

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材
土木工程专业系列教材

流体力学

主编 高学平

天津大学出版社
中央广播电视大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/高学平主编. —天津: 天津大学出版社, 2002.9

ISBN 7-5618-1662-6

I. 流… II. 高… III. 流体力学-电视大学-教材 IV. 035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 065154 号

- 书 名 流体力学
主 编 高学平
出版发行 天津大学出版社
 中央广播电视大学出版社
出 版 人 杨 欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内 (天津大学出版社)
 北京市海淀区西四环中路 45 号 (中央广播电视大学出版社)
电 话 营销部: 022-27403647 邮购部: 022-27402742 (天津大学出版社)
 发行部: 010-58840200 邮购部: 010-58840234 (中央广播电视大学出版社)
印 刷 北京云浩印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 210mm×297mm
印 张 14.5
字 数 470 千
版 次 2002 年 9 月第 1 版
印 次 2006 年 6 月第 4 次
印 数 7001~9000
书 号 ISBN 7-5618-1662-6/O·160
定 价 20.00 元

前 言

本教材是依据 2001 年 11 月审定的《中央广播电视大学开放教育试点“工学科土建类土木工程专业”流体力学课程教学大纲》以及 2002 年 3 月审定的《流体力学多媒体教材一体化设计方案》编写的。本教材是《土木工程专业的系列教材》之一。

开放教育是一种新型的远程教育模式,其培养对象主要是以业余学习为主的成人。在编写本教材过程中,充分考虑到学生的学习环境、学习需要和学习方式,努力贯彻“以学生学习为中心”的现代教育思想,精选内容,理论联系实际,加强“导学”、“助学”功能,深入浅出,循序渐进,适应开放教育试点学生自学的需要,努力做到学以致用,培养学生分析问题和解决问题的能力。

流体力学课程多种媒体教材包括文字教材以及录像教材、CAI 课件、IP 课件。四种教学媒体发挥各自优势,取长补短,形成互补的较完善的综合性教材体系。录像教材共计 12 讲(小时),突出对水流现象的认识和重点难点的讲解与分析,形象直观,易于学生理解和掌握。CAI 课件重点是练习题,自测对本课程知识的掌握程度,加强实践性教学环节,并通过自我检查,发现问题和不足,以便加强学习,不断提高分析和解决问题的能力。IP 课程共计 20 学时,强调流体力学课程内容的系统性,并通过讲解例题,提高学生分析和解决问题的能力。本书是流体力学课程多种媒体教材的文字教材。

全书共分为 10 章,即绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学基础、流动阻力和能量损失、孔口管嘴及有压管流、明渠恒定流、堰流及闸孔出流、渗流、量纲分析和相似原理。

本书采取集体讨论、分工执笔、相互审阅、主编统稿审定的编写方式。参加编写的有天津大学高学平(第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章)、天津大学张效先(第 7 章、第 8 章、第 9 章)、天津大学李大鸣(第 5 章、第 10 章)、中央广播电视大学郭鸿(第 6 章),由高学平主编。中央广播电视大学郭鸿老师做了本书的教学设计。

本书由清华大学陈永灿教授和天津大学杨奕翰教授、王春永教授审定,陈永灿教授主审。审定专家对本教材进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵的建设性意见及建议。在教学大纲的制订、多种媒体教材一体化设计方案的设计以及本书的编写过程中,得到了天津大学赵耀南教授、东南大学闻德荪教授、哈尔滨工业大学刘鹤年教授、清华大学陈永灿教授和天津大学杨奕翰教授、王春永教授等的大力支持,吸收了他们许多的宝贵经验、意见和建议,在此一并致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,对于开放式教学模式的研究探索不够,再加上时间较紧,书中定有不妥之处,恳切希望广大读者及专家批评、指正。

编者

2002 年 7 月 30

内 容 提 要

本书是依据《中央广播电视大学开放教育试点“工学科土建类土木工程专业”流体力学课程教学大纲》以及《流体力学多媒体教材一体化设计方案》编写的。全书共分为10章,内容包括绪论、流体静力学、流体运动学、流体动力学基础、流动阻力和能量损失、孔口管嘴及有压管流、明渠恒定流、堰流及闸孔出流、渗流、量纲分析和相似原理。

本书强调基本概念、基本原理和基本方法的重要性,注重培养学生解决实际问题的能力。各章配以“导学”、“助学”功能,包括学习目标、学习重点、旁白、小结。各章均有一定量的例题、思考题和习题。

本书是《土木工程专业系列教材》之一,适用于土木工程专业,也可作为水利水电工程专业、港口工程专业以及其他相近专业的教材或参考书,还可供有关专业工程技术人员参考。

土木工程专业课程建设

委员会名单

顾问：刘锡良 江见鲸 顾晓鲁
策划：钱辉镜 杨风和 任 岩 陈家修
主任：姜忻良
副主任：蒋克中 王铁成 刘兴业
委员：丁 阳 丁红岩 于俊英 王 圻 王金敏
方根男 刘宗仁 刘津明 包世华 罗福午
孙天正 孙天杰 匡文起 李 杰 李林曙
李砚波 李运光 任兴华 毕继红 严士超
杨春风 陈永灿 陈中良 吴铭磊 旷天鑑
郑 刚 郑家扬 邹积明 何勇军 邵立国
张晋元 张质文 陆培毅 周建滨 赵奎生
赵 彤 赵铁生 常春伟 洪 钧 高学平
黄世昌 康谷贻 韩庆华 温庆涛 鄢小平
魏鸿汉 戴自强
秘书：郭 鸿 陈英蕙

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 流体力学的任务及研究对象	(1)
1.2 连续介质假定	(2)
1.3 流体的主要物理力学性质	(2)
1.4 作用在流体上的力	(7)
1.5 流体力学模型及研究方法	(8)
本章小结	(9)
思考题	(10)
习题	(10)
第 2 章 流体静力学	(12)
2.1 流体静压强及其特性	(12)
2.2 流体的平衡微分方程及其积分	(14)
2.3 流体静压强的分布规律	(17)
2.4 压强的量测	(22)
2.5 作用于平面上的静水总压力	(24)
2.6 作用于曲面上的静水总压力	(28)
2.7 浮力、潜体和浮体的稳定性	(32)
本章小结	(34)
思考题	(34)
习题	(36)
第 3 章 流体运动学	(40)
3.1 流动描述	(41)
3.2 描述流体运动的基本概念	(44)
3.3 流体运动的连续性方程	(49)
3.4 流体微团运动分析	(51)
3.5 无涡流与有涡流	(54)
3.6 恒定平面势流	(55)
本章小结	(60)
思考题	(61)
习题	(61)
第 4 章 流体动力学基础	(63)
4.1 理想流体运动微分方程及其积分	(63)
4.2 实际流体运动微分方程	(67)
4.3 实际流体恒定总流的能量方程	(70)
4.4 实际流体恒定总流的动量方程	(77)
本章小结	(83)
思考题	(84)
习题	(85)
第 5 章 流动阻力和能量损失	(89)
5.1 两种流态和判别标准	(89)

5.2 边界层与边界层分离现象简介	(92)
5.3 流动阻力与能量损失的关系	(95)
5.4 均匀流基本方程	(95)
5.5 层流运动	(97)
5.6 紊流运动	(98)
5.7 紊流沿程阻力系数	(102)
5.8 非圆管道流动中的沿程损失	(107)
5.9 管道流动中的局部损失	(108)
本章小结	(113)
思考题	(114)
习题	(114)
第6章 孔口、管嘴及有压管流	(116)
6.1 薄壁孔口出流	(116)
6.2 管嘴恒定出流	(120)
6.3 短管的水力计算	(122)
6.4 长管的水力计算	(127)
6.5 管网水力计算基础	(131)
6.6 有压管道中的水击	(133)
本章小结	(137)
思考题	(137)
习题	(138)
第7章 明渠恒定流	(140)
7.1 明渠的类型	(140)
7.2 明渠均匀流的特征及形成条件	(142)
7.3 明渠均匀流的基本计算公式	(143)
7.4 明渠水力最优断面与允许流速	(144)
7.5 明渠均匀流水力计算	(146)
7.6 管道无压流的水力计算	(148)
7.7 明渠恒定非均匀流水力特征及流态	(149)
7.8 断面单位能量与临界水深	(150)
7.9 临界底坡、缓坡及陡坡	(153)
7.10 明渠急变流	(154)
7.11 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	(159)
7.12 明渠非均匀流水面曲线变化规律及其定性分析	(161)
7.13 明渠恒定渐变流水面曲线的计算	(165)
7.14 天然河道水面曲线的计算	(168)
本章小结	(169)
思考题	(171)
习题	(171)
第8章 堰流及闸孔出流	(174)
8.1 堰的类型及堰流的基本公式	(174)
8.2 薄壁堰	(176)
8.3 实用断面堰	(178)
8.4 宽顶堰	(178)
8.5 小桥孔径水力计算	(182)

8.6 闸孔出流	(185)
本章小结	(187)
思考题	(188)
习题	(188)
第9章 渗流	(190)
9.1 岩土渗流特性	(190)
9.2 渗流基本定律	(191)
9.3 恒定均匀渗流与非均匀渐变渗流	(194)
9.4 集水廊道渗流计算	(197)
9.5 井的渗流	(198)
本章小结	(203)
思考题	(203)
习题	(204)
第10章 量纲分析和相似原理	(205)
10.1 量纲分析	(205)
10.2 相似的概念	(208)
10.3 相似准则	(210)
10.4 模型设计	(211)
本章小结	(215)
思考题	(215)
习题	(215)
附录 A 常用单位换算表	(217)
附录 B 粗糙系数 n 值表	(218)
附录 C 梯形及矩形渠道均匀流水深求解图	(219)
附录 D 梯形及矩形渠道底宽求解图	(220)
参考文献	(221)

第1章 绪 论

学习目标

1. 了解流体的主要物理力学性质,理解流体的易流动性和粘滞性,掌握牛顿内摩擦定律。
2. 理解质量力和表面力,掌握其表示方法。
3. 理解连续介质和理想流体的概念。
4. 掌握物理量的基本量纲、基本单位及导出量的单位。

学习重点

1. 流体的易流动性、粘滞性、牛顿内摩擦定律。
2. 质量力和表面力。
3. 连续介质和理想流体的概念。

1.1 流体力学的任务及研究对象

自然界中的物体一般有三种存在形态,即固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。

宏观地说,固体能维持它的固有形状;液体具有一定的体积,但没有一定的形状,它随容器的形状而变化,可以有自由表面;而气体则充满整个容器,没有自由表面。区分三种物态的标准有二:一是体积变化的大小,即压缩性;二是物体能否流动,即流动性。固体和液体的压缩性小(比气体压缩性要小得多),用压缩性可以把气体和固体或液体区别开来。流动是一种剪切现象。当物体不能在微小剪切力的作用下维持平衡并不断地变形,就是流动。液体和气体都具有流动性,所以统称为流体。固体在剪切力的作用下可以维持平衡,因而不具有流动性。用流动性可以把固体和流体区分开来。

流体力学是研究流体宏观运动和平衡规律的一门科学。本书主要研究以水为代表的流体的宏观运动和平衡规律及其应用,其基本理论也适用于各种液体和忽略压缩性影响的气体。

流体力学是许多工程实践的基础,在土木建筑、道路桥梁、市政建设、交通运输、环境保护、水利、化工、机械、航空等部门,都将碰到大量与流体运动规律有关的问题。例如,地基处理中遇到的渗流问题,涵洞尺寸和桥梁孔径的计算,城市供水系统中管路布置、水泵选择,等等。要解决这些问题必须具备流体力学的基本知识。因此,流体力学是一门重要的技术基础课程。

液体和气体统称为流体。本书研究以水为代表的流体。

1.2 连续介质假定

流体和任何物质一样,都是由分子组成的,分子与分子之间是不连续而有空隙的。例如,常温下每立方厘米水中约含有 3×10^{22} 个水分子,相邻分子间距离约为 3×10^{-8} cm。因而,从微观结构上说,流体是有空隙的、不连续的介质。

正确理解流体连续介质假定。

但是,详细研究分子的微观运动不是流体力学的任务,这里关心的不是个别分子的微观运动,而是大量分子“集体”显示的特性,也就是所谓的宏观特性或宏观量,这是因为分子间的孔隙与实际所研究的流体尺度相比是极其微小的。因此,可以设想把所讨论的流体分割成无数无限小的基元个体,即相当于微小的分子集团,称之为流体的“质点”。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的、没有任何空隙的连续体,即所谓的“连续介质”。同时认为,流体的物理力学性质,例如密度、速度、压强和能量等,具有随同位置而连续变化的特性,即视为空间坐标和时间的连续函数。因此,不再从那些永远运动的分子出发,而是在宏观上从质点出发来研究流体的运动规律,从而可以利用连续函数的分析方法。长期实践和科学实验证明,利用连续介质假定得出的有关流体运动规律的基本理论与客观实际是相符合的。

1.3 流体的主要物理力学性质

注意区别量纲与单位,不要混淆。记住力的单位。

为叙述方便,先介绍流体力学中物理量的量纲(因次)与单位。每一个物理量都包括量的数值和量的种类,物理量的种类习惯上称为量纲;量度物理量的基准称为单位。量纲与单位不同,例如河宽 $B = 5$ m,也可以用 $B = 500$ cm 表示。这里,河宽是表示“长度”的物理量,而“m”或“cm”是长度的单位。所以,单位不同,量的数值也就不同。但量纲只有一个,即长度,记做 L 。

由于我国长期采用工程单位制,在实际工程中,会遇到工程单位制,有关国际单位制与工程单位制的换算,请参见附录 A。

在国际单位制(SI)中,以长度、时间、质量作为基本量,其单位和表示符号分别为米(m)、秒(s)、千克(kg)。力则为导出量,单位为牛顿(N)。1 牛顿定义为:在 1 N 的力作用下,质量为 1 kg 的物体得到 1 m/s^2 的加速度,即 $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ 。

物理量虽然很多,但可以分为两类:一类是有量纲的量,如速度、加速度等;另一类则是无量纲的量,如圆周率 π 、摩擦系数等。有量纲的物理量虽然很多,但量纲亦可分为基本量纲与导出量纲。基本量纲是性质完全不同的独立量纲,其中任何一个不能由另外的组合而得。研究以水为代表的流体时,用长度 L 、时间 T 、质量 M 作为基本量纲。其他物理量的量纲,都可以由这三种基本量纲以不同方式组合而成,称为导出量纲,例如速度的量纲为 LT^{-1} ,力的量纲为 MLT^{-2} 。

流体运动的规律与作用于流体的外部因素及条件有关,而外部因素及条件通过流体自身的内在物理力学性质来表现。一般说来,流体的主要物理力学性质可归纳为易流动性、惯性、重力特性、粘滞性、压缩性和膨胀性、表面张力特性。虽然这些物理力学性质都在不同程度上决定和影响着流体的运动,但每一种性质的影响程度并非相同。就一般而论,重力特性、粘滞性对流体运动的影响起着重要作用。

1.3.1 易流动性

固体在静止时,可以承受切应力。流体在静止时,不能承受切应力,只要在微小的切应力作用下,就发生流动而变形。流体在静止时不能承受切应力和不能抵抗剪切变形的性质称为流体的易流动性。

1.3.2 惯性

流体与其他物体一样,具有惯性。惯性是物体保持原有运动状态的性质。运动状态

的任何改变,都必须克服惯性的作用。惯性的大小以质量来度量。质量愈大,惯性则愈大,运动状态也愈难改变。当流体受外力作用使运动状态发生改变时,由流体惯性引起的对外界抵抗的反作用力称为惯性力。

设物体的质量为 M ,加速度为 a ,则惯性力 $F = -Ma$,式中负号表示惯性力的方向与物体加速度方向相反。必须指出,惯性力不是能够引起物体运动或使物体有运动趋势的主动力,而是为了使物体加速所必须克服的一种力。

流体的质量以密度来反映。单位体积流体所含的质量称为密度,以 ρ 表示。对于均质流体,若体积为 V 的流体具有的质量为 M ,则密度

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

密度的单位为 kg/m^3 ,量纲为 ML^{-3} 。流体的密度随温度和压强的变化而变化。对液体而言,其密度随压强和温度的变化甚微,在实际计算中可视为常数。例如水的密度,实用中就在一个标准大气压强下、温度为 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的最大密度值作为计算值,数值为 $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。表1-1给出了不同温度下水的密度值。由表中可知,温度在 $0\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,密度变化很小,水的密度比 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的密度只减小 0.4% ;但当温度在 $80\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,其密度比 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的密度减小 $2.8\%\sim 4\%$ 。因此,在温差较大的热水循环系统中,应设膨胀接头或膨胀水箱以防止管道被水胀裂。此外,当温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,冰的密度 $\rho_{\text{冰}} = 916.7\ \text{kg}/\text{m}^3$,水的密度 $\rho_{\text{水}} = 999.9\ \text{kg}/\text{m}^3$,二者的密度不同,冰的体积比水的体积约大 9% ,故路基、水管、水泵等在冬季温度过低时应增加防冻措施。

在一个标准大气压强下,温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,水银(汞)的密度为 $13\ 550\ \text{kg}/\text{m}^3$,通常计算时取 $\rho_{\text{H}} = 13.6 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。在一个标准大气压强下,温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,干空气的密度 $\rho_{\text{a}} = 1.2\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 1-1 不同温度下水的物理性质的数值表

温度 $^\circ\text{C}$	密度 ρ (kg/m^3)	粘滞系数 μ ($10^{-3}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动粘滞系数 ν ($10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$)	体积弹性系数 K ($10^9\ \text{N}/\text{m}^2$)	表面张力系数 σ (N/m)
0	999.9	1.787	1.787	2.04	0.076 2
4	1 000.0	1.567	1.567	—	—
5	1 000.0	1.514	1.514	2.06	0.075 4
10	999.7	1.304	1.304	2.11	0.074 8
15	999.1	1.137	1.138	2.14	0.074 1
20	998.2	1.002	1.004	2.20	0.073 6
25	997.0	0.891	0.894	2.22	0.072 6
30	995.7	0.789	0.802	2.23	0.071 8
40	992.2	0.654	0.659	2.27	0.070 1
50	988.0	0.548	0.554	2.30	0.068 2
60	983.2	0.467	0.475	2.28	0.066 8
70	977.8	0.405	0.414	2.25	0.065 0
80	971.8	0.355	0.366	2.21	0.063 0
90	965.3	0.316	0.327	2.16	0.061 2
100	958.4	0.283	0.295	2.07	0.059 4

1.3.3 重力特性

物体受地球引力的性质,称为重力特性。地球对流体的引力即为重力,或称重量。质量为 M 的流体所受重力 G 的大小为

$$G = Mg \quad (1-2)$$

式中: g 为重力加速度。重力的单位为 N 或 kN , $1\ \text{kN} = 10^3\ \text{N}$ 。

1.3.4 粘滞性

粘滞性是重点。

流体具有易流动性,对于像水这样的流体,不论多么微小的切向作用力一经作用于静止流体时,原来的静止状态将被破坏而开始变形,也即开始流动。但流体一旦流动时,流体分子间的作用力立即显示为对流动的阻滞作用,即显示出所谓粘滞性阻力。流体的这种阻滞变形运动的特性称为粘滞性。需要说明的是,当流体运动一旦停止,这种阻力就立即消失。因此,粘滞性在流体静止或平衡时是不显示作用的。流体运动时的粘滞阻力只能使流动缓慢下来,但不能阻止静止流体在任何微小切向力作用下开始流动。

下面以图 1-1 说明流体的粘滞性的作用。图示流体沿边壁作平直的直线运动,且相邻层质点之间互不掺混,即表现为成层地向前运动。由于流体和边壁的“附着力”,紧邻边壁的流层将粘附在边壁上静止不动。这样,边壁以上的流层由于受这个不动流层的阻滞,而形成了如图 1-1 所示的 $0 \sim u_0$ 流速分布。这就是说,运动较快的流层将作用于运动较慢的流层上一个切向力,方向与运动方向相同,促其运动加快。反之,运动较慢的流层将有与运动方向相反的切应力作用在运动较快的流层上,使其运动减慢。这样,流体的粘滞性就使流体内部出现了成对的切力,即内摩擦力。科学实验证明,内摩擦力(切力) T 与下述因素有关:

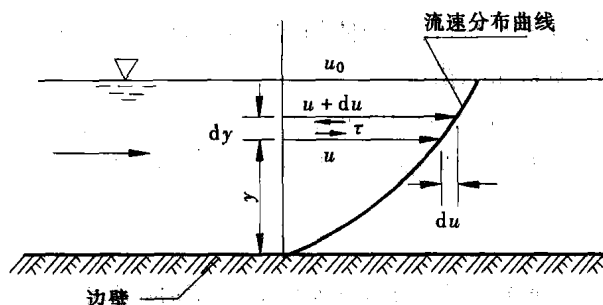


图 1-1 流体沿边壁的直线运动

- (1) 与两流层间的速度差(即相对速度) du 成正比,和流层间距离 dy 成反比;
- (2) 与流层的接触面积 A 的大小成正比;
- (3) 与流体的种类有关;
- (4) 与接触面上压力的大小无关。

内摩擦力的数学表达式可写为

$$T = \mu \cdot A \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

单位面积上的内摩擦力称为切应力,以 τ 表示,则

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

牛顿内摩擦定律适用条件是层流和牛顿流体。

式中: μ 为随液体种类不同而异的比例系数,称为粘滞系数。两流层间流速差与其距离的比值 du/dy 称为流速梯度。式(1-3)或式(1-4)称为牛顿(Newton)内摩擦定律。它可以表述为:做层流运动的流体,相邻流层间单位面积上所作用的内摩擦力(或粘滞力)与流速梯度成正比,同时与流体的性质有关。

下面对式(1-4)中各项做进一步说明。

- (1) 速度梯度 du/dy 表示速度沿垂直于速度方向 y 的变化率,单位为 s^{-1} 。

为理解流速梯度的意义,从图 1-1 中将相距为 dy 的两层流体分离出来,并取两流层间矩形微分流体 $ABCD$ 来研究,如图 1-2 所示。设微分体经过 dt 时段后运动至新的位置 $A'B'C'D'$,因流层 2-2 与流层 1-1 间存在流速差 du ,微分体除位置改变而引起平移运动之外,还伴随着形状的改变,由原来的矩形变成了平行四边形,也就是产生了剪切变形(角变

形), AD 边和 BC 边都发生了角变形 $d\theta$, 其剪切变形速度为 $d\theta/dt$ 。同时, 在 dt 时段内, D 点比 A 点多移动的距离为 $du dt$ 。因 dt 为微小时段, 角变形 $d\theta$ 亦为微小量, 可以认为, $d\theta \approx \tan(d\theta) = du dt / dy$, 故

$$\frac{du}{dy} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-5)$$

可见, 流速梯度 du/dy 实际上是代表流体微团的剪切变形率(或称剪切变形速度, 亦称直角变形速度)。所以, 牛顿内摩擦定律也可以理解为: 切应力与剪切变形速度成正比。

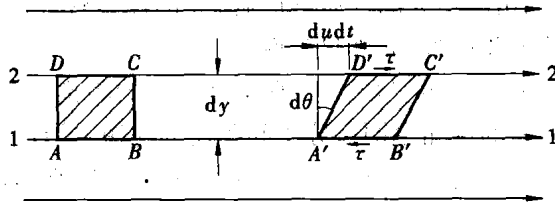


图 1-2 微分流体的剪切变形

(2) 切应力 τ , 或称单位面积的内摩擦力, 或称单位面积上的粘滞力, 单位为 N/m^2 , 即 Pa。量纲为 $ML^{-1}T^{-2}$ 。切应力 τ 不仅有大小, 还有方向。现以图 1-2 微分矩形流体变形后的 $A'B'C'D'$ 来说明 τ 的方向: 上表面 $D'C'$ 上面的流层运动较快, 有带动较慢的 $D'C'$ 流层前进的趋势, 故作用于 $D'C'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相同; 下表面 $A'B'$ 下面的流层运动较慢, 有阻滞较快的 $A'B'$ 流层前进的趋势, 故作用于 $A'B'$ 面上的切应力 τ 的方向与运动方向相反。对于相接触的两个流层来讲, 作用在不同流层上的切应力, 必然是大小相等、方向相反。这里需要说明的是, 内摩擦力虽然是流体阻抗相对运动的性质, 但它不能从根本上制止流动的发生。因此, 流体的易流动特性不因有内摩擦力存在而消失。当然, 内摩擦力在流体静止或相对静止状态(即流体质点间没有相对运动)时是不显示作用的。

(3) 粘滞系数 μ , 单位是 $N \cdot s/m^2$ 或 $Pa \cdot s$, 量纲为 $ML^{-1}T^{-1}$ 。粘滞系数 μ 的大小表征流体粘滞性的强弱。不同流体有不同的 μ 值, 粘滞性大的流体 μ 值大, 粘滞性小的流体 μ 值小。 μ 的物理意义可以这样来理解: 当取 $du/dy = 1$ 时, 则 $\tau = \mu$, 即 μ 表征单位速度梯度作用下的切应力, 所以它反映了粘滞性的动力特性, 因此也称 μ 为动力粘滞系数。

流体的粘滞性常用另一种形式的粘滞系数 ν 来表示, 它是动力粘滞系数 μ 和流体密度 ρ 的比值, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$

因 ν 不包括力的量纲而仅仅具有运动的量纲 L^2T^{-1} , 故称 ν 为运动粘滞系数。常用单位是 m^2/s 或 cm^2/s , 习惯上把 $1 cm^2/s$ 称为 1 斯托克斯(St)。同样, 运动粘滞系数 ν 表征流体粘滞性的强弱。在相同条件下, ν 值愈大, 说明粘滞性愈大, 流体流动性愈低; 反之, ν 值愈小, 说明粘滞性愈小, 流体流动性愈高。

液体的粘滞系数随温度而变化。水的粘滞系数随温度升高而减小(表 1-1)。几种常见液体在常温下的运动粘滞系数值见表 1-2。

表 1-2 几种液体的运动粘滞系数

液体名称	温度(°C)	$\nu(10^{-6} m^2/s)$	液体名称	温度(°C)	$\nu(10^{-6} m^2/s)$
汽油	18	0.65	石油	18	25.00
酒精	18	1.33	重油	18	140.00
煤油	18	2.50	甘油	20	510.00

动力粘滞系数 μ 和运动粘滞系数 ν 是不同类型的物理量, 前者是动力量, 量纲 $ML^{-1}T^{-1}$, 单位 $N \cdot s/m^2$; 后者是运动量, 量纲 L^2T^{-1} , 单位 m^2/s 。

最后还须指出,牛顿内摩擦定律只适用部分流体,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(即剪切应力与剪切变形速度成线性关系)的流体称为牛顿流体,反之称为非牛顿流体。如水、空气和油类等,在温度不变条件下,这类流体的 μ 值不变,剪切应力与剪切变形速度成线性关系,是牛顿流体。本书研究的是牛顿流体,至于非牛顿流体(如泥浆、血浆、油漆、颜料等)可参考有关著作。

1.3.5 压缩性与膨胀性

流体受压、体积缩小、密度增大的性质,称为流体的压缩性。流体受热、体积膨胀、密度减小的性质,称为流体的膨胀性(亦称热胀性)。

液体不能承受拉力,但可以承受压力。液体分子间的距离与气体相比是比较小的。当对液体施加压力时,体积的压缩也即是分子间距离的缩短,导致了分子之间巨大排斥力的出现,并和外加压力维持平衡状态,外加力一旦取消,分子间立即恢复原来的距离,即液体立即恢复原来的体积。正像固体一样,液体呈现了对于压力的弹性抵抗作用。液体压缩性的大小以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 表示。体积压缩系数是液体体积的相对缩小值与压强的增值之比。设 V 为液体原来的体积,当加压 dp 后,体积相应地压缩了 dV ,则体积压缩系数

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-7)$$

考虑压力增加时体积相应减小, dV 与 dp 的符号始终是相反的,为保持 β 为正,式中加负号。 β 愈大,液体压缩性愈大。 β 的单位是 m^2/N 。

液体被压缩时质量并不改变,即质量增量 $dm=0$,故 $dm=\rho dV+Vd\rho=0$ 或 $dV/V=-d\rho/\rho$,因而体积压缩系数又可写为

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-8)$$

体积弹性系数 K 是体积压缩系数的倒数,即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-9)$$

K 值愈大,表示液体愈不容易被压缩。 K 的单位为 N/m^2 。

不同的液体有不同的 β 或 K 值,同一种液体的 β 或 K 值是随温度和压强变化的,但这种变化甚微,一般可视为常数。例如,压强每升高一个大气压,水的密度约增加二万分之一;大约增加一千个大气压才可使水的体积减少百分之五。其他液体也有类似的性质,因而可以认为液体是不可压缩的。只有在某些特殊情况下,如水击等问题必须考虑水的压缩性。水的体积弹性系数 K 值见表1-1。

温度较低时($10\sim 20^\circ\text{C}$),每增加 1°C ,水的密度约减小万分之一点五;温度较高时($90\sim 100^\circ\text{C}$),每增加 1°C ,水的密度约减小万分之七,故一般情况下液体的膨胀性可以忽略。只有在某些特殊情况,如热水采暖等问题才考虑水的热胀性。对于气体,虽然温度和压强对 β 和 K 值的影响较液体显著,但一般在速度不高的流动情况下,也可以视为不可压缩流体来处理。只有在压强变化过程非常迅速或者速度较高的流动情况下,才必须考虑压缩性。

1.3.6 表面张力特性

在液体自由表面,由于液体两侧分子引力不平衡,使自由表面上液体分子受有极其微小的拉力,这种拉力称为表面张力。表面张力不仅在液体与气体接触面上发生,而且还会在液体与固体或一种液体与另一种液体(如汞和水等)相接触的周界上发生。

因为气体分子有扩散作用,所以气体不存在自由表面,故气体不存在表面张力。表面

张力是液体的特有性质。即使对液体来讲,表面张力在平面上并不产生附加压力,因为那里的力处于平衡状态,它只有在曲面上才产生附加压力以维持平衡。

表面张力的大小可以用表面张力系数 σ 度量。表面张力系数是指在自由表面(把这个面看做一个没有厚度的薄膜一样)单位长度上所受拉力的数值,单位为 N/m 。 σ 的大小随液体种类、温度和表面接触情况而变化。对于与空气接触的自由面,当温度为 20°C 时,水的 $\sigma = 0.0728 \text{ N/m}$,水银的 $\sigma = 0.0538 \text{ N/m}$ 。

在水流实验中,经常使用盛有水或水银的细玻璃管做测压管。由于表面张力的影响,使玻璃管中液面和与之相联通容器中的液面不在同一水平面上,液体会在细管中上升或下降 h 高度(图1-3),这种现象称为毛细管现象。

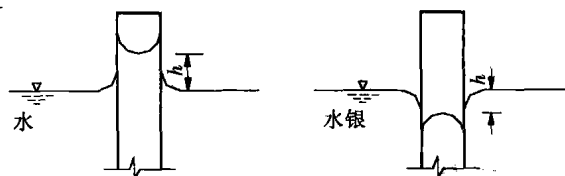


图1-3 毛细管现象

毛细管升高或下降值 h 的大小和管径大小及液体性质有关。对于一般实验室温度(20°C),可用下列近似公式来估算毛细管高度:

$$\text{水的毛细升高} \quad h = \frac{30}{d} \quad (1-10)$$

$$\text{水银的毛细降低} \quad h = \frac{10.15}{d} \quad (1-11)$$

式中: h 及 d 均以毫米计; d 为玻璃管内径。可见,管的内径越小,毛细管升高或下降值越大。所以,用来测量压强的玻璃管内径不宜太小,否则就会产生很大的误差。

1.4 作用在流体上的力

流体处于运动或平衡状态时,受到各种力的作用。按物理性质不同可以把这些力分为惯性力、重力、粘滞力、弹性力和表面张力等。为便于分析流体的运动或平衡规律,按作用特点又可将作用于流体上的力分为表面力和质量力两大类。

1.4.1 表面力

表面力是作用于流体表面并与其面积成比例的力。例如,固体边界对流体的摩擦力、边界对流体的反作用力、一部分流体对相邻流体(在接触面上)产生的压力等,都属于表面力。表面力可分为垂直于作用面的压力 P 和沿作用面方向的切力 T 。表面力的单位为 N 。

表面力的大小除用总作用力度量外,常用单位表面力(应力)即单位面积上所受的表面力来表示。单位表面力的单位为 N/m^2 ,量纲为 $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$ 。若单位表面力与作用面垂直,称为压应力或压强 p ;若与作用面平行,称为切应力 τ 。

1.4.2 质量力

质量力是指通过所研究流体的每一部分质量而作用于流体的、大小与流体的质量成比例的力。质量力又称体积力。重力、惯性力都属于质量力。质量力的单位是 N 。

质量力除用总作用力来度量外,常用单位质量力来表示。作用在单位质量流体上的质量力称单位质量力。若质量为 M 的均质流体,总质量力为 F ,则单位质量力

毛细管升高或降低高度与管径成正比。因此,用来量测压强的玻璃管内径不宜太小。

分析流体受力时,按表面力和质量力分析较方便。压强、切应力属表面力;重力、惯性力属质量力。

$$f = \frac{F}{M} \quad (1-12)$$

单位质量力的量纲和加速度的量纲 LT^{-2} 相同。这一点可以对比牛顿公式 $F = Ma$ 或 $a = F/M$ 来理解,其中 a 为加速度。

设总质量力 F 在空间坐标上的投影分别为 F_x, F_y, F_z , 则单位质量力 f 在相应坐标轴上的投影 X, Y, Z 为

$$X = \frac{F_x}{M}, Y = \frac{F_y}{M}, Z = \frac{F_z}{M} \quad (1-13)$$

当液体所受的质量力只有重力时(这是流体力学中的普遍情况),重力 $G = Mg$ 在直角坐标系(设 z 轴铅直向上为正)的三个轴向分量分别为 $G_x = 0, G_y = 0, G_z = -Mg$, 单位质量重力的轴向分力为

$$X = 0, Y = 0, Z = -g \quad (1-14)$$

1.5 流体力学模型及研究方法

1.5.1 流体力学模型

1. 理想流体

注意理想流体与实际流体的区别。

实际流体具有粘滞性。粘滞性的存在,使得对流体运动的分析变得非常困难。为问题分析的简化,引入理想流体。所谓理想流体是指没有粘滞性的流体。理想流体只是实际流体在某种条件下的一种近似(简化)模型。实际流体与理想流体的区别在于有无粘滞性。在某些流动问题中,若粘滞性不起作用或不起主要作用,采用理想流体模型可得出符合实际的结果。在某些流动问题中,若粘滞性影响很大,不能忽略时,应按实际流体处理,或者,先按理想流体模型处理,再对没有考虑粘滞性引起的偏差进行修正。

2. 不可压缩流体

实际流体都是可压缩的,如果忽略流体的压缩性,这种流体称不可压缩流体;反之,则称可压缩流体。不可压缩流体只是实际流体在某种条件下的一种近似模型。液体的压缩性和膨胀性均很小,密度可视为常数,一般按不可压缩流体处理。在大多数情况下,气体也可按不可压缩流体处理。只有在某些情况下,比如速度接近或超过音速时,在流动过程中气体密度变化很大时,必须按可压缩流体处理。本书主要讨论不可压缩流体。

1.5.2 流体力学的研究方法

研究流体力学的方法通常有理论分析、数值计算和科学实验三种方法。由于流体运动的多样性和复杂性,针对不同流体运动问题应采用不同的研究方法。有时,同一问题同时采用不同方法,以便相互补充、相互验证。

1. 理论分析方法

理论分析方法是建立在流体连续介质假定的基础上,通过研究作用于流体上的力,引用经典力学的基本原理(如牛顿定律、动量定理、动能定理等)建立流体运动的基本方程(如连续性方程、能量方程和动量方程等),利用数学手段分析求解。由于流体运动具有多样性,完全用理论分析方法解决某些复杂流体运动问题,目前还存在许多困难。

2. 数值计算方法

数值计算方法是近似求解流体运动的控制方程(如连续性方程、N-S 方程等),把描述流体运动的控制方程化为代数方程组,在计算机上求解的方法。它是以理论流体力学和计算数学为基础的。数值计算方法可分为有限差分法、有限元法和边界元法等。随着计算机的发展,数值计算方法已成为研究流体运动的一种重要手段,正在得到广泛的应用。

3. 科学实验方法

科学实验方法是研究流体运动的一种重要的手段。它可以检验理论分析或数值计算成果的正确性与合理性,亦可以直接对理论或数值计算暂时还不能完全求解的流体运动进行研究。科学实验方法可归纳为以下三种方式。

(1)原型观测。对工程中的实际流体运动直接进行观测,收集第一性资料,进行分析研究,为检验理论分析、数值计算成果或总结某些基本规律提供依据。

(2)模型试验。在实验室内,以相似理论为指导,把实际工程缩小为模型,在模型上预演相应的流体运动,得出模型流体运动的规律。然后,再把模型试验结果按照相似关系还原为原型的结果,以满足实际的工程需要。

(3)系统试验。由于原型观测受到某些条件的局限或因某种流体运动的相似理论还未建立,因而既不能进行原型观测又不能进行室内模型试验,但可在实验室内小规模地造成某种流体运动,用以进行系统的试验观测,从中找出规律。

理论分析、数值计算、科学实验三种方法各有利弊。理论分析能对某些流体运动进行分析求解,并能指导数值计算和科学实验,但对一些复杂的流体运动求解还存在着数学困难。数值计算能对一些复杂的流动现象进行近似求解,便于改变计算条件,具有灵活、经济等优点,但同时也有它本身的困难和局限性,如解的稳定性、收敛性等。科学实验是研究流动的重要手段,它能检验理论分析和数值计算结果的正确性和可靠性,并为简化理论模型提供依据,其作用是理论分析和数值计算方法不可替代的。因此,上述三种方法应结合使用,使它们互为补充、相互促进。

本章小结

1. 固体、液体和气体是自然界中物质存在的三种形态。液体和气体统称为流体。本书主要研究以水为代表的流体的宏观运动和平衡规律及其应用。

2. 把流体视为由一个紧挨一个的连续的无任何空隙的质点所组成,即所谓连续介质。

3. 物理量的量纲与单位不同。国际单位制中,长度、时间、质量为基本量,而力则为导出量,其单位和表示符号分别为米(m)、秒(s)、千克(kg)和牛顿(N)。1 N = 1 kg·m/s²。常用基本量纲为长度L、时间T、质量M。

4. 易流动性、惯性、重力特性、粘滞性、压缩性和膨胀性以及表面张力特性是流体的主要物理力学性质,其中重力特性、粘滞性对流体运动的影响起着重要作用。

5. 流体的质量以密度来衡量。单位体积流体内所具有的质量称为密度,单位为kg/m³,量纲为ML⁻³。

6. 当流体处在运动状态时,由于流体分子间的作用力,流体内部质点间或流层间因相对运动而产生内摩擦力以抗抵相对运动的性质,称为流体的粘滞性。此内摩擦力称为粘滞力,可由牛顿内摩擦定律描述。流体的粘滞性常用动力粘滞系数或运动粘滞系数表示。

7. 作用在流体上的力按其作用特点分为质量力和表面力两大类。质量力(又称体积力)的大小与流体的质量成正比。重力、惯性力都属于质量力。质量力常用单位质量力来表示。单位质量力在各坐标轴上的投影分别用X、Y、Z表示。表面力的大小与作用面的面积成比例。表面力常用应力(单位表面力)表示。若应力与作用面垂直,称为压应力或压强;若与作用面平行,称为切应力。

8. 理想流体只是实际流体在某种条件下的一种简化模型。实际流体与理想流体的区别在于有无粘滞性。