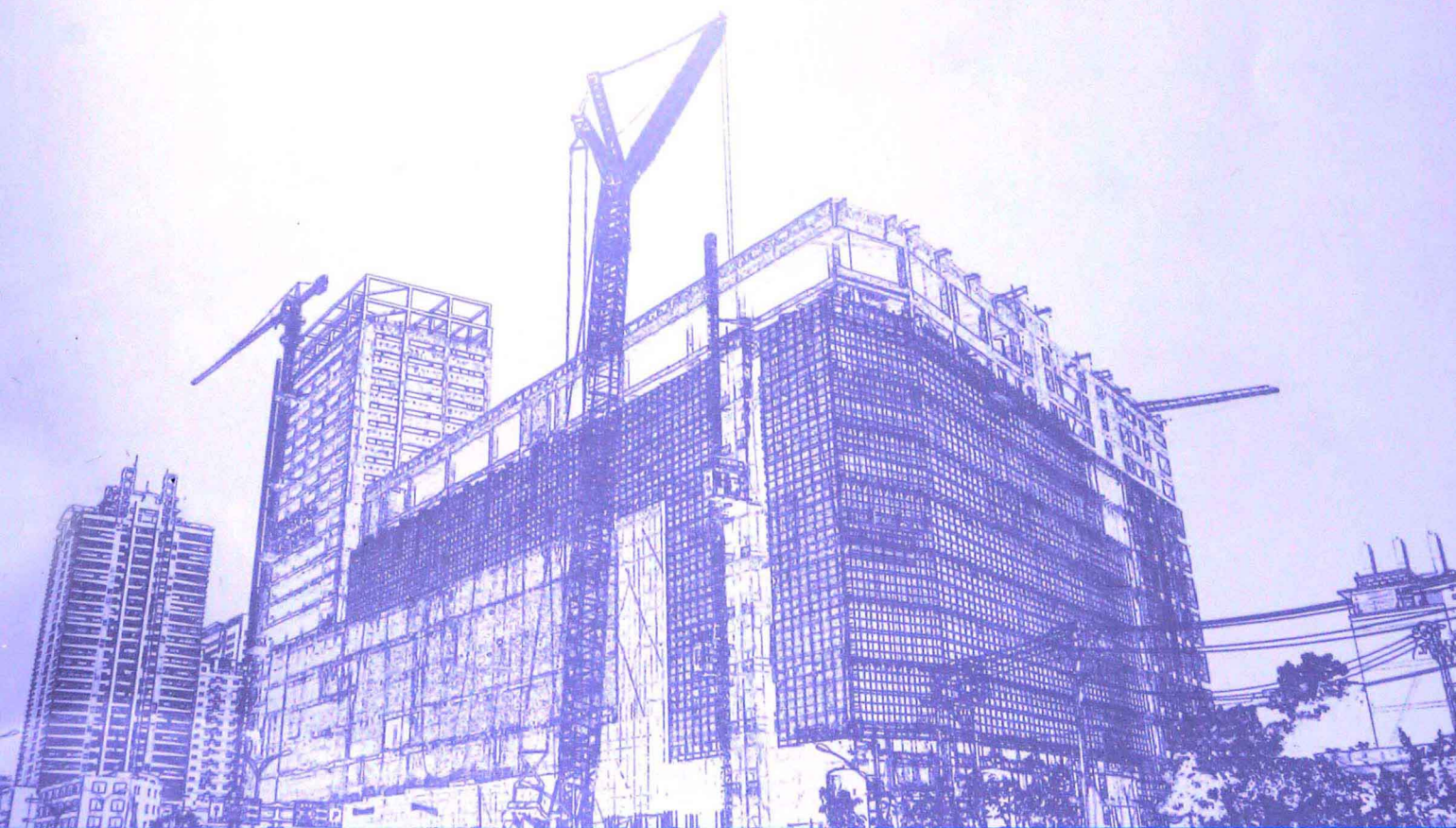




普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

# 流体力学

主编 方达宪 张红亚  
主审 李玉柱



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

# 流体力学

主 编 方达宪 张红亚  
副主编 周 琦 王艳华  
主 审 李玉柱



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

流体力学/方达宪,张红亚主编. —武汉:武汉大学出版社,2013.9

普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

ISBN 978-7-307-10879-0

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 111872 号

责任编辑:曲生伟      责任校对:刘小娟      装帧设计:吴 极

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu\_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉鑫泰和印务有限责任公司

开本:850×1168      1/16      印张:15      字数:413 千字

版次:2013 年 9 月第 1 版      2013 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-10879-0      定价:29.00 元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

# 普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材 编审委员会

(按姓氏笔画排名)

顾问:干 洪 朱大勇 任伟新 张伟林 程 桦 颜事龙

主任委员:丁克伟 徐 颖 高 飞

副主任委员:戈海玉 方达宪 孙 强 杨智良 陆 峰 胡晓军

殷和平 黄 伟

委员:马芹永 王 睿 王长柏 王佐才 韦 璐 方诗圣

白立华 刘运林 关 群 苏少卿 李长花 李栋伟

杨兴荣 杨树萍 肖峻峰 何夕平 何芝仙 沈小璞

张 洵 张 速 张广锋 陈 燕 邵 艳 林 雨

周 安 赵 青 荣传新 姚传勤 姚直书 袁文华

钱德玲 倪修全 郭建营 黄云峰 彭曙光 雷庆关

总责任编辑:曲生伟

秘 书 长:蔡 巍

# 特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

## 课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

## 课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

**基本数字教学资源网站链接:**<http://www.stmpress.cn>

# 前言

本书是为“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”而编写的教材。依据高等学校土木工程专业本科指导性专业规范,以“必需、够用”为度,主要从流体力学课程的基础地位出发,教材编写内容兼顾与其他课程的联系性,基本覆盖了注册结构工程师流体力学考试大纲的全部范围。

本书在编写过程中,为保证内容的完整性,对明渠流动的水面线分析、堰流等内容都有较详细的介绍,考虑到土木工程中较少涉及气流问题,舍去了一元气体流动的相关内容。因此,在选择本教材时,考虑到专业方向、各院校定位、培养目标的差异和学时数的不同,各专业主讲教师在具体教学中可根据具体情况,对讲述内容进行取舍。

本书共分为9章,主要内容包括绪论;流体静力学;流体动力学基础;流动阻力与能量损失;孔口、管嘴出流和有压管流;明渠流动;堰流;渗流;量纲分析和相似原理。

本书由安徽新华学院方达宪、安徽建筑大学张红亚担任主编;铜陵学院周琦、安徽新华学院王艳华担任副主编;安徽新华学院潘争伟、黎勇秀、黄远明、卜松担任参编。全书由王艳华统稿。

具体编写分工为:

安徽新华学院,方达宪(第1章、第3章);

安徽建筑大学,张红亚(第4章);

铜陵学院,周琦(第5章);

安徽新华学院,王艳华(第6章);

安徽新华学院,潘争伟(第2章);

安徽新华学院,黎勇秀(第7章);

安徽新华学院,黄远明(第8章);

安徽新华学院,卜松(第9章)。

清华大学李玉柱教授担任本书主审,并对本书的编写提出了许多宝贵的意见,在此表示感谢。

由于时间紧迫,加之编者学识所限,尽管做出了很大努力,书中难免有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2013年3月

# 目录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| <b>1 绪论</b>              | 1  |
| 1.1 流体力学的任务与研究对象         | 2  |
| 1.2 流体力学发展简史及在相关工程中的应用   | 3  |
| 1.3 流体的主要物理力学性质          | 5  |
| 1.4 作用在流体上的力             | 11 |
| 1.5 流体力学的研究方法、课程性质、目的和要求 | 12 |
| 知识归纳                     | 13 |
| 独立思考                     | 14 |
| 习题                       | 14 |
| 参考文献                     | 16 |
| <b>2 流体静力学</b>           | 17 |
| 2.1 静止流体中应力的特性           | 18 |
| 2.2 流体平衡微分方程             | 20 |
| 2.3 重力作用下流体静压强的分布规律      | 22 |
| 2.4 压强的测量                | 29 |
| 2.5 流体的相对平衡              | 30 |
| 2.6 静止液体作用在平面上的总压力       | 32 |
| 2.7 静止液体作用在曲面上的总压力       | 37 |
| 知识归纳                     | 41 |
| 独立思考                     | 42 |
| 习题                       | 43 |
| 参考文献                     | 47 |
| <b>3 流体动力学基础</b>         | 48 |
| 3.1 流体运动的描述方法            | 49 |
| 3.2 欧拉法的基本概念             | 50 |
| 3.3 连续性方程                | 55 |
| 3.4 恒定总流的伯努利方程           | 58 |
| 3.5 恒定总流的动量方程            | 72 |
| 知识归纳                     | 75 |
| 独立思考                     | 76 |
| 习题                       | 77 |
| 参考文献                     | 81 |
| <b>4 流动阻力与能量损失</b>       | 82 |
| 4.1 流动阻力与水头损失的分类         | 83 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 4.2 均匀流沿程水头损失与切应力的关系 .....  | 85         |
| 4.3 流体运动的两种流态 .....         | 87         |
| 4.4 圆管层流运动 .....            | 90         |
| 4.5 紊流运动的特征 .....           | 92         |
| 4.6 紊流的沿程水头损失 .....         | 96         |
| 4.7 局部水头损失 .....            | 105        |
| 4.8 边界层概念与绕流阻力 .....        | 109        |
| 知识归纳 .....                  | 112        |
| 独立思考 .....                  | 113        |
| 习题 .....                    | 114        |
| 参考文献 .....                  | 117        |
| <b>5 孔口、管嘴出流和有压管流 .....</b> | <b>118</b> |
| 5.1 孔口恒定出流 .....            | 119        |
| 5.2 管嘴恒定出流 .....            | 121        |
| 5.3 短管的水力计算 .....           | 123        |
| 5.4 长管的水力计算 .....           | 128        |
| 5.5 管网水力计算基础 .....          | 134        |
| 5.6 有压管道中的水击 .....          | 139        |
| 知识归纳 .....                  | 143        |
| 独立思考 .....                  | 144        |
| 习题 .....                    | 145        |
| 参考文献 .....                  | 148        |
| <b>6 明渠流动 .....</b>         | <b>149</b> |
| 6.1 概述 .....                | 150        |
| 6.2 明渠恒定均匀流 .....           | 152        |
| 6.3 无压圆管均匀流 .....           | 159        |
| 6.4 明渠恒定非均匀流 .....          | 161        |
| 知识归纳 .....                  | 175        |
| 独立思考 .....                  | 176        |
| 习题 .....                    | 176        |
| 参考文献 .....                  | 178        |
| <b>7 堰流 .....</b>           | <b>179</b> |
| 7.1 堰流的定义及分类 .....          | 180        |
| 7.2 堰流的基本公式 .....           | 181        |
| 7.3 薄壁堰 .....               | 182        |
| 7.4 实用堰 .....               | 184        |
| 7.5 宽顶堰 .....               | 184        |
| 7.6 小桥孔径水力计算 .....          | 188        |
| 知识归纳 .....                  | 190        |
| 独立思考 .....                  | 191        |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 习题 .....                 | 191 |
| 参考文献 .....               | 192 |
| <b>8 渗流</b> .....        | 193 |
| 8.1 概述 .....             | 194 |
| 8.2 渗流基本定律 .....         | 194 |
| 8.3 恒定无压渗流 .....         | 198 |
| 8.4 井的渗流 .....           | 201 |
| 8.5 集水廊道 .....           | 206 |
| 8.6 渗流对建筑物安全稳定的影响 .....  | 207 |
| 知识归纳 .....               | 209 |
| 独立思考 .....               | 209 |
| 习题 .....                 | 210 |
| 参考文献 .....               | 211 |
| <b>9 量纲分析和相似原理</b> ..... | 212 |
| 9.1 量纲 .....             | 213 |
| 9.2 量纲分析法 .....          | 216 |
| 9.3 相似理论基础 .....         | 220 |
| 9.4 模型实验 .....           | 225 |
| 知识归纳 .....               | 228 |
| 独立思考 .....               | 228 |
| 习题 .....                 | 228 |
| 参考文献 .....               | 229 |



# 绪 论

## 课前导读

---

### □ 内容提要

本章主要介绍流体力学及其课程的发展、流体的基本概念、流体的物理力学性质以及流体力学的三大模型假设、作用在流体上的力，以及流体力学的研究方法、课程性质等内容。

### □ 能力要求

通过本章内容的学习，学生应理解流体的主要物理力学性质（流动性、密度和重度、黏性、压缩性和膨胀性）；掌握牛顿内摩擦定律、作用在流体上的力（质量力与表面力）；掌握连续介质模型、理想流体模型和不可压缩流体模型的概念。

## 1.1 流体力学的任务与研究对象

流体力学是研究流体的平衡和机械运动规律及其应用的一门实用技术科学,是力学的一个分支。

流体力学可以划分为三个分支学科:

① 流体静力学,是研究静止流体的一门力学,主要有流体处于静止(或相对平衡)状态时,内部的一些特性以及作用于流体上各种力之间的关系,如流体间的相互作用力、流体对固体表面的作用力等。

② 流体运动学,处理的是速度及流线,但不考虑力或者能量。

③ 流体动力学,考虑速度和加速度与流体运动时所受的力之间的关系。

常将流体运动学和流体动力学两者共同考虑,统称为流体动力学,它研究流体运动时,作用于流体上的力和运动之间的关系,即流体运动特性和能量转换等,如管流、明渠流动、堰流、孔口管嘴出流、渗流问题等。

### 1.1.1 流体力学的研究对象

流体力学的研究对象是流体,包括液体和气体。

自然界的物质一般有三种存在形式:固体、液体和气体。液体和气体统称为流体,流体区别于固体的最基本的特征是它具有流动性。何谓流动性,这就需要比较固体、液体与气体间的不同。固体由于分子间的距离比较近,分子间的引力大,可以保持固有的形状和体积;在受到外荷载作用下,理想的弹性体发生变形,但外荷载一旦除去,此弹性体必恢复到其原先的状态;若是理想的塑性体,在受到外荷载作用下发生变形,在材料不发生破坏的情况下,只要外荷载一直存在,变形就会持续下去,除掉荷载时,变形随即停止,但不能恢复到原先的状态;而多数介于这两种之间,属弹塑性材料,具有一定的体积和形状,不易变形,可承受压力,也能承受拉力及各种复杂应力,以及抵抗变形。液体分子间距离较固体小,但比气体大,其分子间内聚力可将液体维系在一起,不会无限制地膨胀,具有一定的体积,相对地不容易压缩。而气体分子间的距离比液体大得多,很容易压缩,当外部无限制时,气体会无限制地膨胀,只有在完全封闭的状态下才是平衡的,即此时才具有一定的体积。流体只能承受压力,几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形,在任何微小切应力作用下,流体很容易发生变形和流动。

流体的这种在微小剪切力作用下,连续变形的特性,称为流动性。所以,流体就是在剪切外力作用下会发生流动的物体,它不能在承受剪切力的同时,使自己保持静止状态。我们经常以水和空气作为流体的两种典型代表来说明相关问题。

流体作为物质存在的基本形式,必须遵循一些普遍规律,如牛顿的力学定律、质量守恒定律和能量守恒定律等。所以,流体力学中基本定理实质上就是这些普遍规律在流体力学中的具体体现和应用,那么,物理学和理论力学的知识是学习流体力学的必要基础,必然会用到数学上相关的函数的知识,需同研究固体的力学规律一样对材料进行某种假定。

### 1.1.2 连续介质模型

如前所述,流体是由分子组成的,分子之间是有间隙的,所以流体并不是连续的,那么,基于流体的各种物理量实际上也应该是不连续的。这样,就没办法用数学的手段和方法来分析流体的各种

规律。流体力学研究的是流体的宏观运动规律,不涉及流体内部分子运动(特别情况下例外)的微观运动,亦即流体分子间的距离与生产上需要的研究的尺度相比是极其微小的,提出将流体可当作是由无数流体质点所组成的无间隙的连续体。

瑞士科学家欧拉(Leonhard Euler)在1755年首先提出了连续介质模型的概念,对流体力学的发展起着巨大的作用。流体质点可表述为:宏观尺寸非常小,大小同一切流动空间相比微不足道,认为宏观体积极限为零,但微观尺寸足够大,含有大量分子,具有一定质量的这么一个“点”。连续介质模型即假设流体是一种由流体质点组成的内部无间隙的连续体。这样就可以将基于流体上的物理量视为空间坐标和时间变量的连续函数,采用数学分析方法来研究流体运动。

在流体力学中经常用到的另一个概念是流体微元,它是具有一定微小体积、含有大量流体质点的流体单元,可以分析它的受力以及变形特征,当流体微元的体积充分小并以某坐标点为极限时,流体微元就是处于这个坐标点上的流体质点。

连续介质模型在流体的宏观分析中有着重要意义,用于一般流动是合理有效的,但在某些情况下,就不再适用了,需另行处理,如:高空稀薄气体的运动,由于空气稀薄,不能满足在一个流体质点内含有足够多流体分子的条件;高速掺气水流中产生气泡,不再是连续体,等等。

## 1.2 流体力学发展简史及在相关工程中的应用

### 1.2.1 流体力学的发展历史

流体力学的发展跟其他学科一样,依赖于生产实践和科学实验,并受科学发展社会因素的制约,从最初的经验总结到慢慢形成系统理论,继而形成一个学科。

中国古代就有许多利用流体力学规律解决实际问题的例子:相传我国远古时期就有大禹治水,疏通江河;战国时期(秦昭王时期)李冰父子在四川岷江上兴建的都江堰,至今仍发挥着作用,所总结的“深淘滩、低作堰”反映了当时人们对明渠水流和堰流有了一定的认识;还有京杭大运河、铜壶滴漏等无一不是利用流体力学规律的实例。流体力学作为一门学科是以公元前250年左右阿基米得(Archimedes)的浮力理论为标志的,被认为是真正奠定了流体静力学的基础。但是,直到15世纪达·芬奇(Leonardo Di Ser Piero Da Vinci, 1452—1519)之前,人们对流动的认识并没有多大长进。达·芬奇是意大利文艺复兴时期的美术家、自然科学家、哲学家,他做了很多实验,研究并思考了波、管流、水力机械、鸟的飞翔原理等问题,还提出了一维的质量守恒公式。17世纪,法国数学家、物理学家帕斯卡(Blaise Pascal, 1623—1662)阐明了静止流体中压力的概念。

但流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学,却是随着经典力学建立了速度、加速度、力、流场等概念以及质量、能量、动量三个守恒定律之后才逐步形成的。

牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)通过对运动定律和黏性定律的表述,借助由他发展的微积分,为流体力学的许多重大发展铺平了道路;1732年,法国数学家、水利工程师皮托(Pitot Henri, 1695—1771)发明了量测流速的皮托管;法国物理学家、数学家和天文学家达朗贝尔(Jean le Rond d'Alembert, 1717—1783)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;欧拉采用了连续介质概念,将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;瑞士物理学家、数学家、医学家伯努利(Daniel Bernoulli, 1700—1782)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,得到了流体恒定流运动下的流速、压力、管道高程之间的关系——伯努利方程(亦称

能量方程)。

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,从此开始了用微分方程和实验量测进行流体运动定量研究的阶段。

从 18 世纪起,位势流理论有了很大进展,在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面都阐明了很多规律。法国数学家、物理学家拉格朗日(Joseph-Louis Lagrange,1736—1813)对于无旋运动,德国物理学家赫尔姆霍兹(Helmholtz,1821—1894)对于涡旋运动做了不少研究。但他们考虑的是无黏流体,而大多数流动问题是受到黏性效应影响的,亦即无黏流的解没有用。19 世纪,工程师们为了解决许多工程问题,尤其是要解决带有黏性影响的问题,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。

1822 年,法国人纳维(Claude Louis Navier,1785—1836)建立了黏性流体的基本运动方程;1845 年,英国数学家、物理学家斯托克斯(George Gabriel Stokes,1819—1903)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,即沿用至今的纳维-斯托克斯方程(简称 N-S 方程),它是流体动力学的理论基础;1904 年,德国物理学家普朗特(Ludwig Prandtl,1875—1953)提出了边界层概念,创立了边界层理论,解释了阻力产生的机制,随后又针对航空技术和其他工程技术中出现的紊流边界层,提出混合长度理论。

20 世纪初,飞机的出现极大地促进了空气动力学的发展,以茹科夫斯基、恰普雷金、普朗特等为代表的科学家,开创了以无黏不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论。机翼理论和边界层理论的建立和发展是流体力学的一次重大进展,它使无黏流体理论同黏性流体的边界层理论很好地结合起来。

随着科技的发展,流体力学又发展了许多分支,如高超声速空气动力学、超音速空气动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学等,这些巨大进展与采用各种数学分析方法和使用大型、精密的实验设备和仪器等研究手段是分不开的。从 20 世纪 60 年代起,流体力学开始和其他学科互相交融渗透,形成新的交融学科或边缘学科,如物理-化学流体力学、磁流体力学等。

### 1.2.2 流体力学的工程应用

流体力学逐渐广泛地应用于生产实践,并在生产实践的推动下,大大丰富了流体力学的内容。例如:重工业生产中的冶金、电力、采掘等,轻工业生产中的化工、纺织、造纸等,交通运输业中的飞机、火车、船舶设计等,农业生产中的农田灌溉、水利建设、河道整治等工程中,无不有大量的流体力学问题需要解决;在道路桥梁交通中,桥涵水力学问题、路边排水,大桥水下施工中的水力学问题,路基、路面渗水等诸多问题都需要应用流体力学知识去解决;结构工程中,高耸建筑物一般都要做风洞试验,而大跨度柔性桥梁的抗风性能就是空气动力学的一个典型应用;基坑施工时一般要考虑地下水,降水计算需用到流体力学;隧道中的通风效应,如何计算隧道施工运营中的通风问题、风机如何安置、采用哪种通风方式都是很典型的应用;高速铁路隧道的空气动力学效应,由于“高铁”的速度快,进出隧道时都会产生“活塞效应”,搞不好还有“空气炮”,所以也要用到流体力学来解决这些问题;修明渠和城市管网设计(市政工程)用到的基本上是经典的流体力学。

流体力学广泛应用于土木工程的各个领域。例如:在建筑工程和桥梁工程中,研究解决风对高耸建筑物的荷载作用和风振问题,要以流体力学为理论基础;进行基坑排水、地基抗渗稳定处理、桥

渡设计都有赖于水力分析和计算;从事给水排水系统的设计和运行控制,以及供热、通风与空调设计和设备选用,更是离不开流体力学。可以说,流体力学已成为土木工程各领域共同的专业理论基础。

流体力学不仅用于解决单项土木工程的水和气的问題,更能帮助工程技术人员进一步认识土木工程与大气和水环境的关系。大气和水环境对建筑物和构筑物的作用是长期的、多方面的,其中台风、洪水等自然灾害可直接摧毁房屋、桥梁、堤坝等造成巨大的损失;另外,兴建大型厂矿、公路、铁路、桥梁、隧道、江海堤坝和水坝等,都会对大气和水环境造成不利影响,导致生态环境恶化,甚至加重自然灾害,国内外都已有惨痛教训。因此,只有处理好土木工程与大气和水环境的关系,才能更好地做土木建设。

## 1.3 流体的主要物理力学性质

任何一种物质都有其自身的属性,流体也不例外,了解这些属性,对于应用流体力学的基本原理来求解实际问题是很重要的。

### 1.3.1 惯性

任何物质都有惯性,流体也不例外。惯性是物体保持原有状态的特性。物体运动状态的任何改变,都必须克服惯性作用。质量是惯性大小的度量,质量越大,惯性越大。当流体受到外力作用使运动状态发生改变时,流体就要产生反抗其改变的反作用力,即惯性力。设物体的质量为  $m$ ,加速度为  $a$ ,则惯性力为

$$\vec{F} = -m\vec{a} \quad (1-1)$$

负号表示惯性力的方向与加速度的方向相反。

流体单位体积的质量称为密度,以  $\rho$  表示,国际单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。若某一均质流体质量为  $m$ ,体积为  $V$ ,则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

对于非均质流体,各点的  $\rho$  不同,要确定空间某点流体的  $\rho$ ,可在包含该点的周围取一微元体积  $\Delta V$ ,若它的质量为  $\Delta m$ ,则该点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-3)$$

我们经常会提到另一个概念——重度,重度表示单位体积流体所受的重力,以  $\gamma$  表示,国际单位为  $\text{N}/\text{m}^3$ 。某种流体的密度和重度的关系是

$$\gamma = \rho g \quad (1-4)$$

值得注意的是,密度  $\rho$  是绝对量,它只与质量有关;而重度  $\gamma$  不是绝对量,它取决于重力加速度  $g$  的值,  $g$  随着位置的改变而变化。

流体的密度随温度和压强的变化而变化,在 1 个标准大气压下,不同温度下水和空气的物理特性,如表 1-1、表 1-2 所示。液体的密度随温度和压强的变化很小,在绝大多数实际工程流体力学问题中均视为常数,计算时一般采用  $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $\rho_{\text{水银}} = 13600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;气体的密度随温度和压强的变化较大,1 个标准大气压条件下,0 °C 空气的密度为  $\rho_{\text{空气}} = 1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-1

在 1 个标准大气压下水的物理特性

| 温度 $t$<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | 密度 $\rho$<br>/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 重度 $\gamma$<br>/ $(\text{kN}/\text{m}^3)$ | 动力黏性系数 $\mu$<br>/ $(10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s})$ | 运动黏性系数 $\nu$<br>/ $(10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ | 体积弹性模量 $K$<br>/ $(10^9 \text{ kN}/\text{m}^2)$ | 表面张力 $\sigma$<br>/ $(\text{N}/\text{m})$ |
|--------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 0                              | 999.8                                   | 9.805                                     | 1.792                                                   | 1.792                                              | 2.04                                           | 7.62                                     |
| 5                              | 1000.0                                  | 9.807                                     | 1.519                                                   | 1.519                                              | 2.06                                           | 7.54                                     |
| 10                             | 999.7                                   | 9.804                                     | 1.310                                                   | 1.310                                              | 2.11                                           | 7.48                                     |
| 15                             | 999.1                                   | 9.798                                     | 1.145                                                   | 1.146                                              | 2.14                                           | 7.41                                     |
| 20                             | 998.2                                   | 9.789                                     | 1.009                                                   | 1.011                                              | 2.20                                           | 7.36                                     |
| 25                             | 997.0                                   | 9.777                                     | 0.895                                                   | 0.897                                              | 2.22                                           | 7.26                                     |
| 30                             | 995.7                                   | 9.765                                     | 0.800                                                   | 0.803                                              | 2.23                                           | 7.18                                     |
| 40                             | 992.2                                   | 9.731                                     | 0.654                                                   | 0.659                                              | 2.27                                           | 7.01                                     |
| 50                             | 988.0                                   | 9.690                                     | 0.549                                                   | 0.556                                              | 2.30                                           | 6.82                                     |
| 60                             | 983.2                                   | 9.642                                     | 0.469                                                   | 0.478                                              | 2.28                                           | 6.68                                     |
| 70                             | 977.8                                   | 9.589                                     | 0.406                                                   | 0.415                                              | 2.25                                           | 6.50                                     |
| 80                             | 971.8                                   | 9.530                                     | 0.357                                                   | 0.367                                              | 2.20                                           | 6.30                                     |
| 90                             | 965.3                                   | 9.467                                     | 0.317                                                   | 0.328                                              | 2.16                                           | 6.12                                     |
| 100                            | 958.4                                   | 9.399                                     | 0.284                                                   | 0.296                                              | 2.07                                           | 5.94                                     |

表 1-2

在 1 个标准大气压下空气的物理特性

| 温度 $t$<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | 密度 $\rho$<br>/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 重度 $\gamma$<br>/ $(\text{N}/\text{m}^3)$ | 动力黏性系数 $\mu$<br>/ $(10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s})$ | 运动黏性系数 $\nu$<br>/ $(10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})$ |
|--------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| -40                            | 1.515                                   | 14.86                                    | 14.9                                                    | 9.8                                                |
| -20                            | 1.395                                   | 13.68                                    | 16.1                                                    | 11.5                                               |
| 0                              | 1.293                                   | 12.68                                    | 17.1                                                    | 13.2                                               |
| 10                             | 1.248                                   | 12.24                                    | 17.6                                                    | 14.1                                               |
| 20                             | 1.205                                   | 11.82                                    | 18.1                                                    | 15.0                                               |
| 30                             | 1.165                                   | 11.43                                    | 18.6                                                    | 16.0                                               |
| 40                             | 1.128                                   | 11.06                                    | 19.0                                                    | 16.8                                               |
| 60                             | 1.060                                   | 10.40                                    | 20.0                                                    | 18.7                                               |
| 80                             | 1.000                                   | 9.81                                     | 20.9                                                    | 20.9                                               |
| 100                            | 0.946                                   | 9.28                                     | 21.8                                                    | 23.1                                               |
| 200                            | 0.747                                   | 7.33                                     | 25.8                                                    | 34.5                                               |

### 1.3.2 万有引力特性

任何物体之间都具有互相吸引的性质,其吸引力称之为万有引力。

在流体运动中,一般只需考虑地球对流体的引力,这个引力就是重力,重力的大小称为重量,用符号  $G$  来表示,单位为  $N$  或  $kN$ 。重量  $G$  与质量  $m$ 、重力加速度  $g$  的关系是

$$G = mg \quad (1-5)$$

### 1.3.3 黏性

前面已经提到,与固体不同,流体具有流动性,静止时不能承受任何微小的切应力及抵抗剪切变形。但当流体处在运动状态时,若流体质点之间存在着相对运动,则质点间要产生内摩擦力抵抗其相对运动,这种性质称为黏性,此内摩擦力称之为黏滞力。流体的黏性是流体固有的属性,是其阻止剪切变形或角变形运动的一种量度,是流体中发生机械能损失的根源。

为了更清楚地说明流体的黏性,现在来考察两块平行平板(图 1-1),这两块板足够大,其边缘条件可以略去不计;两板距离  $Y$  很小,板之间充满流体。下板固定不动,上板在一个力  $F$  作用下以速度  $U$  平行于下板运动。在边界处,流体微团黏附在壁面上,因而相对于壁面的速度为零,这就是所谓的无滑移条件,对一切黏性流体都适用。所以,与上板接触的流体速度一定是  $U$ ,与下板接触的流体速度为零。在间距  $Y$  不是太大和速度  $U$  不高时,两板间各流层的速度变化为直线。

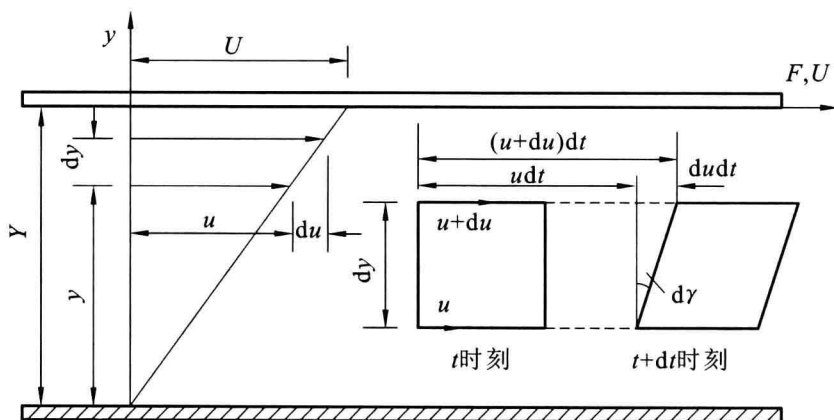


图 1-1 黏性表象

可以看出,上板带动黏附在板上的流层运动,并能影响到内部各流层的运动,就好像流体是由一系列薄层组成,速度快的带动速度慢的向前滑移,流层间存在剪切力即内摩擦力。

对图 1-1 所示状态,实验证明有下列公式成立

$$F \propto \frac{AU}{Y}$$

根据几何关系,可以用速度梯度  $\frac{du}{dy}$  代替  $\frac{U}{Y}$ ,引入一个比例常数  $\mu$ ,则上式可表示为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

以应力表示

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式(1-6)、(1-7)称为牛顿内摩擦定律,是牛顿首先提出来的:流体的内摩擦力  $F$  与流体的性质有关,与速度梯度  $\frac{du}{dy}$  成正比,与流层的接触面积  $A$  成正比,与接触面上的压力无关。

式(1-6)、(1-7)中,速度梯度  $\frac{du}{dy}$  为速度在流层法线方向的变化率。为进一步说明其物理意义,在距离为  $dy$  的上、下两流层间取矩形流体微元,如图 1-1 所示。因微元上、下层的速度相差  $du$ ,经时间  $dt$ ,微团除位移外,还有剪切变形  $d\gamma$ 。由于  $dt$  很小,  $d\gamma$  也很小,所以有

$$d\gamma \approx \tan(d\gamma) = \frac{du}{dy} dt$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-8)$$

因此,牛顿内摩擦定律又可写成

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (1-9)$$

可见,速度梯度等于角变形速度,由于它是在切应力作用下发生的,也称为剪切变形速度。所以,牛顿内摩擦定律也可理解为切应力与剪切变形速度成比例。

比例系数  $\mu$  称为动力黏性系数,简称黏度,单位为  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  或  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。动力黏性系数是流体黏性大小的度量,  $\mu$  值越大,流体越黏,流动性越差,即令人感到越黏稠。在涉及黏度的许多问题中,会经常同时出现  $\mu$  和  $\rho$  的比值,因此在实际计算中,常用运动黏性系数  $\nu$  来表示,其单位为  $\text{m}^2/\text{s}$  或斯托克斯(St)表示( $0.01 \text{ St} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

流体的黏度随流体种类的不同而不同,一般在相同条件下液体的黏度要大于气体黏度,并随温度和压强的变化而变化,但随压强变化甚小,通常可以忽略,而对温度变化较为敏感,并且液体和气体的黏度随温度变化规律是不同的,其中液体  $\mu$  值随温度的升高而减小,气体  $\mu$  值则随温度升高而增大,见表 1-1、表 1-2。这是由于液体分子间距较小,相互吸引力及内聚力较大,内聚力是产生黏度的主要原因。随着温度升高,分子间距增大,内聚力减小,从而使液体黏度减小。气体分子间距大,内聚力很小,黏度主要是气体分子动量交换的结果。温度升高时,气体分子运动加快,分子的动量交换速率加剧,切应力随之增加,黏度增加。

值得注意的是,牛顿内摩擦定律只适用于牛顿流体,牛顿流体即满足牛顿内摩擦定律的流体,如水、汽油、酒精、空气等。将不满足牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体,如油漆、泥浆、血浆等。本书所涉及内容只讨论牛顿流体。

实际的流体都是有黏性的。黏性的存在,给流体运动规律的研究带来极大的困难,为了简化理论分析,特引入理想流体概念。所谓理想流体,是指  $\mu = 0$  的假想流体。理想流体实际上是不存在的,它只是一种对流体物理力学性质简化的力学模型。

由于理想流体不考虑黏性,所以对流动的分析大为简化,从而容易得出理论分析的结果。所得结果,对某些黏性影响很小的流动,能够较好地符合实际;对黏性影响不能忽略的流动,则可通过实验加以修正,从而能比较容易地解决许多实际流动问题。这是处理黏性流体运动问题的一种有效方法。