



普通高等教育“十二五”规划教材

流体力学

主 编 刘竹青 程银才
副主编 刘方亮 杨忠国 朱永梅 朱士江



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

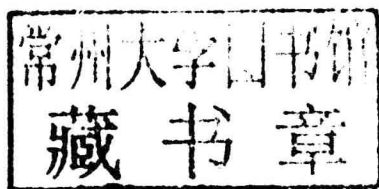


普通高等教育“十二五”规划教材

流体力学

主 编 刘竹青 程银才

副主编 刘方亮 杨忠国 朱永梅 朱士江



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是根据高等学校环境类和水利类专业流体力学课程教学基本要求,基于注重加强理论基础和能力的培养,适应流体力学技术的发展趋势而编写的,系统阐述了流体力学的基本概念、基本原理和基本方法。全书共分12章,主要内容包括:绪论,流体静力学基础,流体动力学基础,流动阻力和水头损失,孔口、管嘴出流和有压管流,明渠恒定流,堰流,渗流,泄水建筑物下游的水流衔接与消能,量纲分析和相似原理,流体测量,计算流体力学基础。

本书可作为高等学校环境类和水利类相关专业的流体力学或水力学课程的教材,也可供其他专业及有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学 / 刘竹青, 程银才主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 11
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0345-8

I. ①流… II. ①刘… ②程… 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(2012)第273519号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 流体力学
作 者	主编 刘竹青 程银才 副主编 刘方亮 杨忠国 朱永梅 朱士江
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.75印张 421千字
版 次	2012年11月第1版 2012年11月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

流体力学是高等学校环境类和水利类专业的一门重要工程基础类课程，既具有本学科的系统性和完整性，又具有鲜明的工程技术特性。本书注重加强理论基础和能力的培养，适应流体力学技术的发展趋势，阐述了流体力学的基本概念、基本原理和基本方法。主要以满足土木工程、建筑环境和设备工程、桥梁与渡河工程、水利水电工程等专业的需求为主，兼顾其他相近的需要。主要包括：绪论，流体静力学基础，流体动力学基础，流动阻力和水头损失，孔口、管嘴出流和有压管流，明渠恒定流，堰流，渗流，泄水建筑物下游的水流衔接与消能，量纲分析和相似原理，流体测量，计算流体力学基础。

本书由中国农业大学刘竹青教授和山东农业大学程银才副教授担任主编并统稿。参加编写工作的有哈尔滨理工大学刘方亮（第1、第2章）、黑龙江八一农垦大学杨忠国（第3、第4章）、山东农业大学朱永梅（第5、第6章）、东北农业大学朱士江（第7、第8章）、山东农业大学程银才（第9、第10章）、中国农业大学刘竹青（第11、第12章）。杨魏博士和研究生黄先北、刘继昂、丁向华、郭朝瑜、祈麟、宁立新等参与了部分资料整理工作。

由于编者水平所限，书中的疏漏和不足之处，恳请批评指正。

编者

2012年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学的应用及其分支	1
1.2 流体力学的发展史	2
1.3 流体力学的研究方法	4
习题	6
第 2 章 流体静力学基础	7
2.1 作用在流体上的力	7
2.2 流体的主要物理性质	10
2.3 流体的力学模型	20
2.4 流体静压强特性及分布规律	21
2.5 作用在平面上的液体静压力	35
2.6 作用在曲面上的液体静压力	41
习题	44
第 3 章 流体动力学基础	50
3.1 描述流体运动的两种方法	50
3.2 欧拉法中的一些基本概念	52
3.3 连续性方程	55
3.4 恒定元流能量方程	58
3.5 过流断面的压强分布	61
3.6 恒定总流能量方程式	64
3.7 能量方程的应用	67
3.8 总水头线和测压管水头线	70
3.9 恒定气流能量方程	71
3.10 总压线和全压线	74
3.11 恒定总流动量方程	76
习题	79
第 4 章 流动阻力和水头损失	83
4.1 沿程水头损失和局部水头损失	83
4.2 流动形态	85
4.3 圆管中的层流运动	88

4.4	紊流运动	91
4.5	尼古拉兹实验	96
4.6	工业管道阻力系数的计算	98
4.7	局部损失的计算	107
	习题	109
第5章	孔口、管嘴出流和有压管流	113
5.1	孔口、管嘴恒定出流和有压管流的基本概念	113
5.2	孔口、管嘴恒定出流的基本公式	114
5.3	短管出流	118
5.4	长管的水力计算	124
	习题	129
第6章	明渠恒定流	132
6.1	明渠的几何特性	132
6.2	明渠均匀流	134
6.3	明渠非均匀流	144
	习题	165
第7章	堰流	168
7.1	堰的类型及流量公式	168
7.2	薄壁堰	170
7.3	实用堰	171
	习题	179
第8章	渗流	180
8.1	渗流的基本概念	180
8.2	渗流的基本规律——达西定律	182
8.3	恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	184
8.4	普通井及井群的计算	187
8.5	用流网法求解平面渗流	194
	习题	197
第9章	泄水建筑物下游的水流衔接与消能	198
9.1	概述	198
9.2	下泄水流的衔接形式	200
9.3	底流式消能与衔接	204
9.4	挑流式衔接与消能	212
	习题	218
第10章	量纲分析和相似原理	221
10.1	量纲和量纲和谐原理	221
10.2	量纲分析法	223
10.3	相似理论基础	227
10.4	模型实验	232

习题	235
第 11 章 流体测量	237
11.1 黏度测量	237
11.2 压强测量	240
11.3 流速测量	243
11.4 流量测量	248
11.5 流动显示技术	253
习题	257
第 12 章 计算流体力学基础	258
12.1 CFD 概述	258
12.2 CFD 的分析过程	260
12.3 CFD 软件结构	261
12.4 CFD 应用实例	264
习题	270
习题答案	271
参考文献	276

第 1 章 绪 论

流体力学是一门既有较长历史又年轻活跃的学科。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。

1738 年雅各布·伯努利出版专著时，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。

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，力学体系可划分为三部分：

- (1) 研究受力以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) 研究受力以后仅发生微小形变的固体作为研究对象的固体力学。
- (3) 研究受力以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。

1.1 流体力学的应用及其分支

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，都大量使用了流体力学的知识。图 1-1 反映了流体力学的应用及其分支。

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 12s，标志着人类第一架飞行器的实现。人类的航空航天飞行始于 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。航空航天的发展与流体力学的发展史是密切相关的。流体力学在航空工程中应用学科的分支为空气动力学、气体动力学。

流体力学除了在航空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介质中的运动。

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。该学

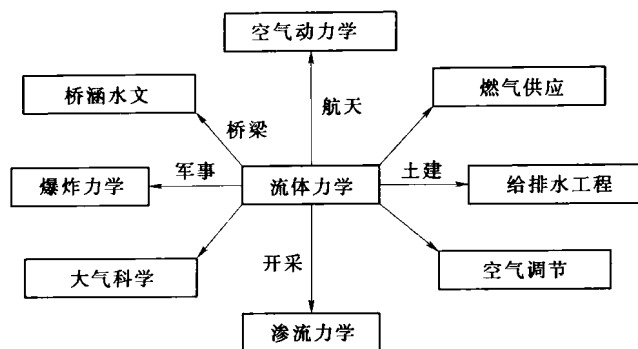


图 1-1 流体力学分支及应用

科是研究爆炸的发生和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，流体力学的应用则更加广泛。桥梁的风振、建筑外立面所受风力的计算、室内给排水系统中的水力计算、中央集中空调系统中空气的流动、燃气供应系统等相关问题，都需要使用流体力学作为工具来解决。

1.2 流体力学的发展史

1.2.1 流体力学的起源

在人类同自然界斗争和生产实践中，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。

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），他建立了浮力定律（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。

牛顿之后，丹尼尔·伯努利在 1726 年提出了“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，精心地安排了实验并加以分析，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实验工作，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实验测量进行流体运动定量研究的阶段。

1.2.2 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, 部分地采用归纳实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地发展。

1883 年, 雷诺通过自己设计的实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, 具有划时代意义。

1904 年, 路德维希·普朗特将 N-S 方程作了简化, 从推理、数学论证和实验测量等各个角度, 建立了边界层理论。可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在还不能求解 N-S 方程之前解决了阻力问题, 使人类实现飞行的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实验。

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实验室, 被称为航空航天大师。

以上的人和事件构成了近代流体力学的框架。

1.2.3 现代流体力学阶段

20 世纪 40 年代, 炸药或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和建立大型、精密的实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等甚为复杂问题中, 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。

1.3 流体力学的研究方法

流体力学的研究主要包括现场观测、实验模拟、理论分析、数值计算四个方面。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、表面上无关联的现象和实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实验室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，还须依靠实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实验室模拟进行研究。

1.3.1 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，因此影响了对流动现象和规律的研究。因此，人们通过实验室，使这些现象能在可控的条件下出现，以便于观察和研究。

流体力学离不开实验，尤其是对新的流体运动现象的研究。实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实验。

模型实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）以便进行实验。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实验。这时，模型实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。

1.3.2 实验模拟

现场观测是对已有现象的观测，而实验室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，实验模拟是研究流体力学的重要方法。

实验模拟主要用实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。实验室模拟可控制实验条件，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，成为主要的实验手段。实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、旋涡、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。实验流体力学的基本理论是流动相似理论，它指明应如何在实验室条件下模拟或预演某种实际流动。实验室模拟的主要设备是风洞、水洞、水槽等。

1.3.3 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实验结果进行比较,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,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,配合实验所做的理论研究,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实验工作的精华。

1.3.4 数值计算

从基本概念到基本方程的一系列定量研究,都涉及到高深的数学方法,所以流体力学的发展是以数学的发展为前提。那些经过实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。

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, 以下简称为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状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 有多种计算方法，而主要有三种：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。

CFD 的研究过程为：

- (1) 建立模型，并根据相关专业将问题用数学方法表达出来。
- (2) 利用 CFD 软件，对问题进行求解、分析。

从 20 世纪 60 年代起，在飞行器和其他涉及流体运动的课题中，经常采用电子计算机做数值模拟，这可以和物理实验相辅相成。数值模拟和实验模拟相互配合，使科学技术的研究和工程设计的速度加快。

习 题

- 1.1 经典流体力学发展的过程中，重要的理论都有哪些？
- 1.2 现代流体力学的研究方法都包括什么？
- 1.3 流体的两种流态及判定的准则是什么？

第2章 流体静力学基础

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，重力和惯性力。

绝对静止和相对静止说明流体质点间没有相对运动，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。

2.1 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，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每一个质点（或微团）上的力，称为质量力；另一种是作用在流体表面上的力，称为表面力。

2.1.1 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：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 2-1 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

$$\lim_{\Delta V \rightarrow M} \frac{\Delta \vec{F}_B}{\Delta m} = \vec{f} \quad (2-1)$$

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

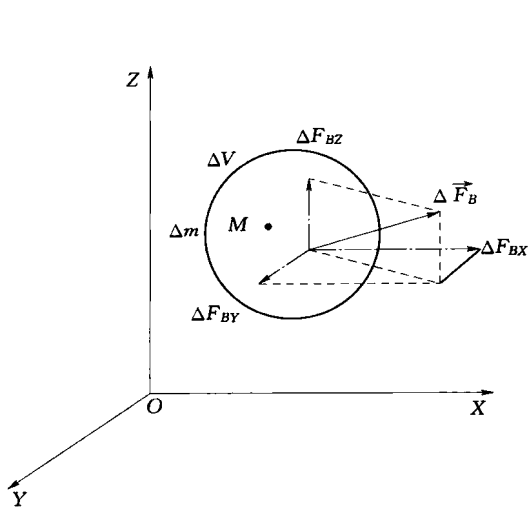


图 2-1 质量力的图示

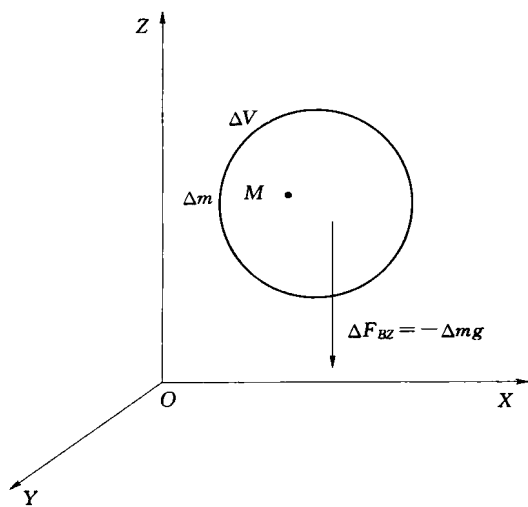


图 2-2 质量力仅为重力的图示

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

$$\begin{cases} X = \lim_{\Delta v \rightarrow M} \frac{\Delta F_{BX}}{\Delta m} \\ Y = \lim_{\Delta v \rightarrow M} \frac{\Delta F_{BY}}{\Delta m} \\ Z = \lim_{\Delta v \rightarrow M} \frac{\Delta F_{BZ}}{\Delta m} \end{cases} \quad (2-2)$$

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 2-2 所示。

此时，作用在微团 Δm 上的质量力 $\Delta \vec{F}_B$ 仅为该微团所受到的重力 $\vec{G}$ ，即 $\Delta \vec{F}_B = \vec{G}$ 。 $\vec{G}$ 的大小 $G = \Delta mg$ ，方向为竖直向下。此时如图 2-2 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。 $\Delta F_{BX} = G_x = 0$ 、 $\Delta F_{BY} = G_y = 0$ 、 $\Delta F_{BZ} = G_z = -\Delta mg$ ，带入单位质量力在各轴向上分力的表达式中，可以得到

$$\begin{cases} X = \lim_{\Delta v \rightarrow M} \frac{\Delta F_{BX}}{\Delta m} = \frac{G_x}{\Delta m} = 0 \\ Y = \lim_{\Delta v \rightarrow M} \frac{\Delta F_{BY}}{\Delta m} = \frac{G_y}{\Delta m} = 0 \\ Z = \lim_{\Delta v \rightarrow M} \frac{\Delta F_{BZ}}{\Delta m} = \frac{G_z}{\Delta m} = -g \end{cases} \quad (2-3)$$

即

$$\vec{f} = (X, Y, Z) = (0, 0, -g) \quad (2-4)$$

2.1.2 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。也可能是另一种相邻流体对其作用，或是相邻面的作用。考察对象的不同，表面力也会相应的发生变化。

如图 2-3 (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 2-3 (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。表面力是作用在所考虑的流体（或分离体）表面上的力。尽管流体内部任意一对相互接触表面上，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作用的内力又变成了作用在分离体表面上的外力。

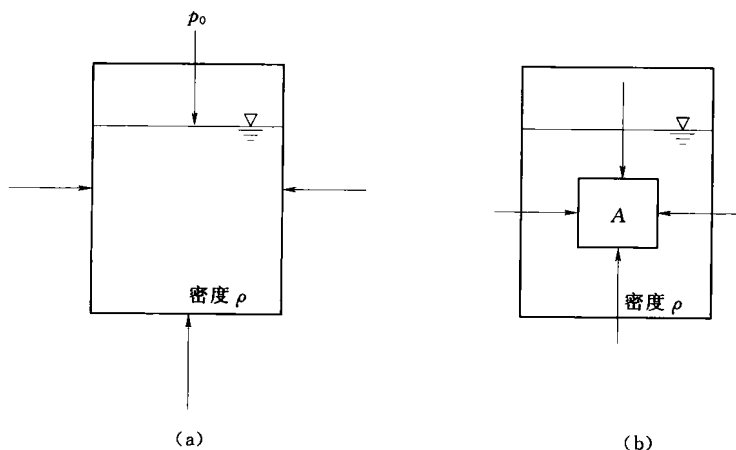


图 2-3 分离体示意图

为了表示表面力的大小，假设在流体分离体表面上，选取任意流体质点 A，如图 2-4 所示。

围绕 A 点任意取一微小面积 ΔA ，作用在 ΔA 上的表面力为 $\Delta \vec{F}_s$ 。 $\Delta \vec{F}_s$ 可以分解为法线方向的分力 ΔP 和切线方向的分力 ΔT 。因为流体内部不能承受拉力，表面法线方向的力 ΔP 只有沿内法线方向的压力。作用在微小面积 ΔA 上的平均压强 $\bar{P}$ 和平均切应力 $\bar{\tau}$ 分别表示为

$$\begin{cases} \bar{P} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{cases} \quad (2-5)$$

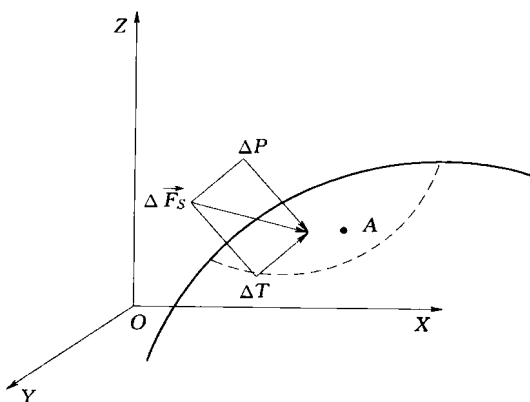


图 2-4 表面力示意图

点切应力的分力，即点压强和点切应力分别为

$$\begin{cases} P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{cases} \quad (2-6)$$

国际单位制中，压强和切应力的单位均为 N/m^2 ，因次为 M/LT^2 ， M 为质量因次。

2.2 流体的主要物理性质

流体的机械运动规律既取决于液体的外部因素，也受到流体自身物理性质的影响。

2.2.1 流动性

通常情况，有许多流体流动的实例，如空气的流动形成风，河流的流动等。这些现象表明了流体不同于固体的基本特征，就是它的流动性。

流动性是流体与固体的最显著的区别。流体没有一定的形状，不能承受拉力，静止时也不能承受剪切力，但流体的抗压能力较强。与固体比较，固体存在着抗拉、抗压和抗切三方面的能力。如果要将某一固体拉裂、压碎或切断，使其产生很大变形，必须加以足够的外力，否则是拉不裂、压不碎、切不断的。但是，流体则不相同，可以很容易地分裂、切断水体。

流体内部各质点不断地发生相对运动，这个性质称为流动性。

2.2.2 惯性

惯性是物体保持其原有运动状态的一种性质。表示某物体惯性大小的物理量是密度，密度的单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 。流体的密度是流体的重要属性之一，它表征流体在空间某点质量的密集程度。流体的密度定义为：单位体积流体所具有的质量，用符号 ρ 来表示。对于流体中各点密度相同的均质流体，其密度表示为

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V} \quad (2-7)$$

式中 $\bar{\rho}$ ——均质流体的密度， kg/m^3 ；

m ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

对于各点密度不同的非均质流体，在流体的空间中某点取包含该点的微小体积 ΔV ，该体积内流体的质量 Δm ，则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (2-8)$$

常见的密度（在一个标准大气压下）：4℃时的水 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ ，20℃时的空气 $\rho = 1.2 \text{kg/m}^3$ 。

对流体密度的描述也可以采用相对密度进行表示。流体的相对密度是指某种流体的密度与4℃时水的密度的比值，用符号 d 来表示。即

$$d = \frac{\rho_f}{\rho_w} \quad (2-9)$$