

普通高等教育土木工程专业“十二五”规划教材

工程流体力学

贡力 杨华中 叶 琰 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等教育土木工程专业“十二五”规划教材

工程流体力学

贡力 杨华中 叶琰 主编



中国铁道出版社

2013年·北京

TB126
54



北航

C1640826

377880810

内 容 简 介

工程流体力学(水力学)是高等学校水利工程类、土木工程类专业的一门重要技术基础课,本书根据水利类和土木类专业特点编写,为普通高等教育土木工程专业“十二五”规划教材。本书内容包括绪论、流体静力学、流体动力学理论基础、液流形态和水头损失、孔口、管嘴出流和有压管流、量纲分析与相似理论、明渠流动、堰流、渗流、可压缩气体的一元流动等10章。

本书为水利水电工程、土木工程、给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑与设备工程等专业的通用教材,供各专业开设工程流体力学(水力学)课程使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学/贡力,杨华中,叶琰主编. —北京:
中国铁道出版社,2013.2

普通高等教育土木工程专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-113-15781-4

I. ①工… II. ①贡… ②杨… ③叶… III. ①工
程力学—流体力学—高等学校—教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 318708 号

书 名:工程流体力学
作 者:贡力 杨华中 叶琰 主编

策 划:刘红梅 电 话:010-51873133 邮 箱:mm2005td@126.com 读者热线:400-668-0820
责任编辑:刘红梅
封面设计:冯龙彬
责任校对:龚长江
责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.51eds.com>

印 刷:北京华正印刷有限公司

版 次:2013年2月第1版 2013年2月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:12.5 字数:310 千

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-15781-4

定 价:26.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话:市电(010)51873170,路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504,路电(021)73187

前 言

工程流体力学(水力学)是高等学校水利工程类、土木工程类专业的一门重要技术基础课。为水利水电工程、土木工程、给水排水工程、环境工程、市政工程、建筑与设备工程等专业的通用教材,供各专业开设工程流体力学(水力学)课程使用。

作者根据水利类和土木类专业特点编写了《工程流体力学》(水力学)教材。

本书内容包括绪论、流体静力学、流体动力学理论基础、液流形态和水头损失、孔口、管嘴出流和有压管流、量纲分析与相似理论、明渠流动、堰流、渗流、可压缩气体的一元流动等10篇。

本教材具有以下特点。

1. 以土木工程、水利工程专业方向为主编写,并增加了气体的部分内容。
2. 本教材为少学时(32~40学时)教材。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。
3. 教材中加入了许多工程实例和土木类工程案例,每章后面都附有适量的习题。
4. 给出大量工程信息,配以一定量的工程照片,加强形象教学。

本书由兰州交通大学贡力、杨华中和西南大学叶琰老师主编。其中第1、2、3、4章由贡力编写,第5章由兰州交通大学靳春玲编写,第6、7、8章由杨华中编写,第9章由兰州交通大学王利霞编写,第10章由叶琰编写;全书由贡力统稿。

本书除可作为水利类、土木类本科和专科有关专业的必修课和选修课教材外,也可供环境类专业参考选用,同时亦可作为管理、设计、施工、投资等单位及工程技术人员的参考书。

编著者深知内容如此广泛的教材不易写好,加之编者水平所限,错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正,多提宝贵意见。

编 者
2013年1月

目 录

1 绪 论	1
1.1 工程流体力学的任务、发展状况及研究方法	1
1.2 流体的主要物理性质	2
1.3 作用在流体上的力	6
1.4 工程流体力学的研究方法	7
思考题	8
2 流体静力学	9
2.1 静水压强及其特性	9
2.2 液体平衡微分方程及其积分	11
2.3 重力作用下流体静压强的分布规律	14
2.4 流体压强的测量	17
2.5 静止液体作用在平面上的总压力	19
2.6 静止液体作用在曲面上的总压力	22
思考题	26
3 流体动力学理论基础	31
3.1 描述流体运动的两种方法	31
3.2 流体运动的基本概念	33
3.3 流体运动的连续性方程	37
3.4 理想流体的运动方程	39
3.5 实际流体恒定总流的能量方程	42
3.6 恒定总流的动量方程	47
3.7 流体微团运动分析	51
3.8 恒定平面势流	55
思考题	58
4 液流形态和水头损失	61
4.1 水流阻力与水头损失的两种形式	61
4.2 实际液体流动的两种形态	62
4.3 均匀流动的沿程水头损失和基本方程	64
4.4 圆管中的层流运动	66
4.5 紊流基本理论	69
4.6 圆管紊流的沿程损失	74
4.7 边界层理论基础	81

4.8 局部阻力损失	84
思考题	87
5 孔口、管嘴出流和有压管流	89
5.1 薄壁孔口恒定出流	89
5.2 管嘴的恒定出流	91
5.3 孔口的变水头出流	93
5.4 短管的水力计算	94
5.5 长管的水力计算	99
思考题	103
6 量纲分析与相似理论	107
6.1 量纲分析	107
6.2 相似原理	112
6.3 模型实验	115
思考题	116
7 明渠流动	118
7.1 明渠的分类	118
7.2 明渠均匀流	119
7.3 明渠恒定非均匀流动的若干基本概念	129
7.4 水跃和跌水	135
7.5 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	139
7.6 棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	140
思考题	145
8 堰 流	148
8.1 堰流的定义及分类	148
8.2 堰流的基本公式	149
8.3 薄壁堰	151
8.4 实用堰	153
8.5 宽顶堰	154
8.6 小桥孔径水力计算	158
思考题	161
9 渗 流	163
9.1 基本概念	163
9.2 渗流模型及达西定律	164
9.3 地下水的渐变渗流分析	166
9.4 渐变渗流的实例	169
9.5 井群	173
9.6 恒定渗流的微分方程及其解法	175

思考题.....	176
10 可压缩气体的一元流动	178
10.1 可压缩气体的物理性质.....	178
10.2 可压缩气体一元流动的基本方程.....	180
10.3 微弱压力扰动的传播.....	181
10.4 可压缩气体在管道中的流动.....	185
思考题.....	192
参考文献	193

1 绪 论

1.1 工程流体力学的任务、发展状况及研究方法

人类的文明几乎都是与河流相伴而生,社会的发展又都是与江河湖海戚戚相关,所以水总是人类密切关注的对象,而空气是人类赖以生存的重要物质。工程流体力学是专门研究流体平衡与机械运动的规律及其工程应用的一门科学,研究对象就是以水和空气为代表的流体。

自然界物质存在的主要形式是固体、液体和气体。液体和气体统称为流体。从力学分析的角度看。流体与固体的主要差别在于它们对外力抵抗的能力不同。固体可以抵抗一定的拉力、压力和剪力。而流体则几乎不能承受拉力,处于静止状态下的流体还不能抵抗剪力。即流体在很小剪力作用下将发生连续不断的变形。流体的这种宏观力学特性称为易流动性。易流动性既是流体命名的由来、也是流体区别于固体的根本标志。至于气体与液体的差别则主要在于气体易于压缩,而液体难于压缩。本书主要探讨液体的运动规律。

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)、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,另一条水力学途径应运而生,该途径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(Checy)、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。

近几十年来,流体力学学科随着现代生产建设的迅速发展和科学技术的进步而不断发展,研

究范围和服务领域越来越广,新的学科分支亦不断涌现,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。如现已派生出计算流体力学、随机流体力学、环境流体力学、能源流体力学、工业流体力学等新的学科分支。所以,流体力学既是一门古老的学科,又是一门富有生机的学科。

本书根据水利工程专业和土木工程专业的需要,主要介绍一些工程流体力学(水力学)的内容。

工程流体力学在土木工程中也有着广泛的应用。如城市的生活和工业用水,一般都是从水厂集中供应,水厂利用水泵把河、湖或井中的水抽上来,经过净化和消毒处理后,再通过管路系统把水输送到各用户,有时,为了均衡负荷,还需要修建水塔。这样,就需要解决一系列工程流体力学问题,在工程中经常遇到的流体力学问题主要有以下几个方面。

(1) 确定水力荷载

确定各种构筑物承受的静水压力或动水总作用力,以及透水地基上的渗透压力筑物的结构设计和稳定分析提供依据。

(2) 确定水力输送能力

研究河流、渠道、管路的输水(泄水)能力以及水利、交通工程中过水建筑物所能通过的流量及其影响因素,为合理确定这些建筑物(水闸、桥梁、涵洞)的型式和尺寸提供依据。

(3) 分析水流运动形态

分析水流通过构筑物及其影响区域的流动形态,采取必要的措施,改善不利的水流形态,保证工程的安全正常运行;如取水口与河道建筑物(桥梁、堤坝等)防护工程的布置,如泄洪间、码头栈桥的布置等。

(4) 确定水流能量的利用和消耗

分析水流在运动过程小能量的转化及损耗规律,减少在引水、输水过程中的能量损失。涉及输水管路的布置,管径及水泵功率的选择,包括输水系统的管理调度及安全运行;涉及水利枢纽采取的泄洪措施能否有效消除水能,确保建筑物和下游河道的安全。

(5) 其他水力学问题

解决土木工程、水利工程基础和围堰的渗流问题、隧道、路基排水问题;在修建铁路及公路、开凿航道、设计港口等工程时,也必须解决如桥涵孔径的设计。挟沙水流、波浪运动对构筑物的影响问题,还要涉及污染物质在水流中的扩散、降解和自净的环境水力学问题。

随着生产的发展,还将会不断地提出新的课题。相信在今后的建设中,工程流体力学将会发挥更大的作用,学科本身也将会得到更大的发展。

1.2 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。

流体运动的规律,除与外部因素(如边界的几何条件及动力条件等)有关外,更重要的是取决于流体本身的物理性质。因此,在研究流体平衡与运动之前,首先讨论流体的主要物理性质。

1.2.1 密度和重度

流体和固体一样,也具有质量和重量。

流体的密度是指单位体积流体所具有的质量。对于均质流体,设体积为 V 的流体具有的质量为 m ,则密度 ρ 为

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

密度的量纲为 ML^{-3} ,其国际单位为千克/米³(kg/m³)。密度也称体积质量。

均质流体的重度 γ 是指单位体积流体所具有的重量,即

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g$$

重度(或称容重、体积重量)的量纲为 $ML^{-2}T^{-2}$,其国际单位为牛/米³(N/m³)。由于重度与重力加速度 g 有关,所以随着地球上的位置而变化。在工程流体力学计算中一般采用 $g=9.80 \text{ m/s}^2$ 。

纯净水在 1 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。在工程计算中,为简便起见,通常取淡水的密度 $\rho=1\,000 \text{ kg/m}^3$,重度 $\gamma=9.80 \text{ kN/m}^3$ 。

表 1.1 水的物理性质

温度(°C)	重度 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	黏度 $\mu \times 10^3$ (N · s/m ²)	运动黏度 $\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	弹性系数 $E_1 \times 10^{-6}$ (kN/m ²)	表面张力 σ (N/m)
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.075 6
5	9.807	1 000.0	1.518	1.519	2.06	0.074 9
10	9.804	999.7	1.300	1.306	2.10	0.074 2
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	0.073 5
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	0.072 8
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	0.072 0
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	0.071 2
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	0.069 6
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	0.067 9
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	0.066 2
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	0.064 4
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	0.062 6
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	0.060 8
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	0.058 9

表 1.2 几种常见流体的重度

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
重度(N/m ³)	11.82	133 280	6 664~7 350	7 778.3	15 600	9 996~10 084
温度(°C)	20	0	15	15	20	15

1.2.2 黏 性

著名的英国科学家牛顿在 17 世纪论述了流体的黏滞性。他指出,流体的内部存在由黏性引起的剪切应力,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 1.1 所示。

相距为 h 的上下两平行平板之间充满均质黏性流体。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。而用 F 拖动上板使其作平行于下板的匀速直线运动。实验表明:

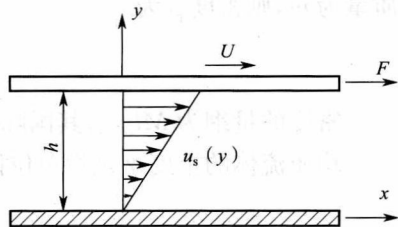


图 1.1

1) 由于流体的黏滞性,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:

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

2) 比值 F/A 与 U/h 成正比,即:

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

式中, μ 为比例系数,称为动力黏性系数,简称黏度;比值 $\tau = F/A$ 为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

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

上式称为牛顿内摩擦定律。黏度是流体黏滞性大小的一种度量,它与流体的物理性质有关直接导出,在国际单位制中, μ 的单位为牛·秒/米² ($N \cdot s/m^2$) 或帕·秒 ($Pa \cdot s$)。

在研究流体运动时,还常采用运动黏性系数(简称运动黏度),其定义为

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

式中, ρ 为流体的密度,在国际单位制中, ν 的单位为米²/秒 (m^2/s)。把 ν 称为运动黏度的原因是,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,流体的黏度 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。

不同温度下水的黏度 μ 和运动黏度 ν 如表 1.1 所列。水的运动黏度可以用以下经验公式计算

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$$

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(Bingham)塑性流体等,可参见图 1.2。另外,还有一种流体,称为理想流体,理想流体是指黏度为零,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,实际流体都存在黏性,应该称为黏性流体,但是在某些问题中,当黏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。

1.2.3 压缩性

当作用在流体上的压强增大时,流体的宏观体积将会减小,这种性质称为流体的压缩性。压缩性的大小可以用体积压缩率 κ 或体积量(亦称体积弹性系数,也记为 E_v) κ 来量度。设压缩前的体积为 V ,压强增加 dp 后,体积减小 dV ,则体积压缩率定义

$$\kappa = -\frac{dV/V}{dp}$$

由于 dp 与 dV 符号始终相反,故上式等号右端加一负号,以保持 κ 为正值。 κ 值越大,则流体的压缩性越大。 κ 的单位为 $\text{米}^2/\text{牛}(\text{m}^2/\text{N})$ 。因为体积 V 与质量 m 和密度 ρ 有 $V=m/\rho$ 则小的关系,且 m 为常量,故体积压缩率 κ 又可写成

$$\kappa = \frac{d\rho/\rho}{dp}$$

体积模量 K 定义为体积压缩率 κ 的倒数,即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{dp}{dV/V} = \frac{dp}{d\rho/\rho}$$

其单位为帕(Pa)。

流体的 κ 或 K 值一般与流体的种类、压强和湿度等有关。但液体的 κ 或 K 值随压强和温度的变化不大。因此,液体并不完全符合弹性体的胡克定律。

液体的压缩性很小,例如在 100°C 时水的体积模量 $K \approx 2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。所以,在一般工程设计中,认为水的压缩性可以忽略,相应的水的密度和重度可视为常数。但在讨论管道中水流的水击问题时,水的压缩性则必须考虑。

至于气体,其压缩性要比液体大。气体的压缩性一般还与压缩过程有关。但需指出,在一定条件下,如在距离不太长的输气系统中,当气流速度远小于音速时,气体压缩性对气流流动的影响也可以忽略。也就是说,此时的气体也可视为不可压缩的。否则,必须考虑气体的压缩性。

实际流体都是可压缩的,但在可以忽略流体压缩性时,引出不可压缩流体模型,可使流动分析简化。

1.2.4 表面张力

表面张力是液体自由表面在分子作用半径范围内,由于分子引力大于斥力而在表层沿表面方向产生的拉力。表面张力 σ 定义为自由表面内单位长度上所受的横向拉力,其量纲为 MT^{-2} ,国际单位为牛/米(N/m)。 σ 值随流体的种类和温度而变化。如对 20°C 的水, $\sigma = 0.074 \text{ N/m}$,对水银 $\sigma = 0.54 \text{ N/m}$ 。 σ 也叫表面张力系数。

表面张力的数值并不大,在工程流体力学中一般不考虑它的影响。但在某些情况下,如当内径较小的管子插在液体中时,由于表面张力会使管中的液体自动上升或下降一个高度,这种所谓的毛细管现象,是工程流体力学实验中使用测压管时所必须注意的。另外,在研究水深很

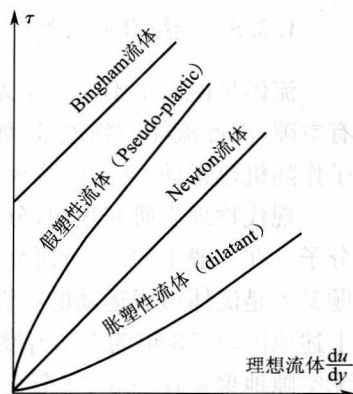


图 1.2

浅的明渠水流和堰流时,其影响也是不可忽略的。

1.2.5 连续介质模型

流体是由大量不断地作无规则热运动的分子所组成。从微观的角度看,由于分子之间存在有空隙,因此流体的物理量(如密度、压强、流速等)在空间上的分布是不连续的;同时,由于分子作随机热运动,又导致物理量在时间上的变化也不连续。

现代物理研究表明,分子间的距离是相当微小的,在很小的体积中已包含了难以计数的分子。在一般工程中,所研究流体的空间尺度远比分子尺寸大得多,而且要解决的实际工程问题又不是流体微观运动的特性,而是流体的宏观特性,即大量分子运动的统计平均特性。基于上述原因,1753年瑞士学者欧拉(Euler)提出了一个基本假说,即认为流体是由其本身质点毫无空隙地聚集在一起、完全充满所占空间的一种连续介质。把流体视为连续介质后,流体运动中的物理量均可视为空间和时间的连续函数,这样,就可利用数学中的连续函数分析方法来研究流体运动。实践证明,采用流体的连续介质模型,解决一般工程中的流体力学问题是可以满足要求的。

1.3 作用在流体上的力

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、黏滞力和表面张力等。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。

1.3.1 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 LT^{-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

$$f = \frac{F}{m}$$

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

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

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上的分力为

$$X = Y = 0, Z = -g$$

1.3.2 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 1.3 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,这里引进流体连续介质概念,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;

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

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA}$$

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)。

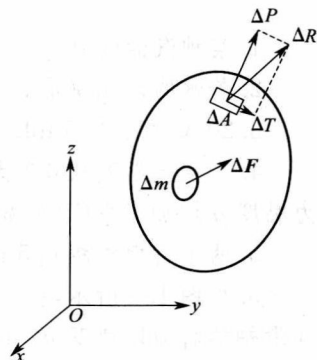


图 1.3

1.4 工程流体力学的研究方法

工程流体力学与其他科学一样,其研究方法一般有实验研究、理论分析和数值模拟三种。

工程流体力学理论的发展,在相当程度上取决于实验观测的水平。古代流体力学的知识多半是直接 from 生产实践中积累起来的。在以系统研究自然规律为直接目的的科学实验出现后,便扩大和加深了实践的范围,并在此基础上形成了近代流体力学的系统理论。在工程流体力学中实验观测的方法主要有三个方面:一是原型观测,对工程实践中的流体流动直接进行观测;二是系统实验,在实验室内对人工流动现象进行系统研究;三是模型实验,在实验室内,以流动相似理论为指导,将实际工程缩小为模型,通过在模型上预演或重演相应的流动现象来进行研究。这三个方面有计划地进行,可以取得相互配合、补充和验证的效果。

当掌握了相当数量的试验资料后,就可以根据机械运动的普通原理,运用数理分析的方法来建立流体运动的系统理论,并在指导生产实践的过程中加以检验、补充和发展。由于流体运动的复杂性,实际解决工程问题时,单纯依靠数理分析有时往往还很难得到所需要的具体结果,因此必须采用数理分析与试验观测相结合的方法。在工程流体力学中,有时先推导理论公式再用经验系数修正;有时是应用半经验半理论的公式;有时是先定性分析然后直接采用经验公式进行计算。

从 20 世纪 60 年代以后,随着现代电子计算机技术及其应用的飞速发展,在工程流体力学的研究中已形成了一门重要的分支学科——计算流体力学或计算水力学。它广泛地采用有限差分法、有限单元法、边界元法以及其他数学方法将工程流体力学中一些难以用解析法求解的线性或非线性偏微分方程离散为数值模型,进行数值计算。虽然数值计算结果是近似的,但一般都能达到工程上要求的精度。

数值计算一般比物理模型实验在人力物力上较为节省,还具有不像物理模型受相似律限制的优点。但数值模型必须建立在物理概念正确和力学规律明确的基础上,而且需要天然或实验资料的检验。所以对于一些重要的工程流体力学问题的研究,通常采用理论分析、数值模拟和实验研究相结合的途径。本书主要介绍理论分析和实验研究方法。至于数值计算,本书不作介绍,读者可参阅有关计算流体力学或计算水力学书籍。

思考题

1. 某种汽油的重度 $\gamma = 7.20 \text{ kN/m}^3$, 求其密度 ρ 。
2. 若水的体积模量 $K = 2.2 \times 10^9 \text{ Pa}$, 欲减小其体积的 0.5%, 问需增加多大的压强?
3. 20°C 的水 2.5 mL, 当温度升至 80°C 时, 其体积增加多少?
4. 当空气温度从 0°C 增加至 20°C 时, 运动黏度 ν 增加 15%, 重度 γ 减少 10%, 问此时动力黏度 μ 增加多少(百分数)?
5. 两平行板相距 0.5 mm, 其间充满流体 0.25 m/s 匀速移动, 求该流体的动力黏度。
6. 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 $\delta = 1 \text{ mm}$, 坡度关系为 5 : 12 : 13, 求润滑油的动力黏性系数(黏度) μ 。

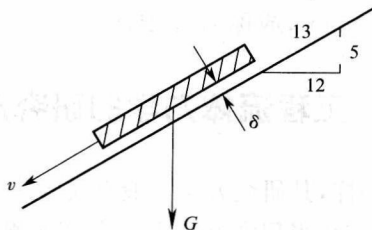


图 1.4

7. 一封闭容器盛有水或油, 在地球上静止时中自由下落时, 其单位质量力又为多少?

2 流体静力学

水静力学是研究液体在静止或相对静止状态下的力学规律及其工程实际中的应用。所谓静止是指液体质点之间没有相对运动,液体整体对于地球也没有相对运动。相对静止是指液体质点之间没有相对运动,但液体整体相对于地球有相对运动,例如沿直线等加速运动容器内的液体。

在工程实际中会遇到许多水静力学问题。例如设计水闸、挡水坝、码头和船闸、桥台时,必须先计算静水对它们的作用力;设计浮码头、船舶等时,不仅要计算它们的浮力,还要计算其稳定性,这些计算都要应用水静力学知识;另外水轮机和量测液体压强仪表的工作原理等,都涉及水静力学方面的知识。

由液体的物理性质可知,在静止或相对静止液体中不存在切力,同时液体又不能承受拉力,因此静止液体中两部分之间以及液体与相邻的液体壁面之间的作用力只有静水压力。为了计算作用于某一面积上的静水压力,首先要知道该面积上的静水压强分布规律,所以水力学的关键问题是根据平衡条件来求解静止液体中的压强分布。

本章讨论静水压强的特性、液体平衡微分方程、平面和曲面上的静水压力及浮体稳定性。

2.1 静水压强及其特性

2.1.1 静水压强

如图 2.1(a)所示,在静止液体中任取一点 m ,围绕 m 点取一微小面积 ΔA ,作用在该面积上的静压力为 ΔP ,面积 ΔA 上的平均压强为

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2.1)$$

如果面积 ΔA 围绕 m 点无限缩小,当 ΔA 趋近于零时,比值 $p = \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 的极限称为 K 点的静水压强,即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2.2)$$

压强的国际制单位是帕[斯卡],即 Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。

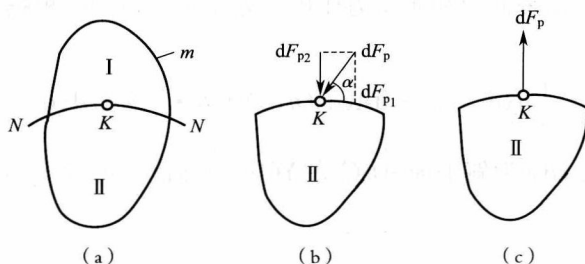


图 2.1 平衡液体中取出一水体

2.1.2 静水压强的特性

静水压强有两个重要的特性:

(1) 流体静压强的方向沿作用面的内法线方向, 静止液体压强垂直指向作用面。

在平衡液体中取出一水体, 如图 2.1, 用 $N-N$ 面将 M 分为两部分, 若取下部分为研究对象, 设某点 K 所受的静水压强为 p 围绕 K 点所取的微分面 dA 上所受的静水压力为 dP 。若 dP 不垂直于作用面而与通过 K 点的切线相成交 α 角, 如图 2.1(b) 所示, 则 dP 可分为垂直于 dA 的作用力 dP_n 及平行于通过 K 点切线作用力 dP_τ 。然而, 在前面指出过静止液体不能承受剪切变形, 显然, dP_τ 的存在必然破坏液体的平衡状态。所以静水压力 dP 及相应的静水压强 p 必须与其作用面相垂直, 即 $\alpha=90^\circ$ 。

以上讨论表明, 在平衡液体中静水压强只能是垂直并指向作用面, 即静水压力只能是垂直的压力。

(2) 静止液体中任一点处各个方向的静水压强都相等。

设在静止液体中任选一点 O , 以 O 点为顶点。取一微小四面体 $OABC$, 如图 2.2 所示。 p_x 、 p_y 、 p_z 分别表示坐标面和斜面 ABC 上的平均压强。如果能够证明, 当四面体 $OABC$ 无限地缩小到 O 时, $p_x=p_y=p_z=p_n$ (n 为任意方向), 则静水压强的第二特性得到了证明。为此目的, 分别用 p_x 、 p_y 、 p_z 、 p_n 表示垂直于 dA_x 、 dA_y 、 dA_z 和 dA_n 的平面及斜面上的总压力, 则有

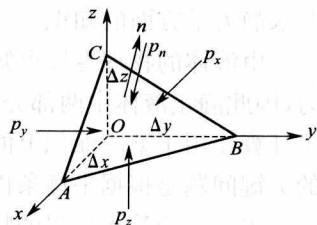


图 2.2

$$\left. \begin{aligned} P_x &= 1/2 p_x dydz \\ P_y &= 1/2 p_y dzdx \\ P_z &= 1/2 p_z dxdy \\ P_n &= p_n dA \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

四面体 $OABC$ 除了受到表面力的作用外, 还有质量力的作用。四面体的体积为 $\frac{1}{6} dx dy dz$, 液体密度以 ρ 表示, 令 X 、 Y 、 Z 分别为液体单位质量的质量力在相应的坐标轴方向的分量, 则质量力 F 在坐标轴方向的分量分别为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= X \frac{1}{6} dx dy dz \\ F_y &= Y \frac{1}{6} dx dy dz \\ F_z &= Z \frac{1}{6} dx dy dz \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

由于四面体 $OABC$ 在表面力和质量力作用下处于平衡, 因此, 根据各力在 x 方向的平衡条件有

$$p_x \cdot \frac{1}{2} dydz - p_n \cdot dA \cos(n, x) + X \cdot \rho \frac{1}{6} dx dy dz = 0 \quad (2.5)$$

式中, $dA \cos(n, x) = \frac{1}{2} dx dy$ 为斜平面 ABC 在 YOZ 坐标面上的投影面积, 将其代入上式, 化简后得

$$p_x - p_n + X \cdot \rho \frac{1}{3} dx = 0 \quad (2.6)$$