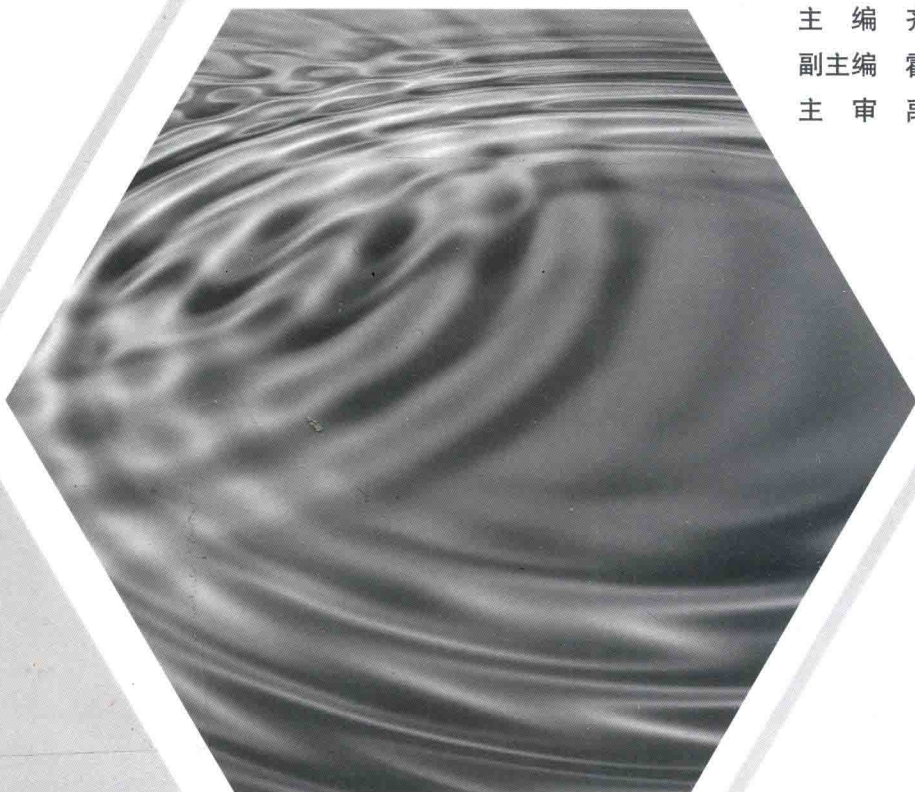




成人教育/网络教育系列规划教材

工程流体力学

Gongcheng Liuti Lixue



主 编 齐清兰

副主编 霍 倩 李 强 张少雄

主 审 禹华谦



人民交通出版社
China Communications Press



成人教育/网络教育系列规划教材

Gongcheng Liuti Lixue

工程流体力学

主 编 齐清兰

副主编 霍 倩 李 强 张少雄

主 审 禹华谦

人民交通出版社

内 容 提 要

本书为成人及网络教育系列规划教材之一。本书系统地介绍了工程流体力学的基本知识。

本书根据成人及网络教育土建类专业40学时“工程流体力学”课程教学基本要求编写。本书内容精练、体系完整、实用性强。全书共分八章,主要包括:绪论;流体静力学;流体动力学;流动阻力及能量损失;孔口、管嘴出流和有压管路;明渠水流、堰流、渗流。

本书可作为高等院校成人及网络教育土木工程专业的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 / 齐清兰主编. --北京:人民交通出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-114-10569-2

I. ①工… II. ①齐… III. ①工程力学—流体力学—成人教育—网络教育—教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 083545 号

成人教育/网络教育系列规划教材

书 名: 工程流体力学

著 作 者: 齐清兰

责任编辑: 温鹏飞

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.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 880 × 1230 1/16

印 张: 14.5

字 数: 360 千

版 次: 2013 年 8 月 第 1 版

印 次: 2013 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10569-2

定 价: 36.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

成人教育/网络教育系列规划教材

专家委员会

(以姓氏笔画为序)

- | | |
|-----|-----------------|
| 王恩茂 | 兰州交通大学土木工程学院 |
| 任宝良 | 西南交通大学土木工程学院 |
| 吴力宁 | 石家庄铁道大学继续教育学院 |
| 宋玉香 | 石家庄铁道大学土木工程学院 |
| 张鸿儒 | 北京交通大学土木建筑工程学院 |
| 赵晓波 | 北京交通大学远程与继续教育学院 |
| 彭立敏 | 中南大学土木建筑学院 |
| 曾家刚 | 西南交通大学成人教育学院 |
| 韩 敏 | 人民交通出版社 |
| 雷智仕 | 兰州交通大学继续教育学院 |
| 廖 耘 | 中南大学继续教育学院 |

出版说明

随着社会和经济的发展,个人的从业和在职能力要求在不断提高,使个人的终身学习成为必然。个人通过成人教育、网络教育等方式进行在职学习,提升自身的专业知识水平和能力,同时获得学历层次的提升,成为一个有效的途径。

当前,我国成人及网络教育的学生多以在职学习为主,学习模式以自学为主、面授为辅,具有其独特的学习特点。在教学中使用的教材也大多是借用普通高等教育相关专业全日制学历教育学生使用的教材,因为二者的生源背景、教学定位、教学模式完全不同,所以带来极大的不适用,教学效果欠佳。总的来说,目前的成人及网络教育,尚未建立起成熟的适合该层次学生特点的教材及相关教学服务产品体系,教材建设是一个比较薄弱的环节。因此,建设一套适合其教育定位、特点和教学模式的有特色的高品质教材,非常必要和迫切。

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》和《国家教育事业第十二个五年规划》都指出,要加大投入力度,加快发展继续教育。在国家的总体方针指导下,为推进我国成人及网络教育的发展,提高其教育教学质量,人民交通出版社特联合一批高等院校的继续教育学院和相关专业院系,成立了“成人及网络教育系列规划教材专家委员会”,组织各高等院校长期从事成人及网络教育教学的专家和学者,编写出版一批高品质教材。

本套规划教材及教学服务产品包括:纸质教材、多媒体教学课件、题库、辅导用书以及网络教学资源,为成人及网络教育提供全方位、立体化的服务,并具有如下特点。

(1)系统性。在以往职业教育中注重以“点”和“实操技能”教育的基础上,在专业知识体系的全面性、系统性上进行提升。

(2)简明性。该层次教育的目的是注重培养应用型人才,与全日制学历教育相比,教材要相应地降低理论深度,以提供基本的知识体系为目的,“简明”,“够用”即可。

(3)实用性。学生以在职学习为主,因此要能帮助其提高自身工作能力和加强理论联系实际解决问题的能力,讲求“实用性”,同时,教材在内容编排上更适合自学。

作为从我国成人及网络教育实际情况出发,而编写出版的专门的全国性通用教材,本套教材主要供成人及网络教育土建类专业学生教学使用,同时还可供普通高等院校相关专业的师生作为参考书和社会人员进修或自学使用,也可作为自学考试参考用书。

本套教材的编写出版如有不当之处,敬请广大师生不吝指正,以使本套教材日臻完善。

人民交通出版社
成人教育/网络教育系列规划教材专家委员会
2012年年底

前 言

《工程流体力学》是根据成人(网络)高等教育土建类专业40学时工程流体力学课程教学基本要求而编写的。本教材以“够用、实用、适用,适合自学”为编写原则,在总体编排上考虑知识的系统全面,而在知识点的介绍上又有相对的独立性,语言通俗易懂,例证丰富,既传授知识又传授学习方法,便于自学,充分体现了教材的系统性、先进性和趣味性。

本书共分八章,主要内容包括绪论,流体静力学,流体动力学,流动阻力及能量损失,孔口、管嘴出流和有压管路,明渠水流,堰流,渗流。为便于自学,每章正文前均有本章导读,学习目标、学习重点、学习难点和学习计划表,除正文中包括大量的例题外,每章后都附有针对性较强的思考题及习题。

本书由石家庄铁道大学齐清兰主编,石家庄铁道大学霍倩、李强、张少雄任副主编。具体分工:第一、三章由齐清兰编写,第四、六章由霍倩编写,第二、五章由李强编写,第七、八章由张少雄编写,全书由齐清兰统稿。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2012.10

自学指导

课程性质:工程流体力学是土木类专业的基础课程,主要讲述流体平衡和机械运动的一般规律,各种流动现象的基本概念与基本理论,各种实际工程问题的分析方法与计算方法。

课程的地位和作用:工程流体力学是一门重要的专业基础课程,工程地质、桥梁工程、隧道工程、道路工程、给水排水工程、土木工程施工等课程,都要用到工程流体力学的相关知识,例如:水对桥墩的荷载计算、水在复杂地层中的流动、城市的供水管网设计等。通过该课程的学习,可以培养学生将相关的工程流体力学理论有机地组织起来应用于专业技术领域、解决特定领域的实际工程问题的能力。

学习目的与要求:通过本课程的学习,学生应能够达到以下要求:掌握流体的物理特性;熟练运用流体平衡理论进行平面上和曲面上静水总压力的计算;掌握流体动力学的基本概念,并能熟练运用连续性方程、能量方程和动量方程对工程中遇到的实际问题进行分析计算;理解能量损失产生的原因,掌握沿程损失和局部损失的计算方法;掌握孔口、管嘴和各种管道的计算方法;掌握明渠均匀流(包括无压圆管均匀流)的计算方法,能解决明渠均匀流的各类计算问题;掌握明渠非均匀流的有关基本概念、明渠流态的判别以及水面曲线的定性分析;掌握堰流的水力计算方法以及宽顶堰理论在小桥孔径水力计算中的应用;掌握渗流的基本定律以及在实际中的应用。

为学好这门课程,应注意以下几点:

- (1) 深入理解基本概念和基础理论。
- (2) 注意学习内容的前后联系与区别。
- (3) 学会融会贯通,掌握解决某一类实际工程问题的普遍方法。
- (4) 注意理论联系实际,重视工程应用。

学习方法:

(1) 刻苦钻研,深入理解基础理论。绪论、流体静力学、流体动力学以及流动阻力及能量损失四章是本教材的基础理论部分,其后续章节是这些理论在特定领域的综合应用,在前四章的学习中,应深入理解并掌握所涉及的基本概念和基础理论,在后续章节的学习中,除掌握特定领域的知识之外,还应注意前四章内容在这些章节的具体应用,达到融会贯通的目的。

(2) 分类总结,熟练应用。在做题过程中,要注意总结各种计算问题的异同,将其分类整理,达到真正掌握的目的。例如:动水压强计算(校核水泵的真空度问题)、流速计算、位置高度计算(水泵安装高程问题)以及管径计算均属于能量方程结合连续性方程的应用问题,因此遇到类似问题时可立刻找到解决问题的思路。

(3) 深入学习,锻炼综合解决问题的能力。教材只是列举少量经典例题说明一般性理论,而实际工程问题的复杂度更高,理论综合性更强,因此决不能满足于掌握某些例题的解题方法和步骤,停留在只会解决与例题相近的某些习题。本教材每一章后面都设有难度不等的思考题,应结合学习内容,去做相应的习题,旨在深入理解各种理论和计算方法的过程中,培养自己综合分析解决实际问题的能力。

(4) 横向比较,融会贯通。教材讲述了诸多基本概念和各类问题的计算方法,要求学员不仅要掌握不同类型问题各自的解题思路,同时还要将各种问题加以对比,搞清楚各种解题方法的相同点和不同点,做到融会贯通,灵活地运用各种理论和方法来分析问题。

2 工程流体力学

(5) 摒弃不正确的生活经验,用所学理论解决问题。在学习的过程中,你会发现自己的许多固有思维,例如水流一定是由高处向低处流动,水沿竖直管道向下流动时会越流越快,向上流动时会越流越慢……被颠覆,当这种冲突发生时,一定要摒弃不正确的生活经验,用教材所介绍的理论科学地解答这些问题。当正确的观念形成后,你可以主动发现生活中的问题并尝试解答,例如:软管为什么能够自动抽取鱼缸底部的水呢?是否应该关着厨房门让抽油烟机工作呢?这时你会感到乐趣无穷。

目 录

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 第一节 概述 | 3 |
| 第二节 流体的连续介质模型 | 4 |
| 第三节 流体的主要物理性质 | 4 |
| 第四节 作用在流体上的力 | 10 |
| 思考题 | 11 |
| 习题 | 11 |
| 第二章 流体静力学 | 13 |
| 第一节 流体静压强及其特性 | 15 |
| 第二节 重力作用下流体静压强的分布规律 | 17 |
| 第三节 测量压强的仪器 | 21 |
| 第四节 作用在平面上的静水总压力 | 25 |
| 第五节 作用在曲面上的静水总压力 | 30 |
| 思考题 | 33 |
| 习题 | 34 |
| 第三章 流体动力学 | 39 |
| 第一节 描述流体运动的两种方法 | 41 |
| 第二节 欧拉法的几个基本概念 | 42 |
| 第三节 恒定一元流连续性方程 | 48 |
| 第四节 理想流体及实际流体恒定元流能量方程 | 50 |
| 第五节 实际流体恒定总流能量方程 | 54 |
| 第六节 总水头线和测压管水头线的绘制 | 60 |
| 第七节 恒定气流能量方程 | 62 |
| 第八节 恒定总流动量方程 | 64 |
| 思考题 | 70 |
| 习题 | 71 |
| 第四章 流动阻力及能量损失 | 77 |
| 第一节 能量损失的物理概念及其分类 | 79 |
| 第二节 流体运动的两种形态 | 81 |
| 第三节 恒定均匀流沿程损失与切应力的关系 | 84 |
| 第四节 圆管中的层流运动 | 86 |
| 第五节 圆管中的紊流 | 88 |
| 第六节 圆管中沿程阻力系数的变化规律及影响因素 | 91 |
| 第七节 非圆管的沿程损失 | 95 |
| 第八节 局部损失 | 97 |
| 思考题 | 104 |

2 工程流体力学

| | |
|--------------------------|-----|
| 习题 | 105 |
| 第五章 孔口、管嘴出流和有压管路 | 109 |
| 第一节 薄壁小孔口的恒定出流 | 111 |
| 第二节 管嘴的恒定出流 | 114 |
| 第三节 短管计算 | 115 |
| 第四节 长管计算 | 125 |
| 思考题 | 131 |
| 习题 | 132 |
| 第六章 明渠水流 | 137 |
| 第一节 概述 | 139 |
| 第二节 明渠均匀流 | 140 |
| 第三节 无压圆管均匀流的水力计算 | 149 |
| 第四节 明渠非均匀流若干基本概念 | 152 |
| 第五节 水跃 | 159 |
| 第六节 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程 | 162 |
| 第七节 棱柱形渠道恒定非均匀渐变流水面曲线的分析 | 163 |
| 思考题 | 170 |
| 习题 | 171 |
| 第七章 堰流 | 173 |
| 第一节 堰流的特点及其分类 | 175 |
| 第二节 堰流的基本公式 | 176 |
| 第三节 薄壁堰 | 177 |
| 第四节 宽顶堰 | 179 |
| 第五节 小桥孔径的水力计算 | 183 |
| 思考题 | 186 |
| 习题 | 186 |
| 第八章 渗流 | 189 |
| 第一节 概述 | 191 |
| 第二节 渗流基本定律 | 192 |
| 第三节 地下水的均匀流和非均匀流 | 195 |
| 第四节 井和集水廊道 | 199 |
| 思考题 | 204 |
| 习题 | 204 |
| 模拟试卷(A) | 206 |
| 模拟试卷(B) | 209 |
| 部分习题参考答案 | 212 |
| 附录 | 216 |
| 附录1 各种不同粗糙面的粗糙系数 n | 216 |
| 附录2 谢才系数 C 的数值表 | 217 |
| 附录3 梯形渠道水力计算图解 | 219 |
| 参考文献 | 221 |

第一章 DIYIZHANG

绪论



本章导读

我们的生活离不开空气和水,两者都属于流体。工程流体力学就是研究流体(液体和气体)平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门科学。在日常生活中,流体力学问题随处可见,例如:水在自来水管中的流动,飞机在空中飞翔,游泳时感受到的浮力作用,由于排水不畅而导致的城市内涝等。

本章首先概要介绍流体的一般特征以及流体力学的发展历史,然后详细阐述液体和气体的若干物理性质,如黏滞性、压缩性等,在忽略某些特性的基础上,引出流体力学的三大基本模型:连续介质模型、理想流体模型和不可压缩流体模型。本章最后一节讨论作用在流体上的力。



学习目标

流体的主要物理性质;作用在流体上的力;流体的力学模型。



学习重点

流体的主要物理性质;作用在流体上的力;流体的力学模型(连续介质模型、理想流体模型、不可压缩流体模型)。



学习难点

对流体黏滞性的理解。



本章学习计划

| 内 容 | 建议自学时间 (学时) | 学 习 建 议 | 学 习 记 录 |
|---------------|----------------|---|---------|
| 第一节 概述 | 0.25 | 掌握流体力学的研究任务及研究对象 | |
| 第二节 流体的连续介质模型 | 1.0 | 1. 掌握流体的连续介质模型； 2. 掌握流体的惯性、黏滞性、压缩性、膨胀性等重要物理性质； 3. 掌握理想流体模型、不可压缩流体模型 | |
| 第三节 流体的主要物理性质 | | | |
| 第四节 作用在流体上的力 | 0.25 | 掌握表面力与质量力概念,并会举例 | |

第一节 概 述

一、流体力学的任务及研究对象

流体力学是用实验和理论分析的方法来研究流体平衡和机械运动的规律及其实际应用的一门科学。流体力学按其研究内容侧重面不同,分为理论流体力学和应用流体力学(统称为工程流体力学)。前者侧重研究理论体系,注重数学推导,后者侧重于解决工程实际问题。本教材以应用为主,属后者范畴。

在地球上,物质存在的主要形式是固体、液体和气体。由于同体积内分子数目、分子间距、分子内聚力等物质内部微观属性存在差异,导致它们的宏观表象也不同:固体有一定的体积和一定的形状;液体有一定的体积而无一定的形状,但有自由表面;气体无一定的体积也无一定的形状。流体包括液体和气体,流体力学的研究对象为液体和气体。

从力学分析意义上看,流体和固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体有能力抵抗一定的拉力、压力和剪切力,相应的科学是材料力学、弹性力学等;而流体几乎不能承受拉力,处于静止状态下的流体还不能抵抗剪切力,即流体在很小剪切力的作用下将发生连续不断的变形,直到剪切力消失为止。流体的这种特性称为易流动性。流体可承受压力,但气体与液体压缩性不同,气体易于压缩,而液体难于压缩。液体与气体在运动状态下表现出相似的规律,易流动性是两种物质的共性,也是流体区别于固体的根本标志,因此在历史发展中,逐渐形成了流体力学这一门独立学科。

二、流体力学的发展历史

流体力学的萌芽,人们认为是从距今 2000 多年前西西里岛上的希腊学者阿基米德(Archimedes,公元前 287—公元前 212 年)写的“论浮体”一文开始的。他对静止时的液体力学性质作了第一次科学总结。

15 世纪中叶至 18 世纪下半叶,生产力有了很大的发展,遇到许多流体力学问题,但由于科学水平的限制,人们主要用实验的方法或直觉来解决。

1738 年,瑞士数学家伯努利(D. Bernoulli,1700—1782 年)出版了名著《流体动力学》,建立了表达流体位势能、压强势能和动能之间的能量转换关系的伯努利方程。1755 年,瑞士数学家欧拉(L. Euler,1707—1783 年)提出了流体的连续介质模型以及流体运动的解析方法。这些成就为研究流体运动的规律奠定了理论基础,在此基础上形成一门属于数学的“古典流体力学”。

在“古典流体力学”的基础上,纳维和斯托克斯提出了著名的实际黏性流体的基本运动方程,为流体力学的长远发展奠定了理论基础。但由于“古典流体力学”所用数学求解的复杂性和流体模型的局限,不能有效地解决工程问题,于是科学家与工程技术人员试图从实验角度来解决流体力学问题,故形成了以实验方法来总结经验公式的“实验流体力学”。通过实验研究的途径,人们制定了一些经验公式,以满足工程的需要。虽然其中有些经验公式缺乏理论基础,且应用范围狭窄且缺乏进一步发展的基础,但却为后人留下不少宝贵的遗产。

从 19 世纪起,纯理论研究或单独用实验方法研究流体运动规律已不能适应高速发展的生产需要,从而使流体力学走上了理论分析与实验研究相结合的道路。两者的紧密配合进一步推动

学习记录 了流体力学的发展,形成了“现代流体力学”。如1876年英国物理学家雷诺(O. Reynolds, 1842—1912年)在系统实验的基础上,揭示了流体运动时的两种形态——层流和紊流。次年,他又提出了紊流运动的基本方程式——雷诺方程;1933年尼古拉兹(J. Nikuradze, 1894—1979年)通过对人工粗糙管的系统实验得出了水流阻力与水头损失的关系。法国工程师达西(H. Darcy, 1803—1858年)、爱尔兰工程师曼宁(Robert Manning, 1816—1897年)、英国工程师弗汝德(W. Froude, 1810—1879年)及德国工程师普朗特(L. Prandtl, 1875—1953年)等都进行了大量的实验研究和理论分析,促进了流体力学的新发展。

我国是文明古国,水利事业历史悠久,人们在长期实践中逐步加深了对流体运动规律的认识。如:4000多年前大禹治水,就说明人们已经认识到治水应顺水之性,需引导和疏通。秦朝在公元前256~公元前210年间修建了都江堰、郑国渠和灵渠,隋朝(587—610年)完成的南北大运河,说明当时对明渠水流和堰流的认识已达到相当高的水平。距今1000多年前的计时工具“铜壶滴漏”,就是根据孔口出流原理使盛水容器水位发生变化来计算时间的,表明当时对孔口出流的规律已有相当的认识。清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量等于过水断面面积乘以断面平均流速的计算方法。

在20世纪60年代以后,由于计算机的发展与普及,流体力学的应用更是日益广泛。在建筑工程中的应用,如地基降水、路基排水、地下水渗流、水下与地下建筑物的受力分析、围堰修建等;在市政工程中的应用,如桥涵孔径的设计、给水排水、管网计算、泵站和水塔的设计、隧道通风等;在城市防洪工程中的应用,如河道的过流能力,堤、坝的作用力与渗流问题,防洪闸坝的过流能力问题等;在建筑环境与设备工程中的应用,如供热、通风与泵站设计等;在安全工程中的应用,如室内自喷消防系统设计等。

第二节 流体的连续介质模型

从分子结构的观点来看,物质都是由分子组成的,组成物质的分子是不连续的,彼此间有空隙。由于分子间有空隙存在,故严格地说,流体是不连续的。但是,流体力学的任务并不是研究个别分子的微观运动,而是研究大量分子“集体”所显示的特性,也就是所谓的宏观特性或宏观量。因此,可以设想把所讨论的流体无限制地分割成为无限小的流体微元,相当于微小的分子集团,它的尺度大小同一切流动空间相比微不足道,却含有大量分子,并具有一定的质量,叫做流体的“质点”(或微团)。从而认为,流体就是由这样的一个个紧挨着一个的连续的质点所组成,其中再也没有任何空隙的连续体,即所谓“连续介质”。同时又认为流体的物理、力学特性,如密度、速度、压力和能量等,也具有随同位置而连续变化的性质。这样就排除了分子运动的复杂性,而把物理量视为时空连续函数,可方便地应用数学分析中的连续函数理论来分析流体的运动。连续介质假定对大多数流体都是适用的,但对于很稀薄的气体,应视为不连续体,而不能应用连续介质模型。

第三节 流体的主要物理性质

流体具有惯性、黏滞性、压缩性、膨胀性和表面张力特性等重要物理性质,流体的黏滞性是本

节介绍的重点。

一、惯性

一切物质都具有惯性,惯性是物质保持原有运动状态的特性。质量是物体惯性大小的量度,质量越大,惯性也越大。单位体积流体所具有的质量称为密度

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1a)$$

密度的量纲为 $[M/L^3]$,国际单位是 kg/m^3 。

对于非均质流体,密度随点而异。若取包含某点在内的体积 ΔV ,其中质量为 ΔM ,则该点密度需用极限方式

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1-1b)$$

重度 γ 是单位体积流体所具有的重量,与密度的关系

$$\gamma = \rho g \quad (1-2)$$

其量纲为 $[M/L^2T^2]$,国际单位是 N/m^3 。在工程计算中一般采用 $g = 9.8m/s^2$ 。

气体的密度随压强和温度而变化,一个标准大气压(101.325kPa)下 $0^\circ C$ 空气的密度为 $1.29kg/m^3$ 。

纯净的水在一个标准大气压条件下,其密度和重度随温度的变化见表1-1。几种常见流体的重度见表1-2。

水的密度和重度

表 1-1

| 温度($^\circ C$) | 重度(N/m^3) | 密度(kg/m^3) | 温度($^\circ C$) | 重度(N/m^3) | 密度(kg/m^3) |
|------------------|---------------|----------------|------------------|---------------|----------------|
| 0 | 9799 | 999.9 | 40 | 9724 | 992.2 |
| 5 | 9800 | 1000.0 | 50 | 9683 | 988.1 |
| 10 | 9797 | 999.7 | 60 | 9635 | 983.2 |
| 15 | 9791 | 999.1 | 70 | 9582 | 977.8 |
| 20 | 9782 | 998.2 | 80 | 9524 | 971.8 |
| 25 | 9771 | 997.1 | 90 | 9460 | 965.3 |
| 30 | 9757 | 995.7 | 100 | 9392 | 958.4 |

几种常见流体的重度

表 1-2

| 流体名称 | 水银 | 汽油 | 酒精 | 四氯化碳 | 海水 |
|------------------|--------|-------------|--------|-------|--------------|
| 重度(N/m^3) | 133280 | 6664 ~ 7350 | 7778.3 | 15600 | 9996 ~ 10084 |
| 温度($^\circ C$) | 0 | 15 | 15 | 20 | 15 |

在工程计算中,通常将液体的密度和重度看作常量,如采用水的密度 $\rho = 1000kg/m^3$ (重度 $\gamma = 9800N/m^3$)。

二、黏滞性和理想流体模型

与固体不同,流体具有易流动性,静止时不能承受任何微小的切应力,也不能抵抗剪切变形。当流体处在运动状态时,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黏滞性,此内摩擦力又称为黏滞力。黏滞性是流体的基本特性之一,只有在相对运动时才显示出来,静止流体则不显示黏滞性。

学习记录

现以沿固体平面壁作直线流动的液体为例说明流体的黏滞性,如图 1-1 所示,当液体沿着一个固体平面壁作平行的直线流动时,液体质点是有规则的一层一层向前运动而不互相混掺(这种各流层间互不干扰的运动称为“层流运动”,以后我们将详细讨论这种运动的特性)。由于液体

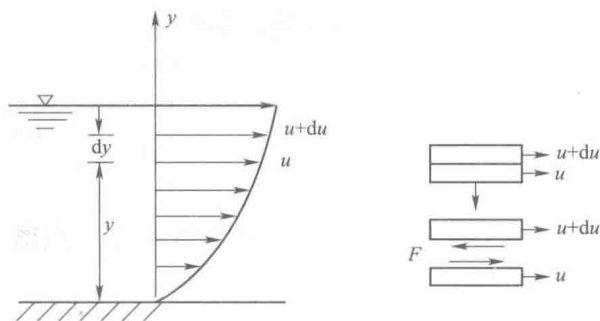


图 1-1 黏性流体的相对运动

具有黏滞性的缘故,靠近壁面附近流速较小,远离壁面处流速较大,因而各个不同液层的流速大小是不相同的。若距固体边界距离为 y 处的流速为 u ,在相邻的 $y + dy$ 处的流速为 $u + du$,由于两相邻液层间存在着相对运动,在两液层之间将对地产生内摩擦力。下面一层液体对上面一层液体作用了一个与流速方向相反的摩擦力,而上面一层液体对下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的摩擦力,这两个力大小相等,方向相反,都具有抵抗其相对运动的性质。

前人的科学实验证明,内摩擦力 F 与流体的性质有关,并与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 及接触面积 ω 成正比,而与接触面上的压力无关,即

$$F \propto \omega \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

引入比例系数 μ ,并以 τ 表示单位面积上的摩擦力(即黏滞切应力),则得

$$\tau = \frac{F}{\omega} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

上式就是著名的“牛顿内摩擦定律”,它可表述为:作层流运动的流体,相邻流层间单位面积上所作用的内摩擦力(或黏滞力),与流速梯度成正比,同时与流体的性质有关。式中的 μ 是与流体的物理性质有关的比例系数,称为动力黏滞系数(或动力黏性系数)。黏性大的流体 μ 值大,黏性小的流体 μ 值小。 μ 的国际单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

流体的黏性还可以用 ν 来表示, ν 称为运动黏滞系数,与动力黏滞系数的关系为 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$,其国际单位是 m^2/s 。

流体的黏滞系数主要随温度变化。水的运动黏滞系数 ν 随温度 t 变化的经验公式为

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-5)$$

式中, t 为水温,以 $^{\circ}\text{C}$ 计, ν 以 cm^2/s 计,为了使用方便,在表 1-3 中列出不同温度时水的 ν 值。

不同水温时的 ν 值

表 1-3

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 温度($^{\circ}\text{C}$) | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| ν (cm^2/s) | 0.01775 | 0.01674 | 0.01568 | 0.01473 | 0.01387 | 0.01310 | 0.01239 | 0.01176 | 0.01118 | 0.01062 | 0.01010 |
| 温度($^{\circ}\text{C}$) | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| ν (cm^2/s) | 0.00989 | 0.00919 | 0.00877 | 0.00839 | 0.00803 | 0.00725 | 0.00659 | 0.00603 | 0.00556 | 0.00515 | 0.00478 |

在表 1-4 中,列举了一个工程大气压下($98.07\text{kN}/\text{m}^2$)不同温度时空气的黏滞系数。

由表 1-3 及表 1-4 可看出,水和空气的黏滞系数随温度变化的规律是不同的,这是因为流体黏滞性是由流动流体的内聚力和分子动量交换所引起的。随温度升高,液体的黏滞性都减小,而气体黏滞性增大。这是由于液体分子间距较小,相互吸引力即内聚力较大,内聚力是影响黏滞性

的主要原因。随着温度升高,分子间距增大,内聚力减小,黏滞性降低。气体分子间距大,内聚力很小,其黏滞性主要与分子间动量交换有关,随着温度升高,分子间动量交换加剧,切应力随之增加,黏滞性增大。一般在相同条件下,液体的黏滞系数要大于气体的黏滞系数。

一个工程大气压下空气的黏滞系数

表 1-4

| $t(^{\circ}\text{C})$ | $\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$ | $\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$ | $t(^{\circ}\text{C})$ | $\mu(10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$ | $\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$ |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 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 |

必须指出,牛顿内摩擦定律只适用于一般流体,对于某些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体,如水、空气、汽油、煤油、甲苯、乙醇等。不符合的叫做非牛顿流体,如接近凝固的石油、泥浆等。它们的差别可用图 1-2 表示。本书只讨论牛顿流体。

当考虑流体的黏滞性后,将使流体运动的分析变得很复杂。在流体力学中,为了简化分析,可以对流体的黏滞性暂不考虑,而引出没有黏滞性的理想流体模型。在理想流体模型中,黏滞系数 $\mu=0$ 。由理想流体模型分析所得的结论应用到实际流体中时,必须对没有考虑黏滞性而引起的偏差进行修正。

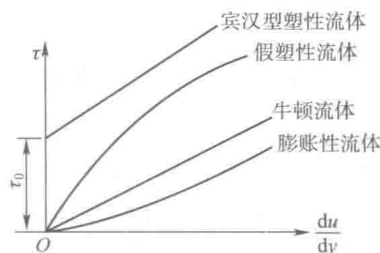


图 1-2 牛顿流体和几种非牛顿流体比较图

三、压缩性和膨胀性

流体受压后体积减小,同时其内部将产生一种企图恢复原状的内力(弹性力)与所受压力维持平衡,撤除压力后,流体可立即恢复原状,这种性质称为流体的压缩性或弹性。若流体受热,则体积膨胀,密度减小,这种性质称为流体的膨胀性。

1. 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来量度。设压缩前的体积为 V ,密度为 ρ ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,密度增加 $d\rho$,其体积压缩系数为

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

由于当 dp 为正时, dV 必为负值,故上式右端加一负号,保持 β 为正数。 β 的单位为 m^2/N 。体积压缩系数又可表示为

$$\beta = -\frac{d\rho}{\rho dp} \quad (1-7)$$