动加剧,动量输运量增大,故气体的黏性随之增大。

在流体力学中,还经常用到运动黏性系数,它定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.2)$$

单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

真实流体都是有黏性的,由于黏性的存在,给流体运动的研究带来了很大的困难。然而在很多问题中,黏性的存在对运动的影响很小,在这种情况下,往往忽略流体的黏性,当作完全没有黏性的流体来处理,这种完全没有黏性(μ 为零)的流体叫作理想流体。应该强调指出,真正的理想流体在客观实际中是不存在的,它只是真实流体在某种条件下的一种近似模型。

同一种流体能否作为理想流体,需视具体问题而定。根据牛顿黏性定律,黏性应力的的大小取决于黏度系数 μ 和速度梯度。对于同一种流体,温度的变化不大时,黏度系数 μ 可视为常数。在速度梯度大的区域(如紧靠壁面),黏性应力比较大,就不能忽略;而速度梯度小的区域,则可忽略黏性的影响,当作理想流体处理。

1.3.2 可压缩性

流体在外力作用或温度改变等因素影响下,其体积或多或少都要有所改变,当质量一定时,流体的密度也随之有所变化。在受到外力作用或温度改变等条件下,流体的体积或密度可以改变的性质称为流体的可压缩性。

真实流体都具有可压缩性。液体的可压缩性很小,例如水在 10°C 时,每增加一个大气压,体积减小只不过是原来体积的二万分之一。因此,一般情况下可以不考虑液体的可压缩性。但是对于某些特殊的问题,例如水中爆炸问题,则必须考虑液体的可压缩性。气体的可压缩性比液体大得多,所以在一般情况下,应该考虑气体的可压缩性。但是如果压差比较小,气体运动速度小于声速,则气体的密度变化很小。例如气象上研究空气的运动,即使是 12 级的台风,空气密度的变化也不超过 2%。所以,气象上将大气看成是一种不可压缩流体。

根据上面的讨论可知,真实流体都是可压缩的,但对于液体和压差较小且低速流动的气体而言,由于密度变化小,均可近似看作是是不可压缩的。因此,流体力学中根据流体的压缩性,将流体区分为可压缩流体和不可压缩流体。

1.4 流体力学发展简史

流体力学的知识起源于人们对自然现象的观察和在生产劳动中的经验。正是人们从本能地感知到自觉地认知,从粗浅、零散的知识到深入系统的科学,构成了流体力学发展史所经历的不同阶段。它大致可分为四个阶段,现扼要叙述如下。

第一阶段——经验科学积累

17 世纪中叶以前,是流体力学发展的原始阶段。在这一阶段,人们缺乏系统的流体力学知识,只是通过朴素直观的思想和具体实践的方法去认识简单情况下的某

些经验规律,从而解决生产及生活中所遇到的问题。这个阶段的数学工具仅限于算术、代数和简单的几何知识等。

早在史前时期,距今 5000~7000 年前,我国古人就有“剡木为舟”,这是对浮力最早的认识。在与自然灾害斗争中,我国夏代(距今约 3000 年前)有大禹治水疏通江河。公元前 300 年,秦朝伟大的水利学家李冰父子修建了至今仍在发挥作用,并为中外水利学家所敬服的“都江堰”。古希腊著名的科学家阿基米德(Archimedes,公元前 287—公元前 212)证明了物体在液体中所受到的浮力等于它所排开液体的重量,这一结果后来被称为阿基米德原理,迄今仍是流体静力学的基础。古希腊另一位著名的哲学家和科学家亚里士多德(Aristotle,公元前 384—公元前 322)在他的著作《物理学》一书中发表了空气对炮弹具有推动作用的想法,这可能是科学史上最原始的空气动力学概念的痕迹。

15 世纪,意大利文艺复兴时代的代表人物达·芬奇(Da Vinci,1452—1519)在他的著作中谈到水波、管流、水力机械以及鸟的飞翔原理等问题。16 世纪到 17 世纪中叶,荷兰科学家斯蒂文(S. Stevin,1548—1620),意大利物理学家和数学家托里拆利(Torricelli,1608—1647),意大利天文学家、力学和哲学家伽利略(Galileo,1564—1642),法国数学家和物理学家帕斯卡(Pascal,1623—1662)等继承和发展了阿基米德的工作。斯蒂文把刚体静力学中的普遍方法运用到流体静力学中;伽利略和帕斯卡的工作则是在流体静力学中应用了虚位移原理;托里拆利以发明气压计而闻名;帕斯卡发现了静止流体传递压强的规律;帕斯卡继续伽利略和托里拆利的大气压实验,还发现了大气压随高度的变化。

第二阶段——流体力学基础理论形成和发展

17 世纪末叶到 19 世纪末叶,随着工场手工业向机器大工业发展的需要,许多新的流体力学问题被提出。例如,如何提高水力发动机的效率以及管道中更快的输运问题;因航海和贸易的需要,提出与造船有关的流体阻力问题,以及研究炮弹飞行中的空气阻力等问题。随着这些问题的逐步解决,从而建立和发展了解决流体力学问题的基本理论和实验方法。

1678 年,牛顿利用理论与实践相结合的方法,研究运动物体所受到的阻力,确定了物体在流体中所受到的阻力的数量关系;牛顿还通过实验建立了流体层之间摩擦力与流层速度梯度的正比关系,这个关系称为牛顿黏性定律,它迄今仍然是黏性流体力学的实验基础。

伽利略、惠更斯(Huygens,1629—1695)、牛顿等人的工作为 17 世纪中叶后流体力学的飞跃发展奠定了坚实基础。从那时起,流体动力学开始从个别的,有时是相互没有关联的问题的考虑转到了对特有的定律及方法的系统论述,使它成为力学的独立分支。

1738年,伯努利(D. Bernouli, 1700—1782)首先对孔口出流与变截面管道流动进行了仔细观察和测量,提出了著名的伯努利原理。差不多同时,法国的皮托(H. Pitot, 1695—1771)发明了至今仍被广泛使用的测量流速的皮托管。1752年,法国科学家达朗贝尔(D'Alembert, 1717—1783)在研究物体阻力时,证明了物体在理想流体中运动所受到的作用力之和为零,但无法解释这个通常被称为达朗贝尔佯谬的结果。1755年,瑞士科学家欧拉(L. Euler, 1707—1783)在其著作《流体运动的一般原理》中最先引进了理想流体运动的基本方程组和速度势的概念,指出了有内摩擦力的实际流体和理想流体的区别,由此阐明了所谓的达朗贝尔佯谬。这些成就使他成为理论流体动力学的奠基人。

欧拉、伯努利和达朗贝尔等人完成了理想流体动力学发展的重要阶段的工作,使理想流体的动力学理论达到了近乎完善的境地。1781年,法国的拉格朗日(Lagrange, 1736—1813)引进了流函数的概念,并首先获得了无黏性无旋转流动所应满足的动力学条件,并提出求解这类流动的复势方法,进一步完善了理想流体做无旋转流动的基本理论。流体波动理论的研究始于1781年拉格朗日关于重力流体表面长波近似理论的研究,波动传播的基本微分方程和波动传播速度的第一个公式都采用了拉格朗日的名字。在柯西(Cauchy, 1789—1857)发表于1815年的论文集中包含了小振幅波的严格理论。法国的数学、天文学家拉普拉斯(Laplace, 1749—1827)以及数学、力学和物理学家泊松(Poisson, 1781—1840)和英国的力学、数学家斯托克斯(Stokes, 1819—1903)等人的工作促进了小振幅波理论的发展。

早在1775年欧拉就证明了可能不存在没有速度势的运动。柯西在1815年和拉普拉斯在1847年分别独立地就涡旋的基本概念做了解释:涡旋是流体元整体的转动角速度。1845年,德国科学家亥姆霍兹(Helmholtz, 1821—1894)引进了一系列有关涡旋的基本概念,提出了以他名字命名的涡旋第一和第二定理,由此创立了涡旋运动理论。这一理论对于大气动力学、机翼理论、螺旋桨理论以及其他许多问题的解决起到了极大的作用。

黏性流体动力学的创立则是由1823年法国的纳维(Navier, 1785—1836)和1845年英国的斯托克斯分别用不同的方法建立了不可压缩和可压缩黏性流体的运动方程组开始的,其基本方程就是著名的纳维—斯托克斯方程。在此之前,泊肃叶(Poiseuille)和哈根(Hagen)分别独立地发表了他们对细圆管中层流流动的实验结果,它与斯托克斯获得的理论结果完全一致。

黏性流体在管中运动存在着两种不同的流动状态,即层流和湍流,这是1883年英国的力学、物理学家和工程师雷诺(O. Reynolds, 1842—1912)通过一系列实验后发现的。他同时总结出从层流到湍流的过渡仅依赖于一个无量纲数——雷诺数。其实这一结论的得出获益于弗劳德(Froude, 1810—1879)和他的儿子罗伯特(Robert,