



高等学校土木工程
专业系列教材
普通高等教育规划教材

水力学

主编 何文社
主审 季日臣

Hydraulics



人民交通出版社
China Communications Press



普通高等学校土木工程
专业系列教材
普通高等教育规划教材

水力学

主编 何文社
参编 董玉云 王军玺 林梦凯
主审 季日臣

Hydraulics



人民交通出版社
China Communications Press

前 言

Foreword

水力学是高等学校土建类专业的一门重要技术基础课。本教材是根据高等学校土建类专业的水力学课程教学基本要求,结合作者多年的教学实践,依据加强理论基础、拓宽基础知识面、按大类培养人才的教改思路编写而成的。根据土木工程专业的特点,学生的学习基础情况和减少课内教学学时的需要,适当精简了传统的经验性内容和计算方法。

本教材较系统地阐述了水力学的基本概念、基本理论和基本的工程应用。在保证理论基础的前提下,精选内容,使基本原理和物理概念的阐述正确、清晰、重点突出,基本保证40~50学时的教学要求。在编写中,力求做到所述内容通俗易懂,富有启发性,以利于教学与自学。

本教材采取集体磋商、分工执笔的编写模式。初稿完成后,几经试用,并经多次讨论和修改,最后才形成定稿。全书由何文社主编。具体编写分工如下:何文社(第1章、附录);董玉云(第5章、第6章、第7章);王军玺(第4章、第8章、第9章);林梦凯(第2章、第3章、第10章)。

本教材的主审季日臣教授为本书提出了有益的修改意见和建议,在此表示感谢。

由于编者学识所限,书中难免有疏漏和不足之处,恳切希望读者给予批评指正。

编 者

2010年10月

目录 contents

第 1 章 绪论	1
§ 1-1 水力学的任务及发展简史	1
§ 1-2 流体的基本特征与连续介质	3
§ 1-3 液体的主要物理性质	4
§ 1-4 作用于液体上的力	9
§ 1-5 水力学的研究方法	10
习题	10
第 2 章 水静力学	12
§ 2-1 静水压强及其特性	12
§ 2-2 液体平衡微分方程及其积分	14
§ 2-3 重力作用下静水压强的分布规律	16
§ 2-4 流体压强的量测	20
§ 2-5 几种质量力同时作用下的液体平衡	23
§ 2-6 作用在平面壁上的静水总压力	26
§ 2-7 作用于曲面壁上的静水总压力	31
§ 2-8 作用于物体上的静水总压力, 潜体与浮体的平衡及其稳定性	34
习题	38
第 3 章 水动力学理论基础	42
§ 3-1 描述液体运动的两种方法	42
§ 3-2 研究液体运动的若干基本概念	44
§ 3-3 恒定总流的连续性方程	48
§ 3-4 能量方程	49
§ 3-5 能量方程应用举例	53
§ 3-6 实际液体恒定总流的动量方程	57
§ 3-7 恒定总流的动量方程式应用举例	60
§ 3-8 恒定总流的动量矩方程	62
习题	63
第 4 章 液流型态及水头损失	69
§ 4-1 水头损失的物理概念及其分类	69
§ 4-2 实际液体运动的两种流态——层流和紊流	71
§ 4-3 均匀流的沿程水头损失和基本方程	75
§ 4-4 层流运动	77
§ 4-5 紊流运动概述	81

§ 4-6	沿程阻力系数 λ 的试验研究及计算	87
§ 4-7	局部水头损失	93
§ 4-8	边界层的概念及绕流阻力	98
	习题	100
第 5 章	孔口、管嘴和有压管道流动	102
§ 5-1	薄壁孔口的恒定出流	102
§ 5-2	管嘴的恒定出流	105
§ 5-3	孔口(管嘴)的非恒定出流	107
§ 5-4	短管的水力计算	108
§ 5-5	长管的水力计算	117
§ 5-6	管网水力计算基础	124
	习题	128
第 6 章	明渠均匀流	132
§ 6-1	明渠的几何要素	132
§ 6-2	明渠均匀流的特性及形成条件	134
§ 6-3	明渠均匀流的水力计算	135
	习题	145
第 7 章	明渠非均匀流	147
§ 7-1	明渠非均匀流的基本概念	147
§ 7-2	水跃与跌水	155
§ 7-3	明渠恒定非均匀渐变流的微分方程式	161
§ 7-4	棱柱体明渠水面曲线形状分析	163
§ 7-5	棱柱形明渠水面曲线计算	170
§ 7-6	天然河道水面曲线计算	173
	习题	178
第 8 章	堰流和闸孔出流	181
§ 8-1	堰闸出流的特性分析及流态转化	181
§ 8-2	堰流的定义及堰的分类	182
§ 8-3	堰流基本公式	183
§ 8-4	薄壁堰的水力计算	184
§ 8-5	实用堰简介	187
§ 8-6	宽顶堰的水力计算	189
§ 8-7	小桥孔径的水力计算	191
§ 8-8	无压涵洞简介	194
§ 8-9	闸孔出流简介	195
§ 8-10	泄水建筑物下游的水流衔接与消能简介	197
	习题	198
第 9 章	渗流	200
§ 9-1	渗流模型	200
§ 9-2	渗流基本定律	202

§ 9-3 恒定无压渗流 205

§ 9-4 集水廊道的渗流计算 211

§ 9-5 井的渗流与基坑排水 212

§ 9-6 土坝的渗流计算 219

§ 9-7 渗流基本微分方程和流速势函数 223

§ 9-8 恒定平面渗流的流网解法 225

习题..... 229

第 10 章 量纲分析与相似原理 232

§ 10-1 概述 232

§ 10-2 量纲与量纲和谐原理 232

§ 10-3 量纲分析法 235

§ 10-4 水力相似理论 239

习题..... 248

附录..... 249

参考文献..... 252

第1章 绪 论

§ 1-1 水力学的任务及发展简史

一、水力学的任务

1. 水力学的定义

水力学是研究以水为代表的液体的平衡和机械运动规律及其实际应用的一门学科。水力学是力学(流体力学)的一个分支,它是介于基础科学和工程技术之间的一门技术学科。

2. 水力学的基本内容

水力学是以物理学、理论力学中的普遍规律为依据,借助于数学工具,结合水流的特点和边界条件,建立了水力学的理论基础。水力学所研究的基本规律包括水静力学和水动力学两大部分。

水静力学——研究液体在静止或相对平衡状态下,作用于液体上各种力的平衡关系及其在生产中的应用。

水动力学——研究作用于液体上的力与运动要素之间的关系和液体运动特性与能量转换的规律及其在生产中的应用。

水力学一方面要根据基础科学中的普遍规律,结合水流特点,建立理论基础,同时又要紧密联系工程实践,因此工程性和技术性都很强。

3. 水力学的研究对象

水力学虽然以水为研究对象,但它的基本原理也适用于一般常见的液体和可以忽略压缩性的气体。

4. 水力学在工程上的主要应用

水是自然界存在的一种重要物质,水是生命之源。水与工农业生产及人民生活息息相关。水力学在水利、土建工程中有着广泛的应用。在修建铁路及公路、开凿航道、设计港口等工程时,必须解决一系列的水力学问题,如桥涵孔径的设计,站场、路基排水设计,隧道、地下工程排水及通风,以及高速铁(公)路隧道洞形设计等。城市建设中,城市的生活和工业用水,一般是从水厂集中供应,水厂利用水泵把河、湖、水库或井中的水抽上来,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,就需要解决一系列水力学问题,如取水口的布置、管路布置、水管直径和水塔高度等的计算,水泵容量和井的产水量计算等。还有如确定水工建筑物所受水力荷载,过流能力,水流的流动形态,以及水流的能量损失等。举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程,工程规模宏大,坝高为185m的重力坝,电站装机容量1820万kW,水利枢纽包括挡水坝、溢洪道、水电站以及通航等建筑物。为了设计各水工建筑物的断面形状及尺寸,校核水工建筑物的稳定性,必须计

算水流对水工建筑物的作用力。大坝蓄水后,壅水将到达上游数百公里,水面曲线的计算就成为一项重要的工作。又如,正在兴建的南水北调中线工程,全长 1200km,建成后将成为世界上最长的运河。该项工程包括明渠、隧洞、渡槽、扬水站等多种水工建筑物,这些问题都直接与水力学有关。除此之外,水力学在工农业生产的许多部门,如农田水利、水力发电、火力发电、市政建设、航运工程、环境保护、机械制造、石油开采、热工测量、冶炼、化工等其他领域均有广泛运用。

在水利工程中,水力学起到“裁剪”的作用,决定水利工程的“体形”、“尺寸”、“轮廓”等。

二、水力学的发展简史

水力学是随着生产实践的需要而不断发展的,同时又受到社会其他因素的影响和制约。在人类自身的发展过程中,人们对水的认识不断加深,从被动认识到主动研究,逐步掌握了水的特性和规律,并用这些规律为人类服务,直到现在,这种探索和研究仍在进行着,并将不断地继续下去。

早在几千年前,由于治河、农业、航运、交通等事业的发展,人们开始了解一些水流的运动规律。我国水利事业的历史十分悠久,相传 4000 多年前的大禹治水,就认识到了“顺水之性”。在公元前 256 年至前 210 年间,秦国人修建了著名的“都江堰”、“郑国渠”、“灵渠”三大工程,表明当时对明渠和堰流的认识已具有相当高的水平。特别是都江堰水利工程,在分流、引水、防沙等结构布局方面都符合现代水力学理论,延续至今 2000 多年,仍发挥着巨大的作用。说明当时我国在水利工程的规划、设计、施工和运行管理方面具有相当高的科学水平及创造性。距今已近 1400 年而依然保持完好的赵州桥,在主拱圈两边各设有两个小腹拱,既减轻了主拱的负荷,又利于泄流,说明当时人们对桥涵水力学已有相当的认识。公元 1363 年的铜壶滴漏,就是利用孔口出流让容器的水位发生变化来计算时间的。据《周礼·夏官》记载,早在周代已开始使用漏壶测定时间。公元 1405 ~ 1433 年,郑和率众七次下西洋,说明当时对航海技术有了较全面的掌握。明代潘季训在治理黄河过程中,提出了“筑堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的正确治河方针,符合水流挟沙的客观规律。清朝雍正年间,何梦瑶在《算迪》一书中提出了流量为过水断面上平均流速乘以过水断面面积的计算方法。此外,我国人民很早就利用水流的冲力带动水磨、水车等水利机械来为生产服务。

一般认为水力学的发展大体经历了以下三个阶段。

1. 萌芽期(亦称启蒙期)(16 世纪以前)

国外有明确记载的最早的水力学原理是公元前 250 年左右西西里岛的阿基米德写的“浮体论”一文开始的。他对静止时的流体力学性质作了第一次科学总结,奠定了流体静力学的基础。此后千余年间,流体力学没有重大发展。

2. 古典期(16 世纪至 19 世纪中叶)

16 世纪后,随着国外资本主义兴起,生产力迅速发展,自然科学亦发生了质的飞跃,这为水力学的发展提出了要求和创造了条件,如 1650 年巴斯卡提出了液体中压强传递的定理;1686 年牛顿内摩擦定律等。18 世纪至 19 世纪,在伽利略—牛顿力学的基础上水力学及古典流体力学得到了较大的发展,形成了两门独立的学科。1738 年伯努利提出了水动力学能量方程;1755 年欧拉建立了理想液体运动的微分方程;1821 ~ 1845 年纳维和斯托克斯建立了黏性液体运动的微分方程,简称 N-S 方程。它用严格的数学分析方法建立了流体的基本运动方程,

为古典流体力学奠定了基础。但是由于理论的假设与实际不尽相符或求解上的数学困难,当时难以解决各种实际问题。为了适应工程技术迅速发展的需要,采用实验和观测手段,直接寻求水力参数间的定量关系的实验水力学得到蓬勃发展。如 1732 年毕托发明了测量流速的毕托管;谢才于 1769 年总结出明渠均匀流公式;1856 年达西提出了渗流的达西定律。此外,还有管流、堰流和孔口流等许多经验公式和系数。这些成果被总结成以实际液体为对象的重经验和重实用的水力学。但由于理论指导不足,其成果往往有局限性,难以解决复杂的工程问题。

18 世纪中叶以后,水力学才开始成为一门独立的学科,它与古典流体力学是有区别的。古典流体力学是用严密数学工具,建立流体基本运动方程。其优点是流体力学发展奠定了理论基础;缺点是理论中假设与实际不尽相符,求解上存在数学困难,难以应用于实际。水力学(实验水力学)主要用试验手段,寻求水力要素的经验关系。优点是有助于解决实际工程问题;缺点是具有局限性,难以解决复杂的工程问题。

3. 现代期(19 世纪中叶至今)

19 世纪以来,随着生产技术的发展,尤其是航空方面的理论和实验的迅速发展,使得古典流体力学与实验流体力学的日益结合,逐渐形成了理论与实验并重的现代流体力学(或称流体力学)。它是建立在古典流体力学的基础上,根据古典流体力学的基础理论和现代的紊流理论、边界层理论以及量纲分析与相似理论等,结合实验、实测数据和经验公式,来探索实际流体运动的基本规律。如雷诺于 1883 年指出对实际流体存在层流和紊流两种流态,并于 1985 年建立了时均化的运动方程——雷诺方程;1904 年普朗特创立了边界层理论,使流体力学进入了一个新的历史时期。

一般把侧重于理论方面的流体力学,称为理论流体力学;侧重于应用的流体力学,称为工程流体力学。若研究对象主要是液流且又侧重于应用的,则称为水力学。

目前,水力学在理论分析、实验研究和数值计算技术紧密结合的条件下,正展现出广阔的前景,分支不断涌现。目前,除传统的水力学外,又崛起了一批新的学科分支,如计算水力学、环境水力学、随机水力学、多相流水力学和工业水力学等。本书主要介绍工程流体力学(水力学)的内容。

§ 1-2 流体的基本特征与连续介质

一、流体与固体的区别

物质通常有三种状态——固态、液态和气态,后两种合称为流体。从宏观特征出发,流体与固体的主要区别在变形方面。固体能保持其固定的形状和体积。在外力作用下,固体会发生变形,但只要不超过弹性限度,在去掉外力后,固体可恢复原形。

流体则不然,流体没有固体那种保持自身形状的能力,流体在静止状态下只能承受压力,一般不能承受拉力,同时也不能承受切力。在微小切力作用下,会使原先处于静止的流体发生连续不断的变形,即流动,这种特性就是流体的易流动性。

液体和气体的主要区别在于压缩性(膨胀性)。液体的压缩性极小,所以能保持一定的体积,虽然其形状随容器而变,当容器的体积大于水体的体积时,它不能充满容器,但可以形成自由表面。气体有比固体和液体大得多的压缩性和膨胀性,可充满整个容器,没有一定的形状和体积,不存在自由表面。

二、连续介质的概念

一切物质都是由分子构成的。在标准状况下, 1cm^3 液体中约含有 3.3×10^{22} 个分子, 相邻分子间的距离约为 $3.1 \times 10^{-8}\text{cm}$; 1cm^3 气体约含有 2.7×10^{19} 个分子, 相邻分子间的距离约为 $3.2 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。从微观上而言, 组成物体的分子都是离散的, 其运动状态是随机的, 呈不均匀状态。这给运用微积分方法来分析讨论液体的运动带来了很大的困难, 因为微积分运算的必要条件是连续性。但在一般工程中, 所研究的流体的空间尺寸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, 而是宏观特性, 即我们所研究的是由液体质点组成的液体的宏观运动。液体质点是由大量分子组成的, 在微观上充分大而宏观上是非常小的几何点的液体微团, 它呈现的运动是由组成质点的大量分子运动的平均值, 因而宏观运动是均匀而连续的。这样就可以提出下列假设: 即液体所占据的空间是由液体质点连续地、无空隙地充满的, 组成液体的质点运动的物理量是连续变化的, 这就是连续介质的概念。这样水力学研究的液体运动就是连续介质的连续运动, 可以运用微积分来分析液体运动和建立运动方程, 给水力学研究带来极大的方便。

§ 1-3 液体的主要物理性质

液体是介于固体和气体之间的物质形态, 因此液体既具有固体和气体的某些特征, 也存在与两者不同的特征。液体除具有质量和重度外, 还具有易流动性、黏性、不易被压缩、具有表面张力、在一定条件下发生汽化的性质。

一、密度与重度

1. 密度

液体的密度是单位体积液体具有的质量, 液体的密度常用符号 ρ 表示。对于均质液体, 假设体积为 V , 质量为 m , 则其密度为

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

其国际单位为千克/米³ (kg/m^3)。

对于非均质液体, 各点密度不同。在液体中某点取包含该点的微小体积 ΔV , 该体积内液体的质量为 Δm , 则该点的液体密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} = \rho(x, y, z, t) \quad (1-2)$$

上式表明, 液体的密度是空间坐标 x, y, z 的函数, 而且随时间而变化。

液体的密度与液体的温度和所受的压强有关。在一个标准大气压下, 不同温度下水的密度见表 1-1。但在日常的温度和压强下, 其变化范围不超过 0.5%, 可视为常数。水力学中通常取水的密度为 $\rho = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

不同温度下水的物理性质(在一个标准大气压下)

表 1-1

水温 $T(^{\circ}\text{C})$	密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	重度 $\gamma(\text{N}/\text{m}^3)$	动力黏度 $\mu(10^{-3}\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$	运动黏度 $\nu(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	体积弹性系数 $K(10^9\text{N}/\text{m}^2)$	表面张力 $\sigma(\text{N}/\text{m})$
0	999.9	9.805	1.781	1.785	2.02	0.0756
5	1000.0	9.807	1.518	1.519	2.06	0.0749
10	999.7	9.804	1.307	1.306	2.10	0.0742
15	999.1	9.798	1.139	1.139	2.15	0.0735
20	998.2	9.789	1.002	1.003	2.18	0.0728
25	997.0	9.777	0.890	0.893	2.22	0.0720
30	995.7	9.764	0.798	0.800	2.25	0.0712
40	992.2	9.730	0.653	0.658	2.28	0.0696
50	988.0	9.689	0.547	0.553	2.29	0.0679
60	983.2	9.642	0.466	0.474	2.28	0.0662
70	977.8	9.589	0.404	0.413	2.25	0.0644
80	971.8	9.530	0.354	0.364	2.20	0.0626
90	965.3	9.466	0.315	0.326	2.14	0.0608
100	958.4	9.399	0.282	0.294	2.07	0.0589

2. 重度

地球对物体的万有引力称为重力,常用符号 G 表示。设物体的质量为 m ,重力加速度为 g ,则它所受到的重力为

$$G = mg \quad (1-3)$$

重力的单位为牛顿(N),重力加速度 g 随纬度及海拔高度的变化而变化,但因其变化很小,水力学中常将其取为常数,取 $g = 9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

单位体积液体所具有的重力称为重度,重度用符号 γ 表示。对于某一重力为 G ,体积为 V 的均质液体,其重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-4)$$

根据式(1-3)和式(1-4)可得

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-5)$$

液体的重度随温度和压强而变化,但这种变化很小,工程上通常将其视作常数,一般取水的重度为 $\gamma = 9800\text{N}/\text{m}^3$ 。

不同温度下水的重度和常见的几种液体的重度列于表 1-2。

几种常见液体的重度

表 1-2

液体名称	水	空气	水银	汽油	酒精	四氯化碳	海水
重度(N/m^3)	9800	11.82	133280	6664~7350	7778.3	15600	9996~10084
温度($^{\circ}\text{C}$)	4	20	0	15	15	20	15

二、黏性

液体具有易流动性。流动性是液体受切力作用后发生连续不断变形的性质,这种变形亦称为剪切变形。液体静止时不能承受切力,抵抗剪切变形。当液体流动时,液体流层之间存在着相对运动,这时流层之间会产生成对的切应力,称之为内摩擦力。其作用是抵抗流体内部的相对运动,从而影响液体运动的状态。

液体在运动状态下抵抗剪切变形的性质,称为液体的黏性(又称黏滞性)。黏性是液体的固有属性。由于黏性的存在,液体在运动过程中要克服内摩擦力做功而消耗能量,所以黏性是液体在流动过程中产生能量损失的根源。

相邻液层之间内摩擦力的大小 F 由牛顿内摩擦力定律给出。牛顿在 1686 年提出并经后人验证的牛顿内摩擦力定律内容如下:流体沿某一固体表面做层流运动(图 1-1),则相邻层间内摩擦力 F 的大小与其横向流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 和流层间接触面积 A 成正比,且与流体的性质有关,而与接触面上的压力无关。这个定律可表达如下:即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

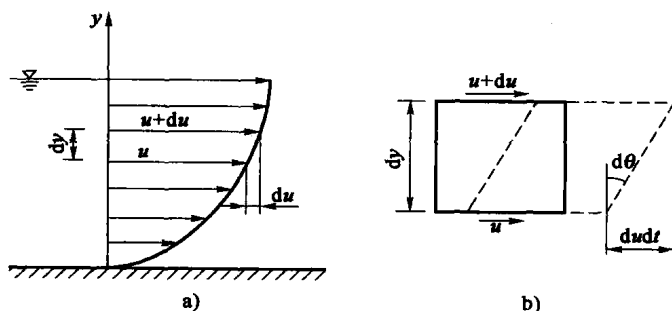


图 1-1 牛顿内摩擦实验

单位面积上的内摩擦力 τ , 即黏滞切应力可表示为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中, μ 为比例系数, 称为动力黏度, 简称黏度(或黏滞系数), 国际单位为牛顿·秒/米² ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$) 或帕·秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

对于液体来说, μ 值随温度的升高而减小; 对于气体, 则相反。这是因为黏性是液体分子间的内聚力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果。温度升高, 分子间的内聚力降低, 而动量交换加剧。对于液体, 因其分子间距较小, 内聚力是决定性因素, 所以液体的黏性随温度的升高而减小; 而对于气体, 由于其分子间距较大, 分子热运动产生的动量交换是决定性因素, 因此气体的黏性随温度的升高而增加。

水力学中的黏滞系数还常用另一种形式来表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-8)$$

式中, ν 称为运动黏滞系数 (m^2/s 或 cm^2/s)。

同种液体, μ 和 ν 随温度及压力而变化, 其中压力的影响甚微, 远小于温度的影响。不同

液体,黏滞系数不同。

水的运动黏滞系数,可按如下经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-9)$$

式中, t 为水温 ($^{\circ}\text{C}$); ν 为运动黏滞系数 (cm^2/s)。

表 1-1 列出了不同温度时,水的 μ 和 ν 值。

牛顿内摩擦定律表达式(1-7)中,流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 既表示流速变化的强弱,还可代表液体微团的剪切变形速率 $\frac{d\theta}{dt}$ 。为便于说明,在图 1-1a) 所示的 dy 流层中取一方形微小水体,如图 1-1b) 中的实线所示。经过 dt 时段后,由于各层流速不等,该微团达到图 1-1b) 中的虚线所示的形状和位置,这时微团的剪切角变形为 $d\theta$, $d\theta = \frac{du dt}{dy}$, 因此单位剪切角变形为 $\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy}$, 则

$$\tau = \mu \frac{d\theta}{dt} \quad (1-10)$$

需要注意,牛顿内摩擦力定律只适用于牛顿流体,如水、空气、各种油类和水银等。牛顿流体是指切应力 τ 与流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 之间存在线性关系,如图 1-2

中的 A 线,在温度不变的情况下,这类流体的黏滞系数 μ 为常数。凡是满足牛顿内摩擦力定律的流体称为牛顿流体,否则为非牛顿流体。非牛顿流体的切应力与流速梯度的一般关系为: $\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^x$ 。线 B、C、D 属于非牛顿流体:线 B 为理想宾汉流体,如血浆、泥浆、牙膏等,当流体中的切应力达到某值(即屈服切应力 τ_0) 时,才开始发生流动,但变形与切应力同样为线性关系;线 C 为伪塑性流体,如尼龙、橡胶、纸浆、水泥浆、油漆等,其黏度随剪切变形率的增加而减小;线 D 为膨胀性流体,如生面团、玉米面糊等,其黏滞系数随剪切变形率的增加而增加。所以在应用牛顿内摩擦力定律时,应注意其适用范围。牛顿内摩擦定律只适用于做层流运动的牛顿流体。

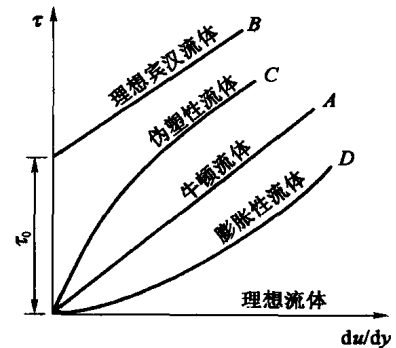


图 1-2 不同流体剪切变形率与剪切应力间的关系

三、压缩性

液体受到外界压力而引起体积减小的特性称为液体的压缩性,除去压力后液体体积能够恢复原状的性质称为液体的弹性。

液体压缩性的大小,可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 表示,即

$$\beta = - \frac{dV/V}{dp} = \frac{1}{K} \quad (1-11)$$

在国际单位制中, β 的单位是 m^2/N , K 的单位是 $\text{Pa} (\text{N}/\text{m}^2)$ 。不同水温下水的体积弹性系数见表 1-1, 可以看出水的压缩性很小, 例如在 10°C 时, 水的体积弹性系数 $K = 2.1 \times 10^9 \text{ N}/\text{m}^2$, 即每增加一个大气压, 水的体积比原体积缩小约二万分之一。因此, 在一般情况下, 可以将水作为不可压缩液体来处理, 即相应的水的密度和重度可视为常数。但对某些特殊情况, 如水击

等,则必须考虑液体的压缩性和弹性。

需要指出,在低温、低压、低速条件下的气体运动,如隧道施工及运营通风、低压气体运输、低温烟道流动等,其气体流速远小于音速,气体压缩性对气流流动的影响也可以忽略。

四、表面张力

液体的表面张力是指液体自由表面上的分子,一侧受液体分子的引力,而另一侧受其他介质(如气体与固体)的引力,由于两侧分子引力不平衡,使自由面上的液体分子受到微小拉力,这种拉力称为液体的表面张力。

液体的表面张力的作用方向与自由液面相切,所以表面张力的大小可用液体表面上单位长度所受的张力系数 σ 来表示,其国际单位为 N/m 。 σ 的数值随液体的种类、温度和表面接触情况而变化。 20°C 水的 σ 值为 0.0728N/m ,水银的 σ 值为 0.54N/m 。不同水温下的表面张力系数值见表1-1。

张力是仅在液体自由表面上存在的局部水力现象,它使液体表面有尽量缩小的趋势。对体积小的液体,表面缩小趋于球体状,如荷叶上的水珠等。在工程水力学中一般不考虑表面张力对液体的影响。但在特殊情况下,如研究水深很小的明渠水流和堰流时,其影响是不可忽略的。在水力学实验中,由于表面张力引起的细玻璃管内的毛细现象使测压管中液面高出或低于管外的液面,对液位和压强量测造成误差。当温度为 20°C 时,水在玻璃细管中的升高值为(图1-3a)

$$h = \frac{29.8}{d} \quad (1-12)$$

水银在玻璃细管中的降低值为(图1-3b)

$$h = \frac{10.5}{d} \quad (1-13)$$

式(1-12)、式(1-13)中的单位以 mm 计。

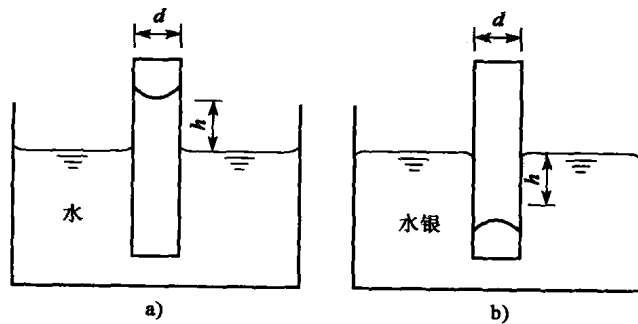


图1-3 液面高度示意图

a) 水; b) 水银

为了减小毛细管作用引起压强量测的误差,在水力实验中,测压管的内径不宜小于 10mm 。

液体的各种物理特性,它们各自不同程度地影响着液体的运动,其中惯性、重力和黏滞性对液体运动有重要的影响,而液体的可压缩性和表面张力等只有在一些特殊问题中才需要考虑。黏滞性对液体的影响十分重要而且极其复杂,它使得研究和分析液体的运动规律变得非

常困难。为了简化问题,便于从理论上研究和分析液体的运动,在水力学中引入了“理想液体”的概念。

“理想液体”是为了简化对液体运动的研究而引进的一种假设,即认为这是一种完全没有黏滞性的液体。这样,先按理想液体分析研究液体的运动,从理论上求得其运动规律,借以揭示实际液体运动的规律和趋势。再根据实际液体的具体情况考虑黏滞性的影响,对理想液体的运动规律进行修正,就可以得到实际液体的运动规律。需要注意的是,理想液体是一种实际上并不存在的假想的液体,引入理想液体的概念仅是水力学研究的一种简化方法。

§ 1-4 作用于液体上的力

液体无论处于平衡或运动状态,都受到多种力的作用。作用在液体上的力,按其物理性质分,有重力、惯性力、黏滞力、压力、表面张力等。按力的作用方式可以分为质量力(重力、惯性力)和表面力(黏滞力、压力、表面张力)两类,这种分类是为了便于进行液体运动受力分析,进而可以导出液体平衡或运动状态下的基本关系式。

一、表面力

表面力是指作用于液体的表面上且与作用面的面积成正比的力。又由于它产生在液体与液体或液体与固体的接触面上,故又称接触力。表面力又可分为垂直于作用面的压力(P)和平行于作用面的切力(T),至于拉力一般可忽略不计。表面力可以是作用于液体边界上的外力,如作用于液体自由表面上的气体压力,风吹水面的切力;也可以是一部分液体质点作用于其相邻的另一部分液体质点上的内力。

作用于单位面积上的压力称为压强,以 p 表示。作用于单位面积上的切力称为切应力,以 τ 表示。

二、质量力

质量力是指作用于液体的每一个质点上且与质量成正比的力。对于均质液体,质量力与体积成正比,故又称为体积力。

单位质量液体上所受到的力称为单位质量力,其单位为 m/s^2 ,与加速度的单位相同。质量为 m 的液体,所受的质量力为 F ,则单位质量力为

$$f = \frac{F}{m} \quad (1-14)$$

若总的质量力 F 在直角坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则单位质量力 f 在相应坐标上的投影分量为 f_x 、 f_y 、 f_z ,可表示为

$$\begin{cases} f_x = \frac{F_x}{m} \\ f_y = \frac{F_y}{m} \\ f_z = \frac{F_z}{m} \end{cases} \quad (1-15)$$

§ 1-5 水力学的研究方法

研究水力学的方法一般有科学实验、理论分析和数值模拟三种。

水力学理论的发展,在相当程度上取决于实验观测的水平。水力学的实验观测方法主要有三个方面:一是原形观测,即对天然或工程中的水体直接进行观测,收集相关资料,为工程设计提供依据;二是系统实验,在实验室内模拟某种边界状况下的液体流动状态,进行系统观测,从中找出水流运动的规律;三是模型试验,在实验场地上,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水流现象来进行研究,以检验工程设计的合理性,并为修改或优化设计提供依据。

水力学是建立在经典力学的理论基础上,根据机械运动的普遍原理,运用数学分析的方法来建立流体运动的系统理论。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实验观测相结合的方法。

随着计算机技术的迅速发展,在工程流体力学的研究中已形成了一门重要的分支——计算水力学。它广泛地采用有限差分法、有限元法以及有限体积法等进行数值计算,来解决工程中的水力学问题。数值计算是一种快速、简便、节省投资的研究方法,但数值计算必须建立在物理概念正确和力学规律明确的基础上,而且一定要受实验和原形观测资料的检验。

水力学是一门实践性很强的学科,它的理论都是生产实践和实验研究的总结。在水力学中,有时先推导理论公式再用经验系数修正;有时应用半经验半理论的公式;有时先定性分析,然后直接采用经验公式进行计算,并在解决实际工程问题过程中经受检验、得到修正和进一步完善。因此我们在学习本课程的过程中,既要重视对本课程理论体系的理解,搞清基本方程和公式的来历、应用条件、使用范围,更要能正确运用所学的理论知识解决实际工程问题,掌握理论分析、实验研究和数学模拟紧密结合的水力学研究方法。

习 题

1-1 20℃的水 2m^3 ,当温度升至 90℃ 时,其体积增加多少?

1-2 若水的体积弹性系数 $K=2.1 \times 10^9 \text{Pa}$,欲使其体积相对压缩 1.0%,需要增加多大的压强?

1-3 两平行平板相距 0.5mm,其间充满流体,下板固定,上板在 2N/m^2 的作用下以 0.25m/s 匀速移动,求该流体的动力黏度 μ 。

1-4 已知某液流的黏性切应力 $\tau=5.0\text{N/m}^2$,动力黏滞系数 $\mu=0.1 \text{Pa} \cdot \text{s}$,试求该液流的剪切变形速率 du/dy 。

1-5 有一面积为 1.6m^2 的薄板在水面上以 $u=1.5\text{m/s}$ 的速度运动,下板固定不动。已知水层厚 $\delta=5\text{cm}$,水温为 10℃,水流流速沿液层按线性分布,如图所示。

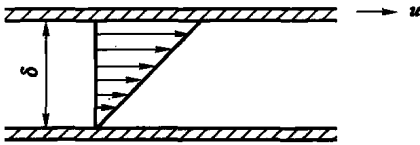
(1) 求薄板的拖拽力 F ;

(2) 绘制切应力 τ 沿液层的分布图。

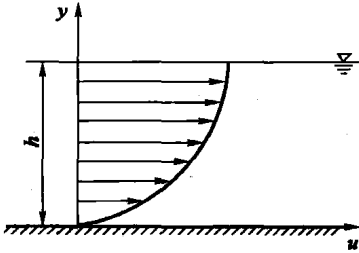
1-6 有一矩形渠道,其流速分布为 $u = 0.002 \frac{\rho g}{\mu} \left(hy - \frac{y^2}{2} \right)$, 式中 ρ 为水的密度; g 为重力加速度; μ 为水的动力黏滞系数;水深 $h = 0.5\text{m}$ 。求:

(1) 切应力 τ 的表达式;

(2) 水面 ($y = 0.5\text{m}$) 及渠底 ($y = 0$) 处的切应力 τ , 并绘制沿垂线的切应力分布图。



题 1-5 图



题 1-6 图

1-7 水箱中盛有静止液体,试问此时液体所受的单位质量力为多少?