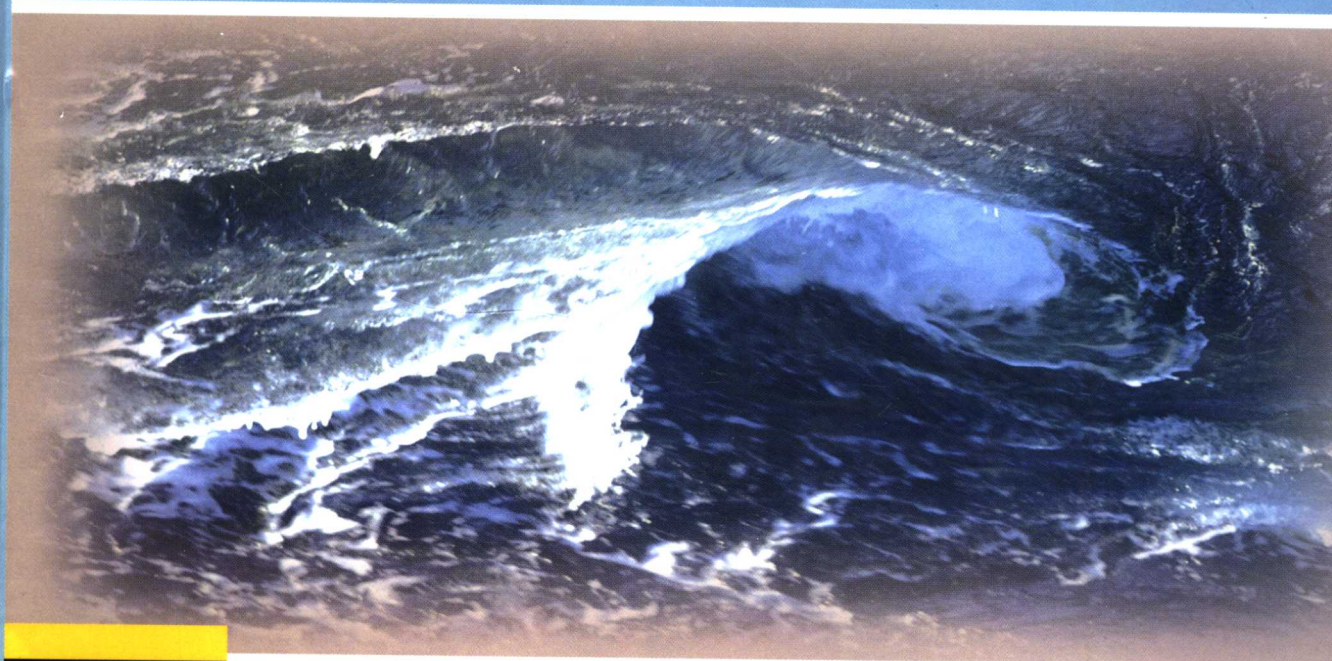


1111

交通版

高等学校土木工程专业规划教材

JIAOTONGBAN GAODENG XUOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



水力学

郭仁东 冯劲梅 吴慧芳 主编
高学平 主审



人民交通出版社

China Communications Press

交通版

高等学校土木工程专业规划教材

JIAOTONGBAN GAODENG XUEXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

水力学

Shui li xue

郭仁东 冯劲梅

吴慧芳

主编

高学平

主审



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书是全国土木工程专业指导委员会规划教材会议确定编写的统编教材之一。本书是为适应土木工程专业的课程设置需要,又考虑到满足其他专业教学要求而编写的一本中、学时的通用教材。本书将尽最大可能即达到本科教学的要求,又可用于报考硕士研究生的参考书。全书共十章,包括基本概念、原理和应用。基本原理包括不可压缩流体(液体)的基本性质、数学模型、运动学和动力学基本原理及相似原理。对于基本原理在各方面的具体应用,可根据不同专业选讲。各章都选配了典型例题、思考题和习题,并给出了部分习题答案,直接附于题后。其中有很多习题,对于继续深造和工程技术人员很有参考价值。

本书可作为工科院校土木工程、道路桥梁工程、市政工程、环境工程等专业用书,也可供有关工程设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学 / 郭仁东等主编. —北京:人民交通出版社,
2006.2
ISBN 7-114-05910-8

I.水… II.郭… III.水力学 IV.TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 004904 号

书 名:水力学
著 作 者:郭仁东 冯劲梅 吴慧芳
责任编辑:张征宇 赵瑞琴
出版发行:人民交通出版社
地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址:<http://www.ccpress.com.cn>
销售电话:(010)85285838, 85285995
总 经 销:北京中交盛世书刊有限公司
经 销:各地新华书店
印 刷:北京宝莲鸿图科技有限公司
开 本:787×1092 1/16
印 张:13.25
字 数:317 千
版 次:2006年2月 第1版
印 次:2006年2月 第1次印刷
书 号:ISBN7-114-05910-8
印 数:0001-3000册
定 价:24.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

交通版

高等学校土木工程专业规划教材

编委会

主任委员：阎兴华

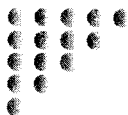
副主任委员：张向东 李岷昌 魏连雨 赵 尘

宗 兰 马芹永 段敬民 黄炳生

委 员：彭大文 林继德 张俊平 刘春原

党星海 刘正保 刘华新 丁海平

秘 书 长：张征宇



随着科学技术的迅猛发展、全球经济一体化趋势的进一步加强以及国力竞争的日趋激烈,作为实施“科教兴国”战略重要战线的高等学校,面临着新的机遇与挑战。高等教育战线按照“巩固、深化、提高、发展”的方针,着力提高高等教育的水平和质量,取得了举世瞩目的成就,实现了改革和发展的历史性跨越。

在这个前所未有的发展时期,高等学校的土木类教材建设也取得了很大成绩,出版了许多优秀教材,但在满足不同层次的院校和不同层次的学生需求方面,还存在较大的差距,部分教材尚未能反映最新颁布的规范内容。为了配合高等学校的教学改革和教材建设,体现高等学校在教材建设上的特色和优势,满足高校及社会对土木类专业教材的多层次要求,适应我国国民经济建设的最新形势,人民交通出版社组织了全国二十余所高等学校编写“交通版高等学校土木工程专业规划教材”,并于2004年9月在重庆召开了第一次编写工作会议,确定了教材编写的总体思路,于2004年11月在北京召开了第二次编写工作会议,全面审定了各门教材的编写大纲。在编者和出版社的共同努力下,目前这套规划教材已陆续出版。

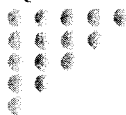
这套教材包括“土木工程概论”、“建筑工程施工”等31门课程,涵盖了土木工程专业的专业基础课和专业课的主要系列课程。这套教材的编写原则是“厚基础、重能力、求创新,以培养应用型人才为主”,强调结合新规范、增大例题、图解等内容的比例并适当反映本学科领域的新发展,力求通俗易懂、图文并茂;其中对专业基础课要求理论体系完整、严密、适度,兼顾各专业方向,应达到教育部和专业教学指导委员会的规定要求;对专业课要体现出“重应用”及“加强创新能力和工程素质培养”的特色,保证知识体系的完整性、准确性、正确性和适应性,专业课教材原则上按课群组划分不同专业方向分别考虑,不在一本教材中体现多专业内容。

反映土木工程领域的最新技术发展、符合我国国情、与现有教材相比具有明显特色是这套教材所力求达到的,在各相关院校及所有编审人员的共同努力下,交通版高等学校土木工程专业规划教材必将对我国高等学校土木工程专业建设起到重要的促进作用。

交通版高等学校土木工程专业规划教材编审委员会

人民交通出版社

2005年8月



本书是在全国高等学校专业调整后,由全国专业教学指导委员会规划教材会议指定编写,为适应土木工程、道路桥梁工程、市政工程和环境工程等专业不同学时需要而编写的专业基础课《水力学》教材。

《水力学》是一门专业基础课或技术基础课,高等数学、大学物理、工程力学是它的基础课,它又是许多工程专业课的基础知识,它也可直接用于解决工程实际问题。因此它是一门非常重要的通用的理工科课程。过去,由于知识体系过窄过细的限制,很多专业没有设置该课程。近年来,改革开放使我们有机会了解欧美国家的学科体系,专业调整后,使得中国的学科体系与世界接轨,《水力学》这门课程的设置也更加合理。希望更多的工程技术人员了解喜爱这门有趣的课程。

本书的研究对象是不可压缩的流体,其中主要的是液体。国际通用的《水力学》教材中所用的术语也与流体力学教材中使用的术语相同。如“流体静力学”、“流体运动学”、“流体动力学”等。从学科系统发展的观点看,水力学是属于流体力学范畴。尽管它的发展历史较长,但却是流体力学的一个分支。因此本书在论述基本原理部分,仍用“流体”这个名词。只不过是指出不可压缩的流体或液体。

本书是在编者多年教学讲义讲稿及科研成果的基础上尽量吸收国内外有关教材的优点,并应用已经成熟的近代数学方法编著而成的,形成了简洁全面的特色。

本书的编写体系,与以前大多使用的《水力学》教材体系有所不同。编写过程中,采用从一般到特殊的推理方法,即从自然界普遍适用的三维方程出发,再加以特定条件进行简化直到常用的一维流动。对于流体静力学部分数学模型的建立则从三维流体平衡微分方程出发,推导各种静止或相对静止条件下的流体静力平衡方程式。

编者认为第一章绪论中流体的物理力学性质,特别是流体的粘滞性及第二章流体静力学对初学者比较难于掌握,又因为它们都是各专业兴学内容,所以在本书中有针对性的增加一些例题及习题,讲解也更为详尽。

值得探讨的是计算机在流体力学中应用的问题。多年来有些教材插入

了计算机程序,但是计算机的程序语言更新的速度很快,这使所编教材的时效性受到了很大限制,因此计算机程序语言应放到计算流体力学一书中去,本书则不考虑编入计算机程序。全书共十章,由郭仁东、冯劲梅、吴慧芳主编。吴昊、杨明明、马建民参加了编写。郭仁东编写了第一章,马建民编写了第二章,吴慧芳编写了第三章、第四章,吴昊编写了第六章、第八章,冯劲梅编写了第七章、第九章,杨明明编写了第五章、第十章。全书由郭仁东老师统稿,吴昊老师对全书的插图进行了修改。

本书承蒙天津大学水力学研究所博士生导师高学平教授主审。高学平老师对本书的编写提出了大量宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

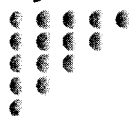
本书的出版还要感谢人民交通出版社的大力支持,感谢沈阳大学、上海应用技术学院、南京工业大学、南京林业大学诸多老师的大力支持。

由于编者水平有限,在书中难免会出现这样或那样的错误,希望读者批评指正。

编 者

2005年9月于沈阳

目录 MU LU



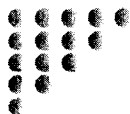
第一章 绪论	1
第一节 流体力学的任务、地位和学习方法	1
第二节 常用的流体力学模型	3
第三节 分析流体力学的理论基础	4
第四节 作用在流体上的力	5
第五节 流体的主要物理性质	7
思考题与习题	17
第二章 流体静力学	20
第一节 流体静压强的特性	20
第二节 流体平衡微分方程式	22
第三节 重力作用下流体平衡压强分布	24
第四节 静止流体对壁面的压力	28
第五节 流体在重力与其他质量力作用下的压强分布规律	32
第六节 浮力及物体的沉浮	34
思考题与习题	35
第三章 流体运动学	39
第一节 描述流体运动的两种方法	39
第二节 流体运动的基本概念	47
第三节 流体运动的分类	52
第四节 连续性微分方程	55
第五节 流体微团运动分析	57
第六节 无旋流动和有旋流动	61
思考题与习题	63
第四章 流体动力学	66
第一节 欧拉运动微分方程	66
第二节 理想流体恒定元流的能量方程	68
第三节 理想流体恒定元流能量方程的意义和应用	69

第四节	实际流体运动微分方程	71
第五节	实际流体元流与总流的能量方程	74
第六节	实际流体总流动量方程和动量矩方程	79
思考题与习题		83
第五章	相似性原理和量纲分析	86
第一节	量纲概念与量纲和谐定理	86
第二节	相似概念及基本内容	88
第三节	量纲分析和相似准则推导方法	90
第四节	模型律的应用举例	98
思考题与习题		101
第六章	流动阻力和能量损失	102
第一节	流动阻力和能量损失分类	102
第二节	雷诺实验及流态判别	103
第三节	均匀流动方程式	105
第四节	圆管中的层流运动	107
第五节	流体的紊流运动	109
第六节	紊流沿程阻力损失计算	112
第七节	局部阻力损失计算	118
思考题与习题		122
第七章	孔口管嘴和管路流动	125
第一节	孔口管嘴出流	125
第二节	短管的水力计算	130
第三节	长管、串联管和并联管水力计算	133
第四节	管网计算基础	138
第五节	有压管路中的水击	141
思考题与习题		145
第八章	明渠均匀流和非均匀流	148
第一节	明渠流的特点	148
第二节	明渠均匀流的计算公式	149
第三节	明渠水力最优断面和允许流速	151
第四节	明渠均匀流水力计算的基本问题	154
第五节	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	158
第六节	断面单位能量与临界水深	159
第七节	水跃	161
第八节	棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线分析、连接及计算	162
思考题与习题		168

第九章 堰流与闸下出流	170
第一节 堰流的定义、分类和基本公式	170
第二节 薄壁堰	171
第三节 实用断面堰	175
第四节 宽顶堰	176
第五节 桥孔过流水力计算	179
第六节 闸下出流	181
思考题与习题	183
第十章 渗流	184
第一节 渗流运动	184
第二节 渗流基本定律	184
第三节 地下水的均匀流和非均匀流	186
第四节 井和集水廊道	189
思考题与习题	196
参考文献	198

第一章 绪 论

DIYIZHANG



本书的研究对象是液体,因为具有代表性的液体是水,故书名为《水力学》。以学科系统发展的观点看,水力学是属于流体(包括气体和液体)力学范畴的,是流体力学的一个分支。因此本书在论述本原理中,仍用“流体”这个名词,只不过在本书中是指不可压缩流体——液体。

本章除阐明全书的概况,所研究的物理量的性质,物理模型,学习本学科的目的和任务外,着重阐述了本学科在科技发展和国民经济建设中的地位,以及学好本学科的基本方法。

第一节 流体力学的任务、地位和学习方法

一、流体力学研究的对象和任务

流体力学是研究流体静止(相对静止)和运动的力学规律及其在工程实际中应用的一门学科。因此,流体力学研究的对象是流体,流体力学研究的任务是如何很好地、有效地把流体静止和运动的力学规律应用到各个实际工程领域中去,改造大自然,造福于人类。

(一)流体

简言之,流体是流动的物质,液体和气体统称为流体。具有代表性的液体是水,具有代表性气体是空气(大气)。流体的基本特性是具有易流动性。所谓易流动性就是流体在静止时不能承受任何小的剪切力和拉力的性质。如果承受了剪切力和拉力,不管多么小,则静止状态就被破坏,易流动性是流体命名的由来。

(二)固体、液体、气体的不同点

1. 固体

固体有一定的体积和一定的形状,固体的运动方式只有平动和转动;固体按受力和变形关系分为塑性体和弹性体。一个给定的力,产生一定的变形,如果力撤除以后,产生永久变形的固体为塑性体;如果力撤除以后,变形立即消失的固体为弹性体。

2. 液体

液体有一定的体积而无一定的形状,液体不易被压缩,有自由表面,具有界面现象——表

面张力特性。

3. 气体

气体既无一定体积又无一定的形状,能够充满任意给定的空间,因而气体易于被压缩,没有自由表面,无界面现象——无表面张力特性。

4. 液体和气体的相同点

液体和气体的相同点是无一定的形状,均具有易流动性,它们除有固体的平动和转动外,更重要的是具有变形运动(线变形和剪切角变形运动)。

二、流体力学的地位

概括地说,流体力学是从人类同自然斗争中发展起来又去指导人类更好地改造自然为人类创造其幸福的一门学科。具体地说,流体力学的发展总是和尖端科学技术的发展联系在一起的,它是涉及各个领域应用极其广泛的技术基础学科。

自然界存在着的物质按集态分为三种状态——固体、液体和气体,这是依理论力学的划分方法;而依热力学方法可把物质划分为两大类:流体和固体(非流体)。流体包括液态和气态。这就是说,流体力学这一门学科就研究了自然界三态存物的两态。流体是人类永恒的伴侣,没有哪一个领域,哪一个部门,乃至个人能离开流体而存在的。所以研究流体静止和运动的力学规律及其应用的流体力学这门学科,在人类发展的历史长河中起着重要作用。航空航天技术的迅猛发展,人类征服宇宙空间事业的发展,都是以流体力学为基础理论学科的。

同时,流体力学与许多学科是相互渗透,相得益彰的,使这门古老的学科不断地获得新鲜血液,显得更富有青春和活力。

在高新技术、知识经济的今天,流体力学更加是流体工程、流体机械、热能、建筑、环保、航海、宇航、兵器、化工、冶金、水利、发电、石油、采矿、农林、轻工、气象、纺织、生物工程等领域的重要专业基础理论课之一,而对于市政工程、环境工程、土木工程、道路和桥梁工程等专业更是基础的基础。

综上所述,流体力学这一学科在我国社会主义四个现代化建设事业中,将发挥着更加重要的作用。

三、关于学好流体力学这门课的几点意见

1. 掌握从一般到特殊的学习方法

学习任何一门自然科学,都要善于掌握从一般到特殊的学习方法,都要抓住它的纲。这个纲就是从物体的机械运动的普遍规律出发,并考虑到所研究问题特点与规律所建立的一般形式基本方程组,再根据具体条件去分析具体问题。纲起着统帅的作用。这样学习,起点高,对问题认识深刻、全面,掌握了一般形的基本方程组,其他的派生方程只是基本方程在不同的条件下的简化应用。如此,才能抓住要领,使知识条理化、系统化。

2. 在掌握“三基”上下功夫

要认真看书,在掌握基本原理、基本概念和基本方法上下功夫。对这“三基”要反复思考、

理解。理解了的知识,才是自己的知识,才能应用。

3. 认真听课适当记笔记

自己认为是重点、难点的地方,以及老师对重点、难点的处理方法,对典型的课堂例题讲解,对老师分析问题的思路和解题的步骤,应该有所记录。这对学习大有好处。

4. 初步预习,有准备地听课

即使不能全面预习,对关键的较难的章节最好预习,才能有准备地、主动地听课。要把70%以上的精力放在看书学习上。书看懂了、理解了,理解了的知识才易于记忆。

5. 解题规范化,加强基本功

对于任何一门自然学科所精选的习题解,都应该看作是该学科的精华。讲课的老师不搞题海战术,要分析题型,精选作业题;学生对所留的作业,应认真分析归类,明确考核的知识点,掌握解题的思路和方法步骤,达到触类旁通举一反三的目的。

6. 要抄题做作业

一门自然学科的作业本,只有抄题做作业才能算是一本有价值的可参考的资料,这也是训练基本的手段之一。同时,要坚持用物理方法解题,尽量杜绝用算术方法解题的习惯。习题中所给的图要认真画在作业本上。解题时一定要注意各物理量的量纲和单位要和谐统一。

7. 重视实验,亲自动手做实验

认真做教学大纲规定的所有实验,每一个教学实验,都是对学过的基本理论的进一步理解、应用和升华;必须亲自动手做实验,一方面培养独立完成课业的能力,另一方面也为将来进行科学实验研究奠定基础。

第二节 常用的流体力学模型

所谓流体力学模型,是对所研究的实际流体的物理结构和物理性质进行科学的结合与实际的简化,以便推导出流体运动规律的数学表达式。

最基本的流体力学模型是连续介质力学模型,常用的还有不可压缩流体力学模型、理想流体力学模型和静止(相对静止)流体力学模型。

一、流体质点的连续介质模型

连续介质的假设(模型)是1753年瑞士物理学家欧拉首先提出的。他假设流体(液体和气体)充满着它所占据的一个空间体积,总是不留任何间隙的(其中没有真空的地方,也没有分子间的间隙和分的运动)连续体,这就是连续介质模型。这是对流体的物质结构进行了简化。它是最基本的,贯穿流体力学始终的力学模型。

连续介质模型具有下列性质。

(1)流体是连续分布的物质,它可以无限分割为具有均布质量的宏观微元体。这个微元体在宏观上无限小中,小到 $\delta V \rightarrow 0$,作为空间的一点,微观上无限大,其内部包含着巨量分子数

(气体: $2.69 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 分子), 满足数学统计平均量, 具有宏观属性;

(2) 在不发生化学反应和离解等非平衡过程的运动流体中, 微元体内状态服从热力学关系;

(3) 除了特殊面外, 流体的力学和热力学状态参数在时空中是连续分布的, 并且通常是无限可微的。

二、不可压缩流体的力学模型

对于液体和马赫数 $M < 0.3$ 的低速气流可忽略流体的压缩性和热胀性, 认为其体积(或密度)是不变的, 这称为不可压缩流体力学模型。因不计压缩性, 密度 $\rho = \text{常数}$, 使问题得到简化。

不可压缩流体力学模型是对流体的物理性质进行简化, 它是水力学研究的对象。

三、理想流体力学模型

所谓理想流体就是不考虑粘性作用的流体, 这种模型叫理想流体力学模型, 这也是对流体的物理性质进行简化。欧拉于 1775 年在他的著作《流体运动的一般原理》中, 首先提出理想流体的概念并建立了理想流体运动微方程——欧拉运动微分方程。

实际上, 一切流体都具有一定程度的粘滞性。提出理想流体力学模型的意义在于研究流体诸方程中, 不考虑令人头痛的粘性项, 从而使问题大大简化。

四、静止(相对静止)力学模型

所以要提出“静止”(相对静止)力学模型, 是因为在讨论流体静力学这部分内容时, 有人认为“研究流体静力学必然用无粘(理想)性流体的力学模型”, 编者认为可直接使用静止(相对静止)力学模型这一提法。因为无论是实际流体还是理想流体, 处于静止(相对静止)状态时, 流体的粘滞性无从显示, 作用在流体上的表面力只有压力。“流体静力学”一章理论分析和实验的结果是完全一致的。“流体静力学”是流体力学中独立完整, 而又严格符合实际的一部分内容, 这里的理论不需要实验修正。所得到的结论无论是对理想流体还是对实际流体, 无论对可压缩流体还是不可压缩流体, 都是适用的。为了避免概念上的模糊, 编者认为在“流体静力学”一章中, 还是应用“静止(相对静止)流体模型”为好。

第三节 分析流体力学的理论基础

自然界中所存在的一切物质的运动, 毫无例外地都遵循着质量守恒定律和能量守恒定律这两个普适定律, 流体运动也必然遵守这些定律。流体力学是研究流体(包括液体和气体)宏观机械运动的, 必然遵守牛顿力学定律。当考虑压缩性时, 还必然要遵循热力学第二定律。故而分析流体力学的理论基础是:

(1) 质量守恒定律(连续性方程);

(2) 能量守恒定律——热力学第一定律(能量方程式);

(3) 牛顿运动第二定律(由它导出动量守恒定理、动量矩守恒定理、动能定理等)。

上述这些定律既不以所讨论的流体的性质为转移, 又与所考虑的具体流动过程无关, 是一切流体、一切运动形式都必须遵循的。只要把上述定律应用于运动流体, 并考虑到流体具有易

流动性(变形)的特点,就得到了流体力学中的基本规律。再附加以流动的初始条件和流动区域边界上的边界条件,就完全确定了一个特殊的问题。

第四节 作用在流体上的力

一切流体只有在力(外力)的作用下,才能产生一定的运动状态(当然也包括静止在内)。外力是流体产生机械运动的外因,流体自身的特性是运动状态的内因。因此,流体在做机械运动的同时,在流体的内部各个质点之间必以一定的应力相互作用着。流体力学研究作用在流体上的力与运动状态的关系。本节介绍作用在流体上的力的分析方法和力的分类。

一、用截面分离法分析作用在流体上的力

流体是连续介质,运动时,各流体质点之间以一定的应力相互作用着,在研究作用在流体上的力时,必须把所要研究的那部分流体从其他流体中分离出来。一般用假想的截面从图1-1所示的流体中分离出一小块流体 ΔV ,根据等效力效应来分析流体 ΔV 上的力。外界作用在这块流体上的力按其作用方式不同,分为质量力和表面力两大类。

二、质量力

作用在所取流体 ΔV 体积微团上并且和质量 Δm 成正比的力叫质量力,用 ΔF_m 表示。 ΔF_m 与 ΔV 以外的流体存在无关。

常接触到的质量力有重力、离心惯性力、直线运动惯性力、静电力等。这里所说的质量力,一般指保守的质量力(只和始末位置有关,而和路径无关的力)。

1. 单位质量力(质量力强度)

有度量价值的是作用在单位质量上的质量力(也称为质量力强度),用 f 表示。

$$f = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_m}{\rho \Delta V} = \frac{dF_m}{\rho dV} \tag{1-1}$$

对均质流体有

$$f = \frac{F_m}{\rho V} \tag{1-2}$$

式中, $\Delta V(V)$ 为所有流体微团的体积(m^3);

$\Delta m = \rho \Delta V$ 为所取流体微团所有的质量; $\Delta F(F)$ 作用在 $\rho \Delta V(\rho V)$ 质量上的力。

在直角坐标系中有

$$f = f_x i + f_y j + f_z k \tag{1-3}$$

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{mx}}{\rho \Delta V} = \frac{dF_{mx}}{\rho dV} \\ f_y &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{my}}{\rho \Delta V} = \frac{dF_{my}}{\rho dV} \\ f_z &= \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{mz}}{\rho \Delta V} = \frac{dF_{mz}}{\rho dV} \end{aligned} \right\} \tag{1-4}$$

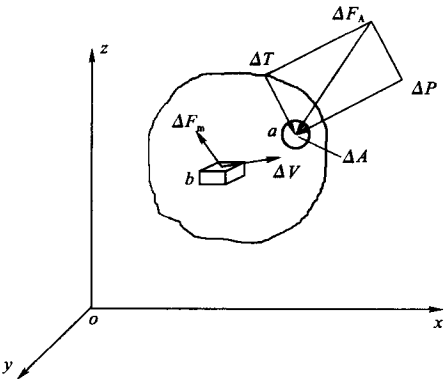


图 1-1 表面力和质量力

单位质量及其分量的单位是加速度单位,即 m/s^2 。

2. 质量力的合力和合力矩

$$\text{质量力的合力:} \quad F_m = \int_V f \rho dV \quad (1-5)$$

$$\text{质量力的合力矩:} \quad M = \int_V r \times f \rho dV \quad (1-6)$$

三、表面力

作用于分离体表面上且与表面积大小成正比例的力,称为表面力,用 $\Delta F_s (F_s)$ 表示。

表面力是接触力,可以是周围流体通过直接接触面而作用于分离体表面 A 上的力,也可以是作用于流体边界面(例如液体与固体或气体的接触面)上的力。如 1-1 所示,在分离体表面上取包含 a 点在内的微元面积 ΔA ,以 ΔF_s (表面力是矢量,因为表面面积是矢量,称为面积矢)表示。一般地与 ΔF_s 与 ΔA 斜交。在流体力学的分析中为了研究方便,把 ΔF_s 分解为两个分量:沿 ΔA 法线方向的 ΔP 和沿切线方向的 ΔT 。因为流体不能承受拉力, ΔP 一定指向 ΔA 的内法线方向。故 ΔP 为压力。作用在流体微团表面上的压力是有大小、有方向、有合力作用的矢量,它的大小和方向都与受压面密切相关。而 ΔT 为切向力。

1. 表面力的应力表示

作用在单位面积的表面力,称为表面力强度,在力学中称为应力。一般应力也有压应力和切应力两个分量。

(1) 压应力(压强)。单位面积上承受的压力称为压应力(压强)。对均匀分布的表面力,其大小为: $\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$

因为表面力是均匀分布的,所以 $\bar{p}$ 和 ΔA 的大小与位置无关。

对非均匀分的表面力,则定义

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-7)$$

(2) 切应力。如同定义点压强一样,当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时,此值 $\frac{\Delta T}{\Delta A}$ 的极限即为度量 a 点切向力强度,也叫切应力。即

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-8)$$

在国际单位制(SI)中,力的单位用牛顿(N),面积的单位平方米(m^2)所以压强和切应力的单位用帕斯卡($1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$)。

2. 表面力的合力和合力矩

(1) 压力的合力和力矩。在力学上,表面积是矢量,称面积矢。

$$dA = dA \cdot n$$

式中, n 是微元面积外法线方向上的单位向量。

所以合压力为

$$P = - \int_A p dA \cdot n = - \int_A p dA \quad (1-9)$$

合力矩

$$M = - \int_A r \times (pn) dA = - \int_A r \times p dA \quad (1-10)$$

(2)切力合力和合力矩。切力合力

$$T = \int_A \tau dA \cdot n = \int_A \tau dA \quad (1-11)$$

切力合力矩

$$M = \int_A r \times (\tau n) dA = \int_A r \times \tau dA \quad (1-12)$$

第五节 流体的主要物理性质

一、惯性

惯性是一切物体维持原有运动状态能力的性质,流体也不例外,也具有惯性。表征惯性的物理量是质量,用 m 表示。

密度是单位体积流体所具有的质量,它是描述流体质量在空间分布程度的物理量,用 ρ 表示。

均质流体

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-13)$$

非均质流体

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-14)$$

式中, m 是体积为 V 的流体内的质量; V 包含质量 m 的体积; Δm 是体积为 ΔV 微元体积内质量; ΔV 是包含质量 Δm 的流体微元体积; $\Delta V \rightarrow 0$ 表示微观无限大,宏观上无限小的质点。

在国际单位制中,密度的单位是 kg/m^3 。

二、重力特性

重力特性是物体(包括流体)受地球地心引力作用的性质,表征重力特性的是重量,用 G 表示。

1. 容重(重度)

容重是单位体积流体所具有的重量,它是描述流体质量在空间分布程度的物理量,用 γ 表示。

对均匀流体

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-15)$$

对非均质流体

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-16)$$

式中, γ 为流体的容重; G 为体积为 V 的流体所受的重量; V 为重量为 G 的流体的体积; ΔG 为