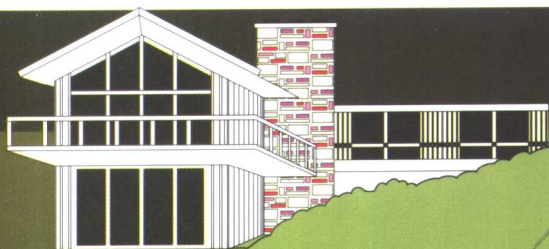




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水 Shuili xue 力学

● 主编 孙东坡



郑州大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

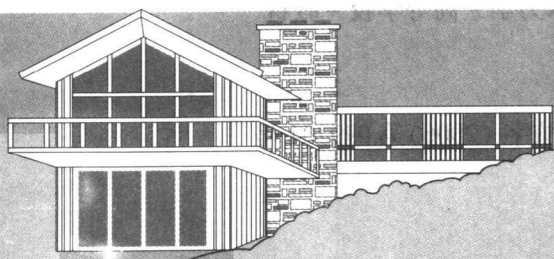
TV13

15

2007

水力学 Shuili xue

●主编 孙东坡



郑州大学出版社

郑州市大学路40号

出版人：张世平

全国新华书店经销

郑州市印刷厂印刷

开本：787mm×1092mm

印张：14

字数：343千字

版次：2007年1月第1版

定价：33.00元

书号：ISBN 7-316-03542-9

郑州市大学路40号 郑州大学出版社



郑州大学出版社

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,系统地阐述了水力学的基本概念、基本理论和工程应用,全书共分为9章,主要内容包括绪论、水静力学、水动力学基本原理、水流型态与水头损失、有压管道水流运动、明渠恒定流动、过流建筑物的水力计算、渗流、相似理论及其应用。本书各章后均编有小结、思考题及习题,以便于读者加深对基础理论的理解。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/孙东坡主编. —郑州:郑州大学出版社,2007.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-81106-354-9

I. 水… II. 孙… III. 水力学-高等学校-教材

IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 099204 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:邓世平

全国新华书店经销

郑州文华印务有限公司印制

开本:787 mm × 1 092 mm

印张:14

字数:343 千字

版次:2007 年 1 月第 1 版

邮政编码:450052

发行电话:0371-66966070

1/16

印数:1~3 100

印次:2007 年 1 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-81106-354-9/T·39

定价:22.00 元

本书如有印装质量问题,请向本社调换

序

Preface

近年来,我国高等教育事业快速发展,取得了举世瞩目的成就。随着高等教育的不断深入,高等教育工作重心正在由规模发展向提高质量转移,教育部实施了高等学校教学质量与教学改革工程,进一步确立了人才培养是高等学校的根本任务,质量是高等学校的生命线,教学工作是高等学校各项工作的中心的指导思想,把深化教育教学改革,全面提高高等教育教学质量放在了更加突出的位置。

教材是体现教学内容和教学要求的知识载体,是进行教学的基本工具,是提高教学质量的重要保证。教材建设是教学质量与教学改革工程的重要组成部分。为加强教材建设,教育部提倡和鼓励学术水平高、教学经验丰富的教师,根据教学需要编写适应不同层次、不同类型院校,具有不同风格和特点的高质量教材。郑州大学出版社按照这样的要求和精神,组织土建学科专家,在全国范围内,对土木工程、建筑工程技术等专业的培养目标、规格标准、培养模式、课程体系、教学内容、教学大纲等,进行了广泛而深入的调研,在此基础上,分专业召开了教育教研活动、教材编写论证会、教学大纲审定会和主编人会议,确定了教材编写的指导思想、原则和要求。按照以培养目标和就业为导向,以素质教育和能力培养为根本的编写指导思想,科学性、先进性、系统性和适用性的编写原则,组织包括郑州大学在内的五十余所学校的学术水平高、教学经验丰富的一线教师,吸收了近年来土建教育教学经验和成果,编写了本、专科系列教材。

教育教学改革是一个不断深化的过程,教材建设是一个不断推陈出新、反复锤炼的过程,希望这些教材的出版对土建教育教学改革和提高教育教学质量起到积极的推动作用,也希望使用教材的师生多提意见和建议,以便及时修订、不断完善。

王 芳 之

2006 年 7 月

前言

Preface

.....

水力学是土建类各专业的一门重要技术基础课,也是土木、水利、地质工程专业技术人员必修的基础理论课。虽然各专业对它的要求和侧面不尽相同,但基本内容是相同的。本书根据国家教育部高等学校工科力学课程指导委员会审定的水力学教学基本要求,以及全国注册结构工程师流体力学考试大纲,按照土建类土木工程、地质工程、工程管理等专业(48学时)的水力学课程教学基本要求编写。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,既强调基本理论,体系完整,内容新颖,又注重照顾到相近各专业的教学基本要求,适用面较宽,联系实际且深浅适度,便于教学应用。

本书系统地阐述了水力学的基本概念、基本理论和工程应用,全书共分为9章,主要内容包括绪论、水静力学、水动力学基本原理、水流形态与水头损失、有压管道水流运动、明渠恒定流动、过流建筑物的水力计算、渗流、相似理论及其应用。本书各章后均编有小结、思考题及习题,以便于读者加深对基础理论的理解。

本书由华北水利水电学院孙东坡教授担任主编。孙东坡编写第1,4章,王二平编写第2,8,9章,李国庆编写第3章,严军编写第5章及第3章第6节,杨玲霞、范如琴编写第6,7章,王俊编写第4章第7,8,9节和第8章第5节。

本书由吴桢祥教授主审,他提出了不少宝贵意见与修改建议,在此表示衷心的感谢。同时,感谢关心及协助本书编写的河南工业大学刘起霞老师和华北水利水电学院水力学教研室各位老师及同志们。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评和指正。

编者

2006年5月

目录 CONTENTS

▶▶▶ 1

第1章 绪论	1
1.1 学科简介	1
1.2 液体的基本特征与主要物理力学性质	2
1.3 作用在液体上的力	7
1.4 量纲与量纲分析	8
第2章 水静力学	12
2.1 静水压强及其特性	12
2.2 液体平衡微分方程和静压基本方程	13
2.3 静水压强的量测与计算	18
第3章 水动力学基本原理	33
3.1 描述液体运动的两种方法	33
3.2 液体运动的基本概念和分类	35
3.3 恒定总流的连续性方程	42
3.4 恒定总流的能量方程及其应用	44
3.5 恒定总流动量方程	56
3.6 流场理论基础	64
第4章 水流型态与水头损失	79
4.1 概述	79
4.2 水流阻力与水头损失	79
4.3 均匀流沿程水头损失的基本方程	81
4.4 水流的流动型态	85
4.5 层流运动及其沿程水头损失计算	89
4.6 紊流的运动特性	91
4.7 紊流沿程水头损失的计算	97
4.8 局部水头损失	104
4.9 边界层与绕流阻力	107
第5章 有压管道水流运动	118
5.1 概述	118
5.2 简单短管的水力计算	118
5.3 长管的水力计算	125

5.4	复杂管路的水力计算	125
5.5	水击现象	129
第6章	明渠恒定流动	136
6.1	概述	136
6.2	明渠水流的流态及其判别	138
6.3	明渠均匀流的特性及计算公式	139
6.4	明渠水流的断面比能、临界水深和临界底坡	144
6.5	明渠水流的两种急变流现象——水跃和水跌	148
6.6	明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程	151
6.7	棱柱体明渠恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	152
6.8	弯道水流简介	157
第7章	过流建筑物的水力计算	161
7.1	概述	161
7.2	堰流的水力计算	162
7.3	闸孔出流的水力计算	169
7.4	桥孔过流的水力计算	172
7.5	无压涵洞的水力计算	176
7.6	泄水建筑物下游的消能与衔接	178
第8章	渗流	184
8.1	概述	184
8.2	土体水力特性与渗流模型	184
8.3	渗流的基本定律	186
8.4	地下河槽恒定渗流	188
8.5	集水廊道与井	193
第9章	相似理论及其应用	205
9.1	相似理论	205
9.2	相似理论的应用——水力模型	210
	参考文献	214



第1章 绪论

1.1 学科简介

1.1.1 水力学的内容和研究对象

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休戚相关,所以水总是人类密切关注的对象。水力学是专门研究液体平衡与机械运动的规律及其工程应用的一门科学,研究对象就是以水为代表的液体。它既有基础科学的特点,是力学的一个分支;又有工程科学的特点,紧密结合实际工程应用。

水力学借助于力学普遍规律与数学工具,结合水流运动的特点和实际工程的边界条件,形成了自己学科的基础理论:水静力学和水动力学。水静力学研究液体在力学平衡(主要是静止)状态下,作用在液体上各种力的相互关系(平衡规律);水动力学则是研究液体作机械运动时,各种作用力与运动要素之间的关系(运动规律)及运动引起的能量损失问题,同时也形成了水力学的工程应用部分:管流,明渠流,堰闸过流及地下水渗流等。

1.1.2 水力学的工程应用

水力学在土木、水电、交通、给排水、环境等工程中都有着广泛的应用。为了城市开发,修建房屋、道路、桥梁;为了防洪、利用水资源,修建各种构筑物(如管路、渠道、闸、坝、渡槽、涵洞等)或各种河道整治工程。这些构筑物的修建改变了原有的边界条件,都会因此发生一些水流现象,产生水流与建筑物之间相互作用的大量问题。在工程中经常遇到的水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,为建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,



如泄洪闸、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中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

解决土木水利工程基础和围堰的渗流问题,隧道、路基排水问题,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。

1.1.3 水力学研究方法

(1) 理论分析

水力学是建立在经典力学的理论基础上,依据力学基本原理解释各种水流现象的成因和机理。采用力学分析方法,研究作用在液体上的力及其运动特点,建立反映液体运动规律的基本方程。水力学中还有一些理论分析无法解决的问题,需要借助科学试验、数值模拟、量纲分析等方法。

(2) 科学试验

通过科学试验寻找水流运动规律,用来解决实际工程问题。

1) 原型观测试验 在野外或工程现场,观测水流运动现象,总结水流运动的规律,检验理论分析成果。

2) 物理模型试验 依据相似理论,在实验室模型中预演有关水流运动,再把模型试验成果换算为相应的原型数据,作为工程设计的依据。科学试验是对理论分析的补充,同时也推动水力学理论的发展,许多试验成果的科学总结也可以上升为理论分析成果。

(3) 数值模拟

在理论上难以求解的液体运动微分方程,可以通过方程离散化,利用计算机高速计算的优势,进行数值模拟计算,解决工程水力学问题,也称为以计算机为试验平台的数值模拟试验。

(4) 量纲分析

通过观察研究,当水流运动的主要影响因素已知时,可以依据量纲和谐原理和影响物理过程的各种因素,构建物理方程无量纲的基本形式,寻求水流运动规律。这是在科学试验研究中经常使用的一种数学与物理相结合的辅助分析方法。

这几种研究方法必须互相结合,互为补充,相辅相成,才能有效地解决实际工程问题。

1.2 液体的基本特征与主要物理力学性质

1.2.1 液体的基本特征

自然界的物质一般有三种存在形式,即固体、气体和液体。固体的内聚力很大,它有



固定的形状和体积,能承受拉、压和剪切作用。气体的内聚力很小,极易膨胀和压缩,没有固定的形状和体积,总是要充满它所占据的空间。液体居固体和气体之间,内聚力比固体小而比气体大,所以液体虽没有固定的形状,可以保持一定的体积,能承受压力,但不能承受拉力。

液体和气体也统称为流体,其共同特征是具有易流动性,即在微小剪切力作用下都会发生连续变形或称流动。是否具有流动性是流体和固体的主要区别,压缩性的大小则是气体和液体的主要区别。

1.2.2 连续介质假定

组成液体的分子之间是存在空隙的,因此从微观结构看,液体不是连续致密的,其物理量在空间的分布也是不连续的。但我们关心的是水流的机械运动,是液体分子“集体”宏观运动的平均特性,具有连续运动的表现特点;并不需要涉及液体内部的微观运动与化学变化。在研究液体运动物理量变化规律时,应用函数进行微积分运算必须要求满足连续条件。因此,我们需要并且可以把液体看作是由质点组成的毫无间隙地完全充满所占据空间的连续体。这里的“质点”是指能反映液体机械运动的“最小”物质单位,它是微观上充分大而宏观上足够小的液体分子团,在空间上可以当作几何点处理。根据这样的连续介质的概念,液体各物理量(如质量、速度、压强等)都可以看成是空间和时间的连续函数。水力学研究的流动就是连续介质液体的连续运动。

综上所述,液体的基本物理特征是:易流动、不易被压缩的连续介质。

1.2.3 液体的主要物理力学性质

外因是变化的条件,内因是变化的依据。液体受力作机械运动时,一方面与外部因素有关,更重要的是取决于本身的物理力学性质。因此,在研究液体运动规律之前,首先讨论液体的主要物理性质。

(1) 惯性、质量与密度

物体保持原有运动状态的特性称为惯性。惯性的大小用质量来量度,质量越大,物体的惯性也越大。当液体受外力作用使其运动状态发生改变时,由于液体惯性引起对外界的反作用力称为惯性力。设液体的质量为 M ,加速度为 a ,则惯性力表示为

$$F = -Ma \quad (1.1)$$

式中负号表示惯性力的方向与物体运动加速度的方向相反。

液体单位体积内所具有的质量称为密度,常用符号 ρ 表示。对于均质液体,其质量可用密度来表征。如质量为 M 的均质液体,体积为 V ,则其密度为

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1.2)$$

在国际单位制(SI)中,密度的单位是 kg/m^3 。液体的密度受温度和压强变化的影响,不同温度下水的密度见表 1.1。一般情况下液体的密度变化很小,故可近似视为常数。例如在工程上,水的密度通常以一个标准大气压下、温度为 4°C 时的密度值作为计算值,其数值为 $1\,000\,\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 重力特性

物体之间相互具有的吸引力称为万有引力。在液体运动中,一般只需要考虑地球对液体的引力,即重力。重力常用符号 G 表示。设液体的质量为 M ,重力加速度为 g ,则

$$G = Mg \quad (1.3a)$$

重力的单位为牛(N)。重力加速度 g 大小与当地的纬度及高程有关,但在工程上一般可视为常数,取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。与密度类似,工程上也有将单位体积液体的重力称为重度 γ 。对于均质液体:

$$\gamma = G/V = \rho g \quad (1.3b)$$

(3) 黏滞性

实际观测表明,液体处于流动状态时,质点之间或相邻流层之间都存在相对运动,从而使质点之间或流层之间产生一种内摩擦力来抵抗相对运动引起的剪切变形,这种特性称为液体的黏滞性(viscosity),相应的内摩擦力称为黏滞力。黏滞性是液体的运动特性。由于存在黏滞性,液体在运动过程中就要克服黏滞阻力做功,因此黏滞性是液体在流动中产生能量损失的根源。

为了研究黏滞力的规律,这里观察沿平直固体壁面作平行直线的流动,如图 1.1 所示。当流层间只有黏滞力作用时,液体质点一方面有规则的成层向前流动,互相不混掺。另一方面各流层质点受相邻流层的黏滞性作用,形成流速沿垂线连续不均匀的分布特点。紧靠固体边壁的液体质点在附着力作用下贴附壁面,流速为零。边壁以上各流层质点速度不同程度地受到不动质点的阻滞影响,靠近边壁处影响作用大,流速较小;远离边壁处影响作用小,流速较大。设距边壁 y 处的流速为 u ,相邻流层 $y + dy$ 处的流速为 $u + du$ 。由于相邻液层存在相对运动,流速小的下层便对上层产生与流向相反的摩擦力,力图使其减速;而流速大的上层则对下层产生与流向相同的摩擦力,使其加速。这两个摩擦力大小相等、方向相反,作用在不同流层上,都具有抵抗邻层间相对运动的性质。

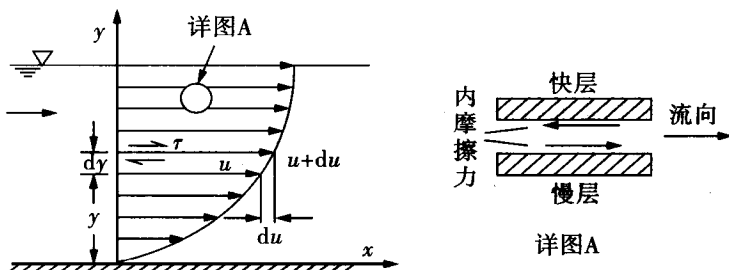


图 1.1

实验证明,相邻液层单位接触面积上的内摩擦力(切应力 τ)的大小与两液层间的流速差 du 成正比,与两液层间的距离 dy 成反比,同时与液体的性质有关,可表示为:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.4)$$

式中: μ 为反映液体黏滞特性的比例系数,称为动力黏滞系数,其单位为:牛·秒/米² ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)或帕秒($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。 du/dy 称为两液层间的流速梯度(velocity gradient)。



式(1.4)就是著名的牛顿内摩擦定律,它可表述为:相邻液层间单位面积上所作用的黏滞切应力(或黏滞内摩擦力),与流速梯度成正比,同时与液体的黏滞特性有关。

动力黏滞系数 μ 是黏性的度量。 μ 值愈大,黏性作用愈强。 μ 的大小与液体的种类有关,并随压强和温度的升高而变化。对于常见的液体如水、油等, μ 随压强的变化很小,一般可以忽略压强的影响。温度是影响 μ 值的主要因素,温度升高会引起液体 μ 值降低。

液体的黏性还可以用动力黏滞系数 μ 与液体密度 ρ 的比值 ν 来描述,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.5)$$

ν 称为运动黏滞系数,它的单位是:米²/秒(m²/s)或厘米²/秒(cm²/s)。在不同温度下水的黏性度量 ν 和 μ 值见表1.1。

表 1.1 不同温度下水的物理性质 (1 个标准大气压)

温度 ℃	密度 ρ (kg/m ³)	动力黏滞系数 μ (10 ⁻³ N·s/m ²)	运动黏滞系数 ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	体积弹性系数 K (10 ⁹ Pa)	表面张力系数 σ (N/m)
0	999.8	1.781	1.785	2.02	0.075 6
5	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.074 9
10	999.7	1.307	1.306	2.10	0.074 2
15	999.1	1.139	1.139	2.15	0.073 5
20	998.2	1.002	1.003	2.18	0.072 8
25	997.0	0.890	0.893	2.22	0.072 0
30	995.7	0.798	0.800	2.25	0.071 2
40	992.2	0.653	0.658	2.28	0.069 6
50	988.0	0.547	0.553	2.29	0.067 9
60	983.2	0.466	0.474	2.28	0.066 2
70	977.8	0.404	0.413	2.25	0.064 4
80	971.8	0.354	0.364	2.20	0.062 6
90	965.3	0.315	0.326	2.14	0.060 8
100	958.4	0.282	0.294	2.07	0.058 9

应当指出,牛顿内摩擦定律只适用于流层间只有黏滞力作用的流动,仅限于切应力 τ 与流速梯度 du/dy 之间呈线性关系的液体。如图1.2中所示,满足A线所示线性关系的液体称为“牛顿体”,如清水、某些油类、酒精等;还有一些液体如泥浆、油漆等,不满足牛顿内摩擦定律,这些液体统称为非牛顿体,如图1.2中B、C、D线所示。

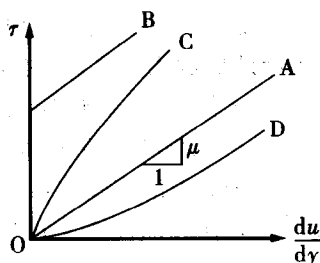


图 1.2

例 1.1 一面积为 0.8 m^2 平板在油面上做水平运动 (图 1.3), 已知平板的速度 $u = 40 \text{ cm/s}$, 油层厚度 $\delta = 2.5 \text{ mm}$, 假设油层内的流速按直线分布, 油的动力黏滞系数 μ 为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 求拖动平板所需的力 F 。

解 因为油层内的流速按直线分布, 则流速梯度为常数

$$\frac{du}{dy} = \frac{40}{0.25} = 160$$

根据牛顿内摩擦定律表达式, 平板所受的阻力 T 为:

$$T = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} = 0.1 \times 0.8 \times 160 = 12.8 \text{ N}$$

这就是拖动平板所需的力 F 。

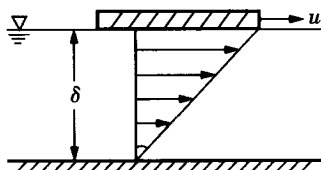


图 1.3

(4) 压缩性 (compressibility)

液体受压后体积将缩小, 压力撤除后能恢复原状, 这种性质称为液体的压缩性或弹性。液体压缩性的大小用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 表示。体积压缩系数 β 就是液体体积相对缩小值与压强增值之比。若某一液体承受压强 p 时体积为 V , 当压强增加 dp , 体积变化量 dV , 则液体的体积压缩系数 β 可以表示为:

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1.6)$$

由于 dp 和 dV 符号始终相反, 故上式右端加一负号, 以保持 β 为正值。 β 的单位为 m^2/N 。 β 值越大, 表明液体越易压缩。由于液体在压缩前后, 质量 M 保持不变, 即 $M = \rho V = \text{常数}$ 。故体积压缩系数 β 也可写成

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.7)$$



把体积压缩系数 β 的倒数定义为体积弹性系数 K , 即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1.8)$$

其单位同压强, 即 Pa。不同种类的液体具有不同的 β 和 K 值, 同一种液体的 β 和 K 值也随温度和压强的变化而变化, 但这种变化甚微, 一般可视为常数。水的 $K = 2.1 \times 10^9$ Pa, 即每增加一个大气压, 水的体积相对减少约为两万分之一, 故在一般的水力计算中, 认为水是不可压缩的。但在讨论有压管道中的水击问题时, 由于压强变化大且迅速, 就要考虑水的压缩性, 见表 1.1。

(5) 表面张力特性

由于液体自由表面两侧分子引力的不平衡, 自由表面上液体质点受到拉力作用有使液体表面缩小、张紧的趋势, 这种力称为液体的表面张力 T_s (surface tension)。表面张力的大小用表面张力系数 σ 来度量, 它表示自由液面上单位长度受到的张力, 单位为 N/m。表面张力系数与液体的种类、温度和表面接触情况有关, 表 1.1 给出了不同温度时水的表面张力系数值。

表面张力仅存在于自由表面, 而且沿液体表面的切线方向, 它将影响液体表面的形状。一般情况下表面张力很小, 对液体宏观运动的影响可以忽略不计。只有在某些特殊情况下, 如研究微小水滴的形成与运动 (水珠成为球体状就是表面张力作用的结果)、水舌较薄且曲率较大的堰流、细管中的水或土壤孔隙中水的运动等, 都必须考虑表面张力的影响。

在小直径细管中, 水的表面张力引起的毛细管现象如图 1.4 所示。当液体内的内聚力小于它与管壁的附着力, 表面张力使液体上升一段高度 h , 水面形成凹曲, 曲面夹角为 θ 。在水位和压强量测时, 毛细现象会引起量测的误差。因此用玻璃测压管进行水位和压强量测时, 其内径不宜小于 10 mm。

液体上述 5 个物理性质都不同程度地影响液体的运动, 其中惯性、重力特性、黏滞性对液体运动起主要作用, 压缩性、表面张力特性只在某些特殊情况下对水流的运动产生影响。

(6) 理想液体的概念

实际液体都有黏滞性, 黏滞性对液体运动的影响不容忽视。由于黏滞性的存在, 给液体运动分析带来很大困难。为了简化对问题的讨论, 引入“理想液体”的概念。**理想液体是指没有黏滞性的液体简化模型**, 即设 $\mu = 0$ 的液体。水力学的研究方法是首先对理想液体的运动进行理论分析, 然后再结合实验研究, 检验并修正由于没有考虑黏滞性所引起的理论分析结果的误差, 得到实际液体运动规律。

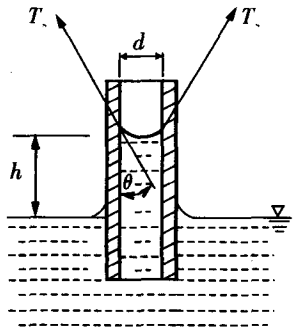


图 1.4

1.3 作用在液体上的力

作用于液体上的力, 按物理性质不同可以分为重力、惯性力、压力、黏滞力、表面张力



等;如果按其作用特点,这些力又可分为表面力和质量力两大类。

1.3.1 表面力

表面力作用在液体表面,并与其作用的表面积成比例。例如固体边界与液体之间的摩擦阻力,液体作用在相邻液体(或固体)接触面上的水压力等。表面力又分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力。表面力的大小常用单位面积上所受到的力(即应力)来度量。与作用面正交的应力称为压应力或压强,与作用面平行的应力称为切应力。

1.3.2 质量力

质量力作用在液体的每个质点上,并与液体的质量成比例。如重力、惯性力都是质量力。在均质液体中,质量与体积成正比,故质量力又称为体积力。若质量为 M 的均质液体,受到总的质量力为 F ,则

$$f = \frac{F}{M} \quad (1.9)$$

f 称为单位质量力,其单位是 m/s^2 。设总质量力 F 在直角坐标上的投影分别为 F_x, F_y, F_z ,则单位质量力 f 在相应坐标上的投影分量 f_x, f_y, f_z 可表示为

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{F_x}{M} \\ f_y &= \frac{F_y}{M} \\ f_z &= \frac{F_z}{M} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

水力学常从单位质量力入手,进行液体的受力分析。

1.4 量纲与量纲分析

水力学中经常需要以量纲为工具分析一些水力要素的基本特征以及它们之间的相互关系。

1.4.1 量纲、基本量纲和导出量纲

量纲是指物理量的种类,也称因次,它是物理量“性质”的具有普遍意义的表征指标。不同种类的物理量有不同的量纲,如流速的量纲以 $[v]$ 表示,力的量纲以 $[F]$ 表示。要注意单位与量纲是有区别但又有联系的概念,它是物理量“数量”的人为度量指标。

量纲分为基本量纲和导出量纲。基本量纲是独立的量纲,它们之间不能互相导出。在力学领域中用基本几何量“长度”、基本运动量“时间”和基本动力量“质量”组成基本量纲,表示为 $[L], [T], [M]$ 。其他物理量的量纲可以用这 3 个基本量纲组合导出,称为导出量纲。如流速量纲: $[v] = [LT^{-1}]$,是用长度和时间两个基本量纲组合而成;又如密度量纲: $[\rho] = [ML^{-3}]$ 。



1.4.2 量纲公式与无量纲数

任何物理量的量纲总可以根据其物理意义表示成基本量纲的指数乘积形式,这就是量纲公式。如物理量 E 的量纲可表示为

$$[E] = [L^\alpha T^\beta M^\gamma] \quad (1.11)$$

式中: α, β, γ 为量纲指数, 当 $\gamma \neq 0$, 表示该物理量与质量或力有关, 是动力量; 当 $\gamma = 0, \beta \neq 0$, 表示该物理量与时间有关, 为运动量; 当 $\gamma = \beta = 0, \alpha \neq 0$, 该物理量只与长度有关, 是几何量。例如, 力的量纲可表示为: $[F] = [Ma] = [MLT^{-2}]$

$$\text{动力黏滞系数的量纲可表示为: } [\mu] = \left[\frac{\tau}{du/dy} \right] = [ML^{-1}T^{-1}]$$

$$\text{运动黏滞系数的量纲可表示为: } [\nu] = [\mu/\rho] = [L^2T^{-1}]$$

由同类物理量或不同物理量的组合而成, 量纲指数全部等于 0 的物理量称为无量纲数。它没有量纲, 其值不随单位的选取变化, 便于反映各种物理量之间的内在规律。因此一些无量纲数就作为判别准则, 经常用于对流动形态的判别以及在相似理论中作为保持原型与模型相似的控制条件。例如, 由管径 d , 流速 v 和运动黏滞系数 ν 组成的 $\frac{vd}{\nu}$ 就是一个无量纲数, $[vd/\nu] = [LT^{-1}L/(L^2T^{-1})] = 0$, 它又称为雷诺数 Re 。

1.4.3 量纲和谐原理

任何一个物理过程中物理量之间存在的规律性, 必然反映在该过程各物理量量纲之间也遵循一定的规律, 即量纲和谐原理, 它可以表述为:

(1) 凡是正确反映物理过程的物理方程, 其各项的量纲应当相同, 即具有量纲齐次性; 反之, 则所建物理方程可能存在问题。因此可以从量纲和谐这个侧面来检验物理方程的正确性。如上抛物体运动方程: $S = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2$ 中各项均为长度量, 符合量纲的齐次性。

(2) 物理方程都可以改写为由无量纲项组成的方程, 而不会改变物理过程的规律性。如上抛物体运动方程各项都用最大升高量 (H) 去除, 得到无量纲的运动方程: $S/H = v_0 t/H - \frac{1}{2}gt^2/H$, 它不改变原方程的本质, 却使其具有普遍意义。

(3) 物理方程中各物理量及其量纲之间的规律性, 不会因选择的基本量纲不同而发生改变。

1.4.4 量纲分析法

量纲分析是利用量纲之间的规律性去推求物理量之间规律的方法。它的基础就是量纲和谐原理, 其前提是必须基本了解影响一个物理过程的主要物理量。常用的量纲分析方法有雷利法与 π 定理法, 雷利法适用于物理量较少并且物理过程可表示成各物理量幂函数乘积的基本函数形式。将各物理量的量纲代入基本函数式, 通过量纲分析确定各项幂指数, 从而建立物理量之间的方程。这里仅举例说明如何用雷利法进行量纲分析。



例 1.2 通过观测研究表明,影响流体边界黏滞力 T 的主要因素有流体密度 ρ 、平均速度 v 和流层接触面积 A ,另外流体黏滞性 μ 和固体边界的粗糙度 Δ 也对黏滞力的大小有一定影响。试分析流体边界黏滞力 T 的表达式。

解 首先可将边界黏滞力 T 表示为一般函数形式: $T = f(\rho, v, A, \mu, \Delta)$ 。

由试验发现,流体黏滞性 μ 和边界粗糙度 Δ 对黏滞力 T 的作用主要是通过对流体流动形态的综合影响来实现的,可以用一个无量纲综合系数 k 来表示。这里把函数表示为各自变量单项指数乘积形式:

$$T = k\rho^\alpha v^\beta A^\gamma \quad (1.12)$$

式中: k 是与 μ 和 Δ 有关的无量纲系数, α, β, γ 分别为待定的量纲指数。

选择 L, T, M 作为基本量纲,将(1.12)表示成量纲公式的形式,即:

$$[X] = [[M]^1 L]^1 [T]^{-2} = [ML^{-3}]^\alpha [LT^{-1}]^\beta [L^2]^\gamma$$

根据量纲和谐原理,等号两侧对应量纲的指数应该相等,于是得:

$$M: 1 = \alpha; \quad L: 1 = -3\alpha + \beta + 2\gamma; \quad T: -2 = -\beta;$$

解之得: $\alpha = 1, \beta = 2; \gamma = 1$

将指数 α, β, γ 值代入(1.12)式可得: $T = k\rho v^2 A$

在应用中一般取 $k = \lambda/8$, λ 又称沿程阻力系数,它包含了流体的黏滞性 μ 和固体边界粗糙度 Δ 的影响,是一个与流动形态有关的综合系数。于是流体的边界黏滞切应力便可表示为:

$$\tau_0 = \frac{T}{A} = \frac{\lambda}{8} \rho v^2 \quad (1.13)$$

必须指出,在实际工程中采用一些依靠试验观测资料建立起来的经验公式,其量纲有的是不和谐的,因而这些公式的使用是有一定局限性的。



本章小结

1. 水力学研究液体的宏观机械运动规律及其在工程中的应用。
2. 液体基本特征是:易流动、不易被压缩、各向同性的连续介质。
3. 惯性、重力特性、黏滞性、压缩性、表面张力特性是液体的主要物理性质。
4. 黏滞性是本章的重点,掌握牛顿内摩擦定律的物理意义和表达式及黏滞系数的确定,掌握牛顿内摩擦定律只适用于流层间黏滞力起主导作用的流动,限于牛顿流体。
5. 理想液体是指没有黏滞性的液体,是对实际液体的简化。
6. 作用在液体上的力分为质量力和表面力,质量力是与液体质量成正比的力;表面力作用在液体表面上,并且与表面积大小成比例。
7. 量纲是物理量种类(性质)的度量,是单位的概括和抽象,掌握无量纲数的含义。