

GONGCHENG LIUTI LIXUE



普通高等教育土木类专业“十二五”规划教材



工程流体力学

●主 编 朱俊锋
●副主编 李一帆 梅 群



郑州大学出版社

GONGCHENG LIUTI LIXUE

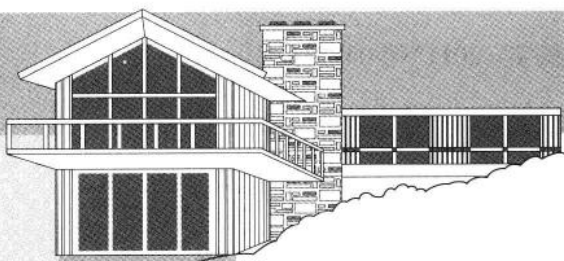


普通高等教育土木类专业“十二五”规划教材



工程流体力学

●主 编 朱俊锋
●副主编 李一帆 梅 群



郑州大学出版社

郑 州

内容简介

本书是根据高等学校土木工程专业的流体力学课程教学基本要求编写的,适用 50~60 学时讲授,内容也基本覆盖了注册结构工程师流体力学考试大纲内容。书中系统地阐述了工程流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用,内容包括:绪论,流体静力学,流体运动学,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,明渠流动,堰流和渗流。书后附有习题参考答案和主要专业术语中英文名词对照。本书可以作为高等学校土木工程、给水排水等专业的教材,也可以作为其他相近专业的教材和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/朱俊锋主编. —郑州:郑州大学出版社,2011.9

(普通高等教育土木类专业“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5645-0420-5

I. ①工… II. ①朱… III. ①工程力学:流体力学-高等学校-教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 047135 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路40号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南地质彩色印刷厂印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:20.75

字数:494 千字

版次:2011 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

印次:2011 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-0420-5

定价:35.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

本书作者

主 编 朱俊锋

副 主 编 李一帆 梅 群

编 委 (以姓氏笔画为序)

韦晓娅 朱俊锋 李一帆 梅 群

前 言

工程流体力学是普通高等学校土木工程等专业的—门重要技术基础课。本书是依据教育部高等学校土木工程专业教学指导委员会关于土木工程专业培养方案,结合当前教学实际情况为普通高等学校土木工程专业流体力学课程编写的教材,适用于 50~60 学时,也可以作为给排水工程、建筑环境与设备工程等相关专业的教材,教材内容基本覆盖了全国注册结构工程师流体力学考试大纲内容。

本书根据土木工程专业的需要,系统地介绍了工程流体力学的基本概念、基本理论和基本工程应用。在编写过程中注意加强理论基础,注重能力培养,力求做到思路清晰、物理概念明确、重点突出和理论联系实际。为了便于读者自学,巩固基础理论和提高分析解决实际问题的能力,各章都精选了一定数量的例题、思考题和习题,其中习题包括单项选择题和计算题。为了便于应用,书后附有各章计算题的参考答案。本书在编写过程中参考了有关书籍,从主要参考文献中引用了部分习题,在此向有关作者和出版社表示衷心的感谢。

全书共 9 章,主编朱俊锋,副主编李一帆、梅群。具体编写分工如下:第 4 章、第 6 章、第 8 章由朱俊锋编写,第 3 章、第 5 章由李一帆编写,第 2 章、第 7 章韦晓娅编写,第 1 章、第 9 章由梅群编写。全书由朱俊锋统稿。

由于编者水平有限,书中不妥之处恳请读者批评指正。

编者

2010 年 12 月于河南科技大学

目录

CONTENTS

▷▷▶ 1

第1章 绪论	1
1.1 工程流体力学的任务及其发展简史	1
1.2 流体质点和连续介质模型	5
1.3 作用在流体上的力	6
1.4 流体的主要物理性质	8
第2章 流体静力学	23
2.1 流体静压强的特性	23
2.2 流体平衡微分方程	26
2.3 重力场中液体静压强的分布规律	30
2.4 流体压强的量测	35
2.5 静止液体作用在平面上的总压力	41
2.6 静止液体作用在曲面上的总压力	47
第3章 流体运动学	62
3.1 流体运动的描述方法	62
3.2 流体运动的若干基本概念	67
3.3 流体运动的连续性方程	79
3.4 流体微团运动分析	85
第4章 流体动力学基础	97
4.1 流体运动微分方程	97
4.2 恒定元流伯努利方程	106
4.3 恒定总流伯努利方程	112
4.4 恒定总流动量方程	123
第5章 流动阻力和水头损失	140
5.1 流动阻力和水头损失的分类	140
5.2 黏性流体的两种流态	142

5.3	沿程水头损失与切应力的关系	147
5.4	圆管中的层流运动	150
5.5	紊流运动	154
5.6	紊流的沿程水头损失	161
5.7	局部水头损失	174
第6章	孔口、管嘴出流和有压管流	189
6.1	孔口出流	189
6.2	管嘴出流	196
6.3	短管水力计算	199
6.4	长管水力计算	204
6.5	有压管道中的水击	213
第7章	明渠流动	230
7.1	概述	230
7.2	明渠均匀流	233
7.3	无压圆管均匀流	244
7.4	明渠流动状态	250
7.5	水跃和水跌	259
第8章	堰流	270
8.1	堰和堰流分类	270
8.2	堰流基本公式	272
8.3	宽顶堰溢流	275
8.4	薄壁堰溢流	279
8.5	实用堰溢流	283
第9章	渗流	288
9.1	概述	288

9.2 渗流达西定律	292
9.3 恒定渐变渗流	296
9.4 井的渗流	298

习题参考答案	310
--------------	-----

主要专业词汇中英文对照	315
-------------------	-----

参考文献	322
------------	-----

第 1 章 绪 论



本章是工程流体力学的开篇,主要概述有关工程流体力学的研究对象和研究方法等一些基本知识,重点内容包括流体的流动性,连续介质模型,作用在流体上的力,以及流体的主要物理性质。这些基本知识是学习工程流体力学的理论基础,要求重点掌握。

1.1 工程流体力学的任务及其发展简史

1.1.1 工程流体力学的任务

工程流体力学是力学的一个分支,是研究流体的平衡和宏观机械运动规律及其在工程实际中应用的一门科学。该定义概括了以下 3 方面的内容。

1.1.1.1 工程流体力学的研究对象

工程流体力学的研究对象是流体,包括液体和气体。流体最基本特征是具有流动性,所谓流动性是指流体受切向力作用发生连续变形的性质。流体在静止时不能承受切向力作用以抵抗剪切变形,任何微小的切向力作用,都会使流体产生连续不断的变形,这种连续不断的变形从宏观上看即为流动。流体的流动性是流体区别于固体的根本标志。

固体与流体相比,其区别主要在于:①固体有一定的体积和形状,而流体不能保持固定的形状,其形状随容器形状的改变而改变;②固体能够承受一定数量的拉力、压力和切向力作用,而流体几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形。其原因在于固体的分子间距离非常小,而内聚力很大,因此固体能够保持固定的形状和体积,当外力作用在固体上时,固体将产生一定量的变形,当变形至一定程度时,其内部的变形将阻止继续变形。而流体由于分子间距离较大,内聚力很小,几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形,在任何微小切向力作用下,流体都会产生连续不断的变形,因此流体不能保持固定的形状,其形状随容器形状的改变而改变。

液体与气体相比,其区别主要在于:①液体有一定的体积,存在一个自由液面;而气体能充满任意形状的容器,没有一定的体积,不存在自由液面。②气体易于压缩,而液体难于压缩。其原因在于液体分子间的内聚力要比气体分子间的内聚力大,液体分子间的距离相对较小,液体虽然不能保持固定的形状,但是能够保持比较固定的体积。另外,液体的压缩性和膨胀性都很小,在很大的压力作用下,其体积变化很小。而气体既没有固定的



形状,也没有固定的体积,非常容易压缩和膨胀,能够任意扩散直到充满其所占据的有限空间。

1.1.1.2 工程流体力学的研究内容

工程流体力学所研究的基本内容主要包括三大部分:一是关于流体平衡的规律,它研究流体处于静止状态时,作用于流体上的各种力之间的关系,各种受力平衡规律及其在实际工程中的应用,这一部分称为流体静力学;二是关于流体运动的规律,它研究流体在运动状态时作用于流体上的力与运动要素之间的关系,以及流体的运动特性与能量转换等,这一部分称为流体动力学;三是关于流体静力学与流体动力学在工程中的应用,如孔口与管嘴出流、管道恒定流动、明渠恒定流、堰流、渗流等。

1.1.1.3 工程流体力学的研究目的

工程流体力学研究目的在于工程应用。工程流体力学作为力学的一个分支,已经广泛应用于土木工程的各个领域。例如在建筑工程中,研究风对高耸建筑物的荷载作用时需要以工程流体力学为理论基础,进行基坑排水、地基抗渗稳定处理时有赖于水力的分析和计算;在公路和桥梁工程中,路基的沉陷、崩塌、滑坡、排水,桥梁、涵洞等的修建都与流体密切相关;在给排水工程中,给排水系统的设计和运行控制有赖于工程流体力学;在建筑环境与设备工程中,供热、通风、空调设计和设备选用也有赖于工程流体力学。

1.1.2 工程流体力学发展简史

同其他自然科学一样,工程流体力学也是随着生产实践而发展起来的,它一方面依赖于长期的生产实践和科学检验,另一方面又受到科技的发展和社会等因素的影响与制约。其发展经历了最初的古典流体力学与实验流体力学两个体系并存但互不联系的阶段,逐步发展到理论与实验相结合的阶段。目前已经是理论分析、实验模拟与数值计算相结合的新发展阶段。

(1)第一阶段(16世纪以前) 工程流体力学形成的萌芽阶段。

人类对流体力学的认识是从治水、灌溉、航行等方面开始的。

公元前2286年~公元前2278年,大禹治水采用疏壅导滞,表明当时人们已经认识到,治水必须“顺水之性”。

春秋战国和秦朝时代,为了灌溉的需要,公元前256年~公元前210年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大灌溉渠道;特别是公元前250年左右,在四川成都开始修建的都江堰工程中,设置了平水池和飞沙堰,并总结了“深淘滩,低作堰”。所有这些都反映了当时人们对明渠水流和堰流流动规律等已有一定的认识,并居于世界领先水平。

公元前485年开始修建的京杭大运河,形成于隋代,发展于唐宋,最终在元代成为沟通海河、黄河、淮河、长江、钱塘江五大水系、纵贯南北的水上交通要道,极大改善了我国南北运输的条件,运河多处使用的船闸,充分表明了我国劳动人民在建设水利工程方面的聪明才智。

东汉初年(约公元31年)杜诗发明了水排,利用山溪水流带动鼓风机转动,进行鼓风



炼铁,其水力装置原理即是近代水轮机的先驱,早于欧洲一千多年。

古代的计时工具——铜壶滴漏,就是利用孔口出流使铜壶的水位发生变化来计算时间的,说明当时人们对孔口出流的规律已有一定的认识。

明朝水利专家潘季驯(1521~1595)提出了“筑堤防溢流,建坝减水,以堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的治黄原则。

清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

最早从事流体力学现象系统研究并使之成为学科的是古希腊的哲学家和物理学家阿基米德(Archimedes,前287~前212),他在公元前250年左右写的《论浮体》一书中首次提出了著名的浮力定律,奠定了流体静力学的基础。此后,直到15世纪的文艺复兴时期以前,没有形成系统的流体力学理论。15世纪末以后,在城市建设、航海和机械工业发展需求的推动下,人们对流体运动规律的认识不断深入。

(2)第二阶段(16世纪文艺复兴以后~18世纪中叶) 流体力学成为一门独立学科的基础阶段。

15世纪末16世纪初,由意大利开始的文艺复兴,使工程流体力学长期停滞不前的局面有所改变。16世纪初,意大利物理学家达·芬奇(Leonardo da Vinci,1452~1519)在观察和实验的基础上写了《论水的流动和水的测量》一文,探讨了孔口泄流和不可压缩流体恒定流的质量守恒连续性原理。

1650年,法国数学家、物理学家帕斯卡(Pascal,1623~1662)通过现场测量,提出了流体静力学的基本关系式,建立了流体中压强传递的帕斯卡定律。

1686年,牛顿(Newton,1642~1727)通过分析和实验,在《自然哲学的数学原理》一书中提出了牛顿内摩擦定律,为建立黏性流体运动方程组创造了条件。

1738年,瑞士物理学家、数学家伯努利(Bernoulli,1700~1782)对孔口出流和变截面管流进行了细致的观测,在名著《流体动力学》中提出了不可压缩理想流体运动的能量方程——伯努利方程。

1753年,瑞士数学家、物理学家欧拉(Euler,1707~1783)提出了流体力学中一个带根本性的假设,即把流体视为连续介质;1755年,又提出了流体运动的描述方法——欧拉方法和理想流体运动方程——欧拉运动方程,首先用微积分的数学分析方法来研究流体力学的问题,为理论流体力学的发展开辟了新的途径,奠定了古典流体力学的基础。

(3)第三阶段(18世纪中叶~19世纪末) 流体力学沿着理论与实验并重两个方向发展阶段。

1783年,法国数学家、天文学家拉格朗日(Lagrange,1736~1813)在总结前人工作的基础上,提出了另外一种描述流体运动的方法——拉格朗日法,首先引进流函数的概念,并首先获得理想流体无旋流动所应满足的动力学条件,提出求解这类流体运动的方法,进一步完善了理想流体无旋流动的基本理论。

1823年,法国工程师纳维(Navier,1785~1836)和1845年,英国数学家、物理学家斯托克斯(Stokes,1819~1903)分别用不同的假设和方法,建立了不可压缩实际流体的运动方程——纳维—斯托克斯运动方程(简称N-S方程),提供了研究实际流体运动的基础。

1847年,英国物理学家、生理学家亥姆霍兹(Helmholtz, 1821~1894)用数学形式表达出一般的能量守恒原理;1858年,他将流体质点的运动分解为平动、变形和旋转,提出了亥姆霍兹速度分解定律,推广了理想流体的研究范围,对工程流体力学的发展有很大影响。

与此同时,为了解决生产实际问题,实验流体力学逐步发展起来。在这方面做出代表性研究成果的学者主要有毕托(Pitot, 1695~1771)、文丘里(Venturi, 1746~1822)、谢才(Chezy, 1718~1798)和曼宁(Manning, 1816~1879)等人。他们主要是从大量实验和实际观测数据中总结一些实用的经验关系式,并利用简化的基本方程进行数学分析,建立各运动要素之间的定量关系。

1883年,英国工程师、物理学家雷诺(Reynolds, 1842~1912)在圆管中进行了一系列的流体流动实验,发现流体流动有两种形态:层流和紊流及其判别准则。1895年,雷诺又引入紊流应力的概念,建立了不可压缩实际流体的紊流运动方程,又称雷诺方程,为紊流的理论研究提供了基础。

(4)第四阶段(20世纪初~) 流体力学飞跃发展阶段。

19世纪末到20世纪中叶,随着生产和科技的迅速发展,所遇到的工程流体力学问题越来越复杂,不能单靠理论或实验来解决问题,要求理论和实验相结合,这导致了古典流体力学和实验流体力学相结合,形成了现代流体力学。

1904年,德国工程师、力学家普朗特(Prandtl, 1878~1953)将实验与理论流体力学很好地结合起来,创立了边界层理论。这一基本理论建立了理想流体研究和实际流体研究之间的内在联系,对流体力学的发展具有划时代的意义。

1912年,匈牙利工程师卡门(Karman, 1881~1963)发现了卡门涡街现象,研究了卡门涡街的稳定性。

1933年,德国工程师尼古拉兹(Nikuradze, 1894~1979)对采用人工粗糙的管道进行了系统的测定工作,为补充边界层理论,推导紊流的半经验公式提供了可靠的依据。

1947年,美国研制出第一台电子计算机,以计算机为工具的数值计算方法得到迅速发展,成为流体力学的第三种研究方法。

目前,数值计算方法和数值模拟在工程流体力学中得到了广泛的应用,对工程流体力学的发展起着日益重要的作用。

1.1.3 工程流体力学的研究方法

工程流体力学与其他学科一样,其研究方法一般有理论分析方法、实验研究方法和数值模拟方法。

1.1.3.1 理论分析方法

理论分析方法是根据工程实际中流动现象的特点和物质机械运动的普遍规律,提出合理的理论模型,建立流体运动的基本方程和定解条件,然后运用各种数学方法求出方程的解。理论分析方法的关键在于提出理论模型,并且能够运用数学方法求出揭示流体运动规律的理论结果。理论分析方法的优点在于能够明确给出各种物理量和运动要素之间



的变化关系,有较好的普遍适用性。缺点在于因为数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解,能得出解析解的数量有限。

1.1.3.2 实验研究方法

实验研究方法是通过具体流动的观察和测量,来认识流体运动的规律。实验研究在工程流体力学中占有极为重要的地位,它是理论分析结果正确与否的最终判决。工程流体力学的实验研究主要包括以下三个方面。

(1)原型观测 对工程实践中的流体运动,直接进行观测。

(2)系统实验 在实验室内对人工流动现象进行系统的观测研究,从中找出规律性。

(3)模型实验 是在实验室内,以流动相似理论为指导,将实际工程缩小为模型,通过在模型上预演相应的流体运动,得出在模型中的流体运动规律。然后,再根据相似关系换算为原型的结果,以满足工程实践的需要。

实验研究方法的优点在于能够直接解决实际当中的复杂问题,并能发现新现象和新问题,它的结果可以作为检验其他方法是否正确的依据。缺点在于对于不同情况,需要做不同的实验,所得结果的普遍适用性差。

1.1.3.3 数值模拟方法

数值模拟方法是在计算机应用的基础上,采用各种离散化方法(有限差分法、有限单元法、有限分析法、边界元法等)将流体力学中一些难以用解析方法求解的理论模型离散为各种数值模型,通过计算机进行数值计算和数值实验,求得定量描述流体运动规律的数值解。

数值模拟方法的优点在于许多采用分析法无法求解的问题,通过数值模拟方法可以得出它的数值解。近几十年来,这一方法得到很大发展,已经形成另外一门学科——计算流体力学。

1.2 流体质点和连续介质模型

1.2.1 问题的提出

流体力学的研究对象是流体,从微观角度来看:流体是由大量的分子构成的,这些分子都在做无规则的热运动,分子间是离散的,存在空隙,流体的物理量(比如密度、压强和速度等)在空间的分布是不连续的。又由于分子运动的随机性,在空间任一点上,流体的物理量随时间的变化也是不连续的,因此以分子作为流动的基本单元来研究流体的运动是非常困难的。

现代物理学的研究表明:在标准状态下, 1 cm^3 的水中,大约有 3.3×10^{22} 个水分子,相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{ cm}$; 1 cm^3 气体大约有 2.7×10^{19} 个分子,相邻分子间的距离约为 $3.2 \times 10^{-7}\text{ cm}$ 。可见,分子间的距离是非常微小的,在很小的体积当中,就包含有大量的分子。



宏观上,一般工程中所研究的流体的空间尺度要比分子距离大得多,工程流体力学主要是研究流体的宏观机械运动规律,也就是大量分子统计平均的规律性。

1.2.2 流体质点

所谓流体质点是指尺度大小同一切流动空间相比微不足道,但又含有大量分子,具有一定质量的流体微元体。流体质点具有以下特点。

(1)宏观尺寸非常小 流体质点可以小到肉眼无法观察、工程仪器无法量测的程度,用数学用语来表述即流体质点所占据的宏观体积极限为零,简记为 $\lim \Delta V \rightarrow 0$ 。远小于所研究问题的特征尺度,使得其平均物理量可以看成是均匀的。

(2)微观尺寸足够大 流体质点的体积远大于流体分子之间的间距,在流体质点内任何时刻都包含有大量、足够多的分子,使得在统计平均后能够得到其物理量的确定值,个别分子运动参数的变化不会影响质点总体的统计平均特性。

1.2.3 连续介质模型

连续介质模型是工程流体力学中第一个具有根本性的假说,是由瑞士数学家和力学家欧拉在 1753 年首先提出来的。该模型将流体看做连续介质,认为流体是由无数个彼此间没有孔隙,完全充满所占空间的流体质点所组成的连续体。

一方面,提出连续介质模型是有必要的,根据连续介质模型,流体运动的物理量在流体中的分布是连续的,可以将流体的各物理量看做空间坐标和时间变量的连续函数,这样就能够运用数学分析中的连续函数分析法来研究流体运动问题。

另外一方面,提出连续介质模型也是合理的,因为流体分子间的间隙极其微小,可以把它看做连续介质。

实践证明,连续介质模型的提出,给研究分析流体力学问题带来极大的方便,解决一般工程中的流体力学问题具有足够的精度。经过长期实践检验,证明该模型是合理的、正确的,在工程流体力学的发展史上起了非常重要的作用。

需要指出的是,连续介质模型并不是适用于任何情况,也有一定的适用范围。连续介质模型对于一般的流动是合理和有效的,但对于某些特殊问题,例如研究导弹、卫星等在高空稀薄气体中飞行时,由于稀薄气体分子之间的距离非常大,已经能够和飞行器的特征尺寸相比拟,连续介质模型不再适用。本书只讨论符合连续介质模型的流体。

其实连续介质模型对于学过固体力学的读者来说并不陌生,在材料力学和弹塑性力学中,都是把受力构件看做是连续介质来研究其应力与应变规律的。可以说,连续介质模型是固体力学和流体力学等许多分支学科共同的理论基础。

1.3 作用在流体上的力

力是造成物体机械运动的原因,流体无论处于静止状态还是运动状态,都是由于承受各种力作用的结果。因此,要研究流体机械运动的规律,需要分析作用在流体上的各种

力。作用在流体上的力,按其作用方式可以将其分为表面力和质量力两大类。

1.3.1 表面力

表面力是通过直接接触,作用在所取流体表面上,其大小与受作用的流体表面积成正比的力。它是流体内部相邻流体之间或者其他物体与流体之间相互作用的结果。压力、切向力、摩擦力等都是表面力。

因为流体不能够承受拉力,所以表面力可以分解为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切向力。

在静止流体中任取一隔离体,如图 1.1 所示,设 A 为隔离体表面上任一点,在隔离体表面上包含 A 点取一微小面积 ΔA 。假定作用在 ΔA 上的总表面力为 ΔF_s ,它可以分解为与作用面垂直的法向压力 ΔP 和与作用面平行的切向力 ΔT ,则作用在微元面积 ΔA 上的平均压应力 $\bar{p}$ 和平均切应力 $\bar{\tau}$ 分别为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.1)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1.2)$$

根据连续介质模型,如果微元面积 ΔA 无限缩小到中心点 A ,则 A 点的压应力和切应力分别为

$$p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.3)$$

$$\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1.4)$$

在国际单位制(SI)中,压应力、切应力的单位均为 Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

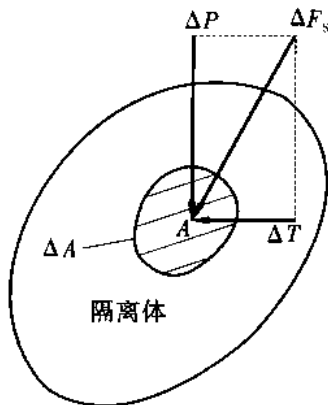


图 1.1 隔离体表面受力分析

1.3.2 质量力

质量力是指作用于所取流体体积内每个质点上,其大小与受作用的流体质量成正比



的力。对于均质流体,质量力与受作用的流体体积成正比,所以质量力又称为体积力。在工程流体力学中,最常见的质量力有两种:重力和惯性力。

在工程流体力学中,质量力的大小用单位质量力来表示。所谓单位质量力是指单位质量流体所受到的质量力。单位质量力的单位是 m/s^2 ,与加速度单位一致。

设某一均质流体的质量为 m ,所受的质量力为 F ,则单位质量力为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1.5)$$

假定质量力 F 在直角坐标系中各坐标轴的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力在相应坐标轴上的投影分别为

$$X = \frac{F_x}{m}, Y = \frac{F_y}{m}, Z = \frac{F_z}{m} \quad (1.6)$$

则单位质量力的矢量可以表示为

$$f = X i + Y j + Z k \quad (1.7)$$

式中 i, j, k 分别为 x, y, z 三个坐标轴方向的单位矢量。

如果作用在流体上的质量力只有重力,如图 1.2 所示,则质量力在三个坐标轴上的投影分别为

$$F_x = 0, F_y = 0, F_z = -mg \quad (1.8)$$

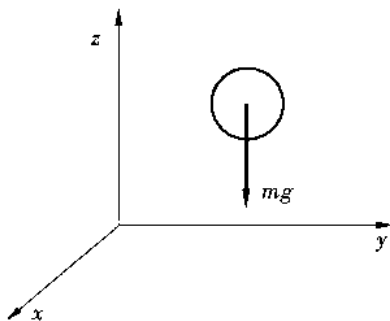


图 1.2 质量力仅有重力

相应地,在质量力只有重力作用时,单位质量力为

$$X = \frac{F_x}{m} = 0, Y = \frac{F_y}{m} = 0, Z = \frac{F_z}{m} = -g \quad (1.9)$$

式中 负号表示重力的方向是铅垂向下的,与坐标轴 z 的方向相反。

1.4 流体的主要物理性质

流体运动的形态和规律,除了与外部因素(例如边界条件、动力条件等)有关外,还取决于流体本身的物理性质。流体的物理性质是决定流体流动状态的内在因素,是研究流体机械运动的基本出发点和依据。在工程流体力学中,与流体运动有关的主要物理性质主要有以下几个方面。

1.4.1 惯性

惯性是物体保持其原有运动状态的性质。流体与其他任何物体一样具有惯性。质量是惯性大小的度量,质量越大,惯性就越大,其运动状态就越难改变。

1.4.1.1 密度

单位体积所具有的流体质量称为流体的密度,用符号 ρ 来表示。

对于均质流体,设其体积为 V ,质量为 m ,则它的密度定义为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.10)$$

式中 ρ ——流体的密度;

m ——体积为 V 的流体质量;

V ——质量为 m 的流体体积。

对于非均质流体,各点的密度不一样,要确定空间某点流体的密度,可以在该点周围取一微元体积 ΔV ,假定它的质量为 Δm 。根据连续介质模型,有

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.11)$$

式中 Δm ——包含该点微小体积 ΔV 中的流体质量;

ΔV ——质量 Δm 所占体积。

流体的密度随温度和压强的变化而变化。实验表明,液体的密度随温度和压强的变化很小,一般情况下可以视为常数,例如在工程计算中,通常取水的密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$,水银的密度为 $13\,600\text{ kg/m}^3$ 。

在一个标准大气压(101 325 Pa)条件下,不同温度下水的密度见表 1.1,几种常见的流体密度见表 1.2。

表 1.1 在标准大气压时不同温度下水的密度

(单位: kg/m^3)

温度/ $^{\circ}\text{C}$	0	4	10	20	30	40
密度	999.87	1 000.00	999.73	998.23	995.67	992.24
温度/ $^{\circ}\text{C}$	50	60	70	80	90	100
密度	988.07	983.24	977.78	971.83	965.28	958.38

表 1.2 在标准大气压下几种常见流体的密度

(单位: kg/m^3)

流体名称	空气	水银	酒精	汽油	四氯化碳	海水
温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	20	20	15	20	15
密度	1.20	13 550	799	700 ~ 750	1590	1 020 ~ 1 030