

21世纪高等学校土木工程专业系列教材

ERSHIYISHIJI GAODENGXUEXIAOTUMUGONGCHENGZHUANYEXILIEJIAOCAI

工程流体力学



GONGCHENGLIUTILIXU 主编 王英 李诚

GONGCHENGLIUTILIXUE

GONGCHENGLIUTILIXUE

26
1/6



中南大学出版社

21世纪高等

ERSHI

TB126

W432.1/6

系列教材

ONGCHENGZHUANYEXILIEJIAOCAI

TB126

W432.1/6

工程流体力学

- [37] Crowe C T, et al. Engineering Fluid Mechanics. 7th ed. John Wiley & Sons, N. Y., 1998
- [38] White F M. Fluid Mechanics. 3rd ed. McGraw - Hill, 1994
- [39] Fox R W, et al. Introduction to Fluid Mechanics. 4th ed. John Wiley & Sons, 1992
- [40] 周光炯等著. 流体力学(第2版). 北京: 机械工业出版社, 1990
- [41] 李... 1990
- [42] ... 1990
- [43] ... 1990
- [44] ... 1990
- [45] ... 1990
- [46] ... 1990
- [47] ... 1990
- [48] ... 1990
- [49] White F M. Viscous Fluid Flow. 2nd ed. McGraw - Hill, Inc., 1991
- [50] John D, Anderson JR. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw - Hill, N. Y. 1995
- [51] 罗曼芦主编. 气体动力学. 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- [52] 孔珑编著. 可压缩流体动力学. 北京: 机械工业出版社, 1991
- [53] 潘锦珊等编. 气体动力学基础. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [54] 童秉纲, 孔祥言. 气体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1990
- [55] [美] M J 佐克... 北京: 国防工业出版社, 1984
- [56] [美] H W LIEPMAN. 气体动力学基础. 北京: 机械工业出版社, 1982

主编 王英 李诚



787×1092 1/16 印张 21.5 字数 423千字 定价 35.00元

2000年9月第1版 2000年12月第3次印刷

ISBN 7-81061-923-1/O·025

开□ 印□ 封□ 装□

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/王英,李诚主编. —长沙:中南大学

出版社,2004.9

ISBN:7-81061-972-1

I. 工... II. ①王...②李... III. 工程力学:流体

力学 IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 095767 号

工程流体力学

王英 李诚 主编

□责任编辑 黄尚安 程彦滨

□责任印制 文桂武

□出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

□印 装 中南大学印刷厂

□开 本 787×1092 1/16 □印张 19 □字数 453 千字

□版 次 2004 年 9 月第 1 版 □2006 年 12 月第 3 次印刷

□书 号 ISBN 7-81061-972-1/O·052

□定 价 32.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换
中南大学出版社

21 世纪高等学校土木工程系列教材

编写委员会

主 任 刘宝琛 院士

副主任 曾庆元 院士

委 员(以姓氏笔画排序):

方理刚	王桂尧	刘宝琛	刘 杰
吕 昀	余志武	陈秀方	林小松
杨建军	杨伟军	杨晓华	赵建三
钟新谷	郭少华	曾庆元	彭立敏

内容简介

本书是根据高等院校土木类专业流体力学课程教学基本要求，基于加强基础理论、拓宽专业面、按大类培养的教育思想编写的。本教材系统地阐述了工程流体力学的基本概念、基本理论和工程应用。教材共分11章，内容包括绪论，流体静力学，流体动力学基础，流动阻力与水头损失，孔口、管嘴出流及有压管流，明渠均匀流，明渠水流的流态及其转换，明渠恒定非均匀渐变流，堰闸出流及底流消能，渗流，可压缩气体的一元恒定流动等。教材中的例题涉及多个专业，力求富有创意，各章配有小结及思考题，精选的习题许多来自各类试题。

本书可作为高等院校土木工程、市政工程、环境工程、地质工程、给排水工程等有关专业的本科、专科工程流体力学或水力学课程的教材，也可作为其他相近专业的教材和全国注册结构工程师应试的参考书。

前 言

工程流体力学是高等院校土木类各专业的一门重要技术基础课,它既有本学科的系统性和完整性,又有鲜明的工程应用特性。编者根据全国高等院校工科流体力学、水力学教学指导小组审定的土木类专业流体力学教学基本要求以及全国注册结构工程师流体力学考试大纲,结合多年的教学实践经验,本着加强理论基础、拓宽基础知识面、按大类培养的教学改革思想编写的。教材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;以恒定不可压缩流体为主要研究对象,考虑到现代土木工程的需要,又对可压缩气体动力学基础进行了适当介绍;在计算方法上,保留部分传统算法,并结合计算机的应用,适当介绍了迭代算法。在编写过程中注重由浅入深、由易到难,力求做到概念清晰,重点突出,语言简洁,富有启发性,便于教学和适当反映本学科的发展趋势。

为了便于巩固基础理论,书中各章均有本章小结,并注意化解学习中的难点问题,减小坡度,循序渐进,同时为了培养学生分析计算的能力,各章均精选了一定数量的思考题与习题。

本教材可作为高等院校土木工程、市政工程、环境工程、地质工程、给排水工程等有关专业的本科、专科工程流体力学或水力学课程的教材,也可作为其他相近专业的教材和全国注册结构工程师考试的参考书。由于书中包含了土木类各专业所需的内容,在使用时可根据专业要求和学时的多少作必要的取舍。

本教材由中南大学王英、长沙理工大学李诚主编。参加编写工作的有王英(第1、3、4、5章)、李诚(第6、7、8章),中南大学谢晓晴(第2章)、齐朝晖(第4章)和陈焕新(第11章),长沙理工大学李梦成(第9章)、韩振英(第10章)。研究生和本科生李星星、郑力、师小瑜、祝志恒等参与了部分编写、绘图工作。

由于编者水平所限,教材中若有疏漏和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者
2004年6月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 工程流体力学的任务与连续介质模型	(1)
1.2 流体的主要物理力学性质	(3)
1.3 作用在流体上的力	(12)
1.4 工程流体力学的发展简史与研究方法	(14)
1.5 量纲一致性原则	(16)
1.6 量纲分析方法	(20)
1.7 迭代计算方法	(28)
本章小结	(31)
思考题	(31)
习题	(32)
第2章 流体静力学	(35)
2.1 流体静压强及其特性	(35)
2.2 流体的平衡微分方程及其积分	(37)
2.3 重力作用下的流体平衡	(40)
2.4 流体压强的量测	(42)
2.5 作用在平面上的流体静压力	(50)
2.6 作用在曲面上的流体静压力	(54)
本章小结	(59)
思考题	(59)
习题	(61)
第3章 流体动力学基础	(65)
3.1 流体运动的描述	(65)
3.2 流体运动的若干基本概念	(68)
3.3 均匀流特性	(74)
3.4 恒定流动的连续性方程	(77)
3.5 恒定元流的能量方程	(79)
3.6 恒定总流的能量方程	(82)
3.7 恒定总流的动量方程	(94)

本章小结	(101)
思考题	(102)
习题	(104)
第4章 流动阻力和水头损失	(110)
4.1 流动阻力和水头损失的分类	(110)
4.2 层流与紊流	(113)
4.3 均匀流的沿程水头损失	(116)
4.4 圆管中的层流运动	(118)
4.5 紊流的特征	(121)
4.6 紊流的沿程水头损失	(126)
4.7 局部水头损失	(134)
本章小结	(141)
思考题	(142)
习题	(144)
第5章 孔口、管嘴出流及有压管流	(146)
5.1 孔口出流	(146)
5.2 管嘴恒定出流	(151)
5.3 短管的水力计算	(153)
5.4 长管的水力计算	(161)
5.5 离心式水泵装置及其水力计算	(168)
本章小结	(173)
思考题	(174)
习题	(176)
第6章 明渠均匀流	(183)
6.1 概述	(183)
6.2 明渠均匀流的特性及基本公式	(186)
6.3 水力最佳断面及允许流速	(188)
6.4 明渠均匀流的水力计算	(190)
6.5 无压圆管均匀流	(193)
本章小结	(197)
思考题	(198)
习题	(198)
第7章 明渠水流的两种流态及其转换	(200)
7.1 缓流和急流	(200)
7.2 断面比能与临界水深	(204)

7.3 临界底坡、缓坡和陡坡	(207)
7.4 水跃和水跌	(209)
本章小结	(216)
思考题	(216)
习题	(217)
第8章 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线分析计算	(219)
8.1 棱柱体明渠水面曲线微分方程	(219)
8.2 棱柱体明渠水面曲线的定性分析	(221)
8.3 棱柱体明渠水面曲线的定量计算	(228)
8.4 非棱柱体明渠水面曲线计算	(232)
本章小结	(234)
思考题	(234)
习题	(235)
第9章 堰闸出流及底流消能	(237)
9.1 堰流特征及其分类	(237)
9.2 堰流的基本公式	(239)
9.3 薄壁堰流	(240)
9.4 实用堰流	(242)
9.5 宽顶堰流	(245)
9.6 闸孔出流	(248)
9.7 底流消能水力计算	(251)
本章小结	(258)
思考题	(258)
习题	(258)
第10章 渗流	(260)
10.1 渗流基本概念与达西定律	(260)
10.2 无压均匀渗流与渐变渗流	(265)
10.3 浸润线的定性分析及定量计算	(266)
10.4 井和井群	(269)
本章小结	(274)
思考题	(275)
习题	(275)
第11章 一元气体动力学基础	(277)
11.1 音速与马赫数	(277)
11.2 理想气体一元恒定流动的基本方程	(279)

第1章 绪论

1.1 工程流体力学的任务与连续介质模型

1.1.1 工程流体力学的任务

工程流体力学是从力学的观点出发,研究流体的平衡和机械运动的规律及其实际应用的科学。这个简单的定义,概括了下面三个涵义。

1. 工程流体力学的研究对象是以水为代表的流体

自然界的物质有三种存在形式:固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。固体由于分子间距离很小,内聚力很大,所以它能保持固定的形状和体积,能承受一定数量的拉力、压力和剪切力;当外力作用在固体上时,固体将相应产生一定程度的变形,若外力保持不变,变形就不会变化(不计徐变时)。而流体则不同,由于分子间距离较大,内聚力很小,几乎不能承受拉力、抵抗拉伸变形;在微小剪切力作用下,流体很容易发生变形或流动,所以流体不能保持固定的形状,其形状随容器而变。我们所观察到的流动现象,诸如微风吹过平静的湖水,水面因受气流的摩擦力(沿水面作用的切向力)而流动;斜坡上的油因受重力沿坡面方向的切向分力而往下流淌等等,都表明流体在静止时不能承受切向力。或者说,任何微小的剪切力一经作用于静止流体,流体立即破坏其原来的平衡状态开始变形,且外力不去,变形不止。无限制的连续变形即为流动,流体的这种宏观性质称为流动性,这是流体的基本特征。

液体与气体相比,液体分子内聚力又比气体大得多,因为液体分子间距离相对较小,密度较大,所以液体虽然不能保持固定的形状,但能保持比较固定的体积。一个盛有液体的容器,当其容积大于液体的体积时,液体不会充满整个容器,具有自由表面(又称自由液面,即液体与气体接触的界面)。液体的压缩性和膨胀性很小,在很大的压力作用下,其体积的缩小甚微。而气体不仅没有固定的形状,也没有固定的体积,极易膨胀和压缩,它可以任意扩散直到充满其所占据的有限空间。气体和液体的主要差别是它们的可压缩程度不同,但当气流速度远小于音速的时候,在运动过程中其密度变化很小,气体也能视为不可压缩,此时工程流体力学的基本原理也同样适用于气体。

2. 工程流体力学的研究内容是流体平衡和机械运动的规律

工程流体力学所研究的基本规律,有两大组成部分:一是关于流体平衡的规律,它研究流体处于静止(或相对静止)状态时作用于流体上的各种力之间的关系,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等,这一部分称为流体运动学及动力学。

工程流体力学在研究流体平衡和机械运动规律时,要应用物理学及理论力学中有关物

体平衡及运动规律,如力系平衡定理、牛顿运动定律、能量转换和守恒定律、动量定理等等。因为流体在平衡或运动状态下,也同样遵循这些普遍原理。所以物理学和理论力学的知识是学习工程流体力学课程的必要基础。

3. 工程流体力学的研究目的在于应用

工程流体力学作为力学的一个分支,是技术基础学科,同时也是与工农业生产和生活密切相关的应用科学。在土木、水利、交通、环境、航空航天、机械、采矿、冶金、化工、石油等工程领域,从规划、勘测、设计、施工到运营、维修、养护,都不可避免地要与流体打交道,都有大量的流体力学问题要解决。下面仅以土木工程专业为例简要说明。

规划方面:修建铁路、公路,不可避免地要跨越河流和沟渠,需要架设桥梁、修建涵洞、虹吸管等水工建筑物,因此,在线路布置和选择时,首先必须分析自然河势及其天然水流状态,因势利导,妥善安排。

设计方面:在进行桥、涵等建筑物设计时,必须先弄清通过这些建筑物的流量、水位等,以决定桥孔的长度(跨度),涵、管的孔径以及桥(涵)面的高程;同时,还必须分析计算流体作用在这些建筑物上的力,以计算建筑物的结构与稳定;还有,建筑工程中风对高层建筑的荷载和风振问题;建筑内部的供热、通风、空调的设计和选用;给水排水工程中,无论取水、水处理、输配水都是在水的流动过程中实现的;地下工程(如隧道、地铁)内部的通风和排水设计、高速铁(公)路隧道洞型设计等都与流体运动相关。

施工方面:如建筑物基础施工时的基坑排水、抗渗处理;施工区生产、生活、消防供水等;施工围堰的高度、厚度与采用的材料均需在进行流体力学计算后才能正确选用。

运营、养护方面:铁(公)路修好后,路基的沉陷、崩塌、滑坡、冻胀等灾害,大多与地面水或地下水的活动有关,为使路基经常处于干燥、坚固和良好的稳定状态,必须修建路堑边沟、截水沟和渗水暗沟等;在山区水流湍急的地方,为保护路基、桥梁不致冲坏,还须修建急流槽、跌水等设施。

值得说明的是,工程流体力学不仅可用于解决某项工程中的流体问题,还能帮助工程技术人员进一步认识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相互的、长期的、多方面的,比如台风、洪水直接摧毁房屋、桥梁、堤坝等,造成巨大的自然灾害;另一方面,兴建大型水库、厂矿、公(铁)路、桥梁、隧道、江海堤防等也可能对大气和水环境造成不利影响,导致生态恶化,甚至加重灾害。随着生产的发展,还会不断地提出新的课题,工程流体力学将会发挥更大的作用。因此,工程流体力学是高等院校许多专业的一门重要技术基础课。

1.1.2 流体的连续介质模型

大家知道,流体同任何其他物质一样,都是由分子组成的。从微观上看,分子间是不连续而有空隙的,同时每个分子都在作无规则的热运动,因此,流体的物理量(如密度、压强和流速等)在空间的分布是不连续的,导致空间任一点上流体物理量在时间上的变化也不连续。但工程流体力学所研究的是流体在外力作用下的机械运动,而不研究其微观运动。现代物理研究指出,在常温下,每 1 cm^3 的水中约含有 3.34×10^{22} 个水分子,相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{ cm}$,这与工程研究问题的特征尺度相比是极其微小的。

取一个微小体积 ΔV 的流体(比如令 ΔV 等于 1 cm^3 的万分之一或者更小), ΔV 中所包

含的分子数仍然相当多,如 10^{-9} cm^3 的水中,含有 3.34×10^{13} 个水分子。可见, ΔV 是一种特征体积,宏观上充分小,小到几何上没有维度,只是空间上的一个点;而微观上充分大,包含足够多的分子。流体力学把 ΔV 中所有流体分子的集合称为流体质点(或流体微元、流体微团)。由于流体质点包含了足够多的流体分子,因此,质点的物理特征就是分子团中所有分子特征的统计平均值,单个分子出入分子团,不影响分子团的总体物理特征。流体质点宏观上充分小,质点的尺度远远小于所研究问题的特征尺度,因此,物质在空间分布的不均匀性及物理特征的不稳定性趋于零;微观上充分大,虽然没有维度、没有尺寸,但具有流体的一切物理特征,而且描述其物理特征的各种物理量是均匀的、稳定的、连续的。如果分子团尺度 ΔV 太小,与分子运动尺度同数量级时,由于单个分子的随机出入不能随时平衡,分子数的增减会使分子团的物理特征(如密度等)随机脉动。

连续介质模型是 1753 年由瑞士数学家、物理学家欧拉(Euler)首先提出的:假想流体是一种充满其所占据空间的毫无空隙的连续体,即把流体当作是由密集质点构成的、内部无空隙的连续介质来研究。

流体力学把流体质点作为最基本的研究单位,从而摆脱了由于分子间隙和分子的随机运动所导致的物理量不连续的问题(分子之间是有间隙的,但分子团之间是没有间隙的)。采用连续介质模型,既可以摆脱分子运动的复杂性,也可以满足工程的精度要求。在研究流体的宏观运动时,可以将流体视为均匀连续介质,其物理量是空间和时间坐标的连续函数,这样,我们就可以运用连续函数的方法来分析流体的平衡和运动的规律。

1.2 流体的主要物理力学性质

工程流体力学研究流体平衡和机械运动的规律,而流体的物理力学性质是决定流动状态的内在因素。同工程流体力学有关的物理力学性质主要是惯性特性、万有引力特性、流动性、粘滞性、压缩性等。

1.2.1 惯性特性

流体与其他任何物体一样具有惯性,惯性是保持物体原有运动状态的性质,改变物体的运动状态,必须克服惯性的作用。表示惯性大小的物理量是质量,质量越大,惯性越大,运动状态越难以改变。一个物体反抗改变原有运动状态而作用于其他物体上的反作用力称为惯性力。设物体质量为 m ,加速度为 a ,根据牛顿第二定律,则惯性力 F 为

$$F = -ma$$

式中负号表示惯性力的方向与物体加速度的方向相反。

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度 ρ 。对于均质流体,若其体积为 V ,质量为 m ,则密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.2.1)$$

对于非均质流体,各点的密度不同。要确定空间某点流体的密度,可在该点周围取一微元体积 ΔV ,若它的质量为 Δm ,根据连续介质的假定,有

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.2.2)$$

密度的量纲是 ML^{-3} ，国际单位制(SI)单位是： kg/m^3 。

液体的密度随压强和温度的变化很小，工程计算中，一般可以将之视为均质流体。淡水在常温、常压下的密度采用一个标准大气压下 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的纯净水之值： $\rho = 1000\text{ }kg/m^3$ 。水银的密度 $\rho_p = 13600\text{ }kg/m^3$ 。

气体的密度随压强和温度变化，在一个标准大气压下， 0°C 空气的密度为 $1.29\text{ }kg/m^3$ 。

空气和纯净水在一个标准大气压下的密度随温度的变化见表 1.2.1，几种常见流体的密度见表 1.2.2。

表 1.2.1 一个标准大气压时不同温度下水与空气的密度

温度($^{\circ}\text{C}$)	水(kg/m^3)	空气(kg/m^3)	温度($^{\circ}\text{C}$)	水(kg/m^3)	空气(kg/m^3)
0	999.87	1.293	40	992.24	1.128
4	1000.00	1.270	50	988.07	1.093
10	999.73	1.248	60	983.24	1.060
15	999.12	1.226	70	977.78	1.029
20	998.23	1.205	80	971.83	1.000
25	997.14	1.185	90	965.28	0.973
30	995.67	1.165	100	958.38	0.947

表 1.2.2 几种常见流体的密度(标准大气压时)

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
测定温度($^{\circ}\text{C}$)	20	20	15	20	20	15
密度(kg/m^3)	1.205	13550	700 ~ 750	799	1590	1020 ~ 1030

1.2.2 万有引力特性

万有引力特性是指任何物体之间具有相互吸引作用的性质，其吸引作用称为万有引力。地球对物体的吸引力称为重力或物体的重量 G 。

一质量为 m 的流体，其所受重力的大小为

$$G = mg \quad (1.2.3)$$

式中： g 为重力加速度。工程流体力学计算中一般采用 $g = 9.80\text{ }m/s^2$ 。

1.2.3 粘性特性

1. 粘性的表象

搅动一下容器中的液体，液体会逐渐地运动起来，停止搅动，又会慢慢地停下来，粘稠的油停得快一些，而清澈的水停得慢一些。可见流体的流动性是受粘性制约的，粘性越强，流动性越差，这就是粘性的表象。

再看一个实例：在宽浅水槽的中部，实测各点的流速，可得出液面流速大、底部流速小的流速分布曲线，如图 1.2.1。产生这个现象的原因是：与槽底相接触的液层中的质点由于附着力的作用，粘附在槽底静止不动；同时，因受粘性影响，槽底以上各流层中质点的运动，并非各不相干而是互相牵连着前进的，各流层中质点的速度都要不同程度地受到不动质点的阻滞影响而减慢，离槽底愈近，不动质点的影响愈大，该处质点流速愈慢，这样就形成图中近底流速小、液面流速大的流速分布连续曲线。

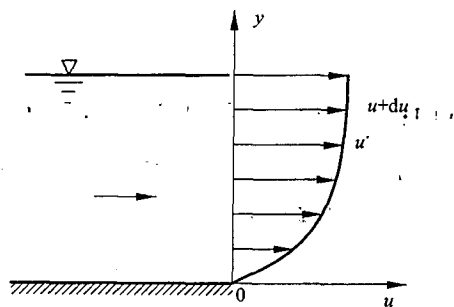


图 1.2.1 宽浅水槽中部流速分布图

2. 牛顿内摩擦定律

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，这种性质称为流体的粘性（或粘滞性），此内摩擦力称为粘滞力。粘性是流体的固有属性，任何一种实际流体都具有粘性。粘性是流体在运动过程中产生阻力和机械能损失的根源。粘性的存在也给流体运动规律的分析带来很多困难。

牛顿（Newton I. 英国）通过著名的平板实验说明了流体的粘性，实验装置如图 1.2.2(a)，两个平置的平行平板，相距为 h ，其间充满流体，平板面积足够大，以至可忽略边缘对液流的影响。下板固定不动，上板受一拉力的作用，以匀速 U 向右运动。因任何微小的剪切力都会引起流体的流动，此时，两板中间的流体自然会发生运动，由于流体具有粘性，与下层平板相接触的一层流体粘附于平板上，速度为零；粘附于上层平板上的流体速度为 U 。实验表明，当 U 与 h 均不大时，沿 y 轴方向，各层流体的运动速度一般呈线性分布，靠近固壁处流速较小，远离固壁处流速较大。若距固壁为 y 处的流速为 u ，在相邻的 $y + dy$ 处的流速为 $u + du$ ，由于两流层流速不一致，两流层之间将产生内摩擦力。下面一层的流速小，对上面一层作用一个与流速方向相反的摩擦力，有将上层流体流速减缓的趋势；而上面一层的流速大，对下层流体作用有一个与流速方向一致的摩擦力，有使其加速的趋势。这两个力成对出现，大小相等，方向相反。

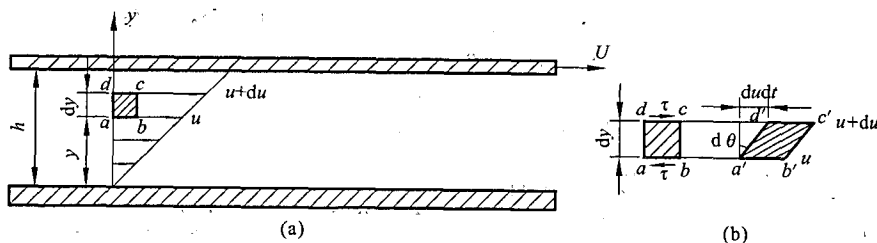


图 1.2.2 牛顿平板实验

牛顿在 1687 年提出（并经后人验证）内摩擦定律：相邻两流层接触面单位面积上所产生的内摩擦力 τ 的大小，与两流层之间的速度差 du 成正比，与两流层之间的距离 dy 成反

比,同时,与流体的性质有关,与接触面上的压力无关。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.2.4)$$

式中: $\frac{du}{dy}$ ——流速沿流层法线方向的变化率,称为流速梯度。表示各流层相对运动的强度。

为进一步说明流速梯度的物理意义,从图 1.2.2 中相距为 dy 的上、下两流层间取矩形流体微团 $abcd$,该微团经 dt 时间后运动至新的位置 $a'b'c'd'$,因两流层的速度相差 du ,微团除平移外,还伴随着形状的改变,由原来的矩形变成了平行四边形,见图 1.2.2(b)。产生了剪切变形(角变形) $d\theta$,其剪切变形速度为 $\frac{d\theta}{dt}$ 。在 dt 时段内, d 点比 a 点多移动的距离为 $du dt$,因为 dt 为微分时段,角变形 $d\theta$ 亦为微分量,可认为

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

即:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1.2.5)$$

可见流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 实为流体微团的剪切变形速度 $\frac{d\theta}{dt}$,牛顿内摩擦定律也可表示为

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1.2.6)$$

即流体因粘性产生的内摩擦力与流体微团的剪切变形速度成正比。当切应力一定时,粘性越大,剪切变形速度越小,所以流体的粘性可视为流体抵抗剪切变形的特性。

式中: μ ——随流体种类而异的比例系数,表征流体粘性的强弱,称为动力粘度(或动力粘滞系数、绝对粘度),简称粘度。 μ 值越大,流体越粘,流动性越差。 μ 随流体种类、温度、压强的变化而变化:温度是影响流体粘性的主要因素,温度升高,液体粘性降低,气体则相反;在低压(通常指低于 100 个大气压)情况下,压强对液体粘度 μ 的影响较小,一般不考虑,气体的粘度不受压强的影响。

粘度 μ 的量纲: FTL^{-2} ; SI 单位: $1 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

在工程流体力学中, μ 值常与密度 ρ 以比值 $\frac{\mu}{\rho}$ 的形式出现,为简便考虑,命名 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$,因其量纲仅具有运动量的量纲 L^2T^{-1} ,故称为运动粘度。其单位为: m^2/s 、 cm^2/s 。

水的运动粘度 ν 随温度变化的经验公式

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1.2.7)$$

式中: t ——水的温度, $^{\circ}\text{C}$; ν 以 cm^2/s 计。

常压下不同温度时水的动力与运动粘度见表 1.2.3,一个大气压下空气的动力与运动粘度见表 1.2.4。

由表可见,液体的粘度随温度升高而减小,气体的粘度却随温度升高而增大。其原因是粘性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果,温度升高,分子间的吸引力降低,分子间的热运动增强,动量增大;温度降低时则相反。对于液体,分子间的引力即内聚力是形成粘性的主要因素,液体分子间的距离较小,温度升高,分子间距离增

大,内聚力减小,粘度随之减小;气体分子间距离远大于液体,分子热运动引起的动量交换是形成粘性的主要因素,温度升高,分子热运动加剧,动量交换加大,粘度随之增大。

表 1.2.3 常压下水的动力粘度与运动粘度

温度(°C)	$\mu(10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu(10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	温度(°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	1.512	1.512	45	0.597	0.603
10	1.306	1.306	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	0.282	0.296

表 1.2.4 一个大气压下空气的动力粘度与运动粘度

温度(°C)	$\mu(10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu(10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$	温度(°C)	$\mu(10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu(10^{-6} \text{m}^2/\text{s})$
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

3. 流体内摩擦力与固体摩擦力的对比

(1) 与固体库伦定律的对比

固体与固体之间的摩擦力 T 遵循库伦定律:

$$T = fN$$

式中: N ——正压力; f ——摩擦系数。可见, 固体之间的摩擦力与正压力有关。

流体之间内摩擦力遵循牛顿内摩擦定律

$$T = \mu A \frac{du}{dy}$$

式中: A ——流体接触面面积。可见, 流体内摩擦力与正压力无关。

(2) 与固体剪切虎克定律的对比