

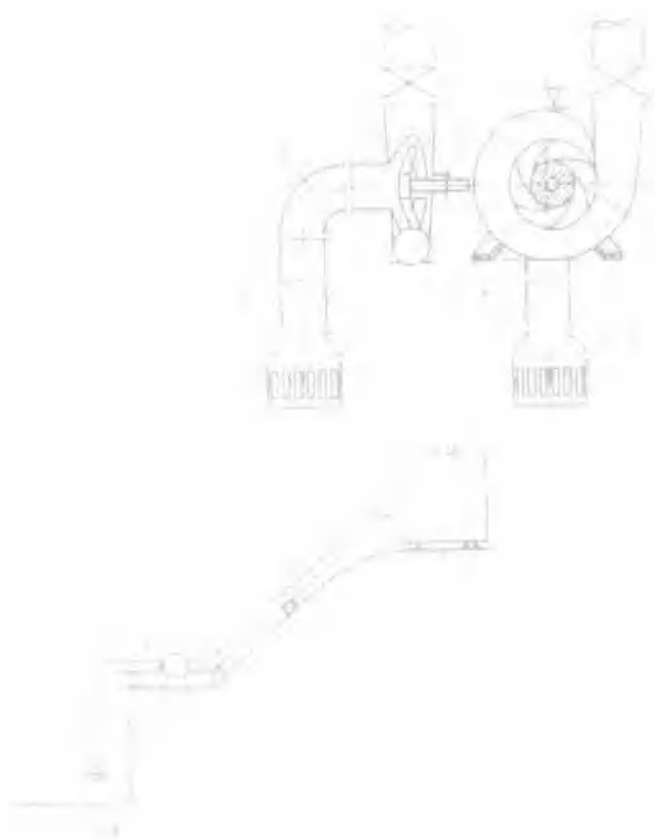
普通高等学校土木工程专业新编系列教材
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

流体力学

(第2版)

L T L X

胡敏良 主编
徐伟章 主审



WUTP

武汉理工大学出版社

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 2 版)

主编 胡敏良
主审 徐伟章

武汉理工大学出版社
· 武汉 ·

【内 容 简 介】

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。每章后面附有适量的思考题和习题。

本书在阐述基本概念及理论时,注意系统、简洁和深入浅出,考虑到土木工程专业的宽口径特点(包括岩土、桥梁、道路、地下建筑等),本书对大量内容进行了删繁求精,便于学生学习和掌握。

本书还可作为与土木、水利、环境、化工、交通等专业有关的工程技术人员的简明参考书。

【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年在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:mihu@WUHEE.edu.cn

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/胡敏良主编. —2版. —武汉:武汉理工大学出版社,2003.7
ISBN 7-5629-1548-2

I. 流… II. 胡… III. 流体力学 IV. TU035

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

印刷者:武汉理工大印刷厂

发行者:各地新华书店

开 本:880×1230 1/16

印 张:11

字 数:365千字

版 次:2003年7月第2版 2003年7月第3次印刷

书 号:ISBN 7-5629-1548-2/TU·134

印 数:13001—16000册

定 价:16.00元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

编 审 委 员 会

顾 问:成文山 滕智明 罗福午 魏明钟 李少甫 甘绍熿

施楚贤 白绍良 彭少民 范令惠

主 任:江见鲸 吕西林 高鸣涵

副主任:朱宏亮 李永盛 辛克贵 袁海庆 吴培明 李世蓉

刘立新 赵明华 孙成林

委 员:(按姓氏笔画顺序排列)

于书翰 丰定国 毛鹤琴 王天稳 王社良 邓铁军

白晓红 包世华 田道全 叶献国 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 孙成林 过静君 闵小莹 李永盛 李世蓉

李必瑜 李启令 吴培明 吴炎海 吴炜煜 辛克贵

何铭新 汤康民 陈志源 汪梦甫 张立人 张子新

张建平 邵旭东 罗福午 周 云 赵明华 赵均海

尚守平 杨 平 柳炳康 姚甫昌 胡敏良 俞 晓

桂国庆 顾敏煜 徐茂波 袁海庆 徐 伟 徐礼华

高鸣涵 蒋沧如 彭少民 覃仁辉 雷俊卿 蔡德明

廖 莎 燕柳斌 戴国欣 魏明钟

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德明

出版说明

(第2版)

1998年教育部颁布了高等学校本科专业的新专业目录后,1999年全国的高等学校都开始按照新专业目录招生。为解决土木工程专业教材缺乏的燃眉之急,武汉理工大学出版社(原武汉工业大学出版社)于2000年年初率先组织编写了这套“普通高等学校土木工程专业新编系列教材”。经中国土木工程学会教育工作委员会审订并向全国高校推荐,三年来,本套教材已为众多院校选用,并受到了普遍欢迎。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。截至2002年年底,系列教材中单本销量最高的已接近7万册。这充分说明了系列教材编审委员会关于教材的定位、特色和编写宗旨符合新专业的教学要求,满足了新专业的教学急需。

正如初版的出版说明中所说,本套教材是新专业目录颁布实施后的第一套土木工程专业系列教材,因此,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,它仍然还会存在缺点和不足。首先是教材中涉及的各种国家规范问题。教材编写时正值各种规范全面修订,尚未定稿,新规范正式颁布的时间还不能确定,而专业教学对新教材需求的急迫又使编写、出版工作不能等待,因此系列教材中很多涉及到规范的地方只能按照当时基本定稿的新规范内容进行讲解或说明。当各种新的国家规范陆续正式颁布后,本套教材中相关的部分就已按照新规范及时编写了修订稿,准备作为第2版出版。其次,2002年10月,高等学校土木工程专业指导委员会编制的本科教育培养目标、培养方案及课程教学大纲正式公布,各门课程教材的修订有了更明确的方向。第三,初版教材在各院校使用过程中,师生们根据教学实践提出了很多中肯的意见,我们虽然在每本教材重印时进行了局部的修改,但仍感到存在一些问题,需要做较大的修订。因此,系列教材编审委员会决定全面修订、出版全套教材的第2版。根据土木工程专业教学需求,本套系列教材还将增补13种,也与第2版教材同时推出。教材的编审委员会委员也相应地进行了增补和调整。

第2版教材的修订及增补教材的编写仍然秉承编审委员会一贯的宗旨,把教材的质量放在第一位,力求更好地满足课程教学的需要。我们更希望使用教材的师生一如既往,继续关心本套教材,及时反馈各校专业建设和教学改革的信息与要求,多提意见和建议,以便我们及时修订,不断完善和提高,把教材打造成名副其实的精品。

武汉理工大学出版社

2003.2

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的简明参考书。

本书的第二版首先对第一版中少量的笔误、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。

本书第一、三、四、五、六、十章,由武汉大学胡敏良编写,第二、八、九章,由广西大学吴雪茹编写,第七章和部分思考题、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,在此表示衷心地感谢!

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,其中胡敏良编写第一、三、四、五、六、七、十章,吴雪茹编写第二、八、九章,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,在此表示衷心地感谢!

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)
1.3 流体的主要物理性质	(2)
思考题	(5)
习题	(6)
2 流体静力学	(7)
2.1 流体静压强的特性	(7)
2.2 欧拉平衡微分方程	(9)
2.3 流体压强的测量	(12)
2.4 静止流体对平面的作用力	(16)
2.5 静止流体对曲面的作用力	(20)
思考题	(24)
习题	(24)
3 流体运动学	(28)
3.1 描述流体运动的两种方法	(28)
3.2 流体运动的连续性方程	(34)
3.3 流体微团运动的分析	(36)
3.4 无旋运动(无涡流)与有旋运动(有涡流)	(39)
思考题	(41)
习题	(41)
4 理想流体动力学和恒定平面势流	(43)
4.1 欧拉运动微分方程	(43)
4.2 理想流体恒定元流的伯努利方程	(44)
4.3 伯努利方程的意义和应用	(46)
4.4 恒定平面势流的流速势函数和流函数	(48)
4.5 几种简单的平面势流	(52)
4.6 势流的叠加	(55)
思考题	(57)
习题	(57)
5 实际(粘性)流体的动力学基础	(59)
5.1 粘性流体的运动方程: $N-S$ 方程	(59)
5.2 恒定元流的伯努利方程(能量方程)	(59)
5.3 恒定总流的伯努利方程(能量方程)	(60)
5.4 气流的伯努利方程	(66)
5.5 有流量分流或汇流的能量方程	(67)
5.6 有能量输入输出的能量方程	(68)
5.7 恒定总流的动量方程	(69)
思考题	(72)
习题	(72)
6 层流、紊流及其水头损失	(76)
6.1 粘性流体运动的两种形态——层流与紊流	(76)
6.2 圆管中的层流	(78)
6.3 紊流基本理论	(82)

6.4	圆管紊流的沿程水头损失	(86)
6.5	局部水头损失	(91)
6.6	边界层理论基础	(94)
	思考题	(96)
	习题	(97)
7	量纲分析和流动相似原理	(99)
7.1	量纲分析的意义和量纲和谐原理	(99)
7.2	量纲分析方法	(101)
7.3	流动相似概念	(104)
7.4	相似准则	(105)
	思考题	(108)
	习题	(108)
8	孔口、管嘴出流和有压管流	(110)
8.1	孔口出流	(110)
8.2	管嘴出流	(113)
8.3	短、长管的水力计算	(114)
8.4	管网计算基础	(122)
8.5	水击	(126)
	思考题	(129)
	习题	(129)
9	明渠流动和堰流	(133)
9.1	明渠均匀流动	(133)
9.2	明渠均匀流的最优断面和允许流速	(135)
9.3	明渠流的两种流态与佛汝德数	(137)
9.4	明渠恒定非均匀渐变流的微分方程	(140)
9.5	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	(143)
9.6	水跃与跌水	(145)
9.7	堰流	(148)
	思考题	(155)
	习题	(156)
10	渗流	(158)
10.1	渗流阻力定律	(158)
10.2	单井的渗流计算	(160)
10.3	渗流的基本微分方程和井群的渗流计算	(163)
	思考题	(165)
	习题	(165)
	参考文献	(167)

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,如我国的春秋战国和秦朝时代(公元前 256~210 年),为了满足农业灌溉需要,修建了都江堰、郑国渠和灵渠,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 年左右,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,由于资本主义制度兴起,生产迅速发展,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(Bernoulli)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,或者由于对基本方程的求解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,应运而生了另一条水力学途径,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(Chézy)、文透里(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,使纯理论的古典流体力学开始与工程实际相结合,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。在公路与桥梁工程中,在地下建筑、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,这些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,在新世纪里,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上一世纪的水平。

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,又可将力的作用方式分为质量力(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,惯性力则是流体作加速运动时,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

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

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的流体上的重力在各坐标轴上的分力为

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

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。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。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:

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

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

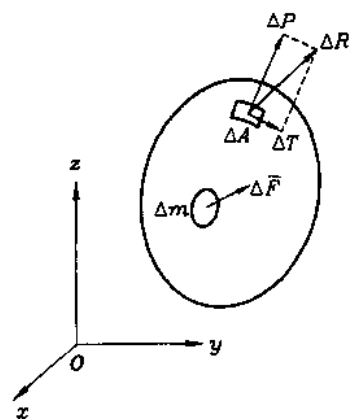


图 1.1 表面受力示意图

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 及 τ 的单位都为 N/m^2 ,或称为帕(Pa)。

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。在物理性质上,流体与固体的最大区别在于流体具有流动性,没有一定的形状,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

^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, $1cm^3$ 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。

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

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.6)$$

对于非均质流体,由连续介质模型可得

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.7)$$

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:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1.8)$$

对于非均质流体,则

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1.9)$$

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 $1000kg/m^3$, 重度为 $9800N/m^3$, 水银的重度为 $133.28 \times 10^3 N/m^3$ 。

表 1.1 水的物理性质

温度 C	重 度 γ kN/m ³	密 度 ρ kg/m ³	粘 度 $\mu \times 10^3$ N · s/m ²	运动粘度 $\nu \times 10^6$ m ² /s	体积模量 $E_v \times 10^{-6}$ 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 在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 $\mu \times 10^5$ N · s/m ²	运动粘度 $\nu \times 10^3$ 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。

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:

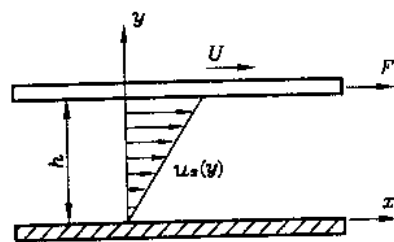


图 1.2 粘性实验示意图

(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则速度为 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:

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

(2) 比值 F/A 与 U/h 成正比,即:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (1.11)$$

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:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.12)$$

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:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.13)$$

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 随温度的升高而减少,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 所列。

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,都遵循牛顿内摩擦定律,因此称之为牛顿流体,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型,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。

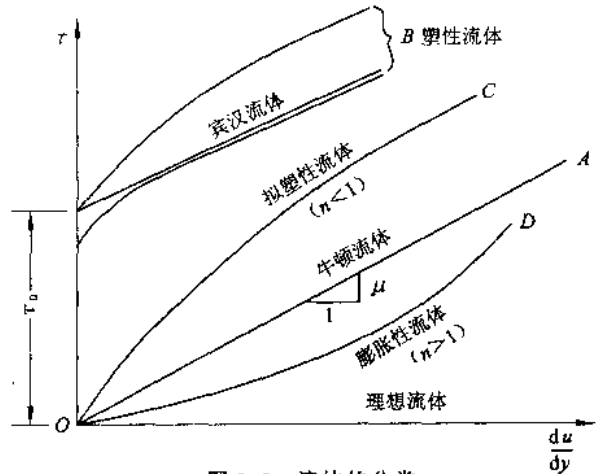


图 1.3 流体的分类

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 $d\rho$ 后,体积减少 dV ,则压缩系数 β 为

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

由于当 $d\rho$ 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 :

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

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,故通常把液体看作是“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关闭时,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。

气体与液体在这方而大不相同,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, $R = \frac{8314}{n} [\text{m} \cdot \text{N}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$, 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得非常小,所以按不可压缩流体来处理时不致产生很大的误差。

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 7000N/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, 一木块的底面积为 $40\text{cm} \times 45\text{cm}$, 厚度为 1cm , 质量为 5kg , 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 。

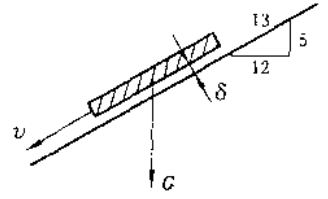


图 1.4 习题 1.4 图

1.5 如图 1.5, 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。

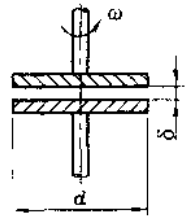


图 1.5 习题 1.5 图

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 $y=0, 2, 4\text{cm}$ 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定常数 A, B, C)。

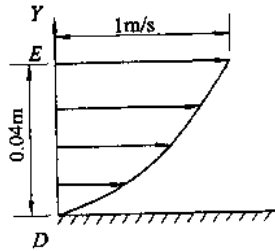


图 1.6 习题 1.6 图

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 , 外圆筒转速为 n (r/min), 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?

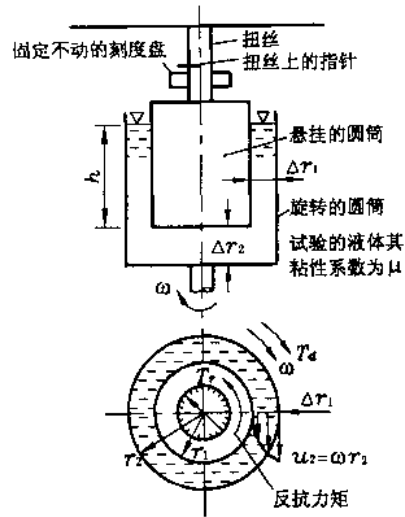


图 1.7 习题 1.7 图

2 流体静力学

本章提要

流体静力学是研究静止流体的平衡规律及其在工程上的应用的科学。

“静止”是流体运动的特例。所谓静止流体，一是指相对于地球而言，流体质点没有运动，这种静止称为绝对静止；另一种是流体质点虽相对于地球有运动，但流体质点间并没有相对运动，这种状况称为相对静止。

无论是绝对静止还是相对静止。由于流体质点间没有相对运动，其粘滞力不起作用，因而可以作为理想流体来探讨，同时我们认为，静止流体充满它所占据的空间，所有的未知函数都可以用坐标的连续函数来表示。

由于土木工程中所接触的流体主要是液体，故本章将以液体为主要研究对象，用力学的观点揭示其在平衡状态下的规律。具体包括两部分，即：液体压力沿坐标的变化情况及其作用在有限面积上的总压力的大小、方向和作用点。

2.1 流体静压强的特性

静止流体的压力强度称为流体的静压强。衡量静压强的大小常用单位面积上的压力来表示。

如图 2.1 所示，在处于静止流体中取包含点 M 的微小面积 ΔA ，作用在微小面积 ΔA 上的合力为 ΔP 。设 ΔP 均匀分布在 ΔA 上，则 ΔA 上的平均压力为

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

当 ΔA 向点 M 无限收缩时

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

p 即为 M 点的压力，习惯上称为压强。流体力学中规定：压强用正号表示。

在 SI 制中，压强的单位是牛/米²(N/m²)，或称帕斯卡(Pa)、千牛/米²(kN/m²)或千帕斯卡(kPa)。气压单位用巴(bar)、毫巴(mbar)。它们之间的关系是：1N/m²=1Pa, 1kN/m²=1000N/m²=0.01bar=10mbar。

静止液体只能承受压力，几乎不能承受拉力，它与固体比较具有两个明显的特性。

特性一 静止液体压强垂直指向作用面。

如图 2.2 所示，在静止液体中取出一块水体，用平面 S 将水体分成上、下两部分，平面 S 上的作用力就是水体间的相互作用力。取下部水体作为研究对象，平面 S 上所受的压力为 P ，法线为 n ，作用于某点 M 处的压强为 p 。 p 可以分解成一个切向应力 τ 和一个法向应力 p_n 。如果存在任何微小的切应力 τ 和拉力的话，液体就要流动，液体的平衡将受到破坏，这与静止液体的前提不符。所以静压强唯一可能的方向只能与作用面的内法线方向一致。

特性二 静止液体中任意点的压强值大小与作用面的方位无关。

如图 2.3 所示，在静止液体中的点 $M(x, y, z)$ 处取一微分四面体，其边长分别为 dx, dy, dz ，斜面的法线为 n ，各面的面积分别为 dA_x, dA_y, dA_z, dA_n (约定：符号的下标表示该面的法线方向)，以 $\cos(n, x), \cos(n,$

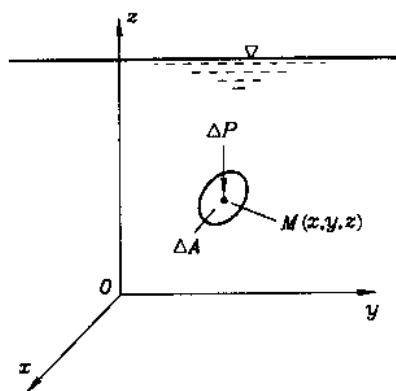


图 2.1 静止流体中的压强

y 、 $\cos(n, z)$ 分别表示微小四面体斜面 dA_n 的法线 n 与 x 、 y 、 z 轴的方向余弦。同时认为,微小四面体各面上的压强是均匀分布的。下面分析该四面体的受力情况。

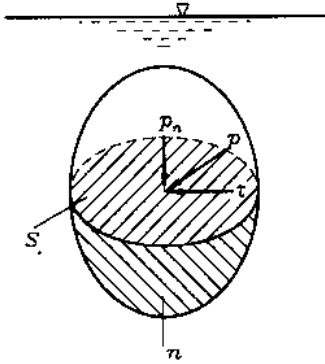


图 2.2 静止流体中压应力方向

作用在该四面体上的力有

表面力

$$P_x = p_x dA_x = \frac{1}{2} p_x dydz$$

$$P_y = p_y dA_y = \frac{1}{2} p_y dx dz$$

$$P_z = p_z dA_z = \frac{1}{2} p_z dx dy$$

$$P_n = p_n dA_n$$

P_n 在三个坐标方向的投影分别为 $P_n \cos(n, x)$ 、 $P_n \cos(n, y)$ 、 $P_n \cos(n, z)$ 。

质量力 设液体为均质流体,作用在四面体上的质量力为 F ,它在各坐标方向的分量为 F_x 、 F_y 、 F_z ,单位质量的质量力在各坐标方向的分量为 X 、 Y 、 Z ,则:

$$F_x = \rho \cdot \frac{1}{6} dx dy dz X = \frac{1}{6} \rho dx dy dz X$$

$$F_y = \frac{1}{6} \rho dx dy dz Y$$

$$F_z = \frac{1}{6} \rho dx dy dz Z$$

对于该平衡四面体,应满足 $\sum \vec{F} = 0$ 的力学条件,所以,在 x 方向,有

$$P_x - P_n \cos(n, x) + F_x = 0$$

即

$$\frac{1}{2} p_x dy dz - p_n dA_n \cos(n, x) + \frac{1}{6} \rho dx dy dz X = 0$$

方程的第三项与前两项之比是高级微量,可以忽略不计。所以 $p_x = p_n$ 。

同理,由 y 向和 z 向的平衡方程式可得 $p_y = p_n$ 、 $p_z = p_n$,故

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (2.1)$$

当四面体的边长趋于零时, p_x 、 p_y 、 p_z 、 p_n 就是 M 点的压强。因为斜面是任选的(即 n 方向是任选的),故上式表明同一点任意方向的静压强相等。

例如,在位于静止液体中设一平板(如图 2.4 所示),平板的轴为 O 。假定平板有不同的放置方式,如图中虚线所示,由于平板轴在水面以下的深度不变,则 O 点所受的压强也不变。

当然,不同点的 p 一般是不相等的,它是位置的连续函数,即 $p = p(x, y, z)$ 。

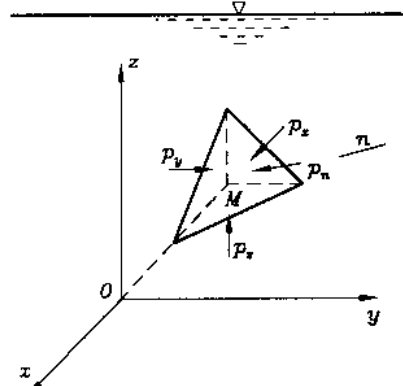


图 2.3 静止流体中微分四面体

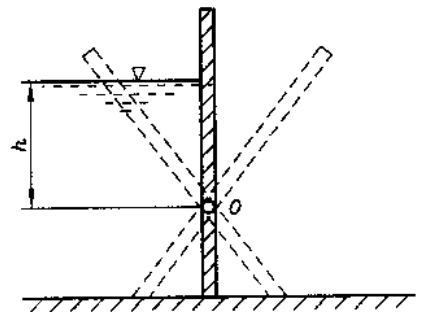


图 2.4 静止流体中的平板