

全国高等学校水利类专业优秀教材
全国高等院校水利水电类精品规划教材

SHUILIXUE

水力学

(第2版)

主编 孙东坡 丁新求
主审 刘士和



黄河水利出版社

全国高等学校水利类专业优秀教材
全国高等院校水利水电类精品规划教材

水 力 学

(第2版)

主 编 孙东坡 丁新求
副主编 王二平 陈丽红
主 审 刘士和

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书共分为十章,其内容包括:水力学基础知识、水静力学、液体一元恒定总流的基本原理、液流型态与水头损失、有压管道流动、恒定明渠水流、过流建筑物的水力计算、液体三元流动的基本原理、渗流和明渠非恒定流。为便于学生学习时把握重点和难点,各章习题均按“课堂讨论题”“基本要求题”和“加深理解题”的形式给出。

本书可作为普通高等院校水利类(水利水电工程、农业水利工程、港口航道与海岸工程、水文与水资源工程等)专业的本科教学用书,也可供从事水利、土建、给排水以及环境等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学/孙东坡,丁新求主编. —2版. —郑州:黄河水利出版社,2016.4

全国高等学校水利类专业优秀教材 全国高等院校
水利水电类精品规划教材

ISBN 978-7-5509-1340-0

I. ①水… II. ①孙…②丁… III. ①水力学-高等学校-教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 080198 号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:24

字数:554 千字

印数:1—3 100

版次:2009 年 8 月第 1 版

印次:2016 年 4 月第 1 次印刷

2016 年 4 月第 2 版

定价:45.00 元

出版者的话

随着 2011 年中央 1 号文件《中共中央 国务院关于加快水利改革发展的决定》的发布和中央水利工作会议的召开,水利作为国家基础设施建设的优先领域迎来了前所未有的黄金期。到 2015 年,全国水利投资总额达 1.8 万亿元,到 2020 年,水利投资达 4 万亿元。据《第一次全国水利普查公报》,截至 2011 年 12 月 31 日,全国堤防总长度为 413 679 公里(其中 5 级及以上在建堤防长度为 7 963 km),共有水库 98 002 座(其中在建水库 756 座),共有水电站 46 758 座(其中在建水电站 1 324 座)。水利水电工程的大规模建设对设计、施工、运行管理等水利水电专业人才的需求也更为迫切,如何更好地培养适应现今水利水电事业发展的优秀人才,成为水利水电专业院校共同面临的课题。作为水利水电行业的专业性科技出版社,我社长期关注水利水电学科的建设与发展,并积极组织水利水电类专著与教材的出版。

在对水利水电类本科层次教材的深入了解中,我们发现,以应用型本科教学为主的众多水利水电类专业院校普遍缺乏一套完整构建在校本科生专业知识体系又兼顾实践工作能力的教材。在广泛调研与充分征求各课程主讲老师意见的基础上,按照高等学校水利学科专业教学指导委员会对教材建设的指导精神与要求,并结合教育部实施的多层次建设、打造精品教材的出版战略,我社组织编写了本系列“全国高等院校水利水电类精品规划教材”。

此次规划教材的特点是:

- (1) 以培养水利水电类应用型人才为目标,充分重视实践教学环节。
- (2) 在依据现有的专业规范和课程教学大纲的前提下,突出特色,力求创新。
- (3) 紧扣现行的行业规范与标准。
- (4) 基本理论与工程实例相结合,易于学生接受与理解。

本系列教材除了涵盖传统专业基础课及专业课外,还补充了多个新开课程的教材,以便于学生扩充知识与技能,填补课堂无合适教材可用的空缺。同时,部分教材由工程技术人员或有工程设计施工从业经历的老师参与编写,也是此次规划教材的创新。

本系列教材的编写与出版得到了全国 21 所高等院校的鼎力支持,特别是三峡大学党委书记刘德富教授和华北水利水电大学副校长刘汉东教授对系列教材的编写与出版给予了精心指导,有效保证了教材出版的整体水平与质量。在此对推进此次规划教材编写与出版的各院校领导和参编老师致以最诚挚的谢意,是他们在编审过程中的无私奉献与辛勤工作,才使得教材能够按计划出版。

“十年树木,百年树人”,人才的培养需要教育者长期坚持不懈的努力,同样,好的教材也需要经过千锤百炼才能流传百世。本系列教材的出版只是我们打造精品专业教材的开始,希望各院校在对这些教材的使用过程中,提出改进意见与建议,以便日后再版时不断改正与完善。

黄河水利出版社

全国高等院校水利水电类精品规划教材

编 审 委 员 会

主 任：	三峡大学	刘德富	华北水利水电大学	刘汉东
副主任：	西安理工大学	黄 强	郑州大学	吴泽宁
	云南农业大学	文 俊	长春工程学院	左战军
委 员：	西安理工大学	姚李孝	西北农林科技大学	辛全才
	扬州大学	程吉林	三峡大学	田 斌
	华北水利水电大学	孙明权	长沙理工大学	樊鸣放
	重庆交通大学	许光祥	河北农业大学	杨路华
	沈阳农业大学	迟道才	河北工程大学	丁光彬
	山东农业大学	刘福胜	黑龙江大学	于雪峰
	新疆农业大学	侍克斌	内蒙古农业大学	刘廷玺
	三峡大学	张京穗	华北水利水电大学	张 丽
	沈阳农业大学	杨国范	南昌工程学院	陈春柏
	长春工程学院	尹志刚	昆明理工大学	王海军
	南昌大学	刘成林	西华大学	赖喜德

再版前言

时间犹如白驹过隙,本书出版转瞬已经六载,在此期间共计重印了两次,并于2014年10月获教育部高等学校水利类专业教学指导委员会、中国水利教育协会高等教育分会等联合评审的第一届“全国高等学校水利类专业优秀教材”。

六年来,本书在获得了不少高校及相关单位同行好评的同时,也收获了许多宝贵的意见与建议。为了更好地适应水利类相关专业的教学要求,补正书中尚存在的个别瑕疵与疏漏,自2014年11月开始,我们着手筹划并安排了本书的修订再版工作。经过本次修订的新版教材,具有如下特点:

1. 修订了部分章节内容,使叙述内容更加科学、严谨;
2. 修订、补正或补充了部分习题,扩大了习题的涵盖面,使习题要求更加明确、实用;
3. 为了适应水文及水资源工程和港口航道与海岸工程专业的教学需要,修订后的新版教材,增加了“明渠非恒定流”内容(第十章)。

为了能够更好的方便学生自学和解题的需要,由丁新求等所著的《水力学学习与解题指导》一书(郑州:黄河水利出版社,2014.),专门就本书各章节的重点内容及疑难问题,进行了针对性辅导与解析,并在其“自测练习题”中,将本书的“基本要求题”和“加深理解题”进行了收录,给出了全部习题的答案。

参加本次修订再版工作的人员有:华北水利水电大学孙东坡(第一、四章(部分)、第九章),王二平(第二、三章),薛海(第八章);长沙理工大学丁新求(第一、六章(部分)、第十章),童海鸿(第六章(部分));云南农业大学陈丽红(第四章(部分)、第五章);河北农业大学梁素韬(第七章)。全书由孙东坡、丁新求统稿。

尽管在本书的修订过程中,我们已穷其心力,但终因编者水平所限,挂漏之处,在所难免,尚祈郢政。

编者
2015年8月

前 言

水力学是水利类各个专业的一门重要技术基础课,也是土木、环境、岩土工程专业技术人员必需的基础理论知识。虽然各专业对它的要求和侧重面不尽相同,但基本内容是共同的。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,按照水利类水工、农水、港航、水文等专业 80 学时的水力学课程教学基本要求编写,并适当参考了全国注册土木工程师(水利水电工程)的水力学和流体力学考试大纲所规定的内容。

本书系统地阐述了水力学的基本概念、基本理论及工程应用,全书共分为 9 章,主要内容包括:水力学基础知识,水静力学,水动力学基本原理,水流型态及水头损失,有压管道流动,恒定明渠水流,过流建筑物的水力计算,流场分析的基本原理,渗流等。

华北水利水电学院孙东坡编写第一、四章(部分),王二平编写第二章,薛海编写第八章;长沙理工大学丁新求编写第一、六章(部分),童海鸿编写第六章(部分);黑龙江大学谷欣编写第三章;云南农业大学陈丽红编写第四章(部分)、第五章;河北农业大学梁素韬编写第七章(部分);沈阳农业大学杨丽萍编写第七章(部分)和第九章。全书由孙东坡、丁新求主编并统稿。本书由武汉大学刘士和教授主审,他提出了不少宝贵意见与修改建议,在此表示衷心的感谢;同时也感谢关心及指导本书编写的华北水利水电学院李国庆教授。

一本好教材,应该既强调基本理论与体系完整,又注重内容新颖并照顾到相近各专业的基本要求,联系实际且深浅适度,文笔准确、简练、流畅,学生易读,教师好用。作者向这个方向做了自己的努力与尝试,本书参考了国外一些较好的流体力学教材的编写方法;单辟了学习小栏目“学海趣谈”,以便于提高读者对基础理论学习的兴趣;在习题编排方面按不同要求分成三类(课堂讨论题、基本要求题、加深理解题),让教与学都有较大的选择空间,以便于对基本概念、基本方法的掌握与融会贯通。

由于编者水平有限,尽管用心良苦,但书中瑕疵在所难免,恳请读者批评和指正。

编 者

2009 年 6 月

目 录

出版者的话

再版前言

前 言

第一章 水力学基础知识	(1)
第一节 水力学简介	(1)
第二节 液体的基本特征及其物理力学性质	(4)
第三节 作用于液体上的力	(11)
第四节 量纲及量纲分析方法	(12)
第五节 水力学的研究方法	(15)
习 题	(16)
第二章 水静力学	(19)
第一节 静水压强及其特性	(19)
第二节 液体平衡微分方程及其积分	(21)
第三节 重力作用下静水压强的基本方程	(23)
第四节 静水压强的量测与静水压强分布图	(25)
第五节 作用在平面上的静水总压力	(31)
第六节 作用在曲面上的静水总压力	(34)
第七节 浮体的平衡及稳定性	(39)
第八节 液体相对平衡及压强计算*	(41)
习 题	(44)
第三章 液体一元恒定总流的基本原理	(52)
第一节 描述液体运动的方法	(52)
第二节 液体运动的基本概念	(55)
第三节 液体运动的分类	(57)
第四节 恒定总流的连续性方程	(61)
第五节 恒定总流的能量方程	(63)
第六节 恒定总流的动量方程	(75)
习 题	(85)
第四章 液流型态与水头损失	(91)
第一节 水头损失及其分类	(91)
第二节 均匀流沿程水头损失的基本方程	(94)
第三节 水流的流动型态	(97)
第四节 层流运动及其沿程水头损失计算	(102)

第五节	紊流的运动特性	(104)
第六节	紊流沿程水头损失的计算	(109)
第七节	计算沿程水头损失的经验公式——舍齐公式	(114)
第八节	局部水头损失	(118)
第九节	边界层与绕流阻力	(123)
习 题	.....	(128)
第五章	有压管道流动	(130)
第一节	有压管流的特点及其分类	(130)
第二节	简单管道恒定流的水力计算	(131)
第三节	复杂管道恒定流的水力计算	(150)
第四节	有压管道中的非恒定流	(156)
习 题	.....	(168)
第六章	恒定明渠水流	(174)
第一节	明渠水流的特点及其分类	(174)
第二节	明渠的几何边界对水流运动的影响	(174)
第三节	明渠均匀流的特性及其产生条件	(176)
第四节	明渠均匀流水力计算	(178)
第五节	明渠均匀流水力计算中的有关问题	(185)
第六节	明渠水流的流态及其判别	(195)
第七节	断面比能、临界水深及临界底坡	(198)
第八节	明渠非均匀急变流现象及水力计算	(205)
第九节	棱柱体明渠恒定非均匀渐变流水面曲线分析	(212)
第十节	明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	(220)
第十一节	弯道水流运动	(225)
习 题	.....	(229)
第七章	过流建筑物的水力计算	(234)
第一节	堰闸出流的共同特点与区别	(234)
第二节	堰流的类型及水力计算公式	(236)
第三节	薄壁堰的水力计算	(238)
第四节	实用堰的水力计算	(241)
第五节	宽顶堰的水力计算	(249)
第六节	闸孔出流的水力计算	(255)
第七节	泄水建筑物下游水流衔接与消能	(261)
第八节	底流消能的水力计算	(262)
第九节	挑流消能的水力计算	(280)
习 题	.....	(286)
第八章	液体三元流动的基本原理	(290)
第一节	液体质点运动的速度与加速度	(290)

第二节	迹线、流线及其微分方程	(292)
第三节	液体微团运动的基本形式	(295)
第四节	有旋流与势流	(299)
第五节	液体质点运动的连续性方程	(300)
第六节	理想液体运动的微分方程及其积分	(302)
第七节	实际液体运动微分方程及其意义	(306)
第八节	恒定平面势流	(309)
习 题	.....	(321)
第九章 渗 流	.....	(323)
第一节	渗流基本概念与渗流模型	(323)
第二节	渗流的基本定律——达西定律	(326)
第三节	地下河槽恒定均匀渗流与渐变渗流的基本公式	(329)
第四节	棱柱体地下河槽恒定渐变渗流的水力计算	(330)
第五节	不透水地基上均质土坝的渗流计算	(335)
第六节	井及井群的渗流计算	(338)
第七节	恒定平面渗流的流网解法	(344)
习 题	.....	(347)
第十章 明渠非恒定流	.....	(351)
第一节	明渠非恒定流的特性及其波的分类	(351)
第二节	明渠非恒定渐变流的基本方程	(354)
第三节	特征线法	(360)
第四节	明渠非恒定急变流——断波	(367)
习 题	.....	(370)
参考文献	.....	(372)

第一章 水力学基础知识

第一节 水力学简介

一、水与人类

水是我们关系最密切的物质,人类的繁衍生息、社会的进化发展都是与水“唇齿相依、休戚相关”的。综观所有人类文明,几乎都是伴着河、海而生的(例如,黄河、恒河、尼罗河、底格里斯河与幼发拉底河、爱琴海等)。所以,早在2 000多年前,我国春秋时期的一位哲人就说:“水者何也?万物之本原也,诸生之宗室也”(《管子·水地》)。自然界的水形成浩瀚的大海、奔腾不息的河流、烟波浩淼的湖泊、地下涌动的清泉。流动的水体既呈现“天下之至柔”的处下不争性,又有“驰骋天下之至坚”的进攻破坏性(《老子·四十三章》),因而既能“到江送客棹,出岳润民田”,造福于人类,又会“浊浪排空至,江流万山穿”,危及社会安全。千百年来人类与水打交道,取得了很多成功与胜利,在历史长卷中,不乏有关“治水”的浓墨重彩。但对江河湖海不合理的开发利用也会破坏流域环境,“自然界反过来也会报复、制约我们”(恩格斯)。人们认识到:只有“识其性”,才能“得其利,避其害”;只有实现“人水和谐”,经济社会才可能协调可持续发展。因此,了解水的运动特性与力学规律,是利用与治理江河湖海、维持水环境和健康生命的理论基础。

二、水力学的定义与特点

为了研究水的基本运动规律并探讨运用这些规律解决水利工程的实际问题,就形成了水力学这门学科。准确地说,水力学是研究液体处于平衡或机械运动状态下的力学规律及其工程应用的一门科学,主要研究对象是以水为代表的液体。

水力学既有基础科学的特征,它是力学的一个分支,隶属于流体力学的范畴;同时它又有工程科学的特点,紧密结合与水相关的各种实际工程应用。

水力学是以物理学和理论力学中机械运动的普遍规律为依据,并借助数学工具,结合实际工程边界条件与水流运动的特点,形成了自己学科的理论基础:水静力学与水动力学。水静力学研究液体在静平衡状态下,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),以及运动引起的能量损失问题。同时又紧密结合实际应用,建立其相应的各种工程计算方法,形成了水力学的工程应用部分:管流、明渠流、堰闸过流、消能以及地下水渗流等。

三、水力学的任务

水利水电工程技术人员的任务是,研究、规划、设计和建设各种用水、治水工程,从而

达到除水害和兴水利的目的。所以,水力学是水利水电工程专业一门重要的专业基础学科。

例如,为了满足防洪、灌溉、发电、供水及航运等方面的要求,通常需要在河道上建坝,以抬高上游水位,形成如图 1-1 所示水库。水库形成后,既可以调节下泄水量,防止洪水对下游肆虐,又可以蓄洪调枯,储丰济旱,用于发展灌溉、发电、供水、航运和养殖等兴利事业。

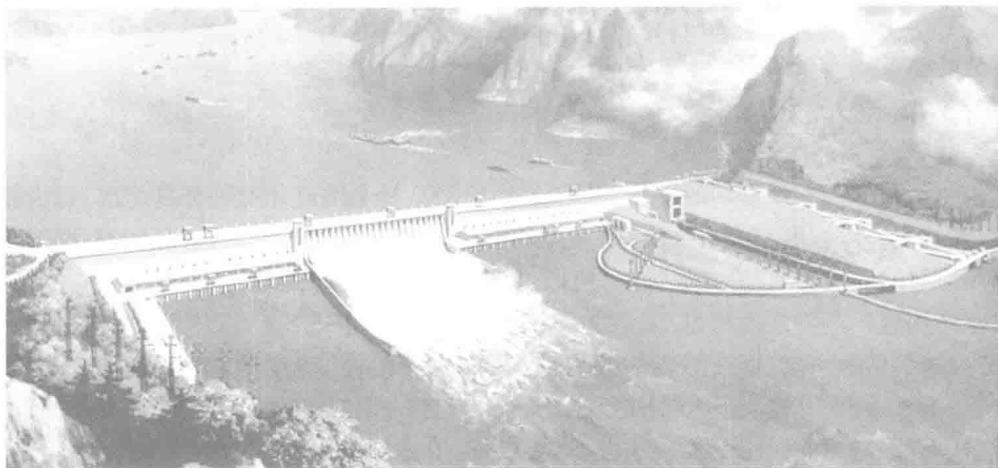


图 1-1

水库枢纽工程主要有大坝、电站、船闸、溢洪道及泄洪闸等;取、输水工程一般由引水闸、引水渠道(或管道)及渠系建筑物,如输水隧洞、渡槽、倒虹吸管及分水闸等构成。

由于上述建筑物的修建,调整和改变了原有水流的结构与流动状态,水流在其惯性的作用下,力图反抗新建固体边界的约束,这就形成了水流与各类固体边界之间在不同条件下的相互作用。这种相互作用的结果,一方面使得水流形成新的状态,另一方面也带来了一系列的水力学问题,如水库坝体水压力的计算、输水及泄水建筑物过流能力的计算、渗流量及渗透压力的计算、泄水建筑物下游的消能防冲设施有关几何尺寸的确定等,这些都是水利工程中所必须解决的常见水力学问题。

归纳起来,水力学在水利水电工程中常见的任务主要有以下几个方面。

(一)水力荷载的计算

确定水利工程中坝体、闸门、渡槽及管道等涉水建筑物的静水压力或动水压力,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水力荷载依据。

(二)建筑物过流能力的确定

计算渠道、溢流坝、泄水闸、涵洞等输水及泄水建筑物在各种条件下的过流能力,为确定这些建筑物的合理布置型式及尺寸提供依据。

(三)水流能量损失的确定

水流在运动过程中都有机械能损失,因此需要分析水流在通过水电站、泵站、管道、渠道、堰闸等水工建筑物时引起的能量转化及损耗规律,需要确定水流能量损失的大小。在工程设计中一方面需要尽量减少在引水、输水过程中的能量损失,另一方面还需要采取合

理的方式和有效措施,消除通过水工建筑物水流的多余有害动能。

(四)分析水流形态

修建水工建筑物,改变了原有的水流状态,因此需要判别水流在各种水工建筑物中及其影响区域的流动形态和对工程的影响;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、沿河建筑物(桥、路、堤防等)、防护工程、泄洪闸以及码头栈桥等工程的规划布置都需要掌握工程所处位置的水流形态。

(五)其他水力学问题

水工建筑物中高速水流会引起空化、空蚀、掺气、振动及雾化等问题;许多水工建筑物基础和围堰区都会产生渗流问题;隧道、路基排水以及挟沙水流、波浪运动对建筑物的影响问题,都是水力学研究的任务。

由此可见,水力学是专门研究水流运动的基本规律,并运用这些规律给出各种水利水电工程的水力计算方法。为了解决上述工程实际问题,必须透彻了解水流运动的规律,具备坚实的水力学理论知识。水力学虽以水为主要研究对象,但其基本原理同样适用于一般其他常见液体和可以忽略压缩性影响的气体。水力学的基本理论不但在水利工程建设方面有着广泛的应用,而且在城市建设(如风荷载对高层建筑物的作用及稳定控制)、环境保护(如污染物在水流中扩散、输移及自净)、机械制造(如液压传动)、石油开采(如管路输送)、金属冶炼(如紊动射流)、交通运输(如绕流物阻力及体型设计)甚至是医学(血流运动)等领域也都有着较为广泛的应用。

四、水力学的发展回顾

如同所有的基础理论与工程科学一样,水力学也是从早期模糊的经验性认识,通过一代又一代学者和工程技术人员努力,才丰富完善到现代水力学的。了解学科的历史轨迹,对于提高学习兴趣和了解学科的特点均具有十分积极的意义。

生活引水、灌溉、防洪、航运等基本社会需求是水力学发展的直接动力,经典力学和高等数学的引入则是水力学形成的理论基础。水力学学科的产生和发展是与世界各国人民对水的利用以及与水的斗争紧密相联、一脉相承的。

在中国,早在上古时代的大禹治水,就提出了对洪水采取“疏导”而不是“围堵”的正确治理方法。“水利兴则天下定”,历代统治者都把水利工程建设作为治国安邦大计。春秋战国时期和秦代,社会由奴隶制过渡到封建制,生产力得到巨大发展。公元前 256 年至公元前 210 年间,修建了都江堰(四川都江堰)、郑国渠(陕西泾阳)和灵渠(广西兴安)等闻名遐迩的水利工程,其中举世瞩目的都江堰至今还在发挥作用;此后又修建了秦渠、汉渠、汉延渠、唐徕渠等引黄(黄河)灌溉工程;公元前 485 年开始直至隋代才修筑完成的京杭大运河长 1 794 km,纵贯京、津、冀、鲁、苏、浙,沟通海河、黄河、淮河、长江及钱塘江五大水系。在长期兴水利、除水害的过程中,人们对水流运动规律的认识逐步由浅入深,不断探索形成了水力学的基本认识与科学的治水方法。如北魏郦道元在《水经注》中就记载有“坡湖、堤、塘、堰、竭、陂(睹)、塍、坨、水门、石逗”等多种类型的农田水利设施。明代潘季驯根据水沙运动规律,科学总结了“塞旁决以挽正流,以堤束水,以水攻沙”的治黄措施;清代初年,何梦瑶在《算迪》中就提出了“断面平均流速乘以过水断面面积”的流量

计算方法。

20 世纪 50 年代以来,我国水利建设突飞猛进地发展,修建(加固)江河堤防 26 万 km、修建大中小水库 8.5 万多座,特别是大型水利水电工程如黄河小浪底水库、长江三峡水利枢纽等工程的建设,解决了挟沙水流与高速水流等许多方面的水力学关键技术问题,大大丰富了水力学的内容。

而在 2 000 多年以前的古埃及、古巴比伦、希腊和印度等地,灌溉、航运、城市引水等设施已经很发达,当时人们已经对水流运动规律有了初步的经验和理论性认识。公元前 3 世纪,希腊哲学家阿基米德(Archimeds)就发表了《论浮体》,提出了论述液体平衡规律的阿基米德原理。但直到欧洲文艺复兴,以资本主义工业革命为基本动力,文学艺术、社会科学以及自然科学等各个领域才都取得了长足的发展,水力学也受惠其中。当时意大利最杰出的画家、科学家和工程师达·芬奇(Leonardo da Vinci)就对物体的沉浮、孔口出流、运动阻力、管道及明渠水流等问题进行了系统的研究;1612 年,意大利物理学家伽利略(G. Galileo)也建立了物体沉浮的基本原理;1650 年,法国数学及物理学家帕斯卡(B. Pascal)提出了平衡液体中压强传递的帕斯卡原理;18 世纪至 19 世纪,数学、力学等各领域迅速发展,加速了经典水动力学的发展。1738 年,瑞士数学家伯努利(D. Bernoulli)在《水动力学》一书中,建立了理想液体运动的能量守恒关系——伯努利方程。在此期间,牛顿(I. Newton)、欧拉(L. Euler)、圣维南(Saint-Venant)、拉格朗日(Lagrange)、斯托克斯(G. G. Stokes)等为水力学奠定了比较完善的理论基础。20 世纪初,德国工程师普朗特(L. Prandtl)利用试验与理论分析相结合的手段提出了边界层理论,此后由普朗特的学生伯拉休斯(P. R. Blasius)等的不断研究完善,为现代水力学的发展奠定了基础。

20 世纪 60 年代以后,在迅速发展的科学技术推动下,国内外学者在水力学的各个领域进行了广泛而深入的研究,在紊流理论、边界层理论、高速水流、渗流、管道和明渠非恒定流、波浪、挟沙水流及水力相似原理等方面均取得了丰硕的成果。同时,激光测速试验技术、流体数值模拟技术的发展,使水力学应用领域有了长足的发展,并与其他学科相互渗透,形成了生物流体力学、电磁流体力学、环境流体力学等新学科。

第二节 液体的基本特征及其物理力学性质

水力学的研究对象是以水为代表的液体,而液体的运动规律既与液体外部的边界条件有关,也与液体本身的物理力学性质有关。

一、液体的基本特征

研究液体的物理力学性质,首先必须了解液体的基本特征。自然界物质的存在形式有固体、液体和气体三种状态。液体与固体的主要区别是:固体的内聚力很大,具有固定的形状,能承受一定的拉、压和剪切作用,不容易变形;而液体的内聚力比固体小,没有固定的形状,虽然能承受压力,却不能承受拉力,具有易流动性。液体与气体的主要区别是:气体的内聚力很小,总充满任何容器,故不能保持固定的形状与体积,很容易流动和被压缩;而液体不但能够保持一定的体积,还能形成自由表面,不易被压缩。

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。压缩性是气体和液体的主要区别;而流动性则是流体和固体的主要区别。

二、连续介质假设

从微观分子结构看,液体的分子之间是存在空隙的,是不连续的,所以其物理量的空间分布也是不连续的。但水力学只研究液体的机械运动,即液体分子“集体”宏观运动的平均特性,而并不关心液体分子的微观运动(常温情况下,水分子间距仅为 3×10^{-8} cm)。因此,在水力学研究中可以假设液体是由质点组成的毫无间隙地完全充满所占据空间的连续介质。这里“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。根据连续介质的概念,液流中的所有物理量(如质量、速度、压强等)都可以看成空间和时间的连续函数。在研究液体静止与运动时的物理量变化规律时,就可以方便地应用连续函数微积分方法进行分析研究。连续介质假设是由瑞士学者欧拉于 1753 年提出的,这是研究液流的重要理论基础。实践证明,基于连续介质假设的液流运动规律理论是与客观实际十分相符的。

综上所述,在水力学中液体的基本物理特征是:容易流动、不易压缩的连续介质。

三、液体的物理力学性质

外因是变化的条件,内因是变化的依据。由经典力学知,液体运动状态的改变是受外力作用的结果,而任何一种力的作用,都要通过液体内部自身的性质来实现,所以在研究液体运动规律之前,首先必须对液体的一些主要物理力学性质有所了解。

(一)惯性(质量与密度)

1. 惯性(Inertia)

液体与自然界其他所有物体一样,具有反抗改变原有运动状态的特性,即所谓惯性。当液体在外力作用下其运动状态发生改变时,由于液体惯性的存在,将对施力物体产生反抗改变原有运动状态的反作用力,这种反作用力就称为惯性力。

若液体的质量为 m ,加速度为 a ,则惯性力可表达为

$$F = -ma \quad (1-1)$$

式中负号表示惯性力的方向与物体的加速度方向相反。

2. 质量(Mass)

在物理学中,质量的定义在不同的情况下会有所不同,如衡量同种物质物体所含物质多少的物理量(物质质量)、惯性大小的度量(惯性质量)、引力大小的度量(引力质量)等。以上所提到的质量,即为惯性质量。惯性质量愈大,惯性也愈大,物体的原有运动状态愈难以改变。在后面将叙述的万有引力特性中,我们所提到的质量就是引力质量。在水力学中,把这些不同定义的质量,统称为质量。质量的单位为 g 或 kg。

3. 密度(Density)

液体单位体积内所具有的质量称为液体的密度,用 ρ 表示。对于质量为 m 、体积为 V 的均质液体,其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

密度的单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 。液体的密度会随温度和压强的变化而变化,但因这种变化很小,故在水力学中为计算方便,通常把水的密度视为常数,并采用蒸馏水在一个标准大气压下、温度为 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时的密度 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ 作为水的标准密度计算值。水银的密度通常采用 $13\,600\text{ kg}/\text{m}^3$ 。不同温度条件下水的密度见表 1-1。

表 1-1 不同温度条件下水的物理性质

温度($^\circ\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	动力黏度 μ ($10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$)	运动黏度 ν ($10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$)
0	999.9	1.781	1.785
5	1 000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.002	1.003
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.798	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

本书采用通用的国际单位制(SI),它的基本单位为米(m)、秒(s)、千克(kg),其他都是导出单位,如力的基本单位牛顿(N)就是导出单位。

(二)万有引力特性(重力)

1. 万有引力特性

物体之间所具有的相互吸引的性质,称为万有引力特性。由这种吸引所产生的引力称为万有引力。万有引力的存在总是企图改变物体的原有运动状态,而使两物体相互接近。

2. 重力(Gravity)

由于地球吸引而使物体受到的万有引力称为重力。在日常生活中,重力常被称为重量,用 G 表示。质量为 m 的液体,其重力为

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

式中 g 为重力加速度,重力加速度会随纬度和高度的变化而调整,但变化很小。国际计量委员会规定 $g = 9.806\,65\text{ m}/\text{s}^2$ 为标准重力加速度,但在水力学中,一般取重力加速度为 $g = 9.8\text{ m}/\text{s}^2$ 。

对均质液体,因质量 $m = \rho V$,故重力亦可表示为

$$G = \rho g V \quad (1-4)$$

实际上,因为物体随地球转动需要一定的向心力 $F_{\text{向}}$,且还会受到空气浮力 $F_{\text{浮}}$ 的作用。严格地说,物体的重力 G 并不等于地球对它的万有引力 $F_{\text{引}}$,但一般情况下可以忽略向心力与空气浮力的影响。

(三) 黏滞性(牛顿内摩擦定律与流变特性)

1. 黏滞性(Viscosity)

液体在运动状态下具有抵抗剪切变形能力的特性,称为液体的黏滞性,黏滞性也称为黏性。黏滞性是液体固有的物理属性,这种物理属性只有当液层之间存在着相对运动时才能显示出来。

下面分析液体沿固体平面边壁 A 作纵向(x 方向)平行直线流动,实测流速沿垂线分布如图 1-2(a)所示,运动过程中液体质点没有横向(y 方向)混掺,各液层之间互不干扰(这种液流称为“层流”,在第四章将对其作详细讨论)。图中所示的实际流速分布曲线表明:正是液体黏滞性的存在,使得靠近固体边壁处的液层流速较小,远离边壁处的液层流速较大;而紧贴边壁壁面上的液层质点的流速为零(理论上称此为黏附条件)。若距固体边壁为 y 处的流速为 u ,在相邻的 $y + dy$ 处的流速为 $u + du$,因两液层间存在流速差 du ,说明该两液层间存在着相对运动。这样,液层间就势必会成对地产生一种内摩擦力来抵抗其相对运动。下液层的流速小,对上层液体产生一个与液流方向相反起阻碍作用的内摩擦力;上液层的流速大,对下层液体产生一个与液流方向相同起拖动作用的内摩擦力,如图 1-2(b)所示。正因为这种内摩擦力是由于液体黏滞性的存在才发生的,故内摩擦力也称为黏滞力。

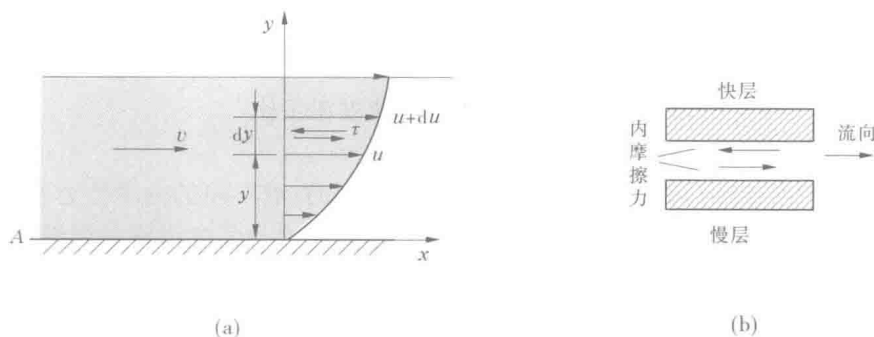


图 1-2

静止液体的黏滞性是显示不出来的。换句话说,静止液体是不存在内摩擦力的。可见,黏滞性是液体产生内摩擦力的根源,而相对运动则是液体产生内摩擦力的条件。

2. 牛顿内摩擦定律

1686 年,英国科学家牛顿通过试验观察分析,首先提出:两相邻液层接触面上所产生的内摩擦力 F (也称为黏滞切力)的大小,与两液层之间的流速差 du 和接触面积 A 成正比,与两液层之间的距离 dy 成反比,同时与液体的种类有关,可表达为

$$F \propto A \frac{du}{dy}$$