

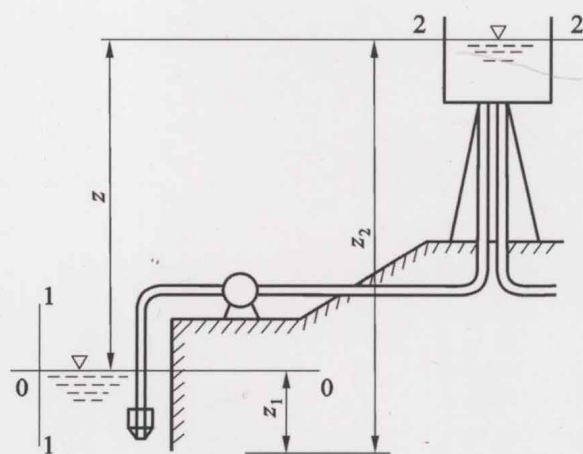
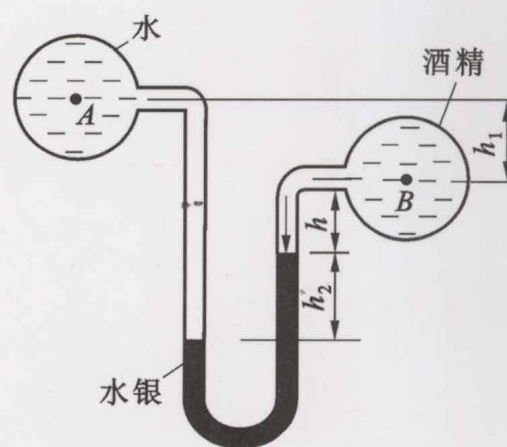
普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

流体力学

(第4版)

L T L

胡敏良 吴雪茹 主编

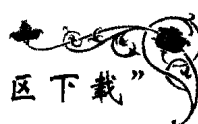


武汉理工大学出版社

流体力学

(第4版)

主 编 胡敏良 吴雪茹
主 审 徐伟章

 “本教材配套电子教案请到理工图书网的课件展示区下载”
 (<http://www.techbook.com.cn>)

武汉理工大学出版社
· 武 汉 ·

【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.—4版.—武汉:武汉理工大学出版社,2011.10
ISBN 978-7-5629-3584-1

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(2011)第186992号

项目负责人:	蔡德民 刘永坚 田道全	责任编辑:	王利永
责任校对:	丁 冲	装帧设计:	吴 极
出版发行:	武汉理工大学出版社		
社 址:	武汉市洪山区珞狮路122号		
邮 编:	430070		
网 址:	http://www.techbook.com.cn		
经 销:	各地新华书店		
印 刷:	武汉理工大印刷厂		
开 本:	880×1230 1/16		
印 张:	12 插	页:	1
字 数:	397千字		
版 次:	2000年7月第1版 2011年8月第4版		
印 次:	2011年10月第1次印刷 总第11次印刷		
印 数:	44001—47000册		
定 价:	23.00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 87383695 87384729 87397097(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

普通高等学校土木工程专业新编系列教材编审委员会

(第4届)

学术顾问:

吕西林 李 杰 罗福午 李少甫 甘绍熺 包世华 毛鹤琴
辛克贵 刘立新 李必瑜 彭少民 何铭新 吴培明 胡敏良

主任委员:

李国强 朱宏亮 田高

副主任委员:

刘伟庆 邹超英 白国良 徐礼华 雷宏刚 贾连光 朱彦鹏
张永兴 张俊平 刘殿忠 缪 昇 王 岚 周学军 赵明华

委员:(以姓氏笔画为序)

王 林 王 燕 王月明 王天稳 王社良 王泽云 袁海庆
邓铁军 王新武 王毅红 吴炎海 卢文胜 白晓红 蒋沧如
叶献国 孙 俊 孙 强 刘长滨 李书进 李启令 曾志兴
李怀建 刘剑飞 孙家齐 过静珺 李碧雄 张立人 窦立军
陈水生 邵旭东 陈伯望 宋固全 张国强 张科强 戴国欣
吴雪茹 吴辉琴 何培玲 周 云 俞 晓 饶云刚 魏瑞演
姜玉松 段兵廷 柳炳康 赵瑞斌 徐 伟 秦建平 袁广林

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德民

前 言

(第 4 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 学时左右教学要求。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。本书整体内容安排由浅入深,在流体静力学之后,从流体的微元理论出发,介绍了流体运动学的基本原理和一般计算方法。教材中每章后附有思考题和习题。

本书第 4 版在前 3 版的基础上,进一步做了以下工作:第一,对全书的一些符号和术语进行了修正,使之更规范,以期达到与国家和行业最新颁布的标准、规范同步,修订中除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;第二,为了方便教学,每章后增加了本章小结,书末对部分习题给出了参考答案;第三,修编中探索了对宽口径土木工程专业的建设,书中还配有部分电子教案,利用多媒体教学手段以提高教学质量。

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,也可以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和广西大学吴雪茹共同编写。其中,第 1、3、4、5、6、10 章由胡敏良编写;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。修订工作和习题答案主要由吴雪茹和曾玉红完成。

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

2011 年 8 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 and 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)
	附录 习题答案	(177)
	参考文献	(181)

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。

上面已经提及,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。单位质量的流体所受的质量力叫做单位质量力,其量纲为 $[L/T^2]$, L 为长度量纲, T 为时间量纲,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

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

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

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

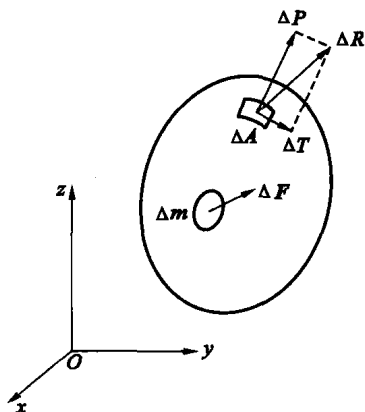


图 1.1 表面受力示意图

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(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,也即可以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 $[ML^{-2}T^{-2}]$, 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,可近似视为常数。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 ($\times 10^{-3} N \cdot s/m^2$)	运动粘度 ν ($\times 10^{-6} m^2/s$)	体积模量 E_v ($\times 10^9 kN/m^2$)	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。

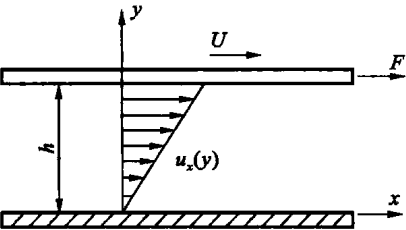


图 1.2 粘性实验示意图

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 · 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,而与压强的关系不大。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

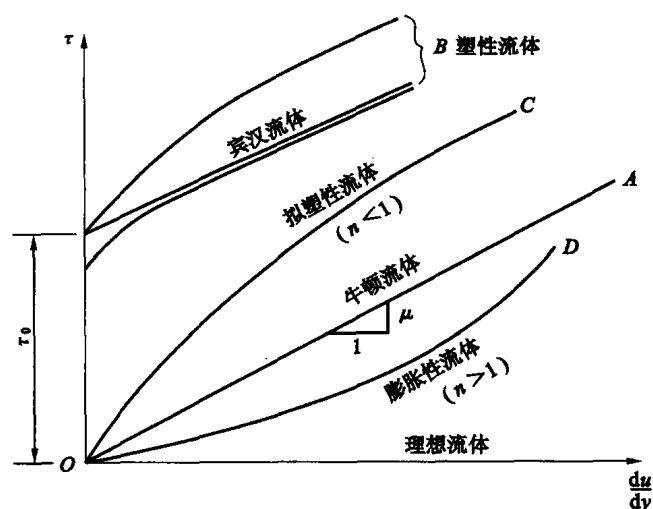


图 1.3 流体的分类

定律,因此称之为牛顿流体,若将 τ 写成 $\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^n$,则牛顿流体对应 $\tau_0 = 0, n = 1$ 。但也有不遵循牛顿内摩擦定律的流体,如泥浆、有机胶体、油漆等,称之为非牛顿流体。非牛顿流体中分宾汉流体、拟塑性流体等,可参见图 1.3。另外,还有一种流体,称为理想流体,理想流体是指粘度为零,也即流体流动时不存在剪切应力的流体。其实,理想流体并不存在,实际流体都存在粘性,应该称为粘性流体。但是在某些问题中,当粘性不起作用或不起主要作用时,可以提出理想流体的假设,从而使问题简化,得出流体运动的一些基本规律。所以,提出理想流体的假设还是很有用的。

1.3.3 压缩性

如果温度不变,流体的体积会随压强的增加而缩小,这种特性称为流体的压缩性。如果压强不变,流体的体积随温度的升高而增大,这种特性称为流体的膨胀性。

流体的压缩性,一般以压缩系数 β 和体积弹性模量 E 来度量。设流体的体积为 V ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,则压缩系数 β 为

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.14)$$

由于当 dp 为正值时, dV 必为负值,故上式右端加一负号,以便使 β 为正值。

压缩系数的倒数为流体的体积弹性模量 E ,即

$$E = \frac{1}{\beta} \quad (1.15)$$

不同温度下,水的体积弹性模量值可参见表 1.1。流体中液体的压缩性和膨胀性都非常小,一般情况下完全可以不予考虑,故通常把液体看做是不可压缩流体。但在个别情况中,例如当流速较大的水管上的闸门突然半闭时,会产生一种水击现象,此时就必须考虑液体的压缩性,否则会得出荒谬的结果。

气体与液体在这方面大不相同,它具有显著的压缩性和膨胀性。在温度不过低 ($> 253 \text{ K}$)、压强不过高 ($< 20 \text{ MPa}$) 时,气体压强、温度和密度之间的关系服从完全气体的状态方程,即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1.16)$$

式中 p 为气体的绝对压强 (N/m^2); ρ 为气体的密度 (kg/m^3); T 为气体的热力学温度 (K); R 称为气体常数, $R = \frac{8314}{n} [\text{m} \cdot \text{N}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$,其中 n 为气体的相对分子质量。不过,对于速度远低于音速的低速气流,若压强和温度的变化也不大,例如通风工程中的气流,由于其气体密度变化非常小,所以按不可压缩流体来处理时也不会产生很大的误差。

本章小结

流体力学是研究流体的平衡和机械运动规律,以及这些规律在工程实际中的应用的学科。本章提出了流体的易流动性、连续介质假设、理想流体、牛顿内摩擦定律等概念。

(1) 为了便于研究,将作用于流体的力按其作用方式分为:质量力和表面力。最常见的质量力是重力和惯性力,表面力常分为垂直于表面的压力和平行于表面的切力。

(2) 流体的主要物理性质有:易流动性、重力特性、惯性、粘滞性和压缩性。

粘滞性大小用动力粘滞系数 μ 或运动粘滞系数 ν 来反映,其大小与温度成反比。

粘滞切应力 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ ——牛顿内摩擦定律。牛顿内摩擦定律表明,液体运动时,相邻液层间所产生的切应力与剪切变形的速率成正比。

流体的压缩性:液体受压后体积要缩小,压力撤除后能恢复原状的这种性质称为液体的压缩性或弹性(膨胀性),大小用体积压缩系数 β 和体积弹性模量 E 来描述。

(3) 连续介质模型:把流体看成没有空隙的连续介质,则流体中的一切物理量(如速度 u 和密度 ρ)都可看作时空的连续函数,可采用函数理论作为分析工具。如:

$$\rho = \rho(x, y, z, t); \quad u = u(x, y, z, t); \quad p = p(x, y, z, t)$$

(4) 理想液体:实际液体的简化——即 $\rho = \text{const}$,不膨胀、无粘性、无表面张力的流体。

思考题

- 1.1 流体运动中有哪些力属于表面力? 有哪些力属于质量力?
- 1.2 流体的密度与重度有什么不同? 它们之间有什么关系?
- 1.3 流体的粘度与运动粘度有什么不同? 它们之间有什么关系?
- 1.4 非牛顿流体有哪些? 它们与牛顿流体的区别是什么?
- 1.5 液体和气体的粘度 μ 随温度的变化规律有什么不同?
- 1.6 气体和液体在压缩性方面有何不同?
- 1.7 理想流体有什么特点? 实际流体中是否存在理想流体?

习题

- 1.1 已知油的重度为 7000 N/m^3 ,求其密度。
- 1.2 设水的体积弹性模量 $K = 2.19 \times 10^9 \text{ Pa}$,试问压强改变多少时,其体积才可以相对压缩 1%?
- 1.3 已知空气的重度 $\gamma = 11.82 \text{ N/m}^3$,粘度 $\mu = 0.0181 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,求它的运动粘度 ν 。
- 1.4 如图 1.4 所示,一木块的底面积为 $40 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$,厚度为 1 cm ,质量为 5 kg ,沿着涂有润滑油的斜面以速度 $v = 1 \text{ m/s}$ 等速下滑,油层厚度 $\delta = 1 \text{ mm}$,求润滑油的动力粘性系数(粘度) μ 。
- 1.5 如图 1.5 所示,上下两个平行的圆盘,直径均为 d ,间隙厚度为 δ ,间隙中的液体动力粘性系数为 μ ,若下盘固定不动,上盘以角速度 ω 旋转,求所需力矩 T 的表达式。

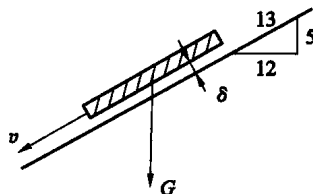


图 1.4 习题 1.4 图

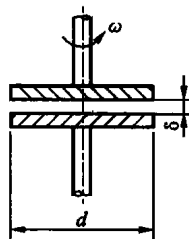


图 1.5 习题 1.5 图

- 1.6 如图 1.6 所示,水流在平板上运动,靠近板壁附近的流速呈抛物线形分布,E 点为抛物线端点,E 点处 $du/dy = 0$,水的运动粘度 $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,试求 $y = 0 \text{ cm}, 2 \text{ cm}, 4 \text{ cm}$ 处的切应力(提示:先设流速分布 $u = Ay^2 + By + C$,利用给出的

条件确定待常数 A、B、C)。

1.7 有一液体粘性测定仪,如图 1.7 所示。测定仪的内、外两圆筒具有同一轴线,两筒间的间隙甚小,其间充满待测定的液体。测定仪的内圆筒被一扭丝悬挂着,所受力矩可由扭丝的转角测定,外圆筒可按各种速度旋转,由粘性产生的转动力矩通过液体内部传递至内圆筒,使扭丝扭转一角度达到平衡。两筒间隙中的液体速度按直线变化,由内圆筒壁处速度为零增至外圆筒周速。现已知内、外圆筒半径分别为 r_1 和 r_2 ,两圆筒侧壁之间、底壁之间的间隙分别为 δ 和 Δ ,液体高度为 h ,外圆筒以角速度 ω (rad/s)旋转,测得转动力矩为 M 。试求液体粘度 μ 的计算式,并据以讨论在什么情况下,才能忽略底部粘滞力的影响,此时 μ 的计算式又将如何表达?

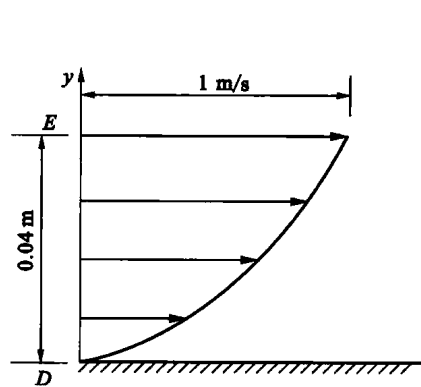


图 1.6 习题 1.6 图

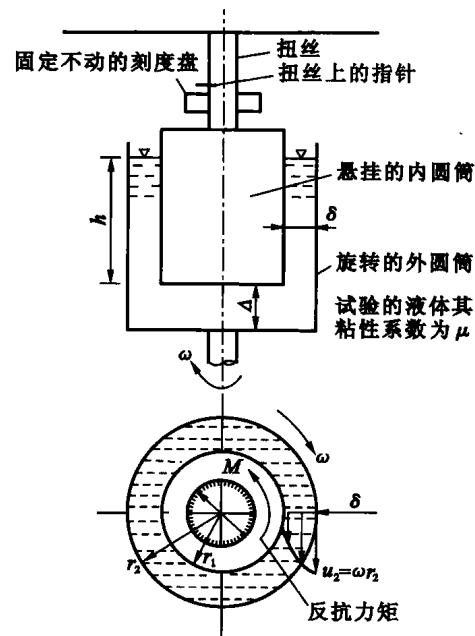


图 1.7 习题 1.7 图