

高等学校教材

GONGCHENG LIUTI LIXUE

# 工程流体力学

石奎 李田军 编



化学工业出版社

TB126/52

2009

高等学校教材

# 工程流体力学

石 奎 李田军 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书简要介绍了流体力学的任务和发展史、流体的性质及力学模型,在此基础上详细介绍了流体静力学、流体运动学、流体动力学、流动阻力和能量损失,孔口、管嘴出流和有压管流,量纲分析和相似原理。本书以培养学生工程技术应用能力为指导思想,重视学生对基本理论、基本知识和基本技能的掌握。

本书可作为普通高等学校地质工程、石油工程等专业的流体力学课程教材,也可作为相关从业技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/石奎,李田军编. —北京:化学工业出版社,2009.2  
高等学校教材  
ISBN 978-7-122-04508-9

I. 工… II. ①石…②李… III. 工程力学:流体力学-高等学校-教材 IV. TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第211952号

---

责任编辑:彭喜英 李春成  
责任校对:吴 静

文字编辑:糜家铃  
装帧设计:关 飞

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)  
印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张9 字数220千字 2009年3月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:18.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

本书是根据教育部、财政部关于实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的精神和加强新教材建设的指导思想，为适应高等学校专业结构的调整、适应学科发展和专业培养目标的需要而编写的。

本书是为普通高等学校地质工程、石油工程等专业的流体力学课程编写的一本教材。以培养学生的工程技术应用能力为指导思想，重视学生对基本理论、基本知识和基本技能的掌握。在内容上，强调针对性和适用性，力求少而精，同时尽量体现地学类专业的特色，适应学科发展和教学需要。

本书主要用于30~40学时本科流体力学课程教学参考用书，也可供相关从专业技术人员参考。

本书是在中国地质大学出版的《工程流体力学》一书的基础之上，对原教材进行修编和改编而完成的。在编写过程中，考虑到一些高等学校在流体力学课程学时的精简，对原书的内容进行了适当的删减、修改和补充：

- 一、删减了原书中不适应专业需要的缝隙流和气体动力学基础章节的内容；
- 二、对原书中流体运动学内容进行了修改和补充，增加了平面有势流动和合成流动；

- 三、对原书每章节的习题进行了补充和修改，增加了思考题及其计算题的数量，删减部分习题，利于学生自学和教学选用。

本书由中国地质大学（武汉）石奎负责主编，李田军负责部分内容的编写和全部内容的初审，全书由石奎统稿。

本书由中国地质大学李同林教授审阅，并提出了很多宝贵的意见和建议，在这里表示由衷的感谢。感谢中国地质大学力学课部的大力支持和协助。

由于作者水平有限，时间紧迫，书中难免有疏漏之处，恳请读者提出宝贵意见和批评指正。

编者

2008年10月

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| <b>第1章 绪论</b> .....        | 1  |
| 1.1 概述 .....               | 1  |
| 1.2 流体的连续介质模型 .....        | 3  |
| 1.3 流体的主要物理性质 .....        | 4  |
| 1.3.1 惯性、质量与密度 .....       | 5  |
| 1.3.2 黏性 .....             | 5  |
| 1.3.3 压缩性和膨胀性 .....        | 7  |
| 1.4 作用在流体上的力 .....         | 9  |
| 习题 .....                   | 10 |
| <b>第2章 流体静力学</b> .....     | 12 |
| 2.1 静压强及其特性 .....          | 12 |
| 2.2 流体平衡微分方程 .....         | 14 |
| 2.2.1 流体平衡微分方程 .....       | 14 |
| 2.2.2 等压面方程 .....          | 15 |
| 2.3 流体静力学基本方程 .....        | 16 |
| 2.3.1 重力作用下的流体平衡方程 .....   | 16 |
| 2.3.2 流体静力学基本方程的意义 .....   | 16 |
| 2.3.3 压强的计量单位和表示方法 .....   | 17 |
| 2.4 液体的相对平衡 .....          | 19 |
| 2.4.1 容器作等加速直线运动 .....     | 19 |
| 2.4.2 容器作匀角速度旋转 .....      | 20 |
| 2.5 静水总压力计算 .....          | 21 |
| 2.5.1 液体对平面面壁的作用力 .....    | 21 |
| 2.5.2 液体对曲面面壁的作用力 .....    | 24 |
| 2.6 浮力定律及固体在液体中的沉浮问题 ..... | 27 |
| 2.6.1 潜体的稳定性 .....         | 28 |
| 2.6.2 浮体的稳定性 .....         | 28 |
| 习题 .....                   | 29 |
| <b>第3章 流体运动学</b> .....     | 34 |
| 3.1 研究流体运动的方法 .....        | 34 |
| 3.1.1 拉氏法 .....            | 34 |
| 3.1.2 欧拉法 .....            | 35 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 3.2 流场的基本概念           | 36 |
| 3.3 流体运动的连续性方程        | 40 |
| 3.3.1 三维流动、二维流动的连续性方程 | 40 |
| 3.3.2 一维恒定流动的连续性方程    | 41 |
| 3.4 流体微团的运动           | 42 |
| 3.4.1 线变形运动           | 43 |
| 3.4.2 角变形与旋转运动        | 43 |
| 3.5 速度势和流函数           | 45 |
| 3.6 简单平面势流            | 48 |
| 3.7 势流叠加原理            | 51 |
| 3.7.1 平面均匀流与源流的组合     | 51 |
| 3.7.2 偶极流             | 52 |
| 习题                    | 54 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| <b>第4章 流体动力学基础</b>   | 57 |
| 4.1 理想流体的运动微分方程      | 57 |
| 4.2 理想流体运动微分方程的伯努利积分 | 58 |
| 4.2.1 伯努利积分          | 59 |
| 4.2.2 重力场中理想流体的伯努利方程 | 60 |
| 4.2.3 伯努利方程的意义       | 60 |
| 4.3 实际流体的能量方程        | 61 |
| 4.3.1 元流的伯努利方程       | 61 |
| 4.3.2 实际流体的能量方程      | 61 |
| 4.3.3 伯努利方程的推广       | 65 |
| 4.4 伯努利方程的工程应用       | 66 |
| 4.5 实际流体的动量方程        | 69 |
| 习题                   | 72 |

|                      |    |
|----------------------|----|
| <b>第5章 流动阻力和能量损失</b> | 76 |
| 5.1 流动阻力及水头损失的两种形式   | 76 |
| 5.2 流体流动的两种形态        | 76 |
| 5.3 均匀流动的沿程损失方程式     | 79 |
| 5.4 圆管中的层流运动和沿程损失    | 80 |
| 5.4.1 过流截面上的切应力和流速分布 | 80 |
| 5.4.2 过流截面上的流量和平均流速  | 81 |
| 5.4.3 沿程损失计算         | 82 |
| 5.4.4 层流起始阶段长度       | 82 |
| 5.5 圆管中的湍流运动         | 82 |
| 5.6 湍流的沿程损失          | 87 |
| 5.6.1 尼古拉兹实验         | 87 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 5.6.2 工业管道的沿程损失 .....         | 89  |
| 5.7 局部损失计算 .....              | 90  |
| 5.8 绕流阻力 .....                | 93  |
| 习题 .....                      | 94  |
| <b>第6章 孔口、管嘴出流和有压管流</b> ..... | 96  |
| 6.1 薄壁孔口恒定出流 .....            | 96  |
| 6.2 管嘴出流 .....                | 98  |
| 6.3 有压管流 .....                | 100 |
| 6.4 短管的水力计算 .....             | 101 |
| 6.4.1 自由出流 .....              | 101 |
| 6.4.2 淹没出流 .....              | 102 |
| 6.4.3 短管水力计算的问题 .....         | 103 |
| 6.5 长管的水力计算 .....             | 103 |
| 6.5.1 简单管路 .....              | 103 |
| 6.5.2 串联管路 .....              | 106 |
| 6.5.3 并联管路 .....              | 106 |
| 6.5.4 沿程均匀泄流管路 .....          | 107 |
| 6.6 管网的水力计算 .....             | 107 |
| 6.7 有压管路中的水击 .....            | 110 |
| 习题 .....                      | 113 |
| <b>第7章 量纲分析和相似原理</b> .....    | 119 |
| 7.1 量纲分析 .....                | 119 |
| 7.1.1 量纲和单位 .....             | 119 |
| 7.1.2 量纲和谐原理 .....            | 120 |
| 7.1.3 量纲分析法 .....             | 120 |
| 7.2 相似的基本概念 .....             | 124 |
| 7.3 相似准则 .....                | 125 |
| 7.4 模型实验 .....                | 128 |
| 7.4.1 模型律的选择 .....            | 128 |
| 7.4.2 模型设计 .....              | 129 |
| 习题 .....                      | 129 |
| <b>附录</b> .....               | 132 |
| 表一 物理量符号、单位与量纲 .....          | 132 |
| 表二 常用流道的局部阻力系数 .....          | 133 |
| <b>参考答案</b> .....             | 135 |
| <b>参考文献</b> .....             | 138 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 概述

---

### (1) 工程流体力学的任务

工程流体力学是力学的一个分支,是研究流体的机械运动规律及其工程应用的一门学科。

自然界物质的存在形式一般有三种,即固体、液体和气体。液体和气体统称为流体,流体力学包括液体力学和气体力学两个部分。固体由于其分子间距很小,内聚力很大,能保持固体的形状和体积,能承受一定的拉力、压力和剪切力。而流体则不同,由于其分子间距较大,内聚力较小,几乎不能承受拉力和剪切力,不能保持固定的形状。与气体相比,液体分子内聚力又比气体大得多,由于液体分子间距较小,密度较大,所以液体虽然不能保持固定的形状,但能保持固定的体积,其膨胀性和压缩性较小。气体既没有固定的形状,也没有固定的体积,极易膨胀和压缩,它可以任意扩散并充满所占据的有限空间。液体与气体的主要差别是它们的可压缩程度不同,但对于低速气流,液体力学的基本原理也同样适用。本书主要探讨的是液体的基本规律。

流体力学所研究的基本规律包括两个部分:一是关于液体的平衡规律,它研究液体处于静止或相对平衡状态时,作用于液体上的各种力之间的关系,称为液体静力学;二是关于液体的运动规律,它研究液体在运动状态时,作用于液体上的力与运动要素之间的关系,以及液体的运动特性和能量转换等,称为液体动力学(包括运动学和动力学)。

液体最基本的特征是具有流动性,即它不抵抗剪切力的作用,也就是说液体在微小剪切力的作用下,会连续不断地产生变形,即流动。液体作为物质的一种基本形态,必然遵循牛顿力学定律、质量守恒定律和能量守恒定律等有关物质宏观机械运动的一般规律。

流体力学在许多工业部门都有广泛的应用。它应用于环境保护、市政建设、给水排水、土木建筑、交通运输、供热通风、化工、机械、动力、能源、水利、资源、气象、航空、国防等工程,尤其与土建类专业有着更加密切的关系。在土建工程中,城市的生活和工业用水、开拓水渠、水的净化与消毒、水塔修建、管道布置等需要解决一系列水力学的问题;在地质工程和石油工程中,液压钻机、水泵、海洋钻探、石油钻探、水文地质与工程地质钻探、矿井与巷道的通风和排水等,都要用到流体力学的基本理论和知识;在公路与桥梁工程中,路基的沉陷、崩塌、滑坡、排水,桥梁、涵洞和透水路堤的修建与水密切相关;在采暖通风工程中,热风采暖、燃气输送等以流体为介质;在土建施工中,修建围堰、基坑排水等都应用到水力学的基本原理。因此,必须掌握好流体的各种力学性质和运动规律,才能有效地、正确地解决工程实际中遇到的各种流体力学问题。

## (2) 工程流体力学的发展简史

工程流体力学是人类在同自然界做斗争，在长期的生产实践中，通过科学的实验逐步发展起来的。

早在几千年以前，人们就已经了解和掌握了一些流体运动规律。我国劳动人民早在春秋战国和秦朝时期就修建了都江堰、郑国渠和灵渠，大大发展了灌溉事业，特别是都江堰工程中所总结的“深淘滩，低作堰”，反映了当时人们对明渠水流、堰流等已经有了一定的认识；公元前 485 年开始修建，到隋朝最后完成的京杭大运河，大大改善了我国的南北运输条件，并在运河上大量采用船闸，高度体现了我国劳动人民的智慧。与我国相似，早在几千年以前，在埃及、希腊、巴比伦和印度等地区，为了发展农业和航运事业，也修建了大量灌溉渠道；古罗马人修建了大规模的供水管道系统。在公元 250 年前，古希腊哲学家、物理学家阿基米德就撰写了《论浮体》，奠定了流体静力学基础。

公元 15 世纪~公元 17 世纪，达·芬奇、伽利略、托里切利、帕斯卡、牛顿等人用实验方法研究了水静压力、大气压力 and 水的切应力等问题。公元 18 世纪后，流体运动规律的研究大致分为两大类：一类是用数学分析的方法进行严格的推导，建立了流体运动的基本方程，如伯努利方程、欧拉方程、纳维-斯托克斯方程、雷诺方程等，由于这些纯理论的推导所作的某些假设与实际不尽相符，或由于数学上难以求解，无法应用于解决工程实际中的一些复杂问题；另一类的研究是为了解决生产实际问题，从大量的实验和实际观测中总结出来一些经验算式，并简化后建立各运动要素之间的定量关系，这些科学家包括毕托、文丘里、谢才、曼宁等。上述两类理论由德国人普朗特建立了边界层理论后得到统一。

20 世纪以来，随着生产和科学技术的发展，特别是航空航天技术的飞速发展，理论分析和实验方法日益结合，形成了现代流体力学，使流体力学领域内的一些重大发现和研究成果推广应用到其他科学领域中，开创出了许多新的研究方向，其中最具代表性的例子有：边界层理论导致应用数学中渐近展开分配法的形成；孤立波理论成为新学科光通信的基石；劳伦斯方程发现浑沌现象等。

## (3) 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法分为三个方面，它们之间的关系是互相配合、互为补充的。

① 理论分析方法。理论分析方法的一般工程是：建立合理的力学模型；运用物理学的基本定律结合流动的特点推导相应的数学方程；用数学分析方法结合初始条件和边界条件求解方程；检验和解释求解结果。正确的理论分析结果可揭示流体运动的本质特性和规律，具有普遍的适用性，对后人在认识流体运动规律及开展进一步的探索过程具有借鉴和根本性的指导意义。流体力学理论研究方向除了各专业特定的方向之外，共同的研究方向包括湍流机理、流动稳定性、涡流、水动力学、水波动力学、复杂流动、多相流动等，这些研究方向显然超过了本书所研究的范围，但是它们是建立在本教材中的基本概念、基本理论和基本方法基础之上的。

② 实验研究方法。截至目前，能完全用理论分析方法来解决的实际流动问题仍然非常有限，大量的复杂流动问题或工程流动问题需要用实验和理论相结合的方法来解决。实验研究方法的一般过程是：在相似理论的指导下，在实验室建立模型实验装置；用流体测量技术测量模型实验中的流动参数；处理和分析实验数据并归纳为经验公式。实验方式包括原型观测、模型实验、系统实验三种。典型的流体力学实验装置有风洞、水洞、水槽、水池等；测

量技术有热线或激光测速、粒子图像、迹线测速、高速摄影、全息照相等。现代测量技术在计算机、光学和图像处理技术的配合下,为研究复杂流动提供了有效的手段。实验结果能反映工程中实际流动规律、发现新的现象、检验理论结果等,但是实验方法也有自身的缺点:实验中得到的经验公式往往普遍适用性较差。

③ 数值方法。随着计算机技术的飞速发展,过去无法解析的流体力学偏微分方程,现在可以用计算机数值方法求解。数值方法的一般研究过程是:对流体力学数学方程作简化和数学离散化;编制程序进行数值计算,将计算结果和实验或理论分析结果比较。常用方法为有限差分法、有限元法、边界元法、谱分析法等。计算的内容包括飞机、汽车、河道、桥梁、涡轮机等流场;湍流、流动稳定性、非线性流动等数值模拟;大型工程计算软件已成为研究和计算工程流动问题的有力武器。数值方法的优点是能计算解析方法无法求解的流动问题,能模拟多种工况的流动问题,比实验方法更省时省钱,但数值方法毕竟是一种近似求解方法,受数学模型的正确性、计算精度和计算机性能的限制。数值方法已成为流体力学现代分析手段中发展最快的方法之一。

以上三种研究方法各有优缺点,只有将它们相互结合起来才能适应现代流体力学研究和工程应用的需要。本书主要采用理论和实验相结合的方法来分析和解决问题。

## 1.2 流体的连续介质模型

作为连续介质力学的一个分支,流体力学将液体和气体的宏观力学行为用连续介质模型来描述。连续介质的物理量是空间位置和时间的连续函数,这些函数表达的流体运动规律符合自然界中实际流体的运动情况。

### (1) 流体的宏观特性

根据物质结构理论,自然界所有物质都是由许多不连续且具有间隙的分子所组成的,所有的分子都处于永不停息的不规则运动状态,分子间相互碰撞、掺和,进行质量、动量和能量的交换,所以,从微观角度来说,流体在空间和时间上都是不连续的,呈现出离散性、不均匀性和随机性,称为流体的微观特性。若将研究对象扩大到包含大量分子的流体团,根据统计学观点,统计平均值在时间上是确定的,在空间上是连续的,呈现出连续性、均匀性和确定性,称为流体的宏观特性。

流体团的微观运动是由流体分子自身的热运动决定的,而其宏观运动是由外力引起的。当流体团不受外力作用处于静止状态时,流体分子仍在剧烈运动,只是所有分子的平均速度统计值为零而已。当流体团受到外力作用运动时,平均速度统计值为某一有限值。一般来说,流体力学是研究流体在外力作用下的宏观运动规律,不需要探讨流体分子的微观结构,只需要对流体加以模型化,使之更有利于研究流体的宏观运动规律。

### (2) 流体质点的概念

流体质点是指微观尺寸足够大而宏观尺寸又非常小的流体微团,是流体力学的最小研究单位。流体质点具有以下几层含义。

① 流体质点微观尺寸足够大。这就是说流体质点的微观体积远远大于流体分子的体积,流体质点内部在任何时刻都包含足够多的流体分子,个别分子的行为不会影响质点的统计平均特性。

② 流体质点宏观尺寸非常小。流体质点所占据的宏观体积趋近于零，即  $\Delta V \rightarrow 0$ ，但是它又并不等于零。

③ 流体质点在几何上近似成一个没有大小和形状的点，而在空间上又占有一定的体积。

④ 流体质点是一个物理实体，在任何时刻都具有一定的宏观物理量，如质量、密度、温度、速度、压强和动能等。

### (3) 连续介质模型

流体的连续介质模型是：假设流体是由连续分布的流体质点组成的介质，流体质点之间没有空隙、充满流体所占有的整个空间。

采用流体的连续介质模型后，流体中的一切物理量（如密度、速度、压强等）都可以视为空间坐标和时间的连续函数，从而我们可以运用数学分析这一有力工具来建立和求解各宏观物理量之间的方程。

比如，我们要定义某点处流体的密度，如图 1-1(a) 所示，取流体空间内包含  $A(x, y, z)$  的流体微团，其体积为  $\Delta V$ ，质量为  $\Delta M$ ，则其平均密度为  $\bar{\rho} = \frac{\Delta M}{\Delta V}$ ，其平均密度 ( $\bar{\rho}$ ) 与  $\Delta V$  的关系见图 1-1(b)。

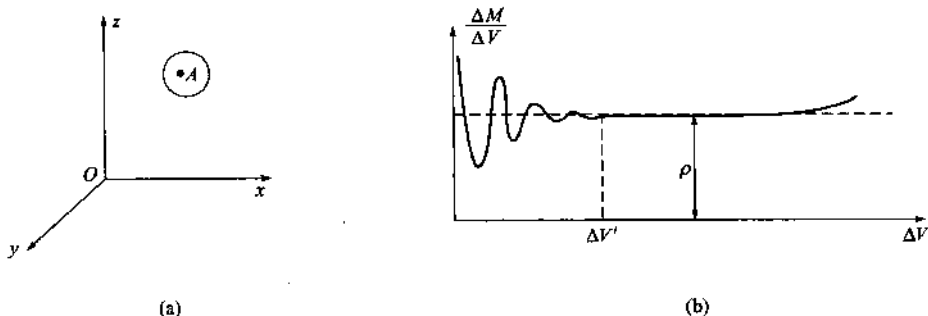


图 1-1 流体连续介质模型

当  $\Delta V$  过大时，由于物质在空间分布的不均匀性，引起  $\bar{\rho}$  的变化，如曲线右端所示；当  $\Delta V$  逐渐减小时， $\bar{\rho}$  随  $\Delta V$  的缩小逐渐趋近于一确定的数值，这是因为  $\Delta V$  越小，微团内流体分子越来越均匀；当  $\Delta V$  进一步减小，由于分子的随机运动特性， $\bar{\rho}$  不再有确定的数值。也就是说当  $\Delta V$  达到一临界体积 ( $\Delta V'$ ) 时，而体积 ( $\Delta V'$ ) 是非常小的，通常看成为零，则  $\bar{\rho}$  为密度的统计平均值，即为点  $A(x, y, z)$  处流体的宏观密度。

在工程实际中，只有少数问题不能采用连续介质模型，比如高空稀薄气体等；绝大多数问题均可以采用连续介质模型来分析。连续介质模型的采用对流体力学的发展起了巨大的作用，但是，迄今为止，关于连续介质的理论本身还不够完善，还不能推导出与具有分子结构的真实流体以完全相同方式运动的连续介质性质，故只能称为连续介质假设。

## 1.3 流体的主要物理性质

流体平衡或运动时的力学规律除了与其外部因素有关外，同时还取决于流体本身的物理性质。本节主要讨论流体的几个重要物理性质。

1.3.1 惯性、质量与密度

惯性是物体保持原有运动状态的特性，与任何物体一样，流体也具有惯性。惯性的大小以质量来度量，物体质量越大，其惯性也越大。当液体受到外力作用使运动状态发生改变时，由于液体的惯性，外界抵抗的反作用力称为惯性力。设液体的质量为  $m$ ，加速度为  $a$ ，则惯性力为

$$F = -ma \tag{1-1}$$

式中，负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反。

流体单位体积内所具有的质量称为密度，用  $\rho$  表示，其国际单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。对于均质流体，若其体积为  $V$ ，质量为  $m$ ，则

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

对于非均质流体，各点的密度不同。要确定空间某点的密度，在该点周围取一微小体积  $\Delta V$ ，若它的质量为  $\Delta m$ ，则该点的密度为

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

流体的密度随温度和压强的变化而变化。在一个标准大气压下，几种常见流体的密度值见表 1-1。

表 1-1 标准大气压下常见液体的密度值

| 流体名称 | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 流体名称 | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$ |
|------|------------------------|------------------------------|------|------------------------|------------------------------|
| 蒸馏水  | 4                      | 1000                         | 汽油   | 15                     | 700~750                      |
| 海水   | 15                     | 1020~1030                    | 柴油   | 15                     | 875                          |
| 空气   | 20                     | 1.293                        | 水银   | 0                      | 13600                        |
| 石油   | 15                     | 880~890                      | 酒精   | 15                     | 790~800                      |

1.3.2 黏性

黏性是流体一个非常重要的性质。当流体处于运动状态时，流体具有抵抗剪切变形能力的性质，这种性质称为黏性。以下以牛顿平板实验来阐明流体的黏性。

设两块比较靠近的平行平板之间充满液体，如图 1-2 所示，上平板以速度  $u_{\max}$  向右运动，而下平板固定不动。

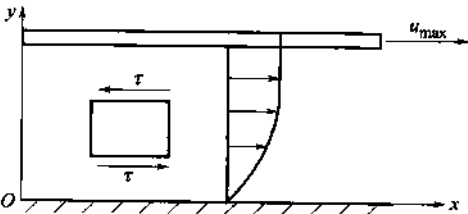


图 1-2 牛顿平板实验速度、切应力分布

由于与平板相接触的流体分子附着在平板表面上，所以上平板上的流体层的速度为  $u_{\max}$ ，而下平板表面上的流体层的速度则为零，两平板之间的各流体层速度自下而上增加。当运动速度快的流层在速度慢的流层上滑过时，速度慢的流层会阻止速度快的流层向右运动；反之，速度快的流层会带动速度慢的流层向右运动。

由实验可知，当运动流体的各层由于各自的速度不同而发生相对运动时，在相邻的两层流体的接触面上会产生一对大小相等、方向相反的力来阻止这种相对运动，这一对力称为牛顿内摩擦力或黏性力。流体具有产生这种内摩擦力来阻止这种相对运动的特性，即黏性。

实验表明，相邻液层接触面单位面积上所产生的内摩擦力（T）的大小，与两液层之间的速度差（du）成正比，与液层的接触面积（A）成正比，与两液层之间的距离（dy）成反比，即

$$T \propto A \frac{du}{dy} \text{ 或 } \tau \propto \frac{du}{dy}$$

上式称为牛顿内摩擦定律。引进比例系数  $\mu$ ，则其数学表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \text{ 或 } \tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-4}$$

式中， $\frac{du}{dy}$  表示流速沿垂直于速度方向的变化率，称为速度梯度； $\mu$  表示衡量流体黏性大小的物理量，称为动力黏度，简称黏度，其单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在分析流体的运动规律时，引进了另外一个物理量——运动黏度，用  $\nu$  表示，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-5}$$

其单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

流体的黏性一般是随温度和压强的变化而变化的，但实验表明，在低压情况下（通常指低于 100 个大气压），压强对流体的黏性影响很小，一般可以忽略。温度是影响流体黏性的主要因素，液体和气体的黏度随温度的变化规律是不同的，液体的黏性随温度的升高而减小，而气体的黏性随温度的升高而加大。其原因是液体分子之间的引力比气体要大得多。当温度升高时，液体分子的活动能力增强，相互间的引力减弱，导致黏度减小。而气体分子之间的引力本来就弱，当温度升高时，其布朗运动加剧，导致黏度增加。所以机器所用的机油牌号在夏天和冬天是不一样的。

在一个标准大气压、不同温度下，水和空气的黏度随温度变化情况见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 水在不同温度时的黏度值

| $t/^\circ\text{C}$ | $\mu/10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ | $\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$ | $t/^\circ\text{C}$ | $\mu/10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ | $\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$ |
|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 0                  | 1.792                                 | 1.792                              | 40                 | 0.654                                 | 0.659                              |
| 5                  | 1.519                                 | 1.519                              | 45                 | 0.597                                 | 0.603                              |
| 10                 | 1.310                                 | 1.310                              | 50                 | 0.549                                 | 0.556                              |
| 15                 | 1.145                                 | 1.146                              | 60                 | 0.469                                 | 0.478                              |
| 20                 | 1.009                                 | 1.011                              | 70                 | 0.406                                 | 0.415                              |
| 25                 | 0.895                                 | 0.897                              | 80                 | 0.357                                 | 0.367                              |
| 30                 | 0.800                                 | 0.803                              | 90                 | 0.317                                 | 0.328                              |
| 35                 | 0.721                                 | 0.725                              | 100                | 0.284                                 | 0.296                              |

表 1-3 空气在不同温度时的黏度值

| $t/^\circ\text{C}$ | $\mu/10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ | $\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$ | $t/^\circ\text{C}$ | $\mu/10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ | $\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$ |
|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 0                  | 1.72                                  | 13.7                               | 90                 | 2.16                                  | 22.9                               |
| 10                 | 1.78                                  | 14.7                               | 100                | 2.18                                  | 23.6                               |
| 20                 | 1.83                                  | 15.7                               | 120                | 2.28                                  | 26.2                               |
| 30                 | 1.87                                  | 16.6                               | 140                | 2.36                                  | 28.5                               |
| 40                 | 1.92                                  | 17.6                               | 160                | 2.42                                  | 30.6                               |
| 50                 | 1.96                                  | 18.6                               | 180                | 2.51                                  | 33.2                               |
| 60                 | 2.01                                  | 19.6                               | 200                | 2.59                                  | 35.8                               |
| 70                 | 2.04                                  | 20.5                               | 250                | 2.80                                  | 42.8                               |
| 80                 | 2.10                                  | 21.7                               | 300                | 2.98                                  | 49.9                               |

牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，我们把满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、酒精和空气等。把不符合牛顿内摩擦定律的流体称为非牛顿流体，如油漆、泥浆等。

【例 1-1】一平板在油面上做水平运动，如图 1-3 所示，已知平板的运动速度为  $u = 0.04\text{m/s}$ ，油层厚度为  $5\text{mm}$ ，油的黏度  $\mu = 0.1\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。试求作用在平板单位面积上的黏性阻力。

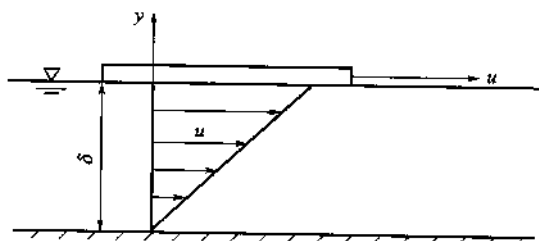


图 1-3 速度分布

解：直接与平板接触的油层黏附在平板上，随平板一起运动。下面与之相邻的油层作用在该层上的切应力（方向与平板运动方向相反）等于作用在平板单位面积上的黏性阻力，由牛顿内摩擦定律有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

因为油层内流速按直线规律分布，有

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{\delta}$$

故

$$\tau = \mu \frac{u}{\delta} = 0.1 \times \frac{0.04}{0.005} = 8 \text{ (Pa)}$$

【例 1-2】旋转圆筒黏度计，外筒固定，内筒由同步电动机带动旋转，内、外筒间充入实验液体，如图 1-4 所示。已知内筒半径  $r_1 = 1.93\text{mm}$ ，外筒半径  $r_2 = 20\text{mm}$ ，内筒高  $h = 70\text{mm}$ ，实验测得内筒转速  $n = 10\text{r/min}$ ，转轴上扭矩  $M = 0.045\text{N} \cdot \text{m}$ 。试求该实验液体的黏度。

解：充入内、外筒间隙的实验液体，在内筒带动下作圆周运动。因间隙很小，速度近似直线分布。不计内筒端面的影响，内筒壁的切应力为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1}{\delta} = \mu \frac{2\pi n r_1}{60\delta}$$

转轴上的扭矩为

$$M = \tau \cdot 2\pi r_1 h \cdot r_1 = \mu \frac{2\pi n r_1^3 h}{60\delta}$$

故流体的黏度为

$$\mu = \frac{60M\delta}{2\pi n r_1^3 h} = 0.952\text{Pa} \cdot \text{s}$$

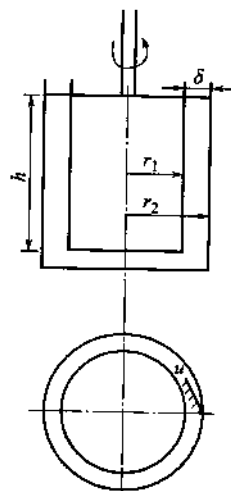


图 1-4 旋转黏度计

### 1.3.3 压缩性和膨胀性

当作用在流体上的压力增加时，流体体积减小、密度增大，这种

性质称为流体的压缩性。当温度升高时，流体体积膨胀，密度减小，这种性质称为流体的膨胀性。虽然液体和气体都是流体，但是它们的压缩性和膨胀性大不一样，下面针对液体和气体的压缩性和膨胀性进行分别介绍。

### (1) 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性一般用体积压缩系数 ( $\beta_p$ ) 表示，它表示在温度一定的情况下，单位体积液体在压强每升高一个单位时，液体体积相对减少的数目，即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-6)$$

式中的负号是为了保证  $\beta_p$  为正值。工程中往往用液体的体积模量  $K$  表示液体的压缩性，即

$$K = \frac{1}{\beta_p} \quad (1-7)$$

$K$  值越大，表示液体越不容易压缩。

表 1-4 列举了水在 20℃ 时不同压强下的体积压缩系数。

表 1-4 水的体积压缩系数

| 压强/at <sup>①</sup>               | 5     | 10    | 20    | 40    | 80    |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\beta_p/10^{-9} \text{Pa}^{-1}$ | 0.538 | 0.536 | 0.531 | 0.528 | 0.515 |

① 工程大气压的符号，1at=98066.5Pa。

从表 1-4 中可以看出液体的压缩性比较小。

液体的膨胀性一般用体积膨胀系数 ( $\beta_T$ ) 表示，它表示在压强一定的情况下，单位体积液体在温度每升高 1℃ 或 1K 时，液体体积相对增加的数目，即

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-8)$$

表 1-5 列举了水在一个大气压下不同温度时的体积膨胀系数。

表 1-5 水的体积膨胀系数

| 温度/℃                            | 10~20 | 40~50 | 60~70 | 90~100 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| $\beta_T/10^{-4} \text{K}^{-1}$ | 0.538 | 0.536 | 0.531 | 0.528  |

从表 1-5 中可以看出液体的膨胀性也是比较小的。

在工程实际中，一般不考虑液体的压缩性和膨胀性，我们把这类不考虑压缩性和膨胀性的流体称为不可压缩流体。只有在水击、热水采暖系统等，才需要考虑水的压缩性和膨胀性，称为可压缩流体。

### (2) 气体的压缩性和膨胀性

气体具有明显的压缩性和膨胀性，在常温、常压下，气体的密度、压强和温度满足理想气体的状态方程，即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-9)$$

式中， $p$  为气体的绝对压强； $\rho$  为气体的密度； $T$  为气体的热力学温度； $R$  为气体常数。

对于低速气流，一般气体速度小于 50m/s 时，可以忽略压缩性，视为不可压缩流体，但是在气击、爆破等，必须考虑压缩性和膨胀性。

## 1.4 作用在流体上的力

无论流体处于平衡状态还是运动状态，都要受到外力的作用。因此，在研究流体的平衡和运动规律时，首先必须分析作用在流体上的力的种类和性质。作用在流体上的力，根据作用方式不同分为表面力和质量力两大类。

### (1) 表面力

表面力作用在液体的表面，其大小与受力作用的表面面积成正比。表面力可以分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力。

如图 1-5 所示，如果在隔离体表面上取一个包含 A 点的微小面积 ( $\Delta A$ )，作用在  $\Delta A$  上的法向力 ( $\Delta P$ ) 和切向力 ( $\Delta T$ )，则  $\Delta A$  上的平均压应力 ( $\bar{p}$ ) 和平均切应力 ( $\bar{\tau}$ ) 分别为

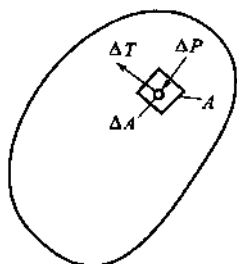


图 1-5 隔离体表面受力

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-10)$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-11)$$

若  $\Delta A$  趋向于无穷小，则 A 点的压强和切应力为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-12)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1-13)$$

在国际单位中，压强和切应力单位为 Pa 或 MPa。

### (2) 质量力

质量力是指作用于流体内每一个流体质点上，其大小与流体的质量成正比的力，如重力、惯性力。质量力除用总作用力来度量外，也常用单位质量力来度量。单位质量力是指作用在单位质量流体上的质量力。若有一质量为  $m$  的均质流体，其上受到的总质量力为  $F$ ，则单位质量力为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-14)$$

若  $F$  在空间三个坐标轴上的投影分别为  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ ，则单位质量力在三个坐标轴上的分量分别为

$$X = \frac{F_x}{m} \quad (1-15a)$$

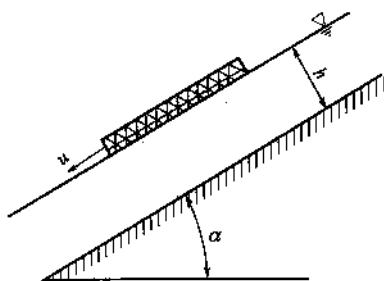
$$Y = \frac{F_y}{m} \quad (1-15b)$$

$$Z = \frac{F_z}{m} \quad (1-15c)$$

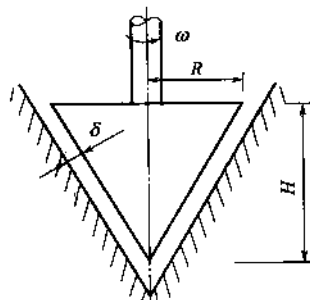
单位质量力的单位  $m/s^2$ 。

## 习题

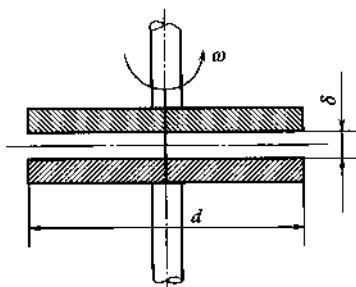
- 1-1 什么是连续介质？在流体力学中为什么要建立连续介质这一理论模型？
- 1-2 何谓流体的压缩性和膨胀性？
- 1-3 举例说明怎样确定流体是可压缩的或是不可压缩的。
- 1-4 什么是流体的黏性？流体的黏性与流体的宏观运动是否有关？静止流体是否有黏性？静止流体内部是否有黏性切向应力？
- 1-5 为什么说流体黏性引起的摩擦力是内摩擦力？它与固体运动的摩擦力有何不同？
- 1-6 为什么要提出理想流体这个假设？它与热力学中的理想气体有什么区别？
- 1-7 作用在流体上的力包括哪些？在什么情况下有惯性力？
- 1-8 温度为  $20^{\circ}\text{C}$ 、流量为  $60\text{m}^3/\text{h}$  的水流入加热器，经加热后，水温升高到  $80^{\circ}\text{C}$ ，如果水的体积膨胀系数为  $\beta_T = 550 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。问水从加热器流出时，体积流量变为多少？
- 1-9 用活塞油缸来测定某种液体的体积压缩系数。当压强为  $10^6 \text{ Pa}$  时，液体的体积为  $1\text{L}$ ；当压力升高到  $2 \times 10^6 \text{ Pa}$  时，液体的体积为  $0.995\text{L}$ 。求这种液体的体积压缩系数。
- 1-10 有一矩形截面的宽渠道，其水流速度分布为  $u = 0.002 \frac{\rho g}{\mu} \left( hy - \frac{y^2}{2} \right)$ ，式中， $\rho$  和  $\mu$  分别为流体的密度和动力黏度， $g$  为重力加速度， $h$  为水深。试求  $h = 0.5\text{m}$  时渠底处的切应力。
- 1-11 如题图 1-1 所示，一底面积  $A = 0.2\text{m}^2$ ，质量  $m = 5\text{kg}$  的木板，沿着涂有润滑油的斜面匀速下滑，斜面倾角  $\alpha = 30^{\circ}$ 。已知木板下滑的速度  $u = 1.0\text{m/s}$ ，油层厚度  $h = 1\text{mm}$ ，试求润滑油的动力黏度  $\mu$ 。
- 1-12 如题图 1-2 所示为一绕自身轴旋转的圆锥体，圆锥体高为  $H = 0.5\text{m}$ ，锥顶角为  $R = 0.3\text{m}$ ，旋转圆锥体与固定的外锥体的窄小间隙为  $\delta = 1\text{mm}$ ，该间隙用黏度为  $\mu$  的润滑油充满，当圆锥体以角速度  $\omega = 16\text{rad/s}$  旋转时，求所需旋转力矩  $M$ 。



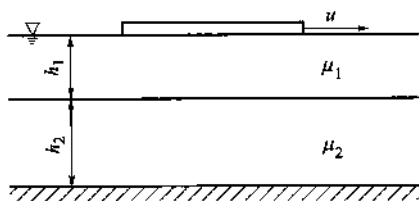
题图 1-1



题图 1-2



题图 1-3



题图 1-4