

全国高职高专水利水电类专业规划教材

工程水力学

者建伦 张春娟 余金凤 主编
张耀先 主审



黄河水利出版社

全国高职高专水利水电类专业规划教材

工 程 水 力 学

主 编	者建伦	张春娟	余金凤
副主编	谭志伟	陈明杰	陈旭彤
	徐文秀	邢菊香	
主 审	张耀先		

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书是全国高职高专水利水电类专业规划教材,是根据全国水利水电高职教研会制定的工程水力学课程教学大纲编写完成的。全书共分 11 章,内容包括:工程水力学概论,静水压力计算,水流运动的基本原理,水流型态与水头损失计算,管流水力计算,明渠恒定均匀流水力计算,明渠恒定非均匀流水力计算,泄水建筑物水力计算,泄水建筑物下游消能计算,渠系连接建筑物水力计算,渗流基础。各章配有例题、常用图表、技能训练题。

本书适用于水利工程、水文水资源工程、给水排水、水利工程监理、城市水利、港航、水土保持、水电站动力设备、水电站建筑、治河与防洪等专业,并可用于成人专科学校以及普通本科院校的高等职业技术学院同类专业教学,还可供水利水电工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程水力学/者建伦,张春娟,余金凤主编. —郑州:黄河水利出版社,2009.9

全国高职高专水利水电类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 80734 - 715 - 6

I. 工… II. ①者…②张…③余… III. 水工建筑物 - 水力学 - 高等学校:技术学校 - 教材 IV. TV135

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151924 号

组稿编辑:王路平 · 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhslwlp@163.com

马 翀

66026749

machong2006@126.com

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:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:18.75

字数:430 千字

印数:1—4 100

版次:2009 年 9 月第 1 版

印次:2009 年 9 月第 1 次印刷

定价:32.00 元

导读与解答

你好同学:

当你打开这本书时,会怎样想呢?喜欢从事水利工作吗?喜欢学习工程水力学吗?学习工程水力学有什么用啊?怎样学习工程水力学呢?这一系列的问题会不会一一涌入你的脑海,在这里编者与你共同探讨。

大家都知道,人第一要做自己喜欢的事,第二要喜欢自己做的事。大家都会首先选择自己喜欢的专业去学习,如果做不到而进入了自己不喜欢的专业,那也没什么了不起,就走第二步,这个世界上只有少数人在少数时间有幸能做自己喜欢的事,大多数人还是要学会并且要培养自己去喜欢自己所做的事。不仅是学习,即便是毕业后进入社会工作时,也不会任自己选择,只能是学会喜欢自己所从事的工作,不然,总是抱着一种低调的心态去工作,那样的一生你会觉得有意思吗?再谈谈学习的劲头,现在一般院校的同学,如果能拿出高考前一半的学习劲头来,老师足也、家长足也。“读书无用论”是一种浅薄的说法,不仅现在要批判,将来也要批判。读书是继承前人的智慧,开拓今人的智慧,不仅仅是像表面上看到的学得一点知识那样的简单,更重要的是通过不断的学习,使人的大脑得以训化而不断进化。现代人大脑要比遥远的早期人类大脑的重量重得多,这是不断学习导致大脑进化的结果。就一个人来讲,经过十几年的在校学习、训化,其大脑的发达程度和一个没有受过教育的人比较,不可同日而语。即使同样受过多年教育,但一个铆足了劲儿学习,一个只要求说得过去就行,结果也是天壤之别。所谓“天道酬勤”,耕种就会有收获。成功是一个多元函数,其中一个重要的变量就是“努力学习,不言放弃”。在校期间是人生的黄金时段,万不可用与事业无关的其他一些自觉浪漫、潇洒的事情去打发时间。既然我们进入了水利的大门,就无可选择地要学会喜欢学习水利类课程,尽可能多地学会几种职业技能,为将来进入社会做好铺垫。

学习工程水力学的用途:一是培养同学们的职业技能,如计算水对建筑物的压力,设计城镇给水排水管网,设计灌溉管、渠,进行泵站、电站的水力计算,虹吸管、渡槽、洞涵、消能的水力计算等;二是为专业及后续专业课如水工建筑物、给水排水、水文学、城市水务、水电站、港航、农业排灌等打下理论基础。同时,工程水力学也是水利类专升本、考取研究生的考试课程。

学习工程水力学的方法:课堂上认真听讲、做笔记,独立、认真、按时完成作业,浏览水力学精品课程网站。每章前面的“职业技能”是要求同学们掌握的实际水力计算技能。每章后的“本章考试内容”是考试复习提纲,涵盖了将来在工程中要进行的水力计算内容。

祝同学们学习圆满成功!

编者

2009年6月

前言

本书是根据《教育部、财政部关于实施国家示范性高等职业院校建设计划、加快高等职业教育改革与发展的意见》(教高[2006]14号)、《教育部关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》(教高[2006]16号)等文件精神,由全国水利水电高职教研会拟定教材编写规划,在中国水利教育协会指导下,由全国水利水电高职教研会组织编写的第二轮水利水电类专业规划教材。第二轮教材以学生能力培养为主线,具有鲜明的时代特点,体现出实用性、实践性、创新性的教材特色,是一套理论联系实际、教学面向生产的高职高专教育精品规划教材。

本书在编写过程中力求概念清晰、深入浅出、联系实际,理论上以适当够用为度,不求学科的系统性和完整性。力求结合专业,突出实用,体现高职高专教育的特色。在传承经典、成熟的理论基础上,编入了新规范、新技术、新材料。

本书特色如下:

(1)均采用我国《水利技术标准汇编》和《室外给水设计规范》(GB 50013—2006)中推荐的计算方法、公式,使学生毕业后就能直接参与工程水力计算。

(2)每章前都设有“职业技能”,目的是让学生清楚该章应该学会的职业技能是什么。每章后面都设有“本章考试内容”,包括记公式、会计算、记概念。明确具体地告诉学生每章应记住哪些公式和概念,避免了通常使用的“掌握、理解”等比较笼统的说法。

(3)每章都配有卡通画片,用卡通人物、动物的插话讲述重要的需要记忆的知识点,以增强学生对知识点的记忆和兴趣。

考虑到高职高专的新设专业和各学院课程教学学时的差异,带*号章节为选讲内容。

本书编写人员及分工如下:杨凌职业技术学院张春娟(第一章),山西水利职业技术学院徐文秀(第二章);黑龙江大学职业技术学院谭志伟(第三章),山东水利职业学院者建伦(第四、五章),安徽水利水电职业技术学院陈明杰(第五章),黑龙江农垦林业职业技术学院张永伟(第六章),浙江同济科技职业学院陈旭彤(第七章),广西水利电力职业技术学院余金凤(第八章),内蒙古机电职业技术学院邢菊香(第九章),北京农业职业学院杨林林(第十章),长江工程职业技术学院陈一华(第十一章)。

本书由者建伦、张春娟、余金凤担任主编,者建伦负责全书统稿,由谭志伟、陈明杰、陈旭彤、徐文秀、邢菊香担任副主编,由黄河水利职业技术学院张耀先教授主审。

对在教材出版工作中各院校领导、专家以及黄河水利出版社所给予的支持、帮助表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2009年6月

目 录

前 言

导读与解答

第一章 工程水力学概论(2 学时)	(1)
第一节 工程水力学的定义、用途、简史	(1)
第二节 液体的物理力学性质	(3)
第三节 连续介质和理想液体的概念	(8)
第四节 作用在液体上的力	(9)
第五节 工程水力学研究方法	(9)
本章考试内容	(10)
技能训练题	(11)
第二章 静水压力计算(10 学时)	(12)
第一节 静水压强及其特性	(12)
第二节 静水压强的基本规律	(14)
第三节 静水压强的表示方法及测算	(17)
第四节 作用于平面壁上的静水总压力	(25)
第五节 作用于曲面壁上的静水总压力	(30)
第六节 浮力、浮体的平衡与稳定	(33)
本章考试内容	(36)
技能训练题	(37)
第三章 水流运动的基本原理(8 学时)	(41)
第一节 描述水流运动的两种方法	(41)
第二节 恒定总流连续性方程	(47)
第三节 恒定总流的能量方程	(49)
第四节 能量方程的应用	(54)
第五节 恒定总流的动量方程	(62)
本章考试内容	(67)
技能训练题	(67)
第四章 水流型态与水头损失计算(10 学时)	(70)
第一节 水头损失根源、分类及边界影响	(70)
第二节 水流两流态及 h_f 随 v 的变化规律	(73)
第三节 均匀流层流的切应力和流速分布规律	(76)
第四节 均匀流紊流过水断面垂线上的切应力及流速分布	(79)
第五节 沿程水头损失分析与计算	(82)

第六节 局部水头损失的分析与计算	(91)
第七节 绕流阻力与升力	(95)
本章考试内容	(98)
技能训练题	(98)
第五章 管流水力计算(10 学时)	(100)
第一节 概 述	(100)
第二节 简单管道的水力计算	(101)
第三节 复杂管路水力计算	(117)
* 第四节 压力管道中的水击	(129)
本章考试内容	(134)
技能训练题	(134)
第六章 明渠恒定均匀流水力计算(6 学时)	(138)
第一节 概 述	(138)
第二节 明渠均匀流的特性及其产生条件	(141)
第三节 明渠均匀流的计算公式及有关问题	(142)
第四节 明渠水力计算类型	(152)
本章考试内容	(158)
技能训练题	(158)
第七章 明渠恒定非均匀流水力计算(12 学时)	(161)
第一节 概 述	(161)
第二节 明渠非均匀流的一些基本概念	(161)
第三节 缓流、急流的转换现象——水跌与水跃	(168)
第四节 明渠恒定非均匀渐变流基本方程	(172)
第五节 棱柱体渠道恒定非均匀渐变流水面曲线定性分析	(174)
第六节 明渠恒定非均匀渐变流水面线计算	(180)
第七节 弯道水流简介	(186)
本章考试内容	(188)
技能训练题	(189)
第八章 泄水建筑物的水力计算(8 学时)	(192)
第一节 概 述	(192)
第二节 孔口与管嘴出流水力计算	(193)
第三节 堰流水力计算	(198)
第四节 闸孔出流的水力计算	(215)
本章考试内容	(222)
技能训练题	(222)
* 第九章 泄水建筑物下游水流消能计算(6 学时)	(225)
第一节 概 述	(225)
第二节 底流式衔接与消能的水力计算	(227)

第三节 消力池水力计算·····	(232)
本章考试内容·····	(246)
技能训练题·····	(246)
* 第十章 渠系连接建筑物的水力计算(4 学时)·····	(248)
第一节 明槽渐变段的水力计算·····	(248)
第二节 渡槽的水力计算·····	(252)
第三节 跌水的水力计算·····	(256)
本章考试内容·····	(265)
技能训练题·····	(265)
第十一章 渗流基础(8 学时)·····	(267)
第一节 渗流基本概念·····	(267)
第二节 达西定律·····	(270)
第三节 地下河槽中的无压恒定均匀渗流·····	(272)
第四节 地下河槽中的无压恒定非均匀渐变流·····	(273)
第五节 地下河槽中的恒定非均匀渐变渗流浸润曲线·····	(275)
第六节 普通井及井群的渗流计算·····	(278)
第七节 水平不透水层上均质土坝的渗流计算·····	(282)
本章考试内容·····	(284)
技能训练题·····	(284)
附录 I 梯形和矩形断面明渠正常水深求解图·····	(286)
附录 II 梯形和矩形断面明渠底宽求解图·····	(287)
附录 III 梯形、矩形、圆形断面明槽临界水深求解图·····	(288)
附录 IV 建筑物下游河槽为矩形时收缩断面水深及其共轭水深求解图·····	(289)
参考文献·····	(290)

第一章 工程水力学概论

职业技能

会测定与计算液体的密度、容重;清楚液体的黏滞性、理想液体、表面力及质量力的概念。

第一节 工程水力学的定义、用途、简史

一、工程水力学的定义、用途

工程水力学是研究液体的机械运动规律及应用这些规律解决工程实际问题的一门科学。工程水力学的研究对象是以水为代表的液体,其基本原理不仅适用于水,也适用于与水的性质相似的液体(油、汞、酒精等)和可以忽略压缩性(即流速小于音速)的气体。

工程水力学的用途是用其理论解决水利工程中的实际问题,书中第一~四章是理论,第五~十一章是利用理论解决工程实际问题,常见工程水力学问题以水利枢纽工程为例予以说明。图 1-1 为水利枢纽布置示意图,其建筑包括混凝土坝(见图 1-2)、土坝(见图 1-3)、泄洪闸(见图 1-4)、发电站、船闸等。对于挡水坝,为了坝的安全,须计算水对坝的作用力、水通过坝基的渗流量、溢洪道流量及尺寸,以及防止闸、坝后泄流冲刷河道的消能计算,闸门尺寸及过流能力计算,泄洪隧洞尺寸及过流能力计算,坝前水面曲线计算(以估算建坝后水库的淹没范围)。其他工程问题还有水池、水箱、水管、船舶、液体中浮体和潜体等的压力计算,管流、明渠流、堰流、孔口流、射流、流速、流量、水深等的水力计算,以及给水排水、道路桥涵、农田排灌、水力发电、防洪排涝、河道整治、水资源工程、环境保护工程、港口工程、航运、交通、石油化工中的水力计算等问题。现代工程水力学学科衍生了一些新的分支,如研究河床演变问题的动床水力学,在计算机基础上产生出的计算水力学,研究环保问题产生出的环境水力学,以及生态水力学、随机水力学等。

工程水力学研究的水利工程实际问题基本可归为以下几个方面:①计算水流对建筑物的作用力;②计算建筑物的输水能力及尺寸;③水流机械能的利用和损失;④计算河渠水面曲线;⑤建筑物下游水流衔接与消能;⑥建筑物的渗流。此外,还有一些特殊水力学问题,如管、渠非恒定流,高速水流中的空蚀、振动、掺气,挟沙水流,波浪运动等。

学习工程水力学的目的:一是培养同学们的职业技能,如计算水对建筑物的压力,设计城镇给水排水管网,设计灌溉管、渠,进行泵站、电站的水力计算,虹吸管、渡槽、洞涵、消能的水力计算等,为走向工作岗位奠定坚实的业务基础;二是为专业及后续专业课程如水工建筑物、给水排水、水文学、城市水务、水电站、港航、农业排

一定要明确学习工程水力学的目的!



灌等打下理论基础。同时,工程水力学也是专升本、考取研究生的考试课程。

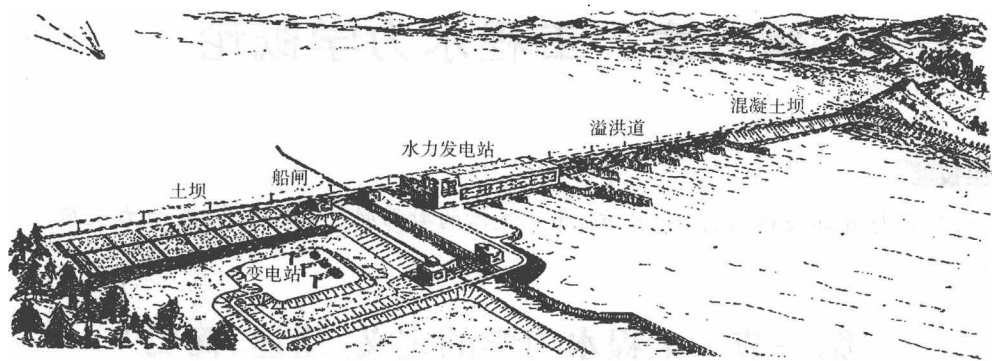


图 1-1 三峡水利枢纽

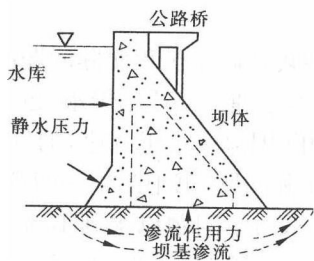


图 1-2 混凝土坝

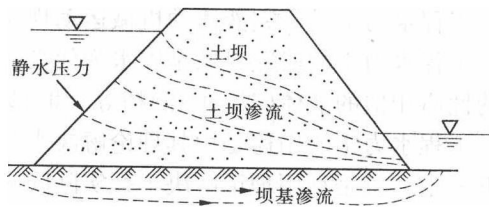


图 1-3 土坝

二、工程水力学发展简史

4 000 年前的大禹治水就已表现出古人的治水智慧。公元前 400 余年,中国的墨翟在《墨经》中已有了浮力与所排液体体积之间关系的设想。公元前 250 年,阿基米德在《论浮体》中阐明了浮体和潜体计算方法。15 世纪,意大利人达·芬奇在实验水力学方面取得进展。1586 年德国数学家斯蒂文提出水静力学方程。15 世纪以前,工程水力学都被认为是一种技艺,而未发展成为一门科学。17 世纪中叶,法国帕斯卡提出液压等值传递的帕斯卡原理。至此,水静力学已初具雏形。工程水力学作为学科而诞生始于水静力学。

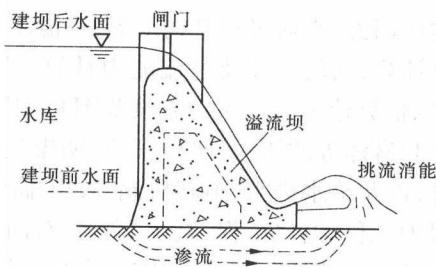


图 1-4 溢流坝

18 世纪中叶,水力学才成为一门独立学科。欧拉和伯努利是这一领域杰出的先驱者。18 世纪末和整个 19 世纪形成了两个相互独立的研究方向:一是运用数学分析的理论流体力学;二是依靠试验的应用水力学。开尔文、瑞利、斯托克斯、兰姆等人的工作使理论水平达到相当的高度,而谢才、达西、巴赞、弗朗西斯、曼宁等人则在应用水力学方面进行了大量的试验研究,提出了各种实用的经验公式。

19 世纪末,流体力学有了新发展,如雷诺理论及试验研究,雷诺的因次分析,弗劳德

的船舶模型试验,空气动力学的研究等。

20 世纪初的重要突破是普朗特的边界层理论,它把无黏性理论和黏性理论在边界层概念的基础上联系起来。20 世纪蓬勃发展的经济建设提出了越来越复杂的水力学问题:高浓度泥沙河流的治理;高水头水力发电的开发;输油干管的敷设;采油平台的建造;河流、湖泊、海港污染的防治等。水力学的研究方向不断拓展,现代水力学课程已由水利类专业重要的专业基础课拓展为土木工程、环境工程、动力机械、生物化学,以至人才流、物资流、资金流、信息流等专业或领域的重要专业基础课,所有与流体或与流动有关的问题,都需用到工程水力学的基本理论。

第二节 液体的物理力学性质

自然界的物质有三种存在形式,即固体、液体和气体。固体分子间距小,内聚力大,所以能保持固定形状和体积,能承受拉力、压力和剪切力。液体与固体相比较,其分子间距大,内聚力小,易发生变形或流动,不能自身保持固定形状。气体与液体相比,气体分子间距更大,内聚力更小,可以任意扩散到其所占据的那部分空间,极易膨胀和压缩。

液体的主要物理力学性质包括惯性、万有引力特性、黏滞性、压缩性、表面张力特性和汽化压强。

一、惯性

液体与自然界其他物体一样具有惯性。惯性是物体所具有的反抗改变其原有运动状态的一种物理力学性质,其大小可以用质量来量度。质量越大的物体,惯性越大,反抗改变其原有运动状态的能力也就越强。质量为 m 、加速度为 a 的物体,其惯性力为

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

负号表示惯性力的方向与加速度的方向相反。单位体积液体的质量称为密度,即

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

式中 ρ ——液体的密度, kg/m^3 ;

m ——液体的质量, kg ;

V ——液体的体积, m^3 。

因为液体的体积随温度和压强的变化而变化,故其密度也随温度和压强的变化而变化,但变化很小,实用中可看做常数。工程中常采用温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压强为一个大气压时水的密度值,其值 $\rho = 1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ 。不同温度条件下水的密度见表 1-1。

本书采用我国推荐使用的国际单位制(SI),它的基本单位为:长度 m ,时间 s ,质量 kg ,其他是导出单位。例如,力的单位为牛顿(N),1 牛顿力的定义为:使质量为 1 千克的物体得到 $1\text{ m}/\text{s}^2$ 加速度的力,即 $1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$,“N”就是由基本单位相乘而得出的导出单位。

表 1-1 不同温度条件下水的物理性质(1 个标准大气压)

温度 (℃)	容重 γ (kN/m ³)	密度 ρ (kg/m ³)	动力黏滞 系数 μ ($\times 10^{-3}$ Pa·s)	运动黏滞 系数 ν ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	体积压缩 系数 β ($\times 10^{-9}$ /Pa)	体积弹性 系数 K ($\times 10^9$ Pa)	表面张力 系数 σ (N/m)	汽化 压强 (kN/m ²)
0	9.805	999.9	1.781	1.785	0.495	2.02	0.075 6	0.60
5	9.807	1 000.0	1.518	1.519	0.485	2.06	0.074 9	0.87
10	9.804	999.7	1.306	1.306	0.476	2.10	0.074 2	1.18
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.465	2.15	0.073 5	1.70
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.459	2.18	0.072 8	2.34
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.450	2.22	0.072 0	3.17
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.444	2.25	0.071 2	4.24
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.439	2.28	0.069 6	7.38
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.437	2.29	0.067 9	12.16
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.439	2.28	0.066 2	19.91
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.444	2.25	0.064 4	31.16
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.455	2.20	0.062 6	47.34
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.467	2.14	0.060 8	70.10
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.483	2.07	0.058 9	101.33

二、万有引力特性

万有引力特性是指任何物体之间具有相互吸引力的性质,其吸引力称为万有引力。地球对物体的吸引力称为重力(或重量),对于质量为 m 的液体,其重量为

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

式中 G 的单位为 N 或 kN; g 为重力加速度,单位为 m/s²,一般取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

单位体积液体的重量称为容重,即

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

式中 γ 的单位为 N/m³ 或 kN/m³。工程水力学中,容重有时也称为重度或重率。

将式(1-3)代入式(1-4),可得到容重与密度的关系为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-5)$$

液体的容重与密度一样随温度和压强的变化而变化,但变化量很小。工程中常将水的容重视为常数。采用温度为 4℃、压强为一个大气压时水的容重: $\gamma = 9\,800 \text{ N/m}^3$ 或 $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$ 。不同温度条件下水的容重见表 1-1。

【例 1-1】 已知某液体的体积为 5 m³,密度为 13 600 kg/m³,求该液体的质量、重量和容重。

解:

液体的质量

$$m = \rho V = 13\,600 \times 5 = 68\,000 \text{ (kg)}$$

液体的重量

$$G = mg = 68\,000 \times 9.8 = 666\,400 \text{ (N)} = 666.4 \text{ kN}$$

液体的容重

$$\gamma = \rho g = 13\,600 \times 9.8 = 133\,280 \text{ (N/m}^3\text{)} = 133.28 \text{ kN/m}^3$$

三、黏滯性

(一) 黏滯性

摩擦力是自然界中普遍存在的物理现象。两块具有不同运动速度叠放在一起的木板,在其接触面上存在着阻碍两木板相对运动的摩擦力,同样,具有不同流速的相邻两流层(即两层水流),在其接触面上也存在着阻碍两流层做相对运动的摩擦力(见图 1-5(c)),工程水力学把液体中存在着阻碍相邻两流层做相对运动的摩擦力这一特性称做液体的黏滯性。其摩擦力称为液体的内摩擦力或摩擦阻力。单位面积上的摩擦阻力称为黏滯切应力或切应力,以 τ 表示。自然界中所有的液体都有不同程度的黏滯性,黏滯性是液体的一种固有物理属性,

如果忽略液体的黏滯性,则各流层就无流速差,因而沿液流横断面垂线上的流速分布均相同,如图 1-5(a)所示(图中箭杆表示流速大小方向);实际液流各流层之间有切应力,因而各流层有流速差,经测试,其断面垂线上的流速分布如图 1-5(b)所示,流速由渠底到水面沿 y 轴逐渐增大,紧靠固体边界有一层极薄水层被吸附在壁面上不流动,该水层通过黏滯性切应力阻碍其上面水层的流动,使其流速变小,该流动水层又阻碍其上面水层的流动,如此逐层影响上去。离固体边界近, τ 大流速小,离固体边界远, τ 小流速大,因此形成了图 1-5(b)所示的流速分布规律。

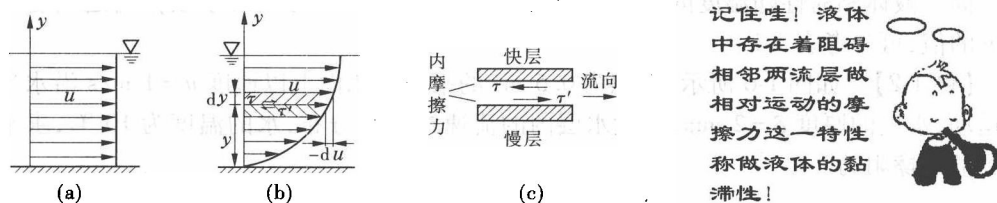


图 1-5 液流横断面垂线上的流速分布图、切应力图

液体要保持流动,就要克服在流动过程中的摩擦阻力而做功,因此消耗液流机械能,这种消耗的机械能称为液流的能量损失。所以,黏滯性是引起液体能量损失的根源。

(二) 牛顿内摩擦定律

1686 年牛顿根据试验提出液体内摩擦定律即牛顿内摩擦定律:相邻两流层接触面上产生的内摩擦力 T 与流层间接触面面积 A 和流速梯度 $\frac{du}{dy}$ 的乘积成正比,并与液体的种类、性质有关,可表示为

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

单位面积上的内摩擦力称为黏滯切应力或切应力,用 τ 表示,则

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

式中 μ ——动力黏滞系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度, 反映流速沿 y 方向的变化程度, $1/\text{s}$ 。

式(1-7)表明, 液体的切应力 τ 随 μ 和 $\frac{du}{dy}$ 增大、减小。

τ 随 $\frac{du}{dy}$ 按直线规律分布的液体称为牛顿流体, 如水、酒精、苯、油类、水银、空气等; 否则为非牛顿流体, 如泥浆、血浆、牛奶、颜料、油漆、淀粉糊等。内摩擦定律只适用于牛顿流体。

动力黏滞系数 μ 是液体的物理属性, 它反映了液体黏滞性的大小。 μ 值大, 黏滞性大; μ 值小, 黏滞性小。 μ 的大小与液体的种类和温度有关。不同温度条件下的 μ 值见表 1-1。

液体的黏滞性还可以用另一种形式的黏滞性系数来度量, 即运动黏滞系数 ν

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

ν 的单位为 m^2/s 或 cm^2/s , 大小也与液体的种类和温度有关。不同温度条件下的 ν 值见表 1-1。

设水的温度为 t , 以 $^{\circ}\text{C}$ 计, 则水的运动黏滞系数可用如下经验公式计算

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

同一液体黏滞性随温度的升高而降低, 不同温度时的动力黏滞系数 μ 与运动黏滞系数 ν 的值, 可参考表 1-1。

【例 1-2】如图 1-6 所示, 面积为 0.5 m^2 的平板在水面上以速度 $u = 1 \text{ m/s}$ 沿水平方向运动, 水层的厚度 $\delta = 2 \text{ mm}$, 假设水层内的流速按直线分布, 水的温度为 10°C , 求平板受到的摩擦阻力。

解: 因为水层内的流速按直线分布, 则流速梯度 $\frac{du}{dy} = \frac{1000 \text{ mm/s}}{2 \text{ mm}} = 500/\text{s}$, 查表 1-1, 动力黏滞系数 $\mu = 1.306 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。根据牛顿内摩擦定律, 平板所受的摩擦阻力为

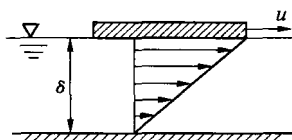


图 1-6

$$T = \mu A \frac{du}{dy} = 1.306 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 500 = 0.259 (\text{N})$$

四、压缩性

液体受压后体积缩小, 压力撤除后又恢复原状的性质称为液体的压缩性或弹性, 压缩性的大小可用体积压缩系数 β 或体积弹性系数 K 来表示。 β 、 K 随温度变化, 但变化较小, 其值见表 1-1。设液体原体积为 V , 当所受压强的增值为 dp 时, 体积压缩值为 dV , 则体积压缩系数为

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} \quad (1-10)$$

体积压缩系数 β 值越大,表示越易压缩。由于液体的体积总是随压强的增大而减小,所以 dV 与 dp 的符号总是相反的,为使 β 为正值,式(1-10)右端取负号。 β 的单位为 m^2/N 或 $1/Pa$ 。

体积压缩系数的倒数称为体积弹性系数,用 K 表示为

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

K 的单位为 Pa , K 值越大,表明液体越不易压缩。

液体的体积压缩系数 β 和体积弹性系数 K 与液体的种类和温度有关,水在不同温度条件下的 β 值和 K 值见表 1-1。在普通水温情况下,压强每增加一个标准大气压,水的体积比原体积缩小约 $1/21\ 000$,可见水的压缩性很小。一般工程认为液体不可压缩。某些特殊问题,如水击问题(见第五章)要考虑水的压缩性。

五、表面张力特性

液体表面张力是指液体表面的液体分子一侧受液体分子的引力,另一侧受其他介质的引力,因两侧引力不同,液体分子受到向密度大介质一侧的拉力,这种拉力称为表面张力。表面张力使得液体表面形成拉紧收缩的趋势。液体表面的这种特性,称为表面张力特性。表面张力不仅存在于液体的自由表面上,也存在于密度不同的两种液体的接触面上。

表面张力的大小可以用液体表面上单位长度所受的张力即表面张力系数 σ 来表示, σ 随温度、液体种类、液体表面接触情况而变化, σ 值见表 1-1。

工程中接触到的水面一般较大,表面张力较小,其影响可以忽略不计。只在小尺寸情况下,如研究微小水滴的形成与运动、小尺度水力模型中的水流、水舌较薄而且曲率较大的堰流、细管中的水或土壤空隙中水的运动等,必须考虑表面张力的影响。

水力学实验室中常使用盛有水或水银的细玻璃管作测压计,由于其直径较小,液体表面张力的影响较明显,如图 1-7 所示,水的引力小于管壁的引力,靠近管壁的水分子受到的管壁的引力大于其内侧水分子的引力,使水分子沿管壁上移,拉动细管内液面形成下凹、液体上升。反之,水银引力大于管壁引力,表面张力将使细管内液面上凸、液体下降。这种现象也称为毛细管现象。

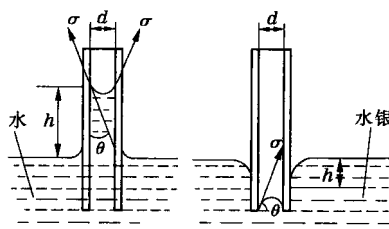


图 1-7

若以 θ 表示液面与固体壁面的接触角,沿管壁圆周上表面张力的垂直分力应与升高或降低液柱的重量相等,可得毛细管升、降的液柱高度 $h = 4\sigma \cos\theta / \gamma d$ 。一般情况下,水与玻璃的接触角 $\theta \approx 0^\circ$,水银与玻璃的接触角 $\theta \approx 139^\circ$,这时玻璃管中水面高出容器水面的高度 h 为

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

水银表面的降低高度为

$$h = \frac{10.15}{d} \quad (1-13)$$

式(1-12)、式(1-13)中, d 为玻璃管的内径, d 和 h 均以 mm 计。为了减小毛细管作用引起的压强量测的误差, 测压管的内径不宜小于 10 mm。

六、汽化压强

物质从液态变为气态称为汽化, 其逆过程即气态变为液态称为凝结。在任何温度下汽化和凝结都同时发生, 当在一定温度下, 汽化量与凝结量达到同样多, 不再随持续进行的汽化和凝结而改变时, 其液面的蒸汽达到饱和, 称为饱和蒸汽, 而压强称为饱和蒸汽压强或汽化压强。此时的液面及液体内部会逸出好多气泡(即沸腾), 此时的温度称为沸点。汽化压强值随温度、液体种类而变化。液体的汽化压强随温度的升、降而增大、减小, 其值见表 1-1。

当水面压强为一个大气压、温度为 100 °C 时, 水会沸腾。随着液面压强的降低, 液体汽化压强会减小, 沸点降低。青藏高原上气压低, 温度 84 ~ 87 °C 水就会沸腾, 就是这个原因。水利工程中, 水流也会因局部区域压强降低至汽化压强, 水流内部释放出大量气泡, 这种现象是“冷沸”, 也称为空化。空化破坏了水流的连续性, 同时, 若有大量气泡的水体流动到压强较高区域, 气泡会迅速溃灭并产生极大的瞬时冲击力, 可以造成建筑物表面严重破坏。

上面我们讨论了液体的六个主要物理力学性质, 它们都不同程度地影响着液体的运动, 其中惯性、万有引力特性、黏滞性对水流运动起着主要作用, 压缩性、表面张力特性和汽化压强只对某些特殊的水流运动产生影响。

第三节 连续介质和理想液体的概念

一、连续介质的概念

现代物理研究指出, 常温下每立方厘米水中约含有 3×10^{22} 个水分子, 相邻分子间距离约为 3×10^{-8} cm, 可见分子间距离相当微小, 在很小的体积中包含有难以计数的分子。

工程水力学只需研究水流的宏观运动规律, 不需研究其微观运动。因此, 1753 年瑞士学者欧拉(Euler)提出了连续介质概念: 忽略水分子的微观运动及其间隙, 将液体视为一种连续充满其所占空间毫无空隙的连续体。工程水力学所研究的即为这种液体。

连续介质概念为流体力学的发展起到了巨大作用。液流中的一切物理量(如速度、压强、密度等)都可以视为空间坐标和时间的连续函数, 这样, 在研究液体运动规律时, 就可以利用连续函数的分析方法。长期的生产和科学试验表明, 利用连续介质概念所得出的液体运动规律的基本理论符合客观实际。

在连续介质概念基础上,工程中还认为液体是均质的,液体质点的物理性质在液体内各部分和各方向都是相同的,即液体具有均质等向性。

二、理想液体的概念

一般的水利工程不考虑液体的压缩性、表面张力特性和汽化压强,考虑液体的黏滞性,但在研究液体运动规律时黏滞性会使问题变得复杂难解。所以,研究中,可以先忽略液体的黏滞性,即液体的黏滞系数 $\mu=0$,这种忽略黏滞性的液体称为理想液体。先分析理想液体的运动规律,再根据实际情况对液体黏滞性的影响进行修正,得到实际液体的运动规律。这是工程水力学的一个重要研究方法。

第四节 作用在液体上的力

液体运动状态的改变是力的作用结果。按作用方式,力可分为表面力和质量力两大类。

一、表面力

作用在液体表面上,大小与受作用的表面积成比例的力称为表面力。如固体边界与液体之间的摩擦力,边界对液体的反作用力,一部分液体对相邻的另一部分液体在接触面上的水压力等。表面力又可以分为垂直于作用面的压力和平行于作用面的切力。单位面积上的压力称为压强(或压应力),单位面积上的切力称为切应力。

二、质量力

质量力是作用在每个液体质点上,其大小与液体的质量成比例的力。如重力、惯性力都属于质量力。在均质液体中质量与体积成正比,故质量力又可以称为体积力。

单位质量液体所受到的质量力,称为单位质量力,以符号 f 表示。质量为 m 的均质液体所受的总质量力为 F ,则单位质量力为

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

若总质量力 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 在相应坐标轴上的投影分量 X 、 Y 、 Z 可表示为

$$X = \frac{F_x}{m}, \quad Y = \frac{F_y}{m}, \quad Z = \frac{F_z}{m} \quad (1-15)$$

单位质量力与加速度的单位相同,为米/秒²(m/s²)。

第五节 工程水力学的研究方法

研究工程水力学有三种最基本的方法,即理论分析、试验研究、数值模拟和数值计算。

一、理论分析

应用数学、物理中的理论研究液体的运动及作用在液体上的力,建立水流机械运动的