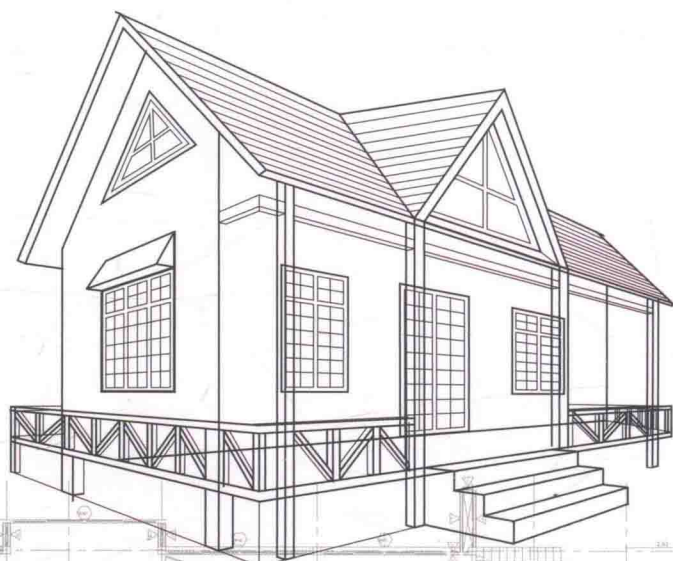


流体力学

主编 刘方亮 毕洪涛



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

流体力学

主 编 刘方亮 毕洪涛

副主编 宋玉鹏 徐 明 郝丽娜

内 容 提 要

本书根据高等学校土木工程专业和水利类专业流体力学课程教学基本要求,以及国家注册结构工程师流体力学考试大纲编写,参考学时50~64学时。本书共8章,主要内容包括绪论,流体静力学,流体动力学基础,流动阻力和能量损失,孔口、管嘴出流和简单管路,明渠水流,堰流与闸孔出流,渗流,量纲分析和相似性原理等。每章均附有习题,书末附有习题答案。

本书可作为高等院校土木工程类相关专业的教材,还可作为环境、水力等有关专业的教材或教学参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/刘方亮,毕洪涛主编. —北京:北京理工大学出版社, 2017.2

ISBN 978-7-5682-3700-0

I. ①流… II. ①刘… ②毕… III. ①流体力学—高等学校—教材 IV. ①O35

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第030550号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京紫瑞利印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/22

字 数/559千字

版 次/2017年2月第1版 2017年2月第1次印刷

定 价/65.00元

责任编辑/陆世立

文案编辑/瞿义勇

责任校对/周瑞红

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

流体力学是一门古老的学科，也是不断完善发展的学科。其应用范围广，涉及多专业、多领域的应用，是土建类、环境类和水利类专业的一门重要专业基础课。本书在注重理论基础和能力培养的基础上，考虑到土木工程专业的特点（包括岩土、桥梁、道路、水利工程、地下建筑诸多方面），深入浅出、删繁求精，让学生理解并认识到流体力学是如何应用于工程实践的。本书共9章，包括绪论，流体静力学，流体动力学基础，流动阻力和能量损失，孔口、管嘴出流和简单管路，明渠水流，堰流与闸孔出流，渗流，量纲分析和相似性原理。每章均附有适量的思考题和习题，全书附有习题答案，供读者练习和参考。

本书由刘方亮、毕洪涛担任主编，宋玉鹏、徐明、郝丽娜担任副主编。具体编写分工如下：绪论、第1、4章由刘方亮编写；第5、8章由毕洪涛编写；第2、7章由宋玉鹏编写；第3章由徐明编写；第6章由郝丽娜编写。

本书编写过程中，参阅了许多教材、著作和文献，均列于参考文献，供读者进一步查阅，在此对各参考文献的作者表示由衷感谢。

由于编者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，恳切希望使用本书的同仁和读者批评指正，以利于修订和完善。

编 者

目 录

0 绪论.....	1	2.4 连续性方程及相关概念	69
0.1 流体力学的应用概况	1	2.5 恒定元流能量方程	73
0.2 流体力学理论的发展	3	2.6 过流断面上压强分布规律	77
0.3 流体力学的研究方法	4	2.7 恒定总流伯努利方程	81
习题与思考.....	8	2.8 伯努利方程的应用	85
1 流体静力学.....	9	2.9 总水头线和测压管水头线	89
1.1 作用在流体上的力	10	2.10 恒定气流能量方程	92
1.2 流体的主要物理性质	12	2.11 总压线和全压线	95
1.3 流体的力学模型	23	2.12 恒定总流动量方程	98
1.4 流体静压强特性	24	习题与思考.....	103
1.5 流体静压强分布规律	27	3 流动阻力和能量损失	110
1.6 流体压强的测量	33	3.1 流动阻力和能量损失的分类	111
1.7 作用在平面上的液体静压力	40	3.2 流体的两种流态及判别流态 的准则	113
1.8 作用在曲面上的液体静压力	46	3.3 圆管中的层流运动	119
1.9 流体平衡微分方程及流体的 相对平衡	49	3.4 紊流运动和紊流阻力	123
习题与思考.....	55	3.5 尼古拉兹试验与工业管道的 紊流阻力计算	132
2 流体动力学基础.....	62	3.6 沿程水头损失的经验公式	143
2.1 运动流体的两种描述方法	63	3.7 局部损失和局部阻力系数	147
2.2 流体运动学的基本概念	65	习题与思考.....	156
2.3 一元流动及相关概念	67		

4 孔口、管嘴出流和简单管路.....	162	7 渗流.....	293
4.1 孔口自由恒定出流	163	7.1 渗流的基本概念	293
4.2 孔口淹没恒定出流	166	7.2 渗流基本定律——达西定律 ...	296
4.3 管嘴恒定出流	169	7.3 地下水的恒定均匀渗流和非 均匀渐变渗流	300
4.4 简单管路水力计算	173	7.4 集水廊道和井与井群的水力 计算	305
4.5 管路的串联与并联	178	7.5 水平不透水层上均质土坝的 渗流计算	313
4.6 管网水力计算基础	180	7.6 渗流对建筑物安全性的影响 ...	316
习题与思考.....	184	习题与思考.....	317
5 明渠水流.....	190	8 量纲分析和相似性原理.....	319
5.1 明渠流动概述	191	8.1 量纲的概念与量纲和谐原理 ...	320
5.2 明渠均匀流	196	8.2 量纲分析	323
5.3 明渠水流的流动状态及判别 ...	206	8.3 相似准则	327
5.4 明渠非均匀流	217	8.4 模型试验方法	333
5.5 明渠急变流	219	习题与思考.....	336
5.6 明渠渐变流	226	习题答案	338
习题与思考.....	241	参考文献	346
6 堰流与闸孔出流.....	246		
6.1 堰流的类型及计算公式	247		
6.2 薄壁堰流的水力计算	249		
6.3 实用堰流的水力计算	251		
6.4 宽顶堰流的水力计算	257		
6.5 闸孔出流的水力计算	262		
6.6 桥梁的水力计算	269		
6.7 泄水建筑物下游的水流衔接 与消能	273		
习题与思考.....	289		

0 绪 论



学习要点

本章主要阐述流体力学的定义、应用以及流体力学发展的过程和所涉及的重要理论，并简单论述了流体力学的研究方法。

通过本章的学习，掌握流体及流体力学的定义、流体力学发展过程中的主要理论；熟悉流体力学的研究方法和研究步骤；了解本课程的内容结构。

1738 年雅各布·伯努利出版他的专著时，首次使用了水动力学这个名词并作为书名；1880 年前后出现了空气动力学这个名词；1935 年以后，人们综合这两方面的知识，建立了统一的体系，称为流体力学。

流体力学作为力学的一个重要、独立的分支，主要研究流体的平衡和机械运动状态下的规律，及其在工程中的应用。流体力学的研究对象是流体，气体和液体统称为流体。除常见的水和空气以外，流体还指水蒸气、油类、含泥沙的江水、血液、高温条件下的等离子体等。

本课程的主要内容包括三大部分：①流体静力学，研究流体平衡的规律，即流体处于静止状态时，作用于流体上各种力之间的关系；②流体动力学，研究流体处于运动状态时，作用于其上的力与各运动要素（例如速度、加速度等）之间的关系，流体的运动特性以及能量转换规律等；③土建工程中的水利计算问题，例如，管流、明渠流、堰流以及地下水的水利计算等。

0.1

流体力学的应用概况

通过考察力学体系的构成，可以深入理解流体力学的重要性。按研究对象不同，力学体系可划分为以下三个部分：

- (1)以受力后不发生任何形变的绝对刚体作为研究对象的理论力学。
- (2)以受力后仅发生微小形变的固体作为研究对象的固体力学。
- (3)以受力后发生较大形变的流体作为研究对象的流体力学。

流体力学在力学体系中三分天下的地位使其在工程中有着广泛的应用。水利工程的研究，航空、航天活动的发展，军事工程中炸弹威力的控制，地下石油的开采以及天体物理的若干问题等，都大量地用到流体力学的知识。造船工程学、航空工程学、传热学、大气科学、河川工程学、应用力学，均与流体力学交叉融合。图 0-1 的关系图反映了流体力学的应用及其分支。

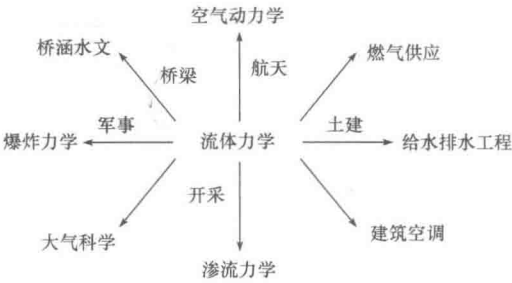


图 0-1 流体力学分支及应用

流体力学主要研究的是气体和液体，首先考察流体力学在以气体作为研究对象时的主要应用。1903 年威尔伯·莱特和奥维尔·莱特兄弟在北卡罗来纳州基蒂霍克使第一架动力飞行器“飞行者一号”成功升空 12 秒，标志着人类第一架飞行器的实现。人类的航空航天飞行开启于 20 世纪 50 年代。1961 年 4 月 12 日，尤里·阿列克谢耶维奇·加加林乘坐东方 1 号宇宙飞船从拜克努尔发射场起航，实现世界上首次载人宇宙飞行，实现了人类进入太空的愿望。航天航空的发展与流体力学的发展密切相关。流体力学在航空工程中应用的学科分支为空气动力学、气体动力学。

流体力学除在航天事业中的巨大贡献外，在开采、勘探活动中也有着重要的应用。如石油和天然气的开采，以及地下水的开发和利用。流体力学在该方向的分支主要为渗流力学。渗流力学主要研究的是流体在多孔或缝隙机制中的运动。

军事工程中也离不开流体力学的知识，如炸弹爆炸。爆炸是一种瞬间能量变化和传递的过程，其威力在于爆炸形成的空气冲击波的作用，流体力学在此方向的分支为爆炸力学。爆炸力学是研究爆炸的发生、发展规律以及爆炸的力学效应的利用和防护的学科。它从力学角度研究化学爆炸、核爆炸、电爆炸、粒子束爆炸(也称辐射爆炸)、高速碰撞等能量突然释放或急剧转化的过程和由此产生的强冲击波(又称激波)、高速流动、大变形和破坏、抛掷等效应。自然界的雷电、地震、火山爆发、陨石碰撞、星体爆发等现象也可用爆炸力学方法来研究。

在土木工程中，也会碰到大量与流体平衡和机械运动规律有关的工程技术问题。桥梁的风振、建筑外立面风力的计算、室内给水排水系统中的水力计算、中央集中空调系统中空气的流动、燃气供应系统的相关问题，都需要使用流体力学作为工具来解决。例如：城市生活及工业用水的给水排水问题，涉及需要解决诸如取水口的布置、管路布置，水管直径以及水塔高度的计算，水泵功率、井的产水量等一系列流体力学的问题；在铁路、公路、桥梁、航道及港口建设中又须讨论桥涵孔径设计、路基排水、隧道通风及排水等流体水力学的计算问题；在房屋建筑工程中，还会遇到地下水的运动，基础和围堰的渗流等问题；在风工程中，会遇到风荷载对构筑物的作用以及风的运动规律及其特性等问题。

0.2

流体力学理论的发展

在人类同自然界做斗争和生产实践中,流体力学得到逐步发展。我国自古就有大禹治水疏通江河的传说;秦时代(公元前 256—前 210 年),李冰父子带领劳动人民修建的都江堰,至今还在发挥着作用;大约与此同时,古罗马人建成了大规模的供水管道系统等。这些都说明古人对水流动的规律有了一定的认识,但这些实践工程多使用经验,并未使流体力学成为一个知识体系。

0.2.1 经典流体力学阶段

一般认为,对流体力学学科的形成作出第一个贡献的人,是古希腊的阿基米德(Archimedes),他提出了浮力定律(公元前 250 年左右):浸在液体里的物体受到向上的浮力,浮力大小等于物体排开液体所受重力。浮力定律奠定了流体静力学的基础。浮力定律在航海等领域有重要意义,密度等重要的物理概念也通过浮力定律得到发展。

流体力学真正成为一门严密的科学,是从 17 世纪开始形成的,首先要归功于牛顿发明了微积分,之后牛顿的著作《自然哲学中的数学原理》给出了黏性流体剪应力计算公式、声速和潮汐理论,但是,牛顿还没有建立起流体动力学的理论基础,他提出的许多力学模型和结论同实际情形还有较大的差别。

1726 年,丹尼尔·伯努利提出了“伯努利原理”。这是在流体力学的连续介质理论方程建立之前,水力学所采用的基本原理,其实质是流体的机械能守恒。伯努利从经典力学的能量守恒出发,研究供水管道中水的流动,精心地安排了试验并加以分析,得到了流体恒定流动下的流速、压力、管道高程之间的关系——伯努利方程。

1752 年,达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了许多试验工作,证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系,并提出了连续性方程。

1755 年,瑞士的欧拉采用了连续介质的概念,把静力学中压力的概念推广到运动流体中,建立了欧拉方程,正确地用微分方程组描述了无黏流体的运动。

1822 年,纳维建立了黏性流体的基本运动方程;1845 年,斯托克斯又以更合理的基础导出了这个方程,并将其所涉及的宏观力学基本概念论证得令人信服。这组方程就是沿用至今的纳维—斯托克斯方程(简称 N—S 方程),它是流体动力学的理论基础。

欧拉方程和伯努利方程的建立,是流体动力学作为一个分支学科建立的标志。此后开始了用微分方程和试验测量进行流体运动定量研究的阶段。

0.2.2 近代流体力学的发展

近代流体力学发展始于 19 世纪末,该时期工程师们主要解决许多工程问题,尤其是要解决带有黏性影响的问题以及流体高速运动的特征。于是他们部分地运用流体力学,部分地采用归纳试验结果的半经验公式进行研究,这就形成了水力学,至今它仍与流体力学并

行的发展。

1883 年，雷诺通过自己设计的试验发现了流体运动的两种流态：层流和紊流。这一发现推动了整整一个世纪的紊流研究。虽然到现在，紊流问题并未完全解决，但紊流现象的提出解决了许多实际工程问题，具有跨时代意义。

1904 年，路德维希·普朗特将 $N-S$ 方程作了简化，从推理、数学论证和试验测量等各个角度，建立了边界层理论，能实际计算简单情形下，边界层内流动状态和流体同固体间的黏性力。同时普朗特又提出了许多新概念，并广泛地应用到飞机和汽轮机的设计中去。边界层理论的提出使得人们还不能求解 $N-S$ 方程之前解决了阻力问题，使人类的飞行时间至少提前了半个世纪，所以，普朗特被称为近代流体力学的奠基人。

1910 年，泰勒提出湍流统计理论。他在 1921 年发表的论文中，首先应用统计学的方法来研究湍流扩散问题，提出了著名的泰勒公式。湍流涡理论的提出，加深了人们对湍流的认识。泰勒善于把深刻的物理洞察力和高深的数学方法结合，并擅长设计简单且完善的试验。

1911 年，卡门提出了“卡门涡列”理论，该理论解释了桥梁的风振、机翼的震颤。卡门后来在美国加州理工学院建立了当时顶尖的空气动力学试验室，被称为航空航天大师。

以上理论构成了近代流体力学的框架。

0.2.3 现代流体力学阶段

20 世纪 40 年代，炸药和天然气等介质中发生的爆轰波形成了新的理论，为研究原子弹、炸药等起爆后，激波在空气或水中的传播，发展了爆炸波理论。流体力学此后又衍生出许多分支，如超音速空气动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学、两相流等。这些巨大进展是和采用各种数学分析方法，建立大型、精密的试验设备和仪器等研究手段分不开的。

从 20 世纪 50 年代起，电子计算机不断完善，原来用分析方法难以进行研究的课题，逐步可以用数值计算方法来进行，出现了新的分支学科——计算流体力学。

20 世纪 60 年代，根据结构力学和固体力学的需要，出现了有限元法，该方法主要解决弹性力学问题。经过发展，有限元分析这项新的计算方法开始在流体力学中应用，尤其是在低速流和流体边界形状甚为复杂问题中，效果显著。近年来，又开始了用有限元方法研究高速流的问题，也出现了有限元方法和差分方法的互相渗透和融合。

从 20 世纪 60 年代起，流体力学开始了流体力学和其他学科的互相交叉渗透，形成新的交叉学科或边缘学科，如物理—化学流体动力学、磁流体力学等。

0.3

流体力学的研究方法

流体力学的研究主要包括现场观测、试验模拟、理论分析、数值计算四个方面。解决流体力学问题时，这四个方面是相辅相成的。试验需要理论指导，才能从分散的、表面上无关联的现象和试验数据中得出普遍规律性的结论。反之，理论分析和数值计算也要依靠

现场观测和试验模拟给出物理图案或数据,由此建立流动的力学模型和数学模式。最后,还须依靠试验来检验这些模型和模式的完善程度。实际工程中,流动往往异常复杂(例如紊流),此时理论分析和数值计算会面临数学和计算方面的困难,无法得到具体结果,只能通过现场观测和试验模拟进行研究。

0.3.1 现场观测

现场观测是指对自然界的流动现象或工程的流动现象,进行系统观测和仪器分析,而总结出流体运动的规律、预测流动现象的演变。早期天气的观测和预报,基本使用此方法进行。但现场观测流动现象的发生一般不能控制,发生条件很难完全重复出现,影响对流动现象和规律的研究。因此,人们通过试验室,使这些现象能在可控的条件下出现,以便于观察和研究。

流体力学离不开试验,尤其是对新的流体运动现象的研究。试验能显示运动特点及其主要趋势,有助于形成概念,检验理论的正确性。几百年来流体力学发展进程中任何一项重大进展都离不开试验。

模型试验在流体力学中占有重要地位。模型是指根据理论指导,把研究对象的尺度成比例改变(放大或缩小)以便进行试验。有些流动现象很难仅靠理论计算解决,有的则因再现流动现象成本高而无法做原型试验。这时,模型试验所得的数据可以用例如换算单位制的简单算法求出原型数据。

0.3.2 试验模拟

现场观测是对已有现象的观测,而试验模拟却可以对还未出现的现象进行观察,如待设计的工程、机械等,通过此方法使之得到改进。因此,试验模拟是研究流体力学的重要方法。

主要用试验方法研究自然界或各类工程领域中的流体流动现象和规律以及流体与固体之间的相互作用的流体力学分支。试验室模拟可控制试验条件,现象可以重演,产生的流动具有典型性,有利于揭示复杂流动的本质和规律,成为主要的试验手段。试验研究的内容可分为基础性和应用性两种。基础性研究的对象是流动的基本现象和规律,如边界层、湍流结构、漩涡、分离流动、尾迹等。应用性研究主要为工程设计提供有关布局技术和流体动力数据。试验流体力学的基本理论是流动相似理论,它指明应如何在试验室条件下模拟或预演某种实际流动。试验模拟的主要设备是风洞、水洞、水槽等。

0.3.3 理论分析

理论分析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,预测未知的结果。理论分析的步骤大致如下:

(1)建立力学模型。即针对实际流体的力学问题,分析其中的各种矛盾并抓住主要方面,对问题进行简化而建立反映问题本质的“力学模型”。流体力学中最常用的基本模型有:连续介质、牛顿流体、不可压缩流体、理想流体、平面流动等。

(2)建立流体力学基本方程组并求解。针对流体运动的特点,用数学语言将质量守恒、动量守恒、能量守恒等定律表达出来,从而得到连续性方程、动量方程和能量方程。此外,还要加上某些联系流动参量的关系式(例如状态方程),或者其他方程。这些方程合在一起称为流体力学基本方程组。

(3)结果比对,确定结论条件。求出方程组的解后,结合具体流动,解释这些解的物理含义和流动机理。通常还要将这些理论结果同试验结果进行比较,以确定所得解的准确程度和力学模型的适用范围。

在流体力学理论中,用简化流体物理性质的方法建立特定的流体的理论模型,用减少自变量和减少未知函数等方法来简化数学问题,在一定的范围是成功的,并解决了许多实际问题。

对于一个特定领域,考虑具体的物理性质和运动的具体环境后,抓住主要因素、忽略次要因素进行抽象化(也同时是简化),建立特定的力学理论模型,便可以克服数学上的困难,进一步深入地研究流体的平衡和运动性质。

20世纪50年代开始,在设计携带人造卫星上天的火箭发动机时,配合试验所做的理论研究,正是依靠一维定常流的引入和简化,才能及时得到指导设计的流体力学结论。

此外,流体力学中还经常用各种小扰动的简化,使微分方程和边界条件从非线性的变成线性的。声学是流体力学中采用小扰动方法而取得重大成就的最早学科。声学中的所谓小扰动,就是指声音在流体中传播时,流体的状态(压力、密度、流体质点速度)同声音未传到时的差别很小。线性化水波理论、薄机翼理论等虽然由于简化而有些粗略,但都是比较好地采用了小扰动方法的例子。

每种合理的简化都有其力学成果,但也总有其局限性。例如,忽略了密度的变化就不能讨论声音的传播;忽略了黏性就不能讨论与它有关的阻力和某些其他效应。掌握合理的简化方法,正确解释简化后得出的规律或结论,全面并充分认识简化模型的适用范围,正确估计它带来的同实际的偏离,正是流体力学理论工作和试验工作的精华。

0.3.4 数值计算

从基本概念到基本方程的一系列定量研究,都涉及高深的数学方法,所以,流体力学的发展是以数学的发展为前提。那些经过试验和工程实践考验过的流体力学理论,又检验和丰富了数学理论,它所提出的一些未解决的难题,也是进行数学研究、发展数学理论的途径。

流体力学的基本方程组非常复杂,在考虑黏性作用时更是如此,如果不靠计算机,就只能对比较简单的情形或简化后的欧拉方程或N-S方程进行计算。20世纪30—40年代,对于复杂而又特别重要的流体力学问题,曾组织过人力用几个月甚至几年的时间做数值计算,比如圆锥做超声速飞行时周围的无黏流场就从1943年一直算到1947年。

随着数学的发展,计算机的不断进步,以及流体力学各种计算方法的发明,使许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性,这又促进了流体力学计算方法的发展,并形成了“计算流体力学”。

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是基于计算机技术的一种数值计算工具,用于求解流体的流动和传热问题。它是流体力学的一个分支,用于求解固定几何形

空间内的流体的动量、热量和质量方程以及相关的其他方程，并通过计算机模拟获得某种流体在特定条件下的有关数据。CFD 最早运用于汽车制造业、航天业及核工业，用离散方程解决空气动力学中的流体力学问题。

CFD 的基本思想是：把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场，用一系列有限个离散点上的变量值的几何来代替，通过一定的原则和方式建立起来的关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后代数方程组获得场变量的近似值。

CFD 方法和传统的理论分析方法、试验测量方法组成了研究流体流动问题的完整体系。理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性，各种影响因素清晰可见，是指导试验研究和验证数值计算方法的理论基础，但是它往往要求对计算进行抽象和简化，才可能得出理论解。对于非线性情况，只有少数流动才能给出解析结果。试验测量方法所得到的试验结果真实可信，它是理论分析和数值方法的基础，其重要性不容低估。然而，试验往往受到模型尺寸、流场流动、人身安全和测量精度的限制，有时可能很难通过试验的方法得到满意的结果。

而 CFD 方法恰好克服了前面两种方法的弱点，在计算机上实现一个特定的计算，就好像在计算机上做一个物理试验。例如，机翼的绕流，通过计算机并将其结果在屏幕上显示，就可以看到流场的各种细节：如激波的运动、强度，涡的生成与传播，流动的分离、表面的压力分布、受力大小及其随时间的变化等。数值模拟可以形象地再现流动情景，与做试验没有什么区别。

CFD 的计算方法主要有三种，即有限差分法、有限元法、有限体积法。计算流体力学是多领域交叉的学科，涉及计算机科学、流体力学、偏微分方程的数学理论、计算几何学、数值分析等学科。这些学科的交叉融合，相互促进和支持，也推动着这些学科的深入发展。

有限差分法是运用最早、最经典的 CFD 方法，它将求解域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域，然后将偏微分方程的导数用差商代替，推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。求出差分方程组的解，就是微分方程定解问题的数值近似解。它是一种直接将微分问题变成代数问题的近似数值解法。这种方法发展较早，比较成熟，较多的用于求解双曲型和抛物型问题。在此基础上发展起来的方法有 PIC(Particle-in-Cell)法、MAC(Marker-and-Cell)法，以及由美籍华人学者陈景仁提出的有限分析法(Finite-Analytic-Method)等。

有限元法是 20 世纪 80 年代开始应用的一种数值解法，它吸收了有限差分法中离散处理的内核，又采用了变分计算中选择逼近函数对区域进行积分的合理方法。有限元法因求解速度较有限差分法和有限体积法慢，因此，应用不是很广泛。在有限元法的基础上，英国 C. A. Brebbia 等提出了边界元法和混合元法等方法。

有限体积法是将计算区域划分为一系列控制体积，将待解微分方程对每一个控制体积进行积分，得出离散方程。有限体积法的关键是在导出离散方程过程中，需要对界面上的被求函数本身及导数的分布作出某种形式的假定。用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性，而且离散方程系数物理意义明确，计算量相对较小。它是目前 CFD 应用最广的一种方法。当然这种方法的研究和扩展也在不断地进行，有的学者提出了适用于任意多边形非结构网格的扩展有限体积法。

CFD 的研究过程通常包括以下步骤：

(1)建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型。具体地说,就是要建立反映问题各个量之间关系的微分方程及相应的定解条件,这是数学模型的出发点。没有正确完善的数学模型,数值模拟就没有任何意义。流体的基本控制方程通常包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程,以及这些方程相应的定解条件。

(2)寻求高效率、高准确度的计算方法,即建立针对控制方程的数值离散化方法,如有限差分法、有限元法、有限体积法等。这里的计算方法不仅包括微分方程的离散化方法及求解条件,还包括体坐标的建立,边界条件的处理等。这些内容可以说是 CFD 的核心。

(3)编制程序和进行计算。这部分工作包括计算网格划分、初始条件和边界条件的输入,控制参数的设定等。这是整个工作中花时间最多的部分。由于求解的问题比较复杂,比如 Navier—Stokes 方程就是一个十分复杂的非线性方程,数值求解方法在理论上不是绝对完善的,所以,需要通过试验加以验证。正是从这个意义上讲,数值模拟又叫作数值试验。

(4)显示试验的结果。计算结果一般通过图表等方式显示,这对检查和判断分析质量和结果有重要的意义。

虽然 CFD 具有许多的优点,但是也存在一定的局限性。第一,数值解法是一种离散近似的计算方法,依赖于物理上合理、数学上适用、适合在计算机上进行计算的离散的数学模型,且最终结果不能提供任何形式的解析表达式,只是有限个离散点上的数值解,并有一定的计算误差。第二,它不像物理模型试验一开始就能给出流动现象并定性的描述,往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些流动参数,并需要对建立的数学模型进行验证。第三,程序的编制及资料的收集、整理与正确利用,在很大程度上取决于经验和技巧。此外,因数值处理方法等原因有可能导致计算结果的不真实,例如,产生数值黏性和频散等伪物理效应。当然,某些缺点或局限性可以通过某种方式克服或弥补。最后,CFD 因涉及大量的数值计算,因此,需要较高的计算机软、硬件配置。



习题与思考

- 0-1 经典流体力学的发展过程中,都有哪些重要的理论?
- 0-2 现代流体力学的研究方法都包括什么?
- 0-3 什么是 CFD? CFD 研究流体力学的优点和缺点是什么?



1 流体静力学



学习要点

本章在讲述流体基本属性、流体主要物理力学性质及其表征方法和流体的连续介质模型的基础上，阐述了流体处于静止或相对静止状态下的力学规律及其在工程上的应用。包括：对流体的黏滞性进行推导，给出流体静压强的分布规律、压强的计算，以及作用在平面壁和曲面壁上的液体静压力，并推导流体平衡微分方程。

通过本章的学习，应掌握根据平衡条件求解静止流体中压强分布规律的方法，掌握点压强的计算；熟练求解作用在平面壁和曲面壁上的液体静压力，计算流体的内摩擦力大小，熟悉流体的黏性，流体平衡微分方程的推导和应用，流体的主要物理性质，流体的主要力学模型；了解液柱测压计和液体的相对平衡问题，以及图解法求解作用在平面上的液体静压力。

流体静力学是研究流体处于静止或相对静止状态下的力学规律及其在工程上应用的科学。静止分为绝对静止和相对静止两类。若选择地球为参照坐标系，流体质点相对地球而言没有运动，这种静止称为绝对静止，此时流体所受质量力只有重力。若流体质点相对于地球有运动，但流体质点之间并无相对运动，则称为相对静止。例如，以盛有流体的容器作为参照系，容器和其中的流体一起做匀加速运动，虽然此时系统相对于地球是运动的，但流体相对容器壁以及各流体之间均无相对运动。此时，相对静止的流体同时受到的质量力有两种，即重力和惯性力。

绝对静止和相对静止说明流体质点之间没有相对运动，黏滞力不起作用，所以，研究流体静力学必然采用无黏性流体的力学模型。

1. 1

作用在流体上的力

力是使固体和流体运动状态发生变化的外因。若研究一个固体的运动规律，则先要分析其受力情况。但流体具有流动性，受力后即发生形变，我们如何进行流体的受力分析？首先，要对作用在流体上的力进行新的定义。

人们通过对流体运动规律的观察，得到这样的认识：作用在流体上的力按作用方式分为两类，一种是作用在流体内部每一个质点(或微团)上的力，称之为质量力；另一种是作用在流体表面上的力，称之为表面力。

1.1.1 质量力

首先给出质点的概念：宏观看非常小，可视为空间的一个点；微观看又很大，每个质点包含足够多的分子并保持着宏观运动的一切特性。

质量力是作用在流体每一个质点或微团上的力，其大小与液体的质量成正比。质量力又称体积力。在均匀流体中，质量力与受作用流体的体积成正比。

按照这一定义，流体力学中常遇到的质量力有两种，即重力和惯性力。重力是地球对流体的吸引力，它作用在流体内部每一个质点上；惯性力则是流体做加速运动时，由于惯性而使流体质点受到的作用力。力包括三个要素：大小、方向和作用点，下面主要讨论质量力的大小。

如图 1-1 所示，在流体中选取任意流体质点 M ，在 M 点周围取一质量为 Δm 的微团，其体积为 ΔV ，设作用在该微团上的质量力为 $\Delta \vec{F}_B$ 。

则流体质点 M 所受到的质量力的大小可以用极限来表示：

$$\lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta \vec{F}_B}{\Delta m} = \vec{f} \quad (1-1)$$

$\vec{f}$ 称为作用在 M 点，单位质量的质量力，简称为单位质量力。

质量力的单位是牛顿(N)，单位质量力的单位按照上式为 N/kg ，其因次与加速度的因次相同，为 $[L/T^2]$ 。 L 为基本量纲长度， T 为时间。

M 点的单位质量力 $\vec{f}$ 为一个向量值，可以写为 $\vec{f} = (x, y, z)$ 。 x 、 y 、 z 是 $\vec{f}$ 在各轴向上的分力。为了给出单位质量力在各轴向上分力的数学表达式，继续假设流体中微团 Δm 所受到的质量力 $\Delta \vec{F}_B$ 在各轴向上的分力分别为 ΔF_{Bx} 、 ΔF_{By} 、 ΔF_{Bz} ，则单位质量力 $\vec{f}$ 在各轴向上的分力表示为：

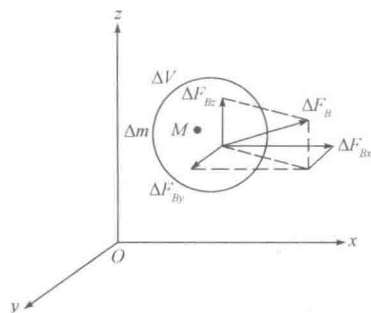


图 1-1 质量力的图示

$$\begin{cases} x = \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bx}}{\Delta m} \\ y = \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{By}}{\Delta m} \\ z = \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bz}}{\Delta m} \end{cases} \quad (1-2)$$

流体力学中碰到的一般情况是流体所受到的质量力只有重力,如图 1-2 所示。

此时,作用在微团 Δm 上的质量力 $\Delta \vec{F}_B$ 为该微团所受到的重力 $\vec{G}$,即 $\Delta \vec{F}_B = \vec{G}$ 。 $\vec{G}$ 的大小为 $G = \Delta mg$,方向为竖直向下。此时如图 1-2 所示,采用惯性直角坐标系, z 轴竖直向上为正,重力在各轴向上的分力即为质量力在各轴向上的分力。 $\Delta F_{Bx} = G_x = 0$, $\Delta F_{By} = G_y = 0$, $\Delta F_{Bz} = G_z = -\Delta mg$,代入单位质量力在各轴向上分力的表达式中,可以得到:

$$\begin{cases} x = \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bx}}{\Delta m} = \frac{G_x}{\Delta m} = 0 \\ y = \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{By}}{\Delta m} = \frac{G_y}{\Delta m} = 0 \\ z = \lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta F_{Bz}}{\Delta m} = \frac{G_z}{\Delta m} = -g \end{cases} \quad (1-3)$$

即 $\vec{f} = (x, y, z) = (0, 0, -g)$ (1-4)

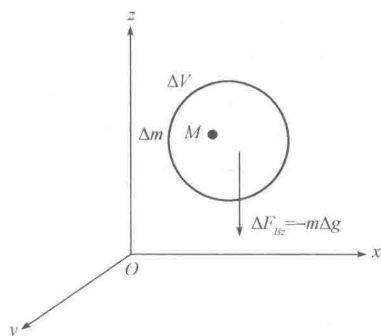


图 1-2 质量力仅为重力的示意图

1.1.2 表面力

作用在流体或分离体表面上的力称为表面力,表面力又称面积力或接触力。

表面力是指作用在流体中所取某部分流体体积表面上的力,也就是该部分体积周围的流体或固体通过接触面作用在其上的力。表面力是就所研究的流体系统而言的。它可能是周围同种流体对分离体的作用,也可能是另种相邻流体对其作用,或是相邻面的作用。考察对象的不同,表面力也会相应地发生变化。

如图 1-3(a)所示,以容器中的所有溶液作为研究对象时,表面力为自由面处的大气压力

及容器壁对流体的作用力。若从容器中的流体中取出分离体 A,如图 1-3(b)所示,作为研究对象,则分离体 A 所受到的表面力为其各表面所受到的压力。尽管流体内部任意一对相互接触的表面上,这部分和那部分流体之间的表面力是大小相等,方向相反,相互抵消的,但在流体力学里分析问题,常常从流体内部取出一个分离体,研究其受力状态,这时与分离体相接触的周围流体对分离体

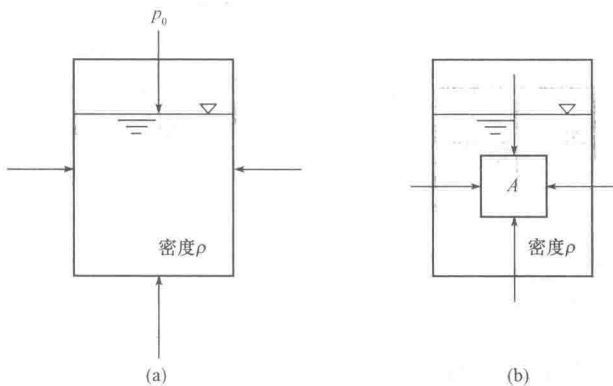


图 1-3 分离体示意图