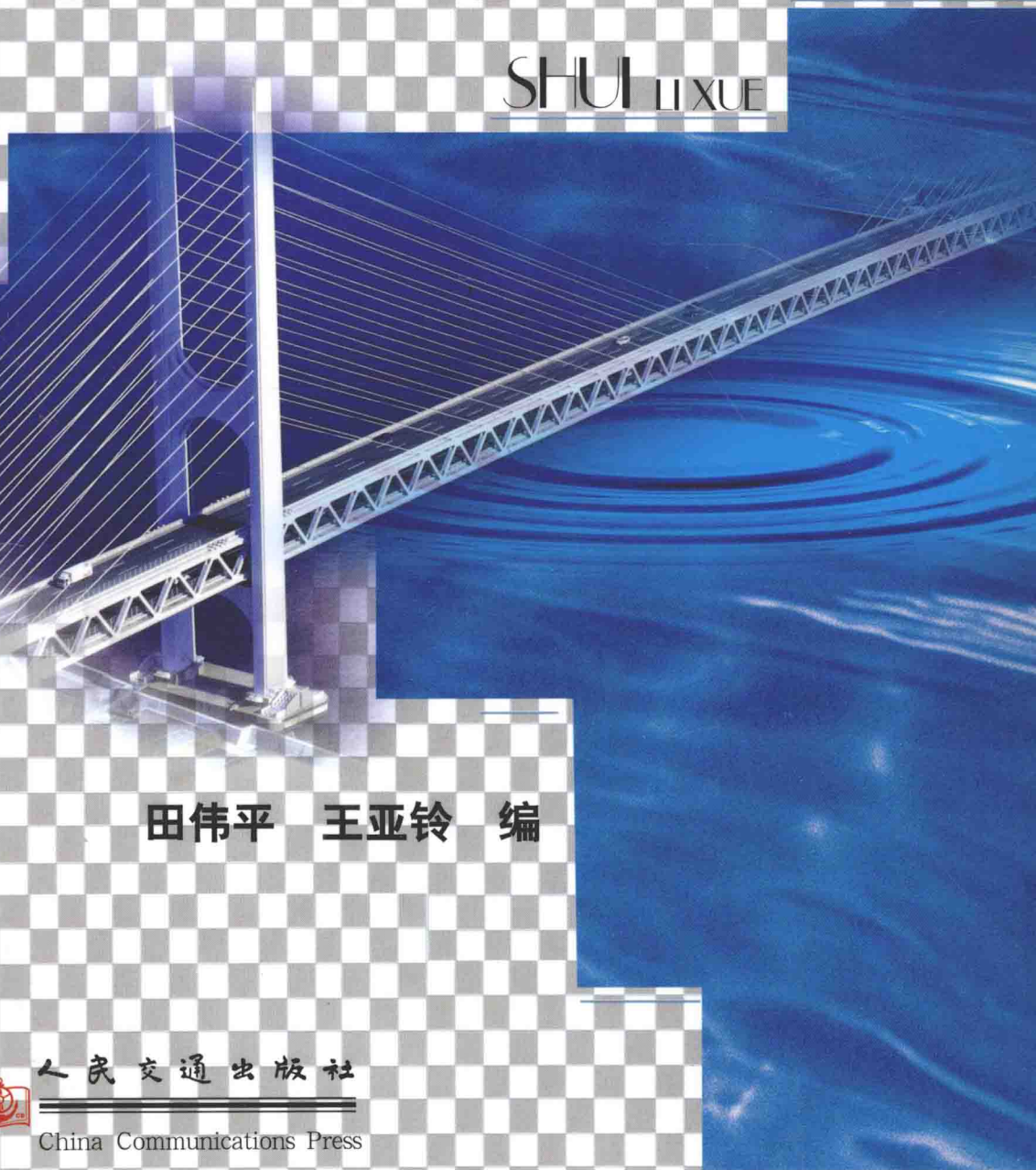


水力学

SHUI LI XUE



田伟平 王亚铃 编



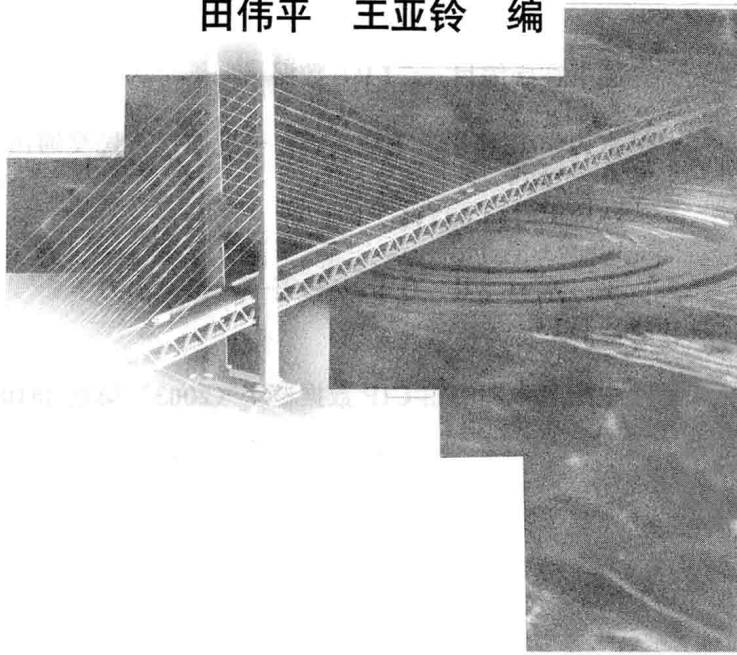
人民交通出版社

China Communications Press

水力学

SHUI LI XUE _____

田伟平 王亚铃 编



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书根据高等学校公路与城市道路、桥梁工程专业水力学课程的基本要求,结合函授教学的特点和规律,考虑少学时教学要求而编写。

全书共分九章,内容包括:绪论、水静力学、水动力学基本定律、水流阻力、孔口和管嘴出流、长管水力计算、明渠均匀流、明渠非均匀流、堰流。

本书可作为高等学校公路与城市道路、桥梁工程专业的少学时水力学教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/田伟平,王亚铃编. —北京:人民交通出版社, 2003. 9

ISBN 7-114-04734-7

I. 水… II. ①田…②王… III. 水力学
IV. TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 053810 号

水 力 学

田伟平 王亚铃 编

正文设计:彭小秋 责任校对:戴瑞萍 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京牛山世兴印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:11 字数:267 千

2003 年 7 月 第 1 版

2003 年 7 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—5000 册 定价:22.00 元

ISBN 7-114-04734-7

前 言

《水力学》是道路与铁道工程、桥梁工程专业的一门重要技术基础课。它的主要任务是使学生掌握必要的水力学基本概念、基本理论、基本计算方法和基本实验技能,并为以后学习专业课程和从事科学研究工作打下一定的基础。

随着高等学校教学改革和课程建设的不断进行,水力学课程的授课学时比以前有了较大幅度的减少。为了使學生能够在比较少的学时内,通过自学和集中授课的方式,掌握本课程的基本知识,特编写了这本适合于少学时教学的《水力学》函授教材。

本教材力图以较短的篇幅,本着与道路与铁道工程、桥梁工程专业密切结合的宗旨来阐述水力学的基本概念、基本原理和基本方法,将内容控制在 120 学时以内(其中自学 80 学时,集中授课 28 学时,实验 6 学时,复习考试 6 学时),并且做到结构合理、重点突出。

全书共分九章,前四章为理论基础部分,其它章节为不同水力现象的具体分析。为了培养分析问题和水力计算的能力,以及便于函授学生自学,各章均安排有一定数量的例题、思考题和习题,并在每一章后面的小结中,将本章的重点内容进行归纳,说明本章内容在水力学体系中的地位以及与其它章节的关系,便于学生全面系统地掌握水力学知识。本教材针对本科生教学要求而编写,为了照顾其它层次学生教学的需要,授课时可根据具体情况和教学时数,酌情取舍。例如,对于本科学生,第五章和第六章的内容,可以作为专题进行介绍;对于专科学生,第五章和第六章的内容可以不予介绍。

参加本书编写工作的有田伟平(第一、二、三、四章),王亚玲(第五、六、七、八、九章),由田伟平负责全书的统稿。从教材编写大纲的制订,到教材各章节的编写,都是在陈祥宝老师的悉心指导下完成的,在此,对陈祥宝老师的悉心指导以及审稿所提出的宝贵意见和建议,致以衷心的感谢。李香菊老师、张永清老师对本书的编写,给予了大力支持,并多次提出宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批判指正。

编者
2003 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 水力学及其应用	1
第二节 液体的基本特征及主要物理性质	2
第三节 液体的连续介质假定和理想液体概念	7
第四节 作用在液体上的力	8
小 结	9
思考题与习题	10
第二章 水静力学	12
第一节 静水压强及其特性	12
第二节 水静力学基本方程	13
第三节 静水压强的量测	16
第四节 静水压强分布图	18
第五节 平面上的静水总压力	19
第六节 曲面上的静水总压力	23
第七节 浮力、浮体及浮体的稳定	25
小 结	28
思考题与习题	28
第三章 水动力学基本定律	31
第一节 液体运动的基本概念	31
第二节 连续性方程	39
第三节 理想液体的运动微分方程(欧拉运动微分方程)	42
第四节 理想液体恒定元流的能量方程	43
第五节 理想液体恒定元流能量方程的意义	44
第六节 实际液体恒定元流的能量方程,水头线及水力坡度	47
第七节 实际液体恒定总流的能量方程	49
第八节 恒定总流的动量方程	57
小 结	61
思考题与习题	62
第四章 水流阻力	65
第一节 水流阻力与水头损失的分类	65
第二节 液体流动的两种型态及判别	67
第三节 均匀流基本方程及沿程水头损失通用公式	70
第四节 圆管中的层流运动	73
第五节 紊流特征	75

第六节 紊流的沿程阻力系数	81
第七节 局部水头损失	88
第八节 短管的水力计算	93
小 结	97
思考题与习题	98
第五章 孔口和管嘴出流	101
第一节 孔口出流	101
第二节 管嘴出流	105
第三节 变水头的孔口和管嘴出流	108
小 结	109
思考题与习题	109
第六章 长管水力计算	110
第一节 长管水力计算特点和基本公式	110
第二节 简单管路系统	110
第三节 有压管路中的水击现象	115
小 结	117
思考题与习题	117
第七章 明渠均匀流	119
第一节 明渠均匀流的水力特性和基本公式	119
第二节 水力最优断面	122
第三节 允许流速	123
第四节 梯形断面明渠均匀流的水力计算	125
第五节 无压圆管均匀流	127
第六节 复式断面明渠均匀流的水力计算	130
小 结	131
思考题与习题	131
第八章 明渠非均匀流	133
第一节 概 述	133
第二节 明渠中的三种水流状态判别	134
第三节 临界水深和临界坡度的计算	137
第四节 水 跃	141
第五节 渐变流水面曲线形状的定性分析	145
第六节 渐变流水面曲线的绘制	150
第七节 泄水建筑物下游的消能	152
小 结	155
思考题与习题	155
第九章 堰流	157
第一节 堰的类型	157
第二节 薄壁堰	158
第三节 实用堰	161

第四节 宽顶堰..... 162

小 结..... 165

思考题与习题..... 166

参考文献..... 167

第一章 绪 论

第一节 水力学及其应用

水力学是用实验和理论分析的方法,研究以水为代表的液体机械运动规律及其在工程中应用的一门科学。从学科的角度看,水力学是介于基础科学和工程技术之间的一门应用科学,一方面根据基础科学中的普遍规律,结合水流特点,建立理论基础;同时又紧密联系工程实践,发展学科内容。对于工程实践中许多迫切需要解决的问题,水力学除了对复杂的水力现象进行必要的理论分析外,还必须借助水力实验的手段弥补理论分析的不足。所以,实验研究在水力学中具有很重要的地位。

因为水力学是许多工程实践的基础,所以它广泛应用于水利、土木、环保、化工、机械等领域。在许多与水有关的工程中,几乎都有构筑物存水,管道和渠道输水的问题。构筑物受到水压力的作用,它的构造形式如果选择得好,水压力可能变小,甚至可以利用水压力增加构筑物的稳定性;选择得不恰当,就会得到相反的结果。水流现象是十分复杂的,根据水流情况选择管径大小和渠道断面形状及尺寸,直接影响着管道或渠道的输水效果、工程投资和管理费用。

在公路和桥梁工程中,从勘测、设计、施工,到维修养护,许多地方都涉及到水的问题。公路建筑物经常因洪水造成各种类型的不同程度破坏。如桥梁因洪水的冲击与冲刷而造成破坏,沿河公路及其冲刷防护构造物因洪水的顶冲与淘刷而造成的坍塌与破坏,山区各类小型人工排水建筑物因暴雨洪水而毁坏等。滑坡、崩塌、泥石流、路面翻浆、路基的沉陷与滑动等,尽管属于地质病害,但是关键的因素仍然是水。可见,公路的水毁、水害,均与地表水或地下水的活动有关。为使路基经常处于干燥、坚固和良好的稳定状态,必须修筑相应的截水沟、边沟、排水沟、急流槽等地表水排水沟渠,以及渗水暗沟、盲沟等各类地下排水设施;公路跨越河流、沟渠,需要修建桥梁、涵洞、倒虹吸管或透水路堤;在山区河流坡陡流急的地方,为保护路基、桥梁不致被水流冲毁,须修建急流槽、跌水和其它消能设施。显然,上述一系列水工设施的有关设计计算,如桥梁涵洞孔径的计算、排水沟渠尺寸的确定、沿河路基防护工程的形式、尺寸的选择以及防护区域的确定等,都必须正确地运用水力学知识来解决。这就要求公路工程技术人员必须通晓有关的水力学原理,善于根据工程特点因地制宜地解决有关的工程问题。因而,水力学是公路与城市道路工程、桥梁工程等专业十分重要的一门技术基础课。

水力学一般可分为水静力学和水动力学两大部分。前者研究液体在平衡状态下,作用于液体上各种力之间的关系;后者研究液体处于运动状态时,作用于液体上的各种力与运动要素(如水流速度、加速度等)之间的关系、液体的运动特性以及能量转换规律等;同时,研究探讨工程实际中的有关水力计算问题,例如管流、明渠流、堰流以及地下水的水力计算等。水力学是力学的一个分支,在研究水力学问题时,需要应用物理学和理论力学中关于物体平衡及运动规律的理论,如液体处于平衡状态时,各液体质点间不存在相对运动,作用于液体上的各种力遵

循力系的平衡理论;液体处于运动状态时,其动量及能量均发生变化,这些变化遵循物理学中的动量定理和动能定理等这些普遍原理。因此,物理学和理论力学等是学习水力学的必要的基础课。

千百年来,人们对水流运动规律的研究探索经历了实践—理论—再实践的过程。在水力学的发展史上,曾出现过两个不同的发展方向,一方面是在古典力学的基础上,运用严格的数学分析来描述液体运动的普遍规律,称为理论的或经典的水动力学,它是以完全没有阻力的水流作为研究对象,对于管流、明渠水流等阻力为主的情况,则不能得到符合实际的结果;另一方面是主要依靠实验方法和总结治水经验而建立的实验水力学,它用实验手段进行有实用意义的探索,但有忽视理论的偏向。

我们不能忽视经典水动力学的作用,因为从假定完全没有阻力的所谓“理想液体”概念导出的运动规律,在很多情况下能起到指导作用,而且有些还能接近实际。

现代水力学是在经典水动力学理论的基础上,对有阻力的所谓“实际液体”进行实验,常用的实验方法有两种:一种是原型观测,即对实际工程建筑物进行观测,可获得第一手资料,但操作难度较大;另一种是模型试验,即对按一定比例将原型缩小或放大的实物或工程建筑物进行试验观测,它不仅可以验证理论分析结果,还可预演各种设计条件的结果,是水力学中不可缺少的研究手段。通过实验方法,能够对理论分析进行验证或加以纠正、补充,也可以对一些液体的复杂运动特性通过一些经验系数加以粗略描述,运用经验公式进行简化的理论分析。因此,理论分析与实验研究的结合,形成了现代水力学。一般说来,水力学的结论是建立在简化了的水流现象基础之上,在水力学的理论公式中,常常列入一些由实验得到的系数,实用上它的准确程度尚能使人满意。

水力学的研究对象是以水为代表的液体。为了适应航空、气象、石油化工和暖气通风等工程的需要,将研究对象扩大到包括液体和气体(液体和气体的机械运动规律有很多相似之处)的流体机械运动规律及其应用,从而形成了另一门学科,即流体力学。

第二节 液体的基本特征及主要物理性质

一、液体的基本特征

在研究液体的物理性质时,须首先了解液体的基本特征。

自然界的物质通常以三种形态存在,即固体、液体和气体,而液体和气体统称为流体。在一定的条件下,液体具有一定大小的体积,其形状随容器形状而变化,并能形成自由表面。从力学分析的意义上看,以水为代表的液体,在其运动的过程中,表现出与固体不同的特点,其主要差别在于它们对外力的抵抗能力不同。固体由于其分子间距离很小,内聚力很大,所以它可以保持一定的形状和体积,能抵抗一定的拉力、压力和剪切力。而液体则由于分子间距离较大,内聚力很小而几乎不能承受拉力。运动的液体具有一定的抗剪切能力,但静止的液体则不能抵抗剪切力,即使在很小的剪切力作用下,静止液体都将发生连续不断的变形运动,直到剪切力消失为止,所以水是一种极易流动的物质,这个性质称为液体的易流动性。液体与气体的主要差别在于液体分子内聚力比气体分子内聚力大得多,因此气体易于压缩,而液体难于压缩。但是,当所研究的气流运动速度远远小于音速时,气体的密度变化很小,气体的运动规律与水流相同,因而水力学的基本原理在一定条件下也适用于气体。

二、液体的主要物理性质

液体机械运动的规律不仅与作用于液体的外部因素及边界条件有关,而更主要地取决于液体本身所具有的物理性质。在水力学中常涉及到的液体主要物理性质有密度、重度、压缩性与膨胀性、粘滞性、表面张力等。

1. 密度和重度

液体与任何物体一样,具有惯性。惯性是指物体保持原有运动状态的特性,其大小以质量来度量,质量越大的物体,惯性也越大。液体密度是指单位体积液体所具有的质量,用符号 ρ 表示。若均质液体的质量为 M , 体积为 V , 则其密度为

$$\rho = M/V \quad (1.1)$$

密度的量纲为 $[M/L^3]$, 国际制单位为 $\text{千克}/\text{米}^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 。液体的密度随着温度和压强的变化而变化,在压强变化不很大时,密度主要随温度而变化。在路桥工程中的大多数水力计算问题中,通常将密度视为常数,在温度为 4°C 、压强为一个标准大气压时,水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。

液体的重度(也称容重)是指单位体积液体所具有的重力,用符号 γ 表示。对于重力为 G 、体积为 V 的均质液体,其重度为

$$\gamma = G/V \quad (1.2)$$

$$\text{又因为} \quad G = Mg \quad (1.3)$$

$$\text{则有} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{或} \quad \gamma = \rho g \quad (1.4)$$

式中: g 为重力加速度,在本课程中采用 $g = 9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。重度的量纲为 $[F/L^2]$, 国际制单位为 $\text{牛}/\text{米}^3 (\text{N}/\text{m}^3)$, 或 $\text{千牛}/\text{米}^3 (\text{kN}/\text{m}^3)$ 。显然,重度也是随着温度而变化。同样,路桥工程中,经常将重度 γ 视为常数,在温度为 4°C 、压强为一个标准大气压时,水的重度 γ 为

$$\gamma = \rho g = 9800\text{N}/\text{m}^3 = 9.8\text{kN}/\text{m}^3$$

纯净的水在一个标准大气压条件下,其密度和重度随温度而变化,其变化值如表 1.1 所示。不同液体的密度和重度是不相同的,在一个标准大气压下,几种常见液体的重度如表 1.2 所示。

水的密度和重度(标准大气压下)

表 1.1

$t(^{\circ}\text{C})$	0°	4°	10°	20°	30°
密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
重度($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57
$t(^{\circ}\text{C})$	40°	50°	60°	80°	100°
密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

几种常见流体的重度 γ 值(标准大气压下)

表 1.2

流体名称	空气	水银	汽油	酒精	二氧化碳	海水
重度($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$)	11.82	133280	6664 ~ 7350	7778.3	15600	9996 ~ 10084
测定温度($^{\circ}\text{C}$)	20°	0°	15°	15°	20°	15°

2. 液体的压缩性和膨胀性

液体几乎不能承受拉力,但可以承受压力。液体受到压力作用,其宏观体积减小,密度增大;除去压力后,则能消除变形而恢复原有体积和密度,这种性质称为液体的压缩性。

液体的压缩性以体积压缩系数 β 度量。若压缩前液体的体积为 V , 压强增加 Δp 以后, 体积减小 ΔV , 则其体积压缩系数 β 为

$$\beta = - \frac{\Delta V/V}{\Delta P} \quad (1.5)$$

式中: $\Delta V/V$ ——体积的相对变化量。

β 越大, 表明液体越易压缩。因液体的体积随着压强增大而减小, ΔV 与 ΔP 的符号相反, 故式(1.5)右端有一负号, 而 β 保持为正值。 β 的单位为 $\text{米}^2/\text{牛顿}(\text{m}^2/\text{N})$ 。

体积弹性模数(弹性模量) K 是体积压缩系数的倒数, 即

$$K = \frac{1}{\beta} = - \frac{\Delta P}{\Delta V/V} \quad (1.6)$$

体积弹性模数 K 的单位为 N/m^2 。 K 愈大, 表明液体越不易压缩。

不同种类的液体具有不同的 β 值和 K 值。同一种液体, β 值和 K 值随温度和压强略有变化。

水的压缩性很小, 当压强在 $1 \sim 100$ 个大气压范围内变化时, $\beta = 0.52 \times 10^{-9} \text{N}/\text{m}^2$ 。这就是说, 每增加一个大气压, 水体积的相对压缩量只有两万分之一。因此, 工程上一般都可以忽略水的压缩性, 认为水的密度和重度为常数。但是, 在某些特殊情况下, 如讨论管道中的水击或水中爆炸问题时, 由于压强变化很大, 则要考虑水的压缩性。

忽略其压缩性的液体称为不可压缩液体, 这是一种简化分析模型。

在温度升高时, 液体的宏观体积增加, 密度减小, 这种性质称为液体的膨胀性。

在常温下, 水的膨胀性很小。例如: 温度从 0°C 到 30°C , 水的体积变化仅为约 0.4% 。因此, 在温度变化不大的情况下, 一般不考虑水的膨胀性。但是, 在温差较大的热水循环系统中, 与 4°C 的水相比, 如果将水加热到 80°C , 体积增大约 2.5% ; 加热到 100°C , 体积增大达 4% , 此时需设膨胀接头或膨胀水箱, 防止管道和容器被水胀裂。

值得注意的是, 当水结冰时, 冰的体积要比水的体积增大约 10% 。所以, 在寒冷地区需要注意水管、水泵、盛水容器及公路路基等的防冻问题。

3. 粘性(粘滞性)与粘性系数

1) 粘性(粘滞性)

能够流动是液体的一个重要性质。水具有易流动性, 说明静止的水没有抵抗剪切变形的能力。但是一旦液体因流动而发生切向变形, 液体质点之间就存在着相对运动, 则质点之间会产生内摩擦力抵抗其相对运动, 即运动的液体具有一定的抵抗剪切变形的能力, 这种特性称为液体的粘性或粘滞性。所有液体都有不同程度的粘滞性, 拿水与石油相比, 水比石油更容易流动, 说明水的粘滞性较小。运动液体的内摩擦力主要由分子内聚力和分子间的动量交换产生。液体分子间的内聚力随着温度升高而减小, 分子的动量交换则随着温度升高而增大, 但是, 液体分子的动量交换对液体粘滞性的影响不大, 所以液体的温度升高时, 粘性减小。

2) 粘滞力

当液体沿着一个平面固壁作平行的直线运动时(如图 1.1 所示), 设液体质点是有规则地一层一层向前运动而不相互混掺(液体的这种运动称为层流运动, 在后面的章节中将详细叙述)。由于液体具有粘性, 最底层的液体分子因粘滞性的作用而粘在固定边界上不动, 其它各

层的质点距离固定边界越远,受固壁的约束作用越小,流速越大,所以各液层的流速不相等。设距固定边界为 y 处的流速为 u ,在相邻的 $y + dy$ 处的流速为 $u + du$ (如图 1.1a)所示),由于两相邻液层的流速不同,在两液层之间将成对地出现切向阻力(如图1.1b)所示),阻碍两相邻液层相对运动的切向阻力称为粘滞力或内摩擦力。下面一层液体对上面一层液体作

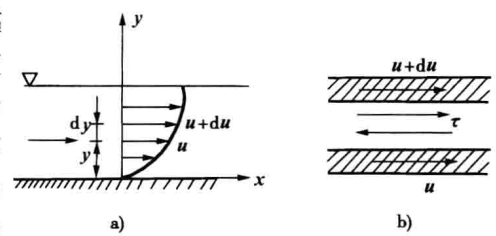


图 1.1

用了个与流速方向相反的内摩擦力,具有使上面一层液体运动减缓的趋势;而上面一层液体对下面一层液体则作用了一个与流速方向一致的内摩擦力,具有使下面一层液体运动加速的趋势;这两个内摩擦力大小相等、方向相反。在流动过程中,由于内摩擦力要作功,因此必然会有机械能的损失,有关流动损失的分析计算将在后面的章节中详细讨论。

早在 1723 年,牛顿就提出了有关粘滞性的牛顿内摩擦定律:当液体作平行直线运动时,相邻液层接触面上的内摩擦力 F 的大小与液体的种类有关,与接触面积成正比,与液层间的速度梯度成正比。用数学公式可表示为:

$$F = \mu \frac{du}{dy} A \quad \text{或} \quad \tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \tag{1.7}$$

- 式中: F ——内摩擦力(粘滞力);
- τ ——单位面积上的内摩擦力,称为内摩擦切应力;
- A ——相邻液层的接触面积;
- $\frac{du}{dy}$ ——相邻两液层之间的液体流动速度差与距离的比值,称为流速梯度;
- μ ——动力粘滞系数,其值随液体的种类、温度及压强的不同而变化。

液体的粘滞性用动力粘滞系数 μ 来度量,粘滞性大的液体 μ 值大,粘滞性小的液体 μ 值小。 μ 的国际制单位为牛顿·秒/米²(N·s/m²)或帕斯卡·秒(Pa·s)。

在水力学中,液体的粘滞性 μ 经常和密度 ρ 同时出现。为了能够综合反映液体的粘滞性和惯性性质,引入运动粘滞系数 ν ,它是动力粘滞系数 μ 和液体密度 ρ 的比值,即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.8}$$

因为 ν 不包含力的量纲,而仅具有运动量的量纲(L^2/T),故称 ν 为运动粘滞系数,它的国际制单位为米²/秒(m²/s)。

对于同一种液体, μ 和 ν 通常是压力和温度的函数,但主要是对温度的变化较为敏感,而压力的影响很小。

水的运动粘滞系数一般按下列经验公式计算:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \tag{1.9}$$

式中: t ——水的温度,以℃计。

ν 的单位为 cm²/s,工程应用中可以直接查表 1.3。

不同水温时的 ν 值 表 1.3

温度(℃)	0	2	4	6	8	10	12
$\nu(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.01775	0.01674	0.01568	0.01473	0.01387	0.01310	0.01239

续上表

温度/℃	14	16	18	20	22	24	26
$\nu(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.01176	0.01108	0.01062	0.01010	0.00989	0.00919	0.00877
温度(℃)	28	30	35	40	45	50	60
$\nu(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	0.00839	0.00803	0.00725	0.00659	0.00603	0.00556	0.00478

例 1.1 试求:水温为 21℃时,水的运动粘性系数 ν 和动力粘滞系数 μ 。

解: 求解 ν 和 μ , 可以采用式(1.9)计算或者查表 1.3, 进行线性内插求得水温为 21℃时的 ν 和 μ :

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} = \frac{0.01775}{1 + 0.0337 \times 21 + 0.00021 \times 21^2} = 0.00983 \text{m}^2/\text{s}$$

$$\mu = \rho\nu = 9.8 \times 0.00983 = 0.0963 \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

查表 1.3, $t = 20^\circ\text{C}$ 时, $\nu = 0.01010$, $t = 22^\circ\text{C}$ 时, $\nu = 0.00989$, 由线性内插得: $t = 21^\circ\text{C}$ 时, $\nu = 0.009999 \text{m}^2/\text{s}$, 相应的 $\mu = 9.8 \times 0.009999 = 0.09899 \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

牛顿内摩擦定律有其适用范围, 大多数常见流体(如水、空气等)的内摩擦力符合牛顿内摩擦定律, 这类流体称为牛顿流体; 某些特殊流体(如油漆、泥浆等)不服从牛顿内摩擦定律, 称为非牛顿流体。

本书只讨论牛顿流体。

4. 表面张力和毛细现象

沿液体自由表面液体分子引力所产生的拉力, 称为表面张力。表面张力能够使水滴悬在水龙头口上, 水面稍高出碗口而不外溢, 钢针浮在液面上而不下沉。所有这些现象都是液体在和另一种不相混合的液体或气体的分界面上分子间内聚力作用的结果。液面好象是一张均匀受力的弹性膜, 表面张力有使液体表面积尽量缩小的趋势。表面张力很小, 一般情况下可忽略不计, 只有当所研究的液体具有自由表面且边界尺寸过小的某些特殊问题时, 如很细的玻璃管或很狭窄的缝隙、微小液滴的运动、水深很小的明渠水流和堰流等, 表面张力影响较为明显, 其影响才不能忽略。

表面张力的大小, 可以用表面张力系数 σ 度量。 σ 是指自由表面单位长度上所受的拉力, 国际制单位为牛顿/米(N/m)。 σ 的值随液体的种类和温度而变化, 在 20°C 时, 对于水, $\sigma = 0.074 \text{N}/\text{m}$, 对于水银, $\sigma = 0.54 \text{N}/\text{m}$ 。

对于细口径管子中的液体, 表面张力的影响十分显著。将直径很小、两端开口的管子插入盛有水或水银的容器中, 当固、液间附着力较大时, 管内液面由于靠近管壁处的液面向上弯曲而成为凹形(如图 1.2a), 使液面的表面扩大。由于表面张力的作用要使液面尽量缩小, 中间液面向上鼓起而成为平面; 同时又由于附着力较大的作用, 液面又向上弯曲, 新的凹形面又形成了。如此不断进行, 直至上升液柱重量与表面张力的垂直分量平衡为止。这种液体上升的现象就是毛细现象, 内径小到足以发生显著毛细现象的管子称为毛细管。毛细管升高值 h 的大小与管内径大小以及液体的性质有关。设液面和管壁面接触的交角为 θ , 管半径为 r , 液体的重度为 γ , 表面张力为 σ , 则可以根据受力平衡关系, 得到液体毛细现象的上升高度 h :

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (1.10)$$

对于水和玻璃, $\theta = 0^\circ$ 。当水银和玻璃接触时, 由于水银的内聚力很大, 管中液面向上凸, 而成为凸形弯曲面, 由于表面张力的作用, 使管中的液柱下降(如图 1.2b)。水银和玻璃的 $\theta =$

140°。

由式(1.10)可看出,毛细管升高值 h 的大小与管径大小以及液体的性质有关。在 20℃ 的情况下,直径为 d 的玻璃管中的水面高出容器水面的高度 h 约为:

$$h = \frac{29.8}{d} (\text{mm}) \quad (1.11)$$

对于水银,玻璃管中水银液面低于容器液面的高度 h 约为:

$$h = \frac{10.2}{d} (\text{mm}) \quad (1.12)$$

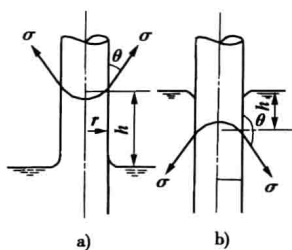


图 1.2

由此可见,管径越小,则毛细管升高值 h 越大。为避免由于毛细现象影响而使测压管读数产生误差,所选用的测压管的直径不应小于 10mm。

第三节 液体的连续介质假定和理想液体概念

一、连续介质

液体由大量不断作无规则热运动的分子所组成,其真实结构是由彼此之间有空隙并在进行复杂微观运动的大量液体分子所组成的聚集态。从微观的角度看,分子之间的真空区是随机变化的,并且,其尺度远大于分子本身的尺度。因此,液体分子运动的物理量(如流速、压强等)的空间分布是不连续的。另外,由于液体分子运动的随机性,其运动物理量在时间过程中也是不连续的。但从宏观的角度看,液体分子的体积极小,在标准状态下,每 1cm^3 的水中,约有 3.34×10^{22} 个水分子,分子之间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$ 。如此众多而密集的水分子,各自作不规则的随机运动,导致分子之间不断地发生碰撞,从而进行充分的能量和动量交换。因此,液体的宏观运动体现了众多液体分子微观运动的统计平均情况,明显地呈现出均匀性、连续性和确定性。

水力学是从宏观的角度研究液体的机械运动。由于在工程实际问题中,所涉及到的液体运动的特征尺度及特征时间均远远大于分子间距及分子碰撞时间,个别分子的行为,几乎不影响大量液体分子统计平均后的宏观物理量(如质量、流速、压力等)。可见,从宏观角度去研究液体运动规律,能够满足工程问题所要求的精度。所以,在水力学中假定:液体质点完全充满所占空间而没有任何空隙存在,其物理性质和运动要素在空间和时间上都是连续分布的,即连续介质。根据连续介质假定,水力学中所研究的液体,可以看成是容易流动、不易压缩、各向均匀连续介质。以水为代表的一般液体和在某些情况下可以忽略压缩性影响的气体都具有这些基本特征。

液体质点是指微观上足够大而宏观上又充分小的液体分子团。微观上足够大是指液体分子团内包含足够多的分子,使得它们的运动物理量的统计平均值是一个稳定的数值;宏观上充分小是指分子团的宏观尺寸远远小于所研究问题的特征尺寸,则分子团内各分子的物理量可以看成是均匀分布的,因此可将它近似看成是一个几何上没有维度的点。

采用连续介质假定,就可以不考虑液体复杂的分子运动,而着眼于实际工程问题所关心的宏观机械运动,并能充分利用连续函数这一数学分析工具有效地描述液体的平衡和运动规律,这在工程应用中既方便简单,又有足够的精确性。

二、理想液体

粘滞性是实际液体所固有的物理属性,它对液体运动有着不容忽视的重要影响。由于液体具有粘滞性,使得液体运动规律变得十分复杂,对其进行理论分析和数学求解都非常困难。为了研究方便,在水力学中提出了理想液体的概念。理想液体是一种假想的液体,这种液体仅有质量和重量,没有粘滞性及表面张力,不考虑压缩性。由于实际液体的压缩性及表面张力在大多数情况下都可以忽略不计,所以理想液体与实际液体相比,主要差别为没有粘滞性,即 $\mu = 0$ 。因理想液体中不存在任何摩擦阻力(绝对易流动性),从理论上研究比较容易,所以,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,然后再用实验研究方法检验并修正由于没有考虑粘滞性所产生的理论分析结果的误差。

对静止和相对静止的液体,由于质点间没有相对运动($du/dy = 0$),则粘滞性的影响体现不出来,所以在水静力学中,理想液体和实际液体完全相同。因此,理想液体的概念,只有在水动力学中才有意义。实际上,理想液体是不存在的,但对理想液体的分析结果,有时也可近似地反映粘滞性影响不大的实际液流的情况。

第四节 作用在液体上的力

无论是处于静止状态或运动状态的液体,都会受到各种力的作用。由前述可知,液体能承受很大的压力,几乎不能承受拉力;静止或相对静止的液体不能抵抗切向力,而运动的液体可以承受一定的切向力。

在水力学中,研究液体的平衡或运动规律时,往往要从液体中分离出一封闭表面所包围的液体作为隔离体,以隔离体作为研究对象进行分析研究,建立相应的基本方程及各影响因素之间的关系式,这是水力学的基本研究手段。所谓作用在液体上的力,就是作用在隔离体上的外力。作用于液体(不论静止或运动)上的力,按其物理性质可以分为惯性力、重力、粘滞力、压力和表面张力等等。为了便于分析液体的平衡和运动规律,将作用于液体的力分为表面力和质量力两大类。

一、表面力

作用在隔离体表面上的力称为表面力,它是相邻液体或其他介质的作用结果。由连续介质假定,表面力连续分布在隔离体的表面上,表面力的大小与作用面的面积成正比,一般采用单位面积上所受的表面力,即应力的概念进行分析。通常,将表面力分解为垂直于作用面的法向力和平行于作用面的切向力。

1. 法向力

法向力是指垂直于隔离体表面的表面力。由于液体不能承受拉力,故法向力只能是压力,单位面积上的压力称为压应力或压强。如图 1.3 所示,在隔离体表面上取包含 A 点的微小面积 $\Delta\omega$,作用在 $\Delta\omega$ 上的法向力为 ΔP ,则在微小面积 $\Delta\omega$ 上的平均压强为

$$P = \frac{\Delta P}{\Delta\omega} \quad (1.13)$$

P 反映了受压面 $\Delta\omega$ 上压强的平均值。根据连续介质的概念,令 $\Delta\omega \rightarrow 0$,对上式取极限,则得 A 点处的压强为

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega} \quad (1.14)$$

2. 切向力

切向力指与作用面平行的力。切向力与液体的粘滞力有关,对于层流而言,切向力就是内摩擦力。如图 1.3 所示,作用在 $\Delta\omega$ 上的切向力为 ΔT ,则 A 点的切应力为

$$\tau = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta\omega} \quad (1.15)$$

对于静止液体,液体之间没有相对运动;而对于理想液体,忽略粘滞性,即 $\mu = 0$,所以二者的切向力均为零,即 $\tau = 0$ 。在这两种情况下,作用在 $\Delta\omega$ 上的表面力就都只有法向力 ΔP 。

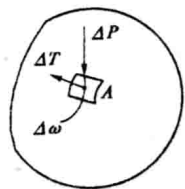


图 1.3

表面力的国际制单位是牛顿(N),压强 p 及切应力 τ 的国际制单位是牛顿/米²(N/m²),或称为帕(Pa)。

水力学中规定:压强用正号表示。

二、质量力

质量力是指作用在隔离体内每一个液体质点上的力,其大小与液体的质量成正比。在均质液体中,质量力也必然与所作用的液体的体积成比例,故质量力又称为体积力。重力、惯性力等都是质量力。

重力是地球对液体每一个质点的吸引力,液体所受的重力等于液体的重量。根据牛顿第二定律,重量等于质量乘重力加速度。

惯性力是液体质点在外力作用下作变速运动时,由于惯性而在质点上体现的一种力。工程上对惯性力的定义是:质点所受惯性力的大小等于该质点质量与其加速度的乘积,方向和加速度方向相反。

水力学中的水流现象通常都在重力作用下,需要另外考虑惯性力作用的情况并不多,如容器中变速前进的液体、旋转容器中的液体、管道弯头段的液流和渠道中的弯道水流等。

若所取的隔离体内的液体是均质的,其质量为 M ,总质量力为 F ,则

$$f = \frac{F}{M} \quad (1.16)$$

式中: f ——称为单位质量力,即液体质量 M 为一个质量单位时所具有的质量力,它具有与加速度相同的量纲(L/T^2)。

设总质量力 F 在直角坐标系三个坐标轴上的投影分别为 F_x 、 F_y 、 F_z ,单位质量力 f 在三个坐标轴上的投影分别为 X 、 Y 、 Z ,则

$$\begin{aligned} X &= \frac{F_x}{M}, Y = \frac{F_y}{M}, Z = \frac{F_z}{M} \\ f &= X_i + Y_j + Z_k \end{aligned} \quad (1.17)$$

水力学中常采用的是单位质量力。

小 结

水力学是用实验观测和理论分析的方法,研究以水为代表的液体机械运动的规律及其在工程中应用的一门科学。本章介绍的内容属于水力学理论的共同问题。

液体机械运动的规律不仅与作用于液体的外部因素及边界条件有关,而更主要地取决于液体本身所具有的物理性质。在水力学中常涉及到的液体的主要物理性质有:质量与密度、重力与重度、压缩性与膨胀性、粘滞性与易流动性、表面张力和气化特性等,它们对于研究液体的平衡与运动规律,定性分析和定量计算等都是必备的基本知识。

在水力学中假定:液体质点完全充满所占空间而没有任何空隙存在,其物理性质和运动要素在空间和时间上都是连续分布的,即液体的连续介质假定。液体的连续介质假定是水力学中的一个基本假定,本书的所有论述均以该假定为基础。采用连续介质假定后,可以应用连续函数的数学分析工具有效地描述液体的平衡和运动规律。同时,运用连续介质假定从宏观角度去研究液体运动规律,能够满足一般工程问题的精度要求。

理想液体是一种假想的液体,这种液体仅有质量和重力,没有粘滞性及表面张力,不考虑压缩性。由于实际液体的压缩性及表面张力,在大多数情况下都可以忽略不计,所以理想液体与实际液体相比,主要差别为没有粘滞性,即 $\mu = 0$ 。引入理想液体概念,主要是为了简化理论分析和数学求解的工作。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,然后再用实验研究方法检验并修正由于没有考虑粘滞性所产生的理论分析结果的误差。

正确分析作用在液体上的力是研究液体平衡与运动规律的基础。作用于液体(不论静止或运动)上的力,按其物理性质可以分为惯性力、重力、粘滞力、压力和表面张力等,通常按其作用方式分为两大类:表面力和质量力。

表面力连续分布在隔离体的表面上,表面力的大小与作用面面积成正比,而表面力通常又可以分解为垂直于作用面的法向力和平行于作用面的切向力。一般采用单位面积上所受的表面力,即应力的概念进行分析。

质量力是指作用在隔离体内每一个液体质点上的力,其大小与液体的质量成正比。在均质液体中,质量力也必然与受作用的液体的体积成比例,故又称为体积力。重力、惯性力等都是质量力。水力学中常采用的是单位质量力。

思考题与习题

- 1.1 液体的压缩性与什么因素有关?
- 1.2 何为牛顿内摩擦定律?
- 1.3 静止的液体能否抵抗剪切变形?
- 1.4 为什么运动的液体有一定抵抗剪切变形的能力? 这种能力以什么形式表现出来?
- 1.5 动力粘滞系数与运动粘滞系数分别反映液体的什么性质? 它们的量纲分别是什么?
- 1.6 牛顿流体与非牛顿流体的区别是什么?
- 1.7 什么是液体的连续介质假定?
- 1.8 理想液体忽略了什么因素?
- 1.9 什么是液体的表面力? 什么是液体的质量力? 它们的大小分别与什么因素有关?
- 1.10 如习题 1.10 图所示,试分析在图中所示三种情况下,水体分别受到哪些表面力和质量力作用? a)水池中静止的水;b)渠道中的水流;c)弯曲河道中的水流。
- 1.11 某种液体的容重为 8kN/m^3 ,求它的密度。
- 1.12 体积为 4m^3 的水,温度不变,当压强从一个大气压(98kPa)增加到 5 个大气压时,体积减少 1dm^3 ,求该水的体积压缩系数及弹性系数。
- 1.13 水在温度 18°C 时,如密度仍取 $\gamma = 1000\text{kg/m}^3$,求水的动力粘滞系数 μ 及运动粘滞系