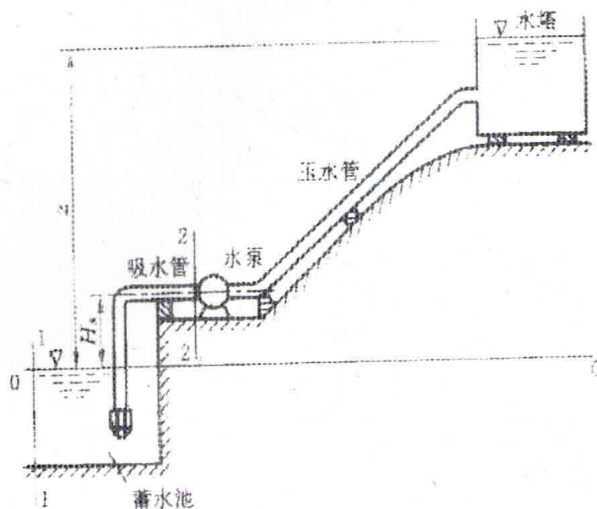
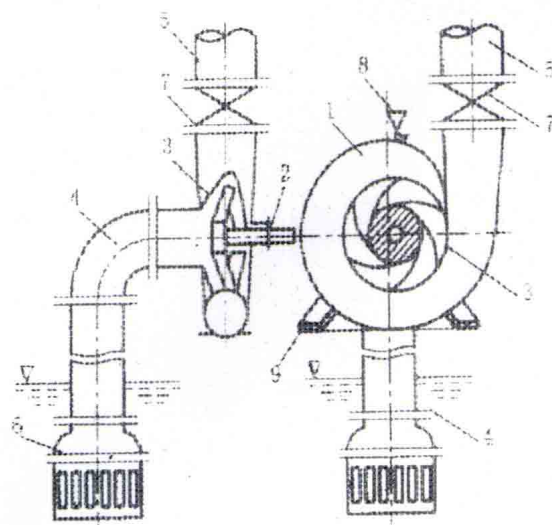


普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

流体力学 (第3版)

L T L X

胡敏良 吴雪茹 主编



普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

流体力学

(第3版)

主 编 胡敏良 吴雪茹
主 审 徐伟章

武汉理工大学出版社

【内容简介】

本书是普通高等学校土木工程专业新编系列教材之一,是根据普通高等学校土建类专业流体力学少学时的教学要求,并本着加强基础理论、理论联系实际、利于教学和按大类培养的教学改革思想编写。本书在整体安排上由浅入深,在静水力学之后,从液体的微元理论出发,介绍了流体力学的基本原理、基本研究和一般计算方法。为方便学生学习,书中每章后附有思考题和习题。

本书可作为高等学校土木工程、道路桥梁工程、市政工程、环境工程、地质工程等专业的流体力学或水力学教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

【主编简介】

胡敏良 武汉大学水利水电学院教授。1967年毕业于清华大学水利工程系,1981年武汉水利电力学院研究生毕业,获水力学专业硕士学位,1986~1987年在美国衣阿华大学(University of Iowa)当访问学者。现任中国水利学会水力学专业委员会委员,湖北省暨武汉市力学学会流体力学专业委员会主任委员。长期从事工程流体力学和水力学的教学与科研工作,发表学术论文20余篇,其中6篇被国际三大检索收录。

E-mail: mlhu@WUHEE. edu. cn

吴雪茹 广西大学土木工程学院副教授,毕业于广西大学水工结构水利工程建筑方向研究生班,长期从事水力学、流体力学教学和水利工程水力学、河流水力学的研究工作,主持或参与完成了20多座大中型水利工程的水工模型试验研究和20多座跨江大桥或特大桥的防洪评价工作。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/胡敏良,吴雪茹主编. —3版. —武汉:武汉理工大学出版社,2008. 6

ISBN 978-7-5629-2722-8

(高等学校土木工程专业(本科)系列教材)

I. 流… II. ①胡… ②吴… III. 流体力学-高等学校-教材 IV. 035

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第083223号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市武昌珞狮路122号 邮政编码:430070)

<http://www.techbook.com.cn>(理工图书网)

印刷者:武汉理工大印刷厂

经销者:各地新华书店

开本:880×1230 1/16

印张:12

字数:397千字

版次:2000年7月第1版 2003年7月第2版 2008年6月第3版

印次:2008年6月第1次印刷 总第8次印刷

印数:31001—34000册

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87397097 87383695

出版说明

(第3版)

1998年教育部颁布了新的高等学校本科专业目录,将“建筑工程专业”拓宽为“土木工程专业”。为了适应专业拓宽后教学的需要,解决教材缺乏的燃眉之急,我们2000年率先组织编写了“普通高等学校土木工程专业新编系列教材”。这套教材经中国土木工程学会教育工作委员会审订,并向全国高等学校推荐之后,已被众多高等学校选用,同时也得到了广大师生和社会的好评。其中多种教材荣获教育部全国高等学校优秀教材奖或优秀畅销书奖,并被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。截至2006年底,单本书销量最高的已达几十万册。这充分说明了教材编审委员会关于教材的定位、内容、特色和编写宗旨符合土木工程专业的教学要求,满足了专业建设的急需,但它仍然存在缺点和不足。随着我国土木工程建设领域国家标准、规范的修订和高等工程教育教学改革的新发展,教材编审委员会于2003年及时对本套教材进行了第2次修订,并根据高等学校土木工程专业本科教学的需要,增补出版了13种教材。

教材必须及时反映我国土木工程领域科学技术的最新发展,以及高等工程教育教学改革所取得的阶段性成果。根据这些要求,教材编审委员会决定2007年对本套教材进行第3次修订,教材编审委员会的成员也将进行相应的增补和调整。

(1)在教学过程中使用本套教材的各高等学校土木工程专业的师生,积极支持我社开展的教材审读活动,并根据教学实践提出了很多中肯的意见和建议,我们尽管在教材重印时及时做了局部修改,但仍感到存在一些问题,需要做较系统的修订。

(2)第3版教材的修订将及时反映当前土木工程建设领域发展的最新成果,尤其是新材料、新技术、新工艺和新设备,使教材内容与国家和行业最新颁布的标准、规范同步。

(3)第3版教材的修订将更准确地体现高等学校土木工程专业指导委员会为土木工程专业教学制定的《土木工程专业本科(四年制)培养目标和毕业生基本规格》、《专业基础课程教学大纲》、《专业课群组核心课程教学大纲》等文件精神。教材将在宽口径土木工程专业的建设方面进行认真探索,并为高等工程教育人才培养提供新的经验。

(4)第3版教材的修订将注重教材的立体化建设,充分利用多媒体教学手段以提高教学质量。我们配合中国土木工程学会教育工作委员会举办了“首届全国高等学校土木工程专业多媒体教学课件竞赛”活动,并将从获奖作品中遴选相关课程的优秀课件正式出版。

第3版教材的修订工作仍将秉承教材编审委员会既定的宗旨,把教材的内容质量放在第一位,并力求更好地满足教学需要。我们更希望广大师生能一如既往地关注本套教材,并及时反馈各校专业建设和教学改革的意见和建议,以便我们再次修订,将本套教材打造成名副其实的精品教材。

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

编 审 委 员 会

(第3版)

顾 问:成文山 滕智明 罗福午 李少甫 甘绍熺

施楚贤 白绍良 彭少民 范令惠

主 任:江见鲸 吕西林 雷绍锋

副主任:朱宏亮 赵均海 刘伟庆 辛克贵 袁海庆 吴培明

刘立新 赵明华 朱彦鹏 徐礼华 戴国欣

委 员:(按姓氏笔画顺序排列)

毛鹤琴 王天稳 王社良 邓铁军 白晓红 包世华

田道全 叶献国 卢文胜 江见鲸 吕西林 刘立新

刘长滨 刘永坚 刘伟庆 朱宏亮 朱彦鹏 孙家齐

过静君 闵小莹 李世蓉 李必瑜 李启令 吴培明

吴炜煜 辛克贵 何铭新 汤康民 陈志源 汪梦甫

张立人 张建平 邵旭东 罗福午 周 云 赵明华

赵均海 尚守平 杨 平 杨志勇 柳炳康 胡敏良

俞 晓 桂国庆 袁海庆 徐 伟 徐礼华 秦建平

蒋沧如 彭少民 覃仁辉 雷俊卿 雷绍锋 蔡德明

廖 莎 燕柳斌 戴国欣

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德明

前 言

(第 3 版)

流体力学是一门古老而年轻的学科,其应用范围非常广泛,是土木工程专业的基础课程。本书是普通高等学校土木工程专业新编系列教材之一,适用于 40 学时左右教学需要。是根据普通高等学校土建类专业流体力学少学时的教学要求,并本着加强基础理论、理论联系实际、利于教学和按大类培养的教学改革思想编写的。

全书分 10 章,内容包括:绪论,流体静力学,流体运动学,理想流体动力学和恒定平面势流,实际(粘性)流体的动力学基础,层流、紊流及其水头损失,量纲分析和流动相似原理,孔口管嘴出流和有压管流,明渠水流和堰流,渗流。本书整体安排是由浅入深,在静水力学之后,从液体的微元理论出发,介绍了流体力学的基本原理、基本研究和一般计算方法。书中考虑到高等学校土建类的土木工程、道路桥梁工程、市政工程、环境工程、地质工程等专业的特点,涉及面比较广,但同样注意到对大量内容的删繁求精,教材中的每章后附有思考题和习题。

本次对全书的一些符号和术语进行了修正,使之更规范。修订中除保持第 2 版重视物理力学概念表述的同时,还注重文字叙述的严谨和准确,对文字、内容和章节进行提炼,力图对学生有潜移默化的影响。为方便教和学,每章后增加了本章小结,并配有电子教案,可作为高等学校土木工程、道路桥梁工程、市政工程、环境工程、地质工程等专业的流体力学或水力学教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

本书由武汉大学胡敏良教授主持修订。书中第 1、3、4、5、6、10 章由胡敏良教授编写;第 2、8、9 章由广西大学吴雪茹编写,第 7 章和部分思考题、习题由武汉大学曾玉红编写。

本书承蒙广西大学土木工程学院徐伟章教授审阅,提出许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢!

宁波大学祝会兵、中南大学王英、兰州大学慕青松等对本书第 3 版的编写工作提出了宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢!

限于作者的水平,书中难免有错漏和不足,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 2 月

前 言

(第 2 版)

流体力学是一门古老而年轻的学科,其应用范围非常广泛,是土木工程专业的基础课程之一。本书是为了适应国家普通高校本科专业的调整,为土木工程专业编写的少学时(30~40 学时)《流体力学》教材。

全书共有 10 章,内容包括绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学和恒定平面势流、实际(粘性)流体的动力学基础、层流紊流及其水头损失、量纲分析和流动相似原理、孔口管嘴出流和有压管流、明渠流动和堰流,以及渗流。每章后面都附有适量的思考题和习题,全书附有参考书目。

本书前几章在对流体力学的基本概念和基本理论进行阐述时,注意到系统、简洁和深入浅出,这一方面反映出少学时课程的特点,另一方面也有利于学生打好基础,以便今后有能力深入发展。在结合专业阐述实际应用时,本教材考虑到土木工程专业的特点(包括岩土、桥梁、道路、水利工程、地下建筑诸多方面),涉及的面比较广,但同样注意到对大量内容的删繁求精,以便于学生学习和掌握。本书编写时还兼顾到流体力学应用广泛的特点,使之可以作为与土木、水利、环境、化工、交通等专业有关工程技术人员简明参考书。

本书第 2 版首先对第 1 版中少量的笔误、印刷错误等,作了订正;其次,按照“高等学校土木工程专业指导委员会”2002 年 11 月制定的指导性文件:“专业基础课程教学大纲”,对部分教材内容作了调整和修改;其三,结合近几年来教学实践,对部分思考题、习题作了调整。

本书第 1、3、4、5、6、10 章由武汉大学胡敏良编写,第 2、8、9 章由广西大学吴雪茹编写,第 7 章和部分思考题、习题由武汉大学曾玉红编写,全书由胡敏良主编。

本书承蒙广西大学土木工程学院徐伟章教授审阅,提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,加之编写时间比较短促,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2003 年 6 月

前 言

(第 1 版)

流体力学是一门古老而年轻的学科,其应用范围非常广泛,是土木工程专业的基础课程之一。本书是为了适应国家普通高校本科专业的调整,为土木工程专业编写的少学时(30~40 学时)《流体力学》教材。

全书共有 10 章,内容包括绪论、流体静力学、流体运动学、理想流体动力学和恒定平面势流、实际(粘性)流体的动力学基础、层流紊流及其能量损失、流体相似原理、孔口管嘴出流和有压管流、明渠流动和堰流,以及渗流。每章后面都附有适量的思考题和习题,全书附有参考书目。

本书前几章在对流体力学的基本概念和基本理论进行阐述时,注意到系统、简洁和深入浅出,这一方面反映出少学时课程的特点,另一方面也有利于学生打好基础,以便今后有能力深入发展。在结合专业阐述实际应用时,本教材考虑到土木工程专业的特点(包括岩土、桥梁、道路、水利工程、地下建筑诸多方面),涉及的面比较广,但同样注意到对大量内容的删繁求精,以便于学生学习和掌握。本书编写时还兼顾到流体力学应用广泛的特点,使之可以作为与土木、水利、环境、化工、交通等专业有关工程技术人员的简明参考书。

本书由武汉水利电力大学胡敏良和广西大学吴雪茹共同编写,其中胡敏良编写第 1、3、4、5、6、7、10 章,吴雪茹编写第 2、8、9 章,本书部分思考题、习题由曾玉红选编,全书由胡敏良主编。

本书承蒙广西大学土木工程学院徐伟章教授审阅,提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,加之编写时间比较短促,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1999 年 12 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 流体力学的任务、发展概况和研究方法	(1)
1.2 作用于流体上的力	(2)
1.2.1 质量力	(2)
1.2.2 表面力	(2)
1.3 流体的主要物理性质	(2)
1.3.1 流体的质量与流体所受重力	(3)
1.3.2 粘性	(4)
1.3.3 压缩性	(5)
本章小结	(6)
思考题	(6)
习题	(6)
2 流体静力学	(8)
2.1 流体静压强的特性	(8)
2.2 欧拉平衡微分方程	(10)
2.2.1 欧拉平衡微分方程	(10)
2.2.2 重力作用下流体的压强分布规律	(11)
2.3 液体压强的测量	(13)
2.3.1 绝对压强、相对压强、真空度	(13)
2.3.2 测压管	(15)
2.3.3 水银测压计	(15)
2.3.4 水银压差计	(15)
2.3.5 金属测压计与真空计	(16)
2.4 静止流体对平面的作用力	(17)
2.4.1 解析法	(18)
2.4.2 图解法	(19)
2.5 静止流体对曲面的作用力	(21)
2.5.1 总压力的大小、方向、作用点	(21)
2.5.2 压力体	(22)
2.5.3 浮力	(23)
本章小结	(25)
思考题	(25)
习题	(26)
3 流体运动学	(29)
3.1 描述流体运动的两种方法	(29)
3.1.1 拉格朗日法和欧拉法	(29)
3.1.2 欧拉法中流体运动的基本概念	(33)
3.2 流体运动的连续性方程	(35)
3.2.1 流体的连续性微分方程	(35)
3.2.2 总流的连续性方程	(36)

3.3	流体微团运动的分析	(37)
3.3.1	线变形速率(线变率)	(38)
3.3.2	角变形速率(角变率)	(38)
3.3.3	旋转角速度(角转速)	(39)
3.3.4	流体微团运动的组合表达	(39)
3.4	无旋运动(无涡流)与有旋运动(有涡流)	(40)
3.4.1	无旋运动与有旋运动	(40)
3.4.2	涡量与环量	(41)
	本章小结	(42)
	思考题	(42)
	习题	(42)
4	理想流体动力学和恒定平面势流	(44)
4.1	欧拉运动微分方程	(44)
4.2	理想流体恒定元流的伯努利方程	(45)
4.2.1	沿流线的伯努利积分和在重力场中的伯努利方程	(45)
4.2.2	由动能定理推导理想流体恒定元流的伯努利方程	(46)
4.3	元流伯努利方程的意义和应用	(47)
4.3.1	元流伯努利方程的物理意义	(47)
4.3.2	元流伯努利方程的几何意义	(47)
4.3.3	毕托管原理	(48)
4.4	恒定平面势流的流速势函数和流函数	(49)
4.4.1	流速势函数	(49)
4.4.2	流函数	(50)
4.4.3	流网及其特征	(52)
4.5	几种简单的平面势流	(54)
4.5.1	均匀等速流	(54)
4.5.2	源流与汇流	(55)
4.5.3	势涡	(56)
4.6	势流的叠加	(57)
	本章小结	(58)
	思考题	(58)
	习题	(59)
5	实际(粘性)流体的动力学基础	(61)
5.1	粘性流体的运动方程:N-S 方程	(61)
5.2	恒定元流的伯努利方程	(61)
5.3	恒定总流的伯努利方程	(62)
5.3.1	渐变流及其过流断面上动压强的分布	(63)
5.3.2	恒定总流的伯努利方程	(64)
5.3.3	恒定总流伯努利方程的应用	(65)
5.4	气流的伯努利方程	(68)
5.5	有流量分流或汇流的伯努利方程	(70)
5.6	有能量输入输出的伯努利方程	(70)
5.7	恒定总流的动量方程	(72)
5.7.1	恒定总流的动量方程	(72)
5.7.2	恒定总流动量方程的应用条件和使用方法	(73)

本章小结	(74)
思考题	(75)
习题	(75)
6 层流、紊流及其水头损失	(79)
6.1 粘性流体运动的两种形态——层流与紊流	(79)
6.1.1 雷诺实验	(79)
6.1.2 流动形态的判别准则——临界雷诺数	(80)
6.2 圆管中的层流	(81)
6.2.1 水头损失的分类	(81)
6.2.2 沿程水头损失与切应力的关系	(82)
6.2.3 圆管层流的断面流速分布	(84)
6.2.4 圆管层流的沿程水头损失	(85)
6.3 紊流基本理论	(86)
6.3.1 紊流的特征	(86)
6.3.2 运动参数的时均化	(87)
6.3.3 层流底层	(88)
6.3.4 混合长度理论	(88)
6.4 圆管紊流的沿程水头损失	(90)
6.4.1 阻力系数 λ 的影响因素	(90)
6.4.2 尼古拉兹实验	(90)
6.4.3 沿程阻力系数的半经验公式	(92)
6.4.4 沿程阻力系数的经验公式	(93)
6.5 局部水头损失	(95)
6.5.1 圆管突然扩大的阻力系数	(96)
6.5.2 其他的局部水头损失系数	(97)
6.6 边界层理论基础	(98)
6.6.1 边界层概念	(98)
6.6.2 平板边界层厚度	(98)
6.6.3 边界层分离	(99)
6.6.4 绕流阻力	(100)
本章小结	(100)
思考题	(101)
习题	(102)
7 量纲分析和流动相似原理	(104)
7.1 量纲分析的意义和量纲和谐原理	(104)
7.1.1 量纲和单位	(104)
7.1.2 有量纲量和无量纲量	(105)
7.1.3 量纲和谐原理	(106)
7.2 量纲分析方法	(106)
7.2.1 雷利法	(106)
7.2.2 π 定理	(107)
7.3 流动相似概念	(109)
7.3.1 几何相似	(109)
7.3.2 运动相似	(109)
7.3.3 动力相似	(110)

7.4 相似准则	(110)
7.4.1 雷诺准则	(111)
7.4.2 佛汝德准则	(111)
7.4.3 欧拉准则	(112)
本章小结	(114)
思考题	(114)
习题	(114)
8 孔口、管嘴出流和有压管流	(116)
8.1 孔口出流	(116)
8.1.1 薄壁小孔口恒定出流	(116)
8.1.2 孔口变水头出流	(118)
8.2 管嘴出流	(119)
8.2.1 圆柱形外管嘴恒定出流	(119)
8.2.2 管嘴内的真空度	(119)
8.2.3 空化、空蚀现象与管嘴的使用条件	(120)
8.3 短、长管的水力计算	(120)
8.3.1 短管的水力计算	(120)
8.3.2 虹吸管的计算	(122)
8.3.3 水泵吸水管的计算	(123)
8.3.4 长管的水力计算	(123)
8.3.5 离心泵的原理和选用	(126)
8.4 管网计算基础	(129)
8.4.1 串联管路	(129)
8.4.2 并联管路	(130)
8.4.3 管网分类	(131)
8.5 水击	(132)
8.5.1 水击现象	(133)
8.5.2 水击压强计算	(134)
8.5.3 防止水击危害的措施	(135)
本章小结	(136)
思考题	(137)
习题	(137)
9 明渠水流和堰流	(140)
9.1 明渠均匀流	(140)
9.1.1 明渠的分类	(140)
9.1.2 明渠均匀流的特征	(141)
9.1.3 明渠均匀流的计算公式	(141)
9.2 明渠均匀流的最优断面和允许流速	(142)
9.2.1 水力最优断面	(142)
9.2.2 渠道允许流速	(143)
9.2.3 明渠均匀流的水力计算	(143)
9.3 明渠流的两种流态与佛汝德数	(145)
9.3.1 缓流、急流和临界流	(145)
9.3.2 佛汝德数	(145)
9.3.3 断面单位能量和临界水深	(146)

9.4	明渠恒定非均匀渐变流的微分方程	(148)
9.4.1	微分方程	(148)
9.4.2	水面曲线分析简介	(149)
9.5	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	(151)
9.6	水跃与跌水	(153)
9.6.1	水跃及其计算	(153)
9.6.2	跌水	(156)
9.7	堰流	(156)
9.7.1	堰的定义和分类	(156)
9.7.2	薄壁矩形堰和三角形堰	(157)
9.7.3	宽顶堰	(158)
9.7.4	实用堰	(160)
*9.7.5	小桥孔径水力计算	(161)
	本章小结	(164)
	思考题	(165)
	习题	(165)
10	渗流	(167)
10.1	渗流阻力定律	(167)
10.1.1	达西定律	(167)
10.1.2	紊流的渗流阻力定律	(168)
10.1.3	渗透系数确定方法	(168)
10.2	单井的渗流计算	(170)
10.2.1	无压恒定渐变渗流的基本公式	(170)
10.2.2	单井的渗流计算	(170)
10.3	渗流的基本微分方程和井群的渗流计算	(172)
10.3.1	渗流的基本微分方程	(172)
10.3.2	完全井的势函数	(173)
10.3.3	井群的渗流计算	(174)
	本章小结	(175)
	思考题	(176)
	习题	(176)
	参考文献	(177)

1 绪 论

1.1 流体力学的任务、发展概况和研究方法

流体力学的任务是研究流体的平衡和机械运动的规律,以及这些规律在工程实际中的应用。它的研究对象是流体,包括液体和气体。流体力学属于力学的一个分支。

流体力学的研究和其他自然科学研究一样,是随着生产的发展需要而发展起来的。在古代,如我国的秦代(公元前 221~公元前 206 年),为了满足农业灌溉需要,修建了都江堰、郑国渠和灵渠等水利工程,对水流运动规律已有了一些认识;同样地,在古埃及、古希腊和古印度等地,为了发展农业和航运事业,修建了大量的渠系;古罗马人为了发展城市,修建了大规模的供水管道系统,也对水流运动的规律有了一些认识。当然,应当特别提到的是古希腊的阿基米德(Archimedes),在公元前 250 年前后,提出了浮体定律,一般认为是他真正奠定了流体力学静力学的基础。

到了 17 世纪前后,由于资本主义国家生产的迅速发展,对流体力学的发展需要也就更为迫切。这个时期的流体力学研究出现了两条途径,在当时这两条发展途径互不联系,各有各的特色。一条是古典流体力学途径,它运用严密的数学分析,建立流体运动的基本方程,并力图求其解答,此途径的奠基人是伯努利(Bernorlli)和欧拉(Euler)。其他对古典流体力学的形成和发展有重大贡献的还有拉格朗日(Lagrange)、纳维尔(Navier)、斯托克斯(Stokes)和雷诺(Reynolds)等人,他们多为数学家和物理学家。由于古典流体力学中某些理论的假设与实际有出入,或者由于在对基本方程的求解中遇到了数学上的困难,所以古典流体力学无法用以解决实际问题。为了适应当时工程技术迅速发展的需要,另一条水力学途径应运而生,它采用实验手段用以解决实际工程问题,如管流、堰流、明渠流、渗流等问题。在水力学上有卓越成就的都是工程师,其中包括毕托(Pitot)、谢才(Chezy)、文丘里(Venturi)、达西(Darcy)、巴赞(Bazin)、曼宁(Manning)、佛汝德(Froude)等人。但是这一时期的水力学由于理论指导不足,仅依靠实验,故在应用上有一定的局限性,难以解决复杂的工程问题。

20 世纪以来,现代工业发展突飞猛进,新技术不断涌现,推动着古典流体力学和水力学也进入了新的发展时期,并走上了融合为一体的道路。1904 年,德国工程师普朗特(Prandtl)提出了边界层理论,使得纯理论的古典流体力学开始与工程实际相结合,并逐渐形成了理论与实际并重的现代流体力学。随后的几十年,现代流体力学获得飞速发展,并渗透到现代工农业生产的各个领域,例如在航空航天工业、造船工业、电力工业、水资源利用、水利工程、核能工业、机械工业、冶金工业、化学工业、采矿工业、石油工业、环境保护、交通运输、生物医学等广泛领域,都应用到现代流体力学的有关知识。土木工程专业各个领域与流体力学的关系也非常密切,例如城市和工业用水,从开拓水渠、取水口布置、水的净化与消毒、水泵选择到水塔修建、管路布置等,都面临一系列的流体力学问题。在公路与桥梁工程、地下建筑、岩土工程、水工建筑、矿井建筑等土木工程各个分支中,也只有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所遇到的各种流体力学问题。

前面已经提及,现代流体力学的研究方法是理论计算与实验并重。20 世纪 60 年代以来,新型电子计算机不断涌现,数值模拟方法不断创新。与此同时,现代量测技术(如激光、同位素和电子仪器)的应用,以及计算机在实验数据和资料的监测、采集和处理上所起的巨大作用,都使得现代流体力学的各种研究方法更加相辅相成、如虎添翼。可以预见,在 21 世纪里,继续采用这些先进的研究方法,流体力学的发展与应用必将大大超过 20 世纪的水平。

1.2 作用于流体上的力

作用于流体上的力,就其物理性质而言可分为惯性力、重力、弹性力、粘滞力和表面张力等。为了便于分析流体平衡和运动的规律,又可按力的作用方式将其分为质量力(或称为体积力)和表面力两种。

1.2.1 质量力

质量力作用于流体的每个质点上,与受作用的流体质量成正比。在均质流体中,质量与体积成正比,因此质量力也必然与流体的体积成正比,所以质量力又称为体积力。流体力学中常遇到的质量力有两种:重力和惯性力。重力是地球对流体质点的引力,惯性力则是当流体作加速(或减速)运动时,由于惯性而使流体质点受到的作用力。单位质量 of 流体所受的质量力叫做单位质量力,其量纲为 $[L/T^2]$, L 为基本量纲长度, T 为时间,因此其量纲与加速度的量纲相同。

设流体的质量为 m ,所受的质量力为 F ,则单位质量力为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1.1)$$

若 F 在各坐标轴上的分力为 F_x, F_y, F_z ,则相应的单位质量力 f 在三个坐标轴上的分量应为

$$X = \frac{F_x}{m}, \quad Y = \frac{F_y}{m}, \quad Z = \frac{F_z}{m} \quad (1.2)$$

若考虑坐标轴 z 与铅垂方向一致,并规定向上为正,则在重力场中作用于单位质量流体上的重力在各坐标轴上的分力为

$$X = Y = 0, \quad Z = -g \quad (1.3)$$

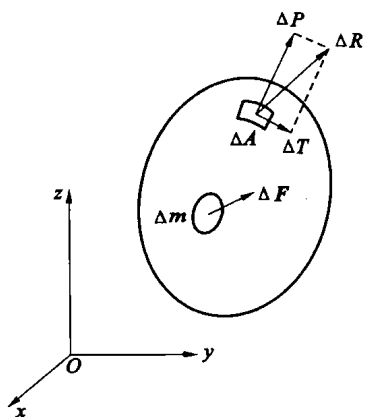


图 1.1 表面受力示意图

1.2.2 表面力

表面力作用于所取流体的表面上,与受作用的表面积成比例。表面力又可分为垂直于作用面的压力(法向力)与平行于作用面的切力。如图 1.1 所示,设在所取流体的表面积 ΔA 上作用的压力为 ΔP ,切力为 ΔT ,则作用在单位面积上的平均压应力(又叫平均压强)为 $\bar{p} = \Delta P / \Delta A$,平均切应力为 $\bar{\tau} = \Delta T / \Delta A$ 。和材料力学的处理方法类似,这里引进流体的连续介质模型^①,则所取流体表面积上某一点的点压强(压应力)和点切应力分别为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1.4)$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA} \quad (1.5)$$

在国际单位制中, ΔP 和 ΔT 的单位是牛顿(N), ΔA 的单位为平方米(m^2), p 与 τ 的单位都为 N/m^2 ,或称为帕(Pa)。

值得注意的是,一般流体中拉力微不足道,可忽略不计,此外,静止流体中不存在切力。

1.3 流体的主要物理性质

物质通常有三种存在状态:固体(也即固态)、液体和气体。流体是液体和气体的总称。在物理性质

^① 连续介质模型:流体由分子组成,分子之间实际上是不连续而有间隙的,但在标准情况下, 1 cm^3 体积内所含气体的分子数约为 2.7×10^{19} ,分子间的距离非常微小,因此可以把流体看作是一种由无间隙的充满空间的质点组成的连续体,也即将流体当作是连续介质。这种模型(假设)为研究流体力学宏观问题带来很大方便,既可以不考虑复杂的微观分子运动,又可以运用数学分析中连续函数微积分这一强有力的计算工具。

上,流体与固体的最大区别在于流体具有易流动性,没有固定的形状,不能承受拉力,静止时也不能承受剪切力,而固体则能维持它固有的形状,并能承受一定的拉力、剪切力和压力。此外,流体中的液体具有自由表面并且有一定的体积,压缩性极小,而气体则具有高度的压缩性和膨胀性,因而没有固定的体积,可以充满任何大小的容器。

流体运动的形态和运动的规律,除与外部因素(包括边界条件、动力条件等)有关外,更重要的是取决于流体本身的物理性质。这里只阐述流体的主要物理性质,而将表面张力、汽化压强等性质略去。

1.3.1 流体的质量与流体所受重力

流体和固体一样,也具有质量并受重力作用。通常用密度 ρ 和重度 γ 来表示其特征。

流体的密度 ρ 是单位体积流体的质量。质量是表示惯性大小的物理量,惯性是指物体保持其原有运动状态的一种性质。流体质量越大,惯性越大,流体的运动状态就越难改变。对于均质流体,设质量为 m , 体积为 V , 则其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1.6}$$

对于非均质流体,由连续介质模型可得

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \tag{1.7}$$

密度在国际单位制中,量纲为 $[M/L^3]$, 单位为 kg/m^3 、 g/cm^3 等。

流体的重度 γ 是单位体积的流体所受的重力,流体所受重力是地球对流体的引力。对于均质流体

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \tag{1.8}$$

对于非均质流体,则

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \tag{1.9}$$

在国际单位制中其量纲为 $[F/L^3]$, 单位为 N/m^3 、 kN/m^3 等。

不同流体的密度和重度各不相同,同一种流体的密度和重度则随温度和压强的变化而变化。一个标准大气压下,不同温度下水和空气的密度值和重度值参见表 1.1 和表 1.2。实验表明,液体的密度和重度随温度和压强的变化甚微,可以近似为常数。例如,一般采用水的密度为 1000 kg/m^3 , 重度为 9800 N/m^3 ; 水银的密度为 13600 kg/m^3 , 重度为 $133.28 \times 10^3\text{ N/m}^3$ 。

表 1.1 水的物理性质

温度 ($^{\circ}C$)	重度 γ (kN/m^3)	密度 ρ (kg/m^3)	粘度 μ ($\times 10^{-3}\text{ N}\cdot\text{s}/m^2$)	运动粘度 ν ($\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$)	体积模量 E ($\times 10^9\text{ kN}/m^2$)	表面张力 σ (N/m)
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.300	1.306	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.0696
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.0589

表 1.2 标准压力下空气的物理性质

温度 (℃)	密度 ρ (kg/m ³)	重度 γ (N/m ³)	粘度 μ ($\times 10^{-5}$ N · s/m ²)	运动粘度 ν ($\times 10^{-5}$ m ² /s)
-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.205	11.82	1.81	1.50
30	1.165	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.060	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.81	2.09	2.09
100	0.946	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	3.45

1.3.2 粘性

著名的英国科学家牛顿在 17 世纪论述了流体的粘滞性。他指出,流体的内部存在由粘性引起的剪切应力,其大小与垂直于流体运动方向的速度梯度成正比,其实验的示意图如图 1.2 所示。

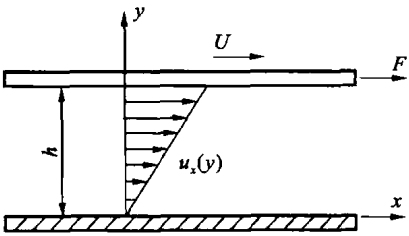


图 1.2 粘性实验示意图

相距为 h 的上下两平行平板之间充满均质粘性流体。两平板的面积均为 A 且其值足够大,以致可以略去平板四周的边界影响。将下板固定不动,而以力 F 拖动上板使其作平行于下板的匀速直线运动。实验表明:

(1) 由于流体的粘滞性,与平板直接接触的流体质点将与平板一起移动而无滑移。与上板接触的流体质点其速度为 U ,与下板接触的流体质点其速度为 0 ,由于两板之间距离 h 很小,测量表明两板之间的速度分布为直线分布,即

$$u_x(y) = \frac{U}{h}y \tag{1.10}$$

(2) 比值 F/A 与 U/h 成正比,即

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \tag{1.11}$$

式中 μ 为比例系数,称为动力粘性系数,简称粘度;比值 $\tau=F/A$ 是流体内部的剪切应力,进一步的测量表明,当两板间具有非直线速度分布时,有

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{1.12}$$

上式称为牛顿内摩擦定律。粘度是流体粘滞性大小的一种度量,它与流体的物理性质有关,其单位可从公式中直接导出。在国际单位制中, μ 的单位为牛顿·秒/米²=N·s/m²=帕·秒=Pa·s。

在研究流体运动时,还常采用运动粘性系数(简称运动粘度),其定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.13}$$

式中 ρ 为流体的密度,在国际单位制中, ν 的单位为米²/秒(m²/s)。把 ν 称为运动粘度的原因是,它的单位中只包含运动学的量,即长度量和时间量。

实验表明,流体的粘度 μ 主要与温度有关,而与压力的关系不大。另需指出,一般液体的 μ 和 ν 随温度的升高而减小,而气体的 μ 和 ν 则随温度的升高而增大,两者变化的趋势相反。

不同温度下水和空气的粘度 μ 和运动粘度 ν 如表 1.1 和表 1.2 所示。

本节最后需要提到的是,对于气体和绝大多数纯净液体,如水、汽油、煤油、酒精等,都遵循牛顿内摩擦