

全国水利行业规划教材

高等学校水利类专业教学指导委员会等 共同组织编审

Heliu Donglixue 河流动力学

(第3版)

(港口航道与海岸工程专业)

主编 吴玲莉

主审 张 玮

人民交通出版社股份有限公司

北京

内 容 提 要

本教材为全国水利行业规划教材,系统地阐述泥沙运动力学和河道演变的基本原理,并结合工程实际介绍了一些新的研究进展。全书分为八章,内容包括:绪论、水流的紊动、泥沙特性、推移质运动、悬移质运动、异重流、河床演变、潮汐河口演变。

本书可作为港口航道工程、海岸工程、水利工程、环境水利、地质地理及市政工程等专业的本科生教材,也可以供相关专业的科研、教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流动力学/吴玲莉主编.—3版.—北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.12

ISBN 978-7-114-16085-1

I. ①河… II. ①吴… III. ①河流—流体动力学—高等学校—教材 IV. ①TV143

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第278365号

全国水利行业规划教材

书 名:河流动力学(第3版)

著 作 者:吴玲莉

责任编辑:黄兴娜

责任校对:赵媛媛

责任印制:刘高彤

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.chinasybook.com>

销售电话:(010)64981400,59757915

总 经 销:北京交实文化发展有限公司

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:14

字 数:305千

版 次:2020年1月 第3版

印 次:2021年9月 第2次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-16085-1

印 数:1001~2000册

定 价:50.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

港口航道与海岸工程专业建设指导组 教材编审分委员会名单

组 长：郑金海(河海大学)

副组长：宋向群(大连理工大学)

周世良(重庆交通大学)

王元战(天津大学)

赵利平(长沙理工大学)

成 员:(按姓氏笔画排序)

王二平(华北水利水电大学)

刘月琴(华南理工大学)

刘曙光(同济大学)

何文社(兰州交通大学)

邹欣庆(南京大学)

张 华(华北电力大学)

陈一梅(东南大学)

陈 刚(西安理工大学)

桂劲松(大连海洋大学)

黄才安(扬州大学)

喻国良(上海交通大学)

王志东(江苏科技大学)

刘文白(上海海事大学)

孙志林(浙江大学)

余锡平(清华大学)

张小峰(武汉大学)

张洪雨(哈尔滨工程大学)

陈子燊(中山大学)

拾 兵(中国海洋大学)

郭红民(三峡大学)

董志勇(浙江工业大学)

秘 书：张 蔚(河海大学)

序

随着全球经济发展和国家战略深化,近年来港口航道与海岸工程领域的重点逐渐向内河水运开发、远岸岛礁建设、绿色低碳建养、修复加固技术等方向发展,并积极拓展近海可再生能源利用工程方向,这对港口航道与海岸工程专业的学生培养也提出了新的要求。同时,在教育部高教司和中国工程教育认证协会的领导和组织下,从2012年到2015年,教育部高等学校水利类专业教学指导委员会港口航道与海岸工程专业建设督导组先后对港口航道与海岸工程专业的核心知识领域、专业认证补充标准、教学质量国家标准等进行了修订。

为了便于在新形势下各相关高校组织教学,教育部高等学校水利类专业教学指导委员会组织编写出版港口航道与海岸工程专业“全国水利行业规划教材”。为了保证教材质量,我们通过多次专业建设督导组会议讨论,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对教材的选题及其主编、主审和教材编写大纲进行了严格把关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好,我们还成立了教材编审委员会,对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督。

许多人为本套教材建设作出了许多努力,付出了许多心血。但是,由于参照新的教学质量国家标准组织教学还需要通过实践不断总结提高,加之一些教材是第一次编写,因此这套教材一定会有各种不足与缺点,恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材,以利于教、便于学,更希望师生们对此提出建议和积极参与。

教育部高等学校水利类专业教学指导委员会
港口航道与海岸工程专业建设督导组
2015年9月

前 言

本书是在2013年版《河流动力学》(第二版)的基础上修订而成。随着互联网技术的发达和普及,学习者的学习方式也略有改变,本书从学习使用的角度出发,增加了二维码获得学习资料的功能。为了帮助读者灵活的掌握和运用书中基本概念与方法,增加了计算例题和工程案例的内容,并对书中部分章节进行了调整和修订。同时,这一期间,很多与河流泥沙相关的实际工程问题被成功解决,研究成果不断更新,本学科的专业知识在应用中也得到了进一步的验证和提高。因此在原版的基础上,汲取大家的意见和相关研究工作的进展,对第二版内容进行了补充和完善。

由于第二版教材整体上已适合港口航道与海岸工程本科生的知识结构需求,故本版教材只对部分内容进行了调整和补充。主要体现在:第一章重新阐述了河流动力学的主要研究内容,更新了学科发展简史和工程应用的介绍;第二章第三节增加了对数流速分布公式的推导,删去了“边壁粗糙度对流速分布的影响”;第三章增加了第一节“河流泥沙来源”,并对第二节和第三节的顺序做了调整;第四章增加了床面形态的判别内容;第五章作了部分修改和调整,扩充了扩散方程的理论推导;第七章第二节增加了河型成因的分析及判别,增加了第三节“山区河流的河床演变”。此外,每一章都增加了二维码获得教材中重要知识点补充视频的功能,并增加了计算例题和工程案例的内容。

本书由多所高等院校教师合作编写而成,由吴玲莉担任主编。全书共分为八章,其中第一章、第五章由河海大学吴玲莉编写,第二章、第六章由东南大学徐宿东编写,第三章、第八章由同济大学刘曙光、钟桂辉、娄厦编写,第四章、第七章由扬州大学黄才安编写。本书编写过程中引用了有关院校、研究单位编写的教材和成果,以及大量国内外文献,在此一并表示谢意。

本书由河海大学张玮教授担任主审,其在审稿过程中提出了很多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

本书在正式出版之前,已经在课堂上讲授多次,并根据实际授课经验进行了多次修改,但是书中仍难免存在疏漏瑕疵,敬请读者批评指正。

编 者
2019年8月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 主要研究内容	1
第二节 学科发展简史	1
第三节 工程中的应用	3
第四节 主要研究方法	4
第五节 学科特点和学习方法	5
思考题	6
参考文献	6
第二章 水流的紊动	8
第一节 紊流的概念	8
第二节 紊流的经典理论	12
第三节 紊流的流速分布	16
思考题	23
参考文献	23
第三章 泥沙特性	25
第一节 河流泥沙来源	25
第二节 泥沙的几何特性	29
第三节 泥沙的重力特性	33
第四节 泥沙的物理化学特性	36
第五节 泥沙的水力特性	39
思考题	48
参考文献	49
第四章 推移质运动	51
第一节 泥沙运动的形式	51
第二节 泥沙的起动	53
第三节 沙波及床面形态判别	63
第四节 冲积河流的阻力	70
第五节 推移质输沙率	77
思考题	89
参考文献	90
第五章 悬移质运动	92
第一节 床沙质与冲泻质	92

第二节	泥沙扩散方程	94
第三节	含沙量的垂线分布	98
第四节	悬移质输沙率	107
第五节	床沙质总输沙率	115
思考题	.....	121
参考文献	.....	122
第六章	异重流	124
第一节	异重流的一般概念	124
第二节	异重流的基本方程	128
第三节	河渠异重流	130
思考题	.....	138
参考文献	.....	138
第七章	河床演变	140
第一节	河床演变的基本概念	140
第二节	河流类型、成因及判别	143
第三节	山区河流的河床演变	148
第四节	平原河流的河床演变	150
第五节	河相关系	166
思考题	.....	175
参考文献	.....	175
第八章	潮汐河口演变	178
第一节	潮汐河口的分段和分类	178
第二节	潮汐河口区的水流特性	181
第三节	潮汐河口区泥沙运动特点	190
第四节	潮汐河口区的河床演变	198
思考题	.....	209
参考文献	.....	209

第一章 绪 论

河流是指在一定气候和地质条件下形成的天然的泄水输沙通道,它是地球上水文循环的重要途径,也是泥沙、盐类和化学元素进入湖泊、海洋的通道。奔涌的河流是生命的摇篮,也是人类文明的起源。人类离不开河流,就像生命离不开水一样。中华文明也是起源于被誉为母亲河的黄河和长江流域,人类在河流两岸繁衍、生息,既依赖于河流、得益于河流,也受制于河流。这种关系从古至今,从未改变,因此,为了更好地与河流和平共处,就需要科学地认识河流、了解河流。

第一节 主要研究内容

河流动力学是研究河流在天然状态下或者受人工建筑物影响后所发生变化的学科。在这门学科里,我们的主要研究内容包括以下3个方面:水流结构、泥沙运动和河床演变。

水流结构是研究水流内部的运动规律及运动要素的空间分布。河道中的水流运动离不开水流的紊动,水流紊动又与泥沙运动密切相关。水流与河床之间的泥沙交换是受水流紊动所制约的。由于紊动交换作用,向上的脉动水流从床面上掀起泥沙颗粒,并把它们带入到水流中去,而向下的脉动水流则把一部分泥沙重新带回到河床上,水流紊动的结构对泥沙运动有着决定性的影响。

泥沙运动是指泥沙冲刷、搬运和堆积的过程。对于天然河流来说,一方面水流作用于河床,使河床发生冲淤变化;另一方面河床反过来又会影响水流,使得水流条件有所改变。水流与河床之间既相互依存,又相互作用。水流挟带泥沙,河床由泥沙组成,它们之间经常发生着泥沙的交换。水流和河床的相互作用就是通过泥沙的交换来完成,泥沙运动就是两者之间作用的纽带。交换的结果,有可能通过泥沙的不断淤积,使得河床抬高,也有可能通过河床泥沙的冲刷,使得河床降低。正是由于泥沙运动担负着如此重要的纽带作用,所以有关泥沙运动规律的研究成为河流动力学研究的核心内容。

河床演变指的是在河道水流与河床边界的相互作用下,河床在垂直和水平方向上的变形。河床演变也是水流与河床相互作用的结果,它的根本原因在于输沙不平衡。根据河流的形态和演变特点,我们可以将平原河流分为顺直、弯曲、分汊、游荡这四种河型。不同的河型,它们的演变特点也不相同。但是随着来水来沙条件的变化,河流都会自动地调整河床形态,以达到与上游来水来沙条件相适应的状态。因此只要来水来沙条件发生变化,河流就会处在不断的演变过程中。

第二节 学科发展简史

河流动力学是在人类和江河长期的相处过程中诞生并发展起来的。人们在河流两岸繁



衍生息,河流在给人类带来生机的同时,也带来了威胁。洪水泛滥、河道迁徙使人类深受其害,为了生存,人们不断地想方设法化害为利,也逐渐加深了对河流的了解,慢慢积累了治理河流的方法。

我国古代人民在治河方面就有着辉煌的成就,比如都江堰工程就是举世瞩目的成功典范。都江堰位于岷江上游干流与支流白沙河交汇之处,建于公元前 256 年。据史料记载,当时的成都平原非涝即旱,有“泽国”“赤盆”之称。“秦蜀合并,蜀西岷江连年江水为患”“沃野岁灾,民受其害”。当时担任蜀郡太守的李冰带领当地人民,历经数年寒暑,在岷江出山流入平原的灌县建成了都江堰。从此以后,成都平原变成了“水旱从人、不知饥馑、时无荒年”的天府之国。

都江堰工程包括鱼嘴、飞沙堰、宝瓶口等多项工程,是全世界迄今为止年代最久、唯一留存、以无坝引水为特征的宏大水利工程,至今仍然灌溉成都平原,被誉为“世界八大奇迹”之一。

鱼嘴是在宝瓶口上游岷江江心修筑的分水堰,因为堰的顶部形如鱼嘴而得名,它把岷江分成内外二江:西边叫外江,俗称“金马河”,是岷江正流,主要用于排洪;东边沿山脚的叫内江,是人工引水渠道,主要用于灌溉。飞沙堰实际上就是“泄洪道”,具有泄洪排砂的显著功能,虽然外表看上去很普通,但却是确保成都平原不受水灾的关键。当内江的水量超过宝瓶口流量上限时,多余的水就从飞沙堰自行溢出;如果遇到特大洪水,它就自动溃堤,使得大量江水回归岷江正流。飞沙堰还可以“飞沙”,它把有可能进入内江的泥沙、石块排到外江,避免宝瓶口和灌区的淤塞。宝瓶口起到“节制闸”的作用,能自动控制内江的进水量。

都江堰水利工程创造了人与自然和谐共存的水利形式,不仅扭转了“蜀人几为鱼”的水涝灾害,而且在 2000 多年后的今天,依然发挥着巨大作用。截至 2018 年,都江堰灌溉总面积 1076 万亩,受益人口 2300 万。鉴于此,都江堰水利工程被列入“世界遗产”“世界文化遗产”“世界灌溉工程遗产”名录,都江堰市也成为全球为数不多的同时拥有 3 个世界遗产的城市。

除了都江堰工程,我国古代人民在长期的治理黄河的过程中,也积累总结了许多宝贵的经验,如“筑堤束水、籍水攻沙”“水分则势缓、势缓则沙停、沙停则河饱”“水合则势猛、势猛则沙刷、沙刷则河深”等。这些在长期历史实践中获得的工程经验至今仍有其理论意义和实践价值。

近代以来,随着工业革命的兴起和科技水平的提升,人们对于河流的认识也逐渐深入,并逐步发展成为一门独立的学科。15 世纪末,意大利的达·芬奇(da Vinci, L)观测了河道的水流流速,成为河流动力学现场实测的先驱;16 世纪中叶,中国的潘季驯提出“筑堤束水、以水攻沙”的治河原则,并成功地应用于黄河治理;1786 年,法国的杜布阿(Dubuat, P L G)对河流动力学的许多基本问题展开研究,涉及泥沙起动、沙波形态、渠道横断面稳定、粗化作用和冲积河流形态等方面;1879 年,法国的杜波依斯(DuBoys, P)提出了推移质运动的拖曳力理论,奠定了泥沙运动研究的基础;1895 年,英国肯尼迪(Kennedy, R G)提出了冲积河流的“均衡”理论,最早对河相关系进行了探讨;1899 年,英国的斯托克斯(Stokes, G G)在静水和动水中对泥沙的沉降速度进行了试验,提出了著名的斯托克斯定律;1931 ~ 1933 年,美国的奥布赖恩(O'Brien, M P)和苏联的马卡维耶夫(Макавеев, Н И)分别将紊流的扩散理论



引入到悬移质的研究中,将现代紊流理论应用于河流动力学;1934年梅叶-彼德(Meyer-Peter)对推移质运动进行了细致的试验研究,后来推导出了被广泛应用的推移质输沙率公式;1938年劳斯(Rouse)发表了泥沙紊动扩散理论的论文,成为泥沙运动研究领域的重大成果;1942年爱因斯坦(Einstein, H A)将统计理论引入推移质的研究中,开创了泥沙运动与统计理论相结合的先河,提出了著名的Einstein推移质输沙率公式。此外,我国的泥沙工作者也开展了许多卓有成效的研究工作,钱宁、窦国仁、谢鉴衡等知名专家就是他们的突出代表,他们对我国泥沙运动的研究,做出了杰出贡献,在国际泥沙学界也享有很高的声誉。

伴随着一大批现代水利工程的建设实施,如葛洲坝枢纽工程、三峡工程、长江口深水航道整治工程等,河流动力学学科也获得长足进步。这些实际工程的开展建设既受益于河流动力学的基本原理和最新科研成果,同时也为学科的理论研究提供了实际的验证资料和生动素材。

第三节 工程中的应用

河流动力学与现代水利工程尤其是港口航道工程关系紧密,主要表现在以下几个方面:

(1)在河流上建设水库、港口时,首先要正确地选择坝址和港址。坝址、港址的选择除了要考虑国民经济的建设需要和水深等条件之外,还需了解河道的冲淤变化以及对整个河系带来的影响,尽可能地选择河床稳定或冲淤变化不大的地方。如不能满足条件,则应另行选择或制定必要的整治方案。

(2)河流上修建水利枢纽,在带来发电、灌溉、防洪等效益的同时,也可能带来不利影响。例如,在大坝上游的水库库区,常年回水区内的滩险可全部淹没,航道水深增加,航行条件得到很大改善。但是,在库尾回水变动区内,泥沙会大量淤积,导致航道水深不足,妨碍航行,也造成附近的码头、取水口、支流河口等淤浅甚至淤塞。在大坝下游,则可能对通航产生不利影响。例如,上游的浑水进入水库,因水深增加、流速变缓,大部分泥沙将沉积下来;泥沙被水库拦蓄后,下泄水流的含沙量明显降低,这样使得下游河床发生冲刷,床沙发生粗化。如果是枢纽下游较长河段上发生的冲刷,冲刷距离往往长达数十到数百千米,使得同流量下的水位降低,并引起枢纽下游河道的剧烈变化;如果是枢纽下游较短河段内发生的局部冲刷,虽然冲刷距离只有数十到数百米,但其冲刷深度往往大于前者。比如,葛洲坝枢纽建成以来,坝下河段冲刷下切,枯水期水位比设计低水位还低0.6m,导致下引航道和二、三号船闸下闸首的槛上水深不能达到原设计标准,特枯水位时水深不足,影响航运安全。又如,在丹江口水库下游,由于受水流冲刷,下游河床变化剧烈,不仅刷深,严重时还会崩岸,仅宜城县就有5万亩良田崩塌在汉江之中;由于河床展宽,无明显深槽,洲滩变化迅速,河床极不稳定,这对于航行来说极为不利。

(3)在河流上进行航道整治时,首先需要了解浅滩碍航情况及其产生原因,因此必须充分掌握河床的演变规律,找出影响河床演变的主要因素,在此基础上,拟定整治工程方案,以达到改善航道条件的目的。例如长江口深水航道整治工程,从项目决策到项目实施历经半个多世纪,1958年开始,大批水利专家学者对长江口的碍航浅滩进行了长期、系统的研究,基本摸清了长江口的发育模式和河床演变的一般规律,为治理拦门沙航道积累了宝贵的经验



和资料。1992年开始,通过现场测量、物理模型试验和数学模型计算等多种研究方法,对长江口选槽和深水航道整治进行了多方案比选和深入研究,提出了“南港北槽”的整治工程方案,具体论证了工程实施的可行性。直至1997年,长江口深水航道整治工程确立了“一次规划、分期实施、分期见效”的实施计划,整个工程分三期完成:一期工程于1998年1月开工,2000年3月实现了8.5m目标水深并试通航,2002年9月通过验收竣工;二期工程于2002年4月开工,2005年3月实现10m水深航线全面贯通,11月通过验收竣工;三期工程于2006年9月开工,2010年3月实现12.5m水深航道贯通全槽,2011年5月通过验收竣工。后期实践表明整治方案成功地达到了预期目标,研究成果居于国际领先水平。

(4)在港口航道工程建设过程中,泥沙引发的一系列问题不容忽视。当然,在科学技术高度发达的今天,港口航道工程建筑物因结构设计不当而坍塌的事故已很少见,但因河床冲刷使得建筑物塌入江中,或因泥沙淤积影响港口码头正常营运,甚至将港口淤塞的现象却屡见不鲜。例如,长江下游福北水道靖江河段的部分沿江码头,2008年码头前沿水深尚有近20m,但到2011年底时,水深已不足7m,严重影响码头的正常运营,不得不采取疏浚等措施,大大增加了维护费用。汉江宜城港也曾被大片边滩包围,以致枯水期船舶无法在码头靠泊。因此,在港口航道工程建设中,必须科学地认识河流,掌握泥沙运动的客观规律,才能合理有效地利用河流,以达到人们所期望的目标。

在建设河口与海岸工程时,同样也要考虑泥沙运动、岸滩演变等问题的影响。不同之处在于,河口海岸的泥沙运动不仅与潮流有关,还受到波浪等动力的作用,其影响因素与内陆河流不同。对于淤泥质海岸来说,泥沙颗粒较细,泥沙运动的规律还与絮凝现象密切相关,部分水域还要考虑浮泥等问题。尽管如此,从河流动力学中获得的基本概念和专业知识,对于研究河口与海岸地区的泥沙运动有着重要的借鉴意义,有些规律甚至可以直接应用。

第四节 主要研究方法

河流动力学所涉及的影响因素众多,机理复杂,研究方法主要有现场观测、理论研究、试验研究、数学模型等。

(1)现场观测:在天然河流上对水流、泥沙运动和河床演变等现象进行直接的观察和测量。随着现代测量技术和仪器的不断发展,观测数据的获得更加便捷,精度也有所提高。这些观测数据不仅可为理论研究提供宝贵的原始资料,也可作为理论分析的验证依据。

(2)理论研究:利用物理学、力学、统计学等学科的原理和方法对泥沙运动学的基本原理和河床演变过程进行理论分析,得到各种问题的理论解。由于河流动力学的研究对象运动机理复杂,不同于理想的流体力学或理论物理学,既表现出遵从机械运动定律的规律性,又表现出很大程度上的随机性,所以需要结合多种学科的理论工具进行研究。

(3)试验研究:在试验室内对水流泥沙运动的基本规律进行试验研究或对具体河段进行实体模型试验,包括水槽试验和河工模型试验。水槽试验是依据相似原理,在室内进行模型实验来验证理论曲线或理论性的研究成果。河工模型试验是将河流按相似原理缩成模型,研究水流、地形等因素的变化规律,它是研究河道水流和河床变形的重要手段之一。



(4)数学模型:数学模型是运用数理逻辑方法和数学语言建构的科学或工程模型。随着计算机技术的迅速发展,数学模型正在越来越多地被应用于河流,成为研究河流泥沙运动和河床演变问题的重要手段。

在实践中,上述方法是相互补充、互为验证的。很多工程技术难题,往往是借助于多种研究方法,才能找到可靠的解决途径。例如三峡工程,在前期论证工作中,泥沙问题被列为关键技术问题之一。通过原型观测、物理模型、数学模型等多种研究手段,对“三峡坝区泥沙淤积对通航和发电的影响及其防治”“回水变动区河段泥沙淤积”“坝下游河道演变及重点河道整治”等实际工程问题进行了深入研究,并找到解决方法,取得的研究成果达到国际先进水平。再如长江口深水航道整治工程,由于长江口丰水多沙、多级分汊,滩槽交错,潮流径流交互作用,属于巨型复杂河口,整治难度极大。首当其冲的关键问题就是科学论证深水航道的航槽定线和整治工程的总体布置方案。通过长期的勘测资料分析结合物理模型、数学模型等试验研究,在基本掌握水沙运动特点和河床演变规律的基础上,提出了“在长江口总体河势基本稳定的条件下,可以选择北槽先期进行工程治理”的科学论断,制定了“中水位整治、稳定分流口、采用宽间距双导堤加长丁坝群、结合疏浚工程”的总体治理方案。

第五节 学科特点和学习方法

河流动力学是一门既古老又年轻的学科。说它古老,因为它是人类从远古开始不断从实践中积累而发展起来的学科,人类运用它治理河流的历史非常久远。说它年轻,因为相对于传统学科,它建立并发展的时间并不算长,有很多问题在现阶段还不能完全从理论上得到解决。另外,随着现代量测技术和计算水平的提升,河流动力学也逐渐和其他学科发生关联并交叉发展,萌生了很多新的与河流动力学相关的学科方向。所以河流动力学是一门新兴并不断发展的学科。

鉴于此,河流动力学使用的多是“半理论半经验”的研究方法。由于研究对象的机理复杂,在研究中不得不对问题做出某些假定,进行一些简化,从而进行理论规律的分析研究。而在实践中则广泛使用从理论公式推导出的半经验或者经验公式。本教材将选择一些本领域代表性的公式详细地介绍其推导过程,希望读者能够从中领会并学习通过半理论半经验途径分析问题的方法。正是由于河流动力学公式的半经验性,所以在实践中,不同学者依据的资料不同,分析问题的角度不同,因此即便研究同一问题,得到的公式也不尽相同。

读者在学习过程中,并不需要将书中众多公式全部记熟,而应将重点放在弄清其概念及原理、掌握其影响因素、注意其建立条件和适用范围等方面,切忌对公式盲目照搬。选定公式进行计算时,还要留意公式中变量的量纲及其相互关系,不可随意改变量纲单位。在应用这些公式解决实际问题时,应从实际出发,重视和掌握第一手资料,全面了解和掌握所研究问题的各个方面;在此基础上,就主要因素进行理论分析和数学推导,得到初步的公式或结论,再用实测资料检验所得公式或结论的正确性,逐步加以修正,不断提高。

本教材根据河流动力学本科教学大纲编写而成,内容取舍和章节安排力求符合专业特



点。本书共分为三个单元,第一单元为河道水流,主要由第二章组成;第二单元为泥沙运动基本规律,由第三章、第四章、第五章、第六章组成;第三单元为河床演变特性,由第七章、第八章组成。

思考题

1. 什么是河流动力学? 其研究内容是什么?
2. 泥沙运动在河床演变中起什么作用?
3. 我国古代在河流治理方面有哪些著名的成就?
4. 河流动力学与港口航道及海岸工程有什么关系? 试举例说明。
5. 河流动力学的主要研究方法有哪些?
6. 学习河流动力学需要注意哪些问题?

参考文献

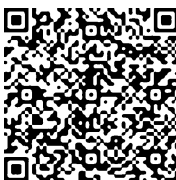
- [1] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 王兴奎, 邵学军, 王光谦, 等. 河流动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] 邵学军, 王兴奎. 河流动力学概论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] 张玮. 河流动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [5] [地理·中国] 都江堰根治了成都平原的水患——视频网址链接:
<http://tv.cntv.cn/video/C22484/6f3ab6f67c6845ff94ce79ec6c4e04fb>.



- [6] cntv 中国今日: 三峡工程——视频网址链接:
https://v.youku.com/v_show/id_XNjU0NDY4MTk2.html.



- [7] 大三峡第3集: 世纪大坝——视频网址链接:
<http://tv.cntv.cn/video/C18917/c57cd100c6344d049924ed9c3267decb>.





- [8] 《科技之光》20120107 船行如歌,江海直达——长江口之梦——视频网址链接:
<http://tv.cctv.com/2013/02/04/VIDE1359974800518988.shtml>.



- [9] 《科技之光》20120109 船行如歌,江海直达——圆梦长江口——视频网址链接:
<http://tv.cctv.com/2013/02/04/VIDE1359974888446277.shtml>.



第二章 水流的紊动

明渠水流一般都是紊流。水流的流速场与水流紊动有着密切联系,水流挟带的泥沙更是靠着水流中紊动漩涡的支持才能维持其悬浮状态。因此,分析泥沙运动与河床演变规律之前,必须首先了解紊流的物理本质及其计算方法。

水流紊动现象是一个十分复杂的课题,在 20 世纪成为现代流体力学的研究前沿,虽然进行过许多研究,提出了不少理论,但从工程实用的角度来看,只有古典理论——普朗特(Prandtl, L)理论得到广泛的应用。同时,由于紊流问题的复杂性,对于明渠水流来说,也只有二元均匀流可得到半经验的理论解。

本章主要介绍紊流的概念及其经典理论以及据此建立起来的明渠水流沿垂线的流速分布计算公式。

第一节 紊流的概念

一、层流与紊流

液体质点作不规则运动、互相混掺、轨迹曲折混乱的形态叫做紊流。从水力学课程中已经知道,紊流和层流是两种不同的水流状态。为了区别紊流与层流,引用雷诺(Reynolds, O)的经典试验加以说明,图 2-1 为雷诺试验装置。

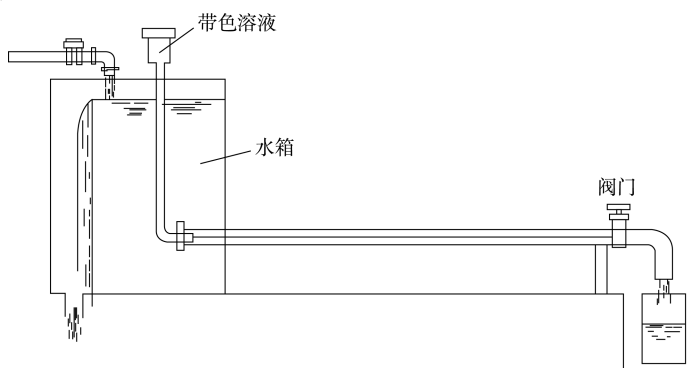


图 2-1 雷诺试验装置

试验中,用玻璃管一支,一端做成和缓圆滑的进口,另一端则装有阀门,以控制流量。试验开始时在水柜中满注清水,待其完全静止以后,再徐徐打开阀门,使水流通过玻璃管下泄,同时从进口注入染色溶液,作为流态的指示剂。在流速较低时,染色溶液成直线流过水管,清晰可辨,且与上下流层不相混淆,见图 2-2a)。如把阀门继续开大,则在流速大到一定程度后,染色直线水流开始上下左右摆动,见图 2-2b)。随着流速的继续增加,染色溶液扩散遍布



全管,尽失原来面貌,见图 2-2c)。水流在第一阶段称为层流,在第三阶段称为紊流,在第二阶段则处于层流及紊流之间的过渡状态。

二、紊流的特征

雷诺试验说明,紊流最首要也是最基本的特征是:即使在流量不变的情况下,流场中任一点的流速和压力也随着时间呈十分不规则的脉动。图 2-3 是实测的某点纵向流速随时间的变化。

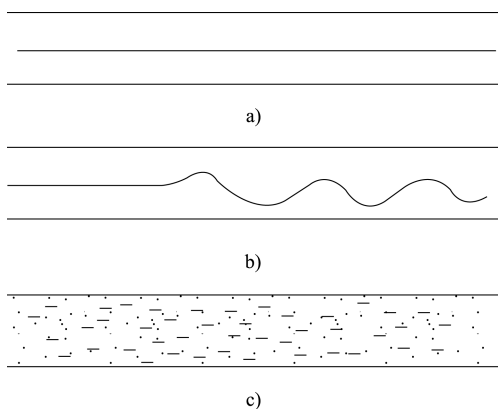


图 2-2 试验装置中水流状态
a)层流;b)过渡状态;c)紊流

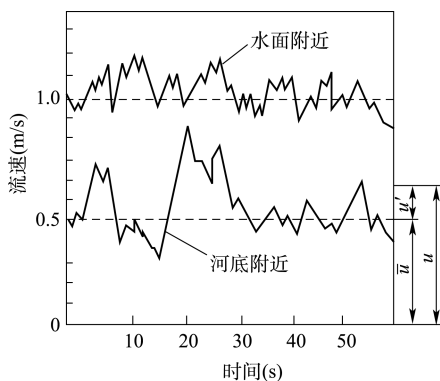


图 2-3 实测的瞬时流速图

从图 2-3 可以看出,任一时间 t 的流速可表示为 $u = \bar{u} + u'$, u 为瞬时流速; \bar{u} 为时均流速; u' 为脉动流速。

在恒定流中, \bar{u} 是一个不随时间而变化的量。 u' 的时均值为零,即

$$\overline{u'} = \frac{1}{T} \int_0^T u' dt = 0 \quad (2-1)$$

式中, T 为某一时段。

其次,紊流具有扩散性质,能把染色溶液扩散到全管,使它与管中不带色的水体充分混合在一起。由于紊流的这种扩散作用,使其能够在水层之间传递动量、热量和质量。

虽然在明渠水流中,脉动流速不超过时均流速的百分之几,但它却对整个流动有着决定性的影响。

三、紊流的发生

1. 紊动发生的概述

层流失去稳定而转变为紊流,主要是由于水流在行进中不可避免地会受到一些干扰。当这种干扰超过一定限度以后,层流就会失去稳定而产生漩涡。这种干扰有由于内在极小的扰动扩大加强而产生的,也有起源于外来滋扰的。水流内在扰动是扩大加强还是衰减削弱取决于水流的惯性力与粘性力的对比。水流为流动性很大的水分子所组成,这些水分子的重量和速度倾向于破坏有规律的运动,引起各种扰动;水流的惯性因此成为促进不规则、



加强不稳定的主要作用力。作用于单位水体的惯性力可以写成 $\rho U^2/L$ 。其中 ρ 为水的密度, L 为某一代表长度,在管流中可以采用管径。另一方面,粘性如同水分子内在的联系力,可以减少它们之间的易动性,有使扰动衰减的作用。作用于单位水体的粘性力为 $\mu U/L^2$,其中 μ 为水的粘性系数。紊动现象实质决定于这两种作用的对比。作用于单位水体的惯性力与粘性力的比值组成一个无量纲数,称为雷诺数 Re ,即

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (2-2)$$

式中, ν 为水流的运动粘性系数; d 为水管直径。

雷诺数愈小,表示粘性的稳定作用远超过惯性的破坏作用,水流属于层流状态;雷诺数愈大,则会进入紊流状态。在雷诺进行的试验中,当雷诺数小于2000左右时,水流属于层流;当雷诺数超过10000~12000时,水流属于紊流。雷诺以后的试验证明:如果改善进水口的曲度,并待水柜中的清水完全静止以后再开始试验,则进入紊流状态的临界雷诺数可以大大提高,这充分说明了外来干扰对于层流稳定性的影响。但是就算最大程度地减少了外来的干扰,在雷诺数超过40000以后,水流也不可能保持层流状态。这说明除了外在干扰的因素,内在的不稳定性是促使水流从层流转化为紊流的内因。对于河道水流来说,内在的扰动是最主要的,这种扰动可以有各种不同的形式,例如周界糙率和水流局部分离都会产生漩涡。

2. 紊动发生的分类

根据水流受到干扰的不同,可将紊动的发生分为以下三种情况。

第一种情况是水流很快流过固体边界,边界是静止的,水流是运动的。当固体边界表面相对比较光滑时,即光壁的情况,如图2-4所示,靠近边界处的流速梯度较大,受到任何扰动,层流就会失去稳定而产生漩涡。扰动使流线发生弯曲,如图2-4b)所示。这样,在流线密集的地方,流速大压力小,在流线稀疏的地方,流速小压力大。形成的压力差进一步使流线发生扭曲,如图2-4c)所示。最终产生一连串的漩涡,如图2-5a)所示,光壁上的层流最终转变为紊流。

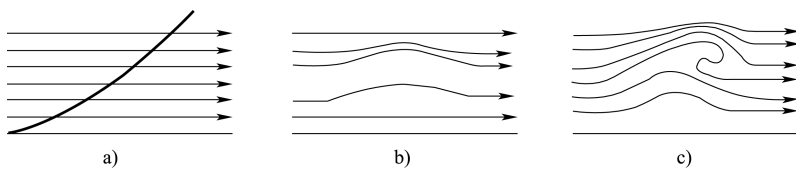


图2-4 光壁紊流的发生

天然河流中河床的表面并不光滑,河床表面高低不平,在突出床面的泥沙颗粒后面,水流会发生不同程度的分离,在分离面上就会卷起漩涡,见图2-5b),这就是固体边界是糙壁的情况。因此对于天然河流来说,河床周界都是产生紊动漩涡的场所。

第二种情况是两种速度不同的液体相接触,接触面上的流速梯度也可产生漩涡。图2-5c)是管中射出的高速水流,流经缓慢流动或静止的液体时,产生漩涡的情况。

第三种情况是水流绕过物体或物体在静水中运动时,在物体的背面水流会发生分离从而产生漩涡,见图2-5d)。

河床周界附近一旦产生漩涡,它和周围水流的相互关系如图2-6所示。在漩涡顶部,其旋转分速 u_r 与当地水流流速方向一致,而在漩涡底部则相反。由此产生的流速水头差产生了向



上的压力差,使得漩涡离开河床而上升。与此同时,漩涡还被水流带向下游。就这样,来自河底的漩涡逐渐扩散遍布全部水流,使整个水流都具有紊动的特征。漩涡在河床周界刚产生时,其尺度受到空间的限制,但在上升过程中,直径逐渐增大。大尺度、高转速的漩涡本身是不稳定的,它们会崩溃分解为次一级的漩涡,直到最小一级的漩涡通过漩涡粘性作用转化为热能最终消失。大尺度漩涡是挟带泥沙离开河床进入主流区、使泥沙悬浮的主要动力。

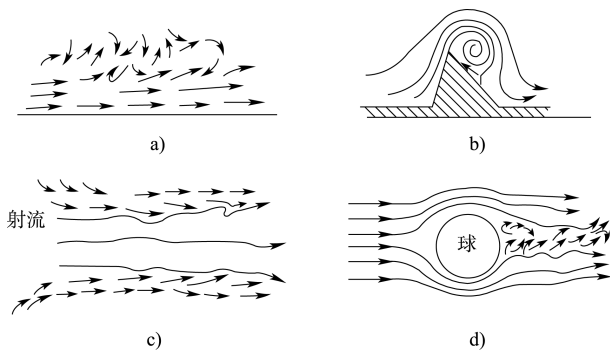


图 2-5 紊流发生的三种情况

a)、b) 第一种情况; c) 第二种情况; d) 第三种情况

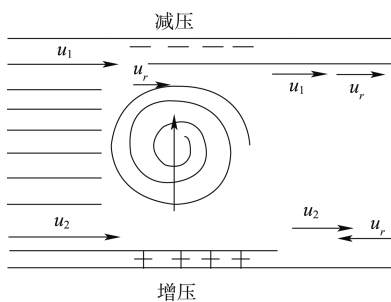


图 2-6 漩涡脱离河床表面进入主流区的机理

四、紊动应力

漩涡产生以后,漩涡的垂向运动使紊流中各水层的性质(例如动量、热量或含沙量等)可以不断进行交换,其中动量的交换就产生了紊动应力,从而决定了平均流速场。我们了解动量交换的过程,将有助于了解有关泥沙悬浮的机理。

水层间动量交换的结果之所以会产生剪力,可以用下面形象化的例子来说明。如图 2-7a) 所示,设想有一辆满载木材的货车 A 及客车 B 在平行的轨道上分别以不同的速度 u_a 和 u_b 向前行驶。因为动量交换只牵涉到两者的相对速度 $u' = u_b - u_a$,为了说明方便,可以把货车 A 看成静止不前,只有客车 B 在与货车 A 平行的方向以速度 u' 运动前进。这时设想在客车 B 的每个窗口上都架着机枪面对货车 A,在客车 B 驶过货车 A 的同时,所有机枪以相同速度发射,每秒钟射出枪弹 N 发。假定每发必中,所有的枪弹都陷在货车 A 所载的木材上。如果货车 A 和测力器相连,则测力器的尺度上将会显示此刻货车所承受的力 F 。货车之所以受力,是因为枪弹离开客车 B 时还携带着客车前进方向的动量(即枪弹质量与客车速度的乘积),待枪弹陷入木材后,这一部分动量全部丧失。根据牛顿定律,动量的改变会产生力 F ,其大小等于单位时间内动量的差值,设每发子弹重量为 W ,重力加速度为 g ,则测力器上测出的作用力应为

$$F = \frac{NW}{g}(u' - 0) = \frac{NW}{g}u' \quad (2-3)$$

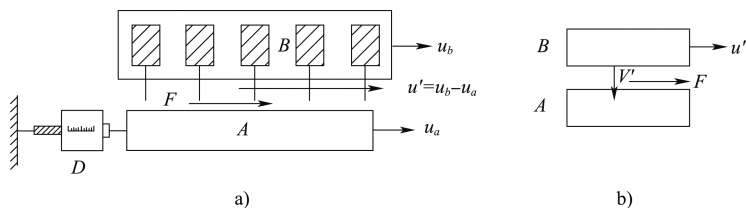


图 2-7 a)、b) 动量交换产生剪力的机理



以上讨论的是客车 B 驶过货车 A 的情况,即客车车速大于货车时,这时机枪向货车开火会使货车受力并加快车速;如果是货车 A 驶过客车 B ,即客车车速小于货车时,则机枪向货车开火将使货车受力变缓。

这个例子可以帮助我们理解相邻水层间动量的交换。如图 2-7b) 所示,相邻水层的面积为 A_0 ,水层间的相对速度为 u' ,水流垂直方向的脉动流速为 v' 。如脉动流速均匀分布在 A_0 面上,则在单位时间内由水层 B 进入水层 A 的水分子质量为 $\rho v' A_0$,假定由此进入水层 A 的水分子和水层 A 中原有的水分子完全融合成一片,最后以相当于水层 A 的流速向前运动,则通过动量的交换,将在水层 A 的表面产生和水流方向一致的剪力 F ,

$$F = \rho A_0 u' v' \quad (2-4)$$

则在单位面积上的剪应力为

$$\tau = \frac{F}{A_0} = \rho u' v' \quad (2-5)$$

事实上,在水流中任何一点 u' 及 v' 的数值时时都在改变,剪力 τ 应该和 u' 及 v' 乘积的平均值成正比,即

$$\tau = \rho \overline{u' v'} \quad (2-6)$$

在河道水流中,离河床表面越远处的水层流速也越大。如果约定, u' 的方向在与水流方向一致时为正, v' 的方向从河床表面向上为正,则 u' 和 v' 的符号永远相反。在这样的方向约定下,上式应改写为

$$\tau = -\rho \overline{u' v'} \quad (2-7)$$

这就是常用的紊动剪切力公式。19 世纪以来,很大一部分紊动理论的研究就在于如何把脉动流速转化为时均流速的函数,从而建立起流速场和应力场间的关系。

第二节 紊流的经典理论

为了确定紊动应力,许多学者进行了大量的工作。其中比较著名的有普朗特(Prandtl, L.) 的动量交换理论、泰勒(Taylor, G. I.) 的漩涡传递理论、卡门(von Karman, T.) 的相似理论等,其中以普朗特的动量交换理论应用最广。下面就着重介绍这一理论的主要概念与结论。

一、动量交换

设二元均匀流如图 2-8 所示,水流中任一点流速为

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad \bar{v} = 0 \quad (2-8)$$

通过该点作一平面 $A-A$ 平行于河底,由于横向脉动流速 v' 的作用,引起相邻水层间的水团上下运动,互相掺混。参与混和的水团都各自带有它原有的前进方向的动量。所以,随着水体质量的混和产生了动量的交换,由此在相邻水层间产生了切应力。若水团在 $-v'$ 的作用下自流速高的上层落到下层,就加快了下层水体的前进速度,也就是增加了下层水体的动量;反之,在 $+v'$ 的作用下,水团自流速低

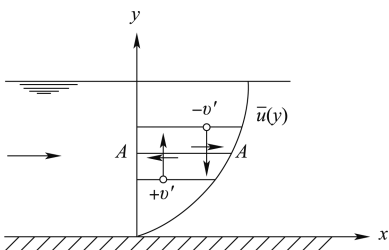


图 2-8 二元均匀流示意图

的下层上升到上层,就会减小上层水体的前进速度,也就是减小了上层水体的动量。这样,在整个水深范围内,由于水团上下混和的结果,就使流速沿水深的分布发生变化。



与层流比较起来,紊流的流速分布要均匀得多。在水团上下混杂的过程中,由于互相碰撞而消耗能量,这种紊动阻力比层流中的粘滞阻力要大很多。

设在 Δt 时间内,通过单位水平面积的水体具有的动量为

$$mu = \rho uv \Delta t \quad (2-9)$$

式中, m 为液体质量。

则单位时间内的动量变化率为

$$\frac{\Delta(mu)}{\Delta t} = \rho uv \quad (2-10)$$

将瞬时值代入,并取时间平均,得

$$\frac{\Delta [m(\bar{u} + \bar{u}')]}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\bar{u})}{\Delta t}, \rho \bar{u}v = \rho (\bar{u} + \bar{u}')\bar{v}' = \rho \bar{u}'\bar{v}' \quad (2-11)$$

于是得

$$\frac{\Delta(m\bar{u})}{\Delta t} = \rho \bar{u}'\bar{v}' \quad (2-12)$$

根据动量定律和牛顿第二定律,上式可以写成

$$\tau''_{yx} = -\rho \bar{u}'\bar{v}' \quad (2-13)$$

下面将要说明 u' 和 v' 的符号相反。式(2-13)中加负号,是为了使切应力以正值的形式出现。式(2-13)就是二元均匀流中紊动切应力的表达式。

紊流中总切应力 τ_{yx} 应为

$$\tau_{yx} = \tau'_{yx} + \tau''_{yx} \quad (2-14)$$

其中, τ'_{yx} 为边壁附近的粘滞切应力, τ''_{yx} 为紊动切应力。

总切应力 τ_{yx} 的数值可从水体受力平衡条件求得。假设在均匀流中取单位宽度的水体 $ABCD$, 如图 2-9 所示。作用在水体上的力有水压力 P_1 、 P_2 、重力 W 和 BC 面上的切应力 τ_{yx} 。因为是均匀流,作用在水体 $ABCD$ 上的合力应为零;又因为两边水压力相等,所以只有重力在 x 方向的分力 W_x 与切应力 τ_{yx} 相平衡。力平衡方程式为

$$\tau_{yx} = \gamma H J \left(1 - \frac{y}{H} \right) - \bar{u}'\bar{v}' \quad (2-15)$$

式中, H 为水深。

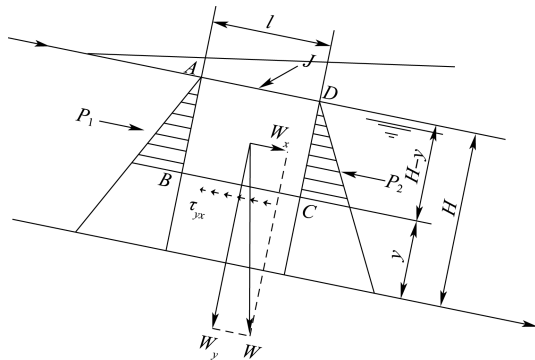


图 2-9 水体受力平衡图

从式(2-15)可以看出,切力 τ_{yx} 在水面处 ($y = H$) 为零,随着水深的增加,切应力也增加,



并呈直线变化。在河底处($y=0$)切应力最大,以 τ_0 表示,有

$$\tau_0 = \gamma H J \quad (2-16)$$

将式(2-16)代入式(2-15)得

$$\tau_{yx} = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{H}\right) \quad (2-17)$$

图 2-10 是在风洞中实测到的紊动切应力 τ 的分布,边壁处相对高度 $\eta=0$ 。

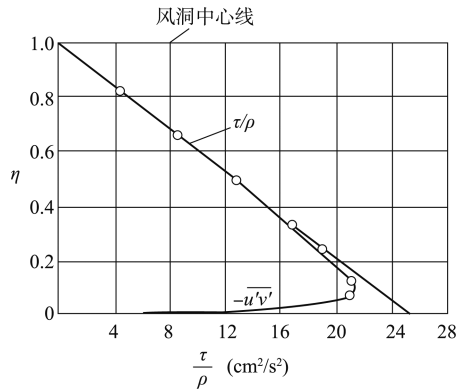


图 2-10 风洞中实测的紊动切应力分布

可以看出,粘滞切应力只在边壁附近占优势,这也可用来说明水流切应力沿水深的分布情况。

二、混合长度

为了建立 $\overline{u'v'}$ 和时均流速之间的关系,普朗特假设,水团在掺混过程中有一个平均自由行程。在这个行程中,水团保持原有的特性(如动量、热量、含沙量等),直到水团抵达自由行程的终点与终点处水流掺混后,才消失原有的特性而取得终点处水流的平均特性。假定水团起点及终点的任何平均特性的差别,就等于该特性在终点的脉动值。这一自由行程叫做混合长度,也称为掺混长度。混合长度是标志紊动交换强度的特征长度。

设 x 坐标指向二元均匀流的流动方向, $\bar{v}=0, v' \neq 0$,如图 2-11 所示。

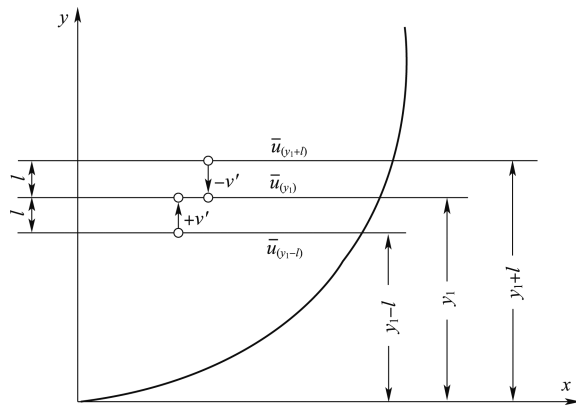


图 2-11 混合长度示意图



从水流的时均流动看,水体是成层向前运动的,但实际上水流中有水团作上上下下运动。设距离河底 $(y_1 - l)$ 、 y_1 、 $(y_1 + l)$ 处有三层相邻水体,间距各为 l , l 为混合长度。在 $(y_1 - l)$ 层中的水团由于 $+v'$ 而向上运动,经过 l 距离到达 y_1 层后,该水团与 y_1 层水体互相混合而取得 y_1 层的速度 $\bar{u}_{(y_1)}$ 其速度差为

$$\Delta u_1 = \bar{u}_{(y_1)} - \bar{u}_{(y_1-l)} \quad (2-18)$$

将函数 $\bar{u}_{(y_1)}$ 在 y_1 处展开成泰勒级数,并略去其高阶项,上式可写成

$$\Delta u_1 = \bar{u}_{(y_1)} - \bar{u}_{(y_1-l)} \approx l \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=y_1} \quad (2-19)$$

同理, $(y_1 + l)$ 层的水团因 $-v'$ 而下降到 y_1 层,其速度差为

$$\Delta u_2 = \bar{u}_{(y_1+l)} - \bar{u}_{(y_1)} \approx l \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=y_1} \quad (2-20)$$

根据混合长度定义,上述速度差等于 y_1 层的脉动流速 $\pm u'$ 。为了消除正负的影响,取脉动流速 u' 的绝对值的平均值等于二个速度差的绝对值的平均值,即

$$\overline{|u'|} = \frac{1}{2} (\overline{|\Delta u_1|} + \overline{|\Delta u_2|}) \approx l \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right) \Big|_{y=y_1} \quad (2-21)$$

可以认为,在数量上横向脉动流速 v' 与纵向脉动流速 u' 属同一量级,即 $\overline{|u'|} \sim \overline{|v'|}$ 。这个问题可以这样解释:如前所述, $(y_1 + l)$ 层的水团到达 y_1 层后,将引起 $+u'$ 的脉动流速,而 $(y_1 - l)$ 层水团到达 y_1 层后,将引起 $-u'$ 的脉动流速。如果来自 $(y_1 - l)$ 层的低速水团恰好在来自 $(y_1 + l)$ 层的高速水团之前,则两者在 y_1 层将各自以 u' 作相向运动而碰撞,然后沿水流垂直方向分开,造成由 y_1 层向上、下邻层向外流动的脉动流速 v' ;反之,如低速水团在高速水团之后,则两者将各以 u' 作背向运动而分离,由此让出的空隙由上、下邻层的水体来填充,结果引起由上、下邻层流向 y_1 层的脉动速度 v' ,如图2-12所示。

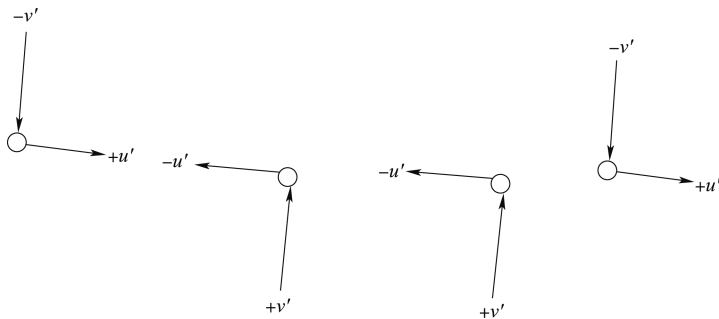


图2-12 脉动流速 u' 、 v' 的示意图

根据这样的推理, u' 和 v' 不但有联系,而且数量级相当。所以 v' 可用下式表示

$$\overline{|v'|} \sim l \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right) \Big|_{y=y_1} \quad (2-22)$$

将 $\overline{|u'|}$ 与 $\overline{|v'|}$ 相乘,并将比例系数包括在 l 内,可写出下式

$$\overline{|-u'|} \overline{|+v'|} = l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \quad (2-23)$$



由图 2-12 可见, u' 与 v' 符号相反, 所以

$$-\overline{u'v'} = \overline{|u'v'|} \quad (2-24)$$

而

$$\overline{|u'v'|} \sim \overline{|u'|} \overline{|v'|} = l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \quad (2-25)$$

所以

$$\tau''_{yx} = -\rho \overline{u'v'} = \text{常数} \times \rho l^2 \left(\frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2 \quad (2-26)$$

如把常数再包括在 l 内, 并考虑到 τ''_{yx} 及 $\frac{d\bar{u}}{dy}$ 的符号的一致性, 上式又可写成

$$\tau''_{yx} = \rho l^2 \frac{d\bar{u}}{dy} \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \quad (2-27)$$

式中, $\left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|$ 为时均流速梯度的绝对值。

由试验可知, 混合长度 l 与流速无关, 只是坐标的函数。我们知道, 在层流运动中, 流层间的剪切应力与流速梯度之间存在如下关系:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \rho \nu \frac{du}{dy} \quad (2-28)$$

式中, μ 及 ν 分别为流体的动力粘滞系数及运动粘滞系数。

仿照层流运动公式(2-28), 式(2-27)又可以改写成

$$\tau''_{yx} = A \frac{d\bar{u}}{dy}, \quad A = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \quad (2-29)$$

式中, A 为紊流动力粘滞系数, 其因次与 μ 相同。

还可以写成

$$\tau''_{yx} = \rho \varepsilon_m \frac{d\bar{u}}{dy}, \quad \varepsilon_m = l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \quad (2-30)$$

式中, ε_m 为紊流运动粘滞系数, 其因次与流体的运动粘滞系数 ν 相同。

A 与 ε_m 都不是流体的物理性质, 都是随着流场中的位置以及流速分布而不同, 因此, 它们不是常数。

第三节 紊流的流速分布

河道中泥沙起动以及输沙率等都与流速分布密切相关。由于这一问题比较复杂, 而且一般来说, 河渠宽深比都较大, 除近岸外, 水深沿河宽的变化都较小。所以这里只限于讨论二元恒定均匀紊动水流中的时均流速分布规律, 即纵向流速沿水深的分布规律。

一、对数型流速分布公式

流速分布和水流紊动切应力是密切相关的。由于紊流理论还不能直接用来解决实际问题, 因此目前大多数的计算公式仍然是半经验或经验性的。其中以建立在普朗特紊流理论基础上的对数曲线型流速分布公式应用最广泛。

本节主要介绍以普朗特紊流理论为基础的对数型流速分布公式的推导, 但由于水流的



运动也会受到边壁粗糙度的影响,所以在研究流速分布规律时还需根据边壁的粗糙程度进行分类讨论。

1. 对数型流速公式的一般推导

对数型流速分布公式的理论基础为普朗特紊流理论,即上节式(2-27),但由于式中的紊动混合长度 l 仍为未知量,故还须给出 l 的表达式。为此,普朗特进一步假定:

(1) 靠近边壁附近,因受边界的限制,紊动混合长度 l 很小,离边壁愈远,混合长度愈大。混合长度在边壁附近的变化规律假定为

$$l = \kappa y \quad (2-31)$$

式中, κ 为卡门常数,是无因次数,由尼古拉兹(Nikuradse, J)管流试验得 $\kappa = 0.4$ 。

(2) 假定边壁附近的粘滞切应力 τ'_{yx} 可以忽略,并取 $\tau''_{yx} = \tau_0$,这样式(2-27)就可以写成

$$\tau_0 = \rho \kappa^2 y^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (2-32)$$

设 $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_*$, 则

$$\kappa y \frac{du}{dy} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_* \quad (2-33)$$

式中的 u_* 反映了边界上阻力的作用,由于它具有速度的因次,所以称为摩阻流速。又因 $\tau_0 = \gamma H J$, 故

$$u_* = \sqrt{g H J} \quad (2-34)$$

式(2-34)表达了水面坡降、水深和摩阻流速之间的关系。由于 u_* 反映了水流的水力条件,所以它是一个很重要的参数,以后在分析泥沙运动时,经常要用到它。

式(2-33)是一个一阶线性微分方程式,由它可以变换得到

$$du = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \frac{dy}{y} = \frac{u_*}{\kappa} \frac{dy}{y} \quad (2-35)$$

对(2-35)式积分得

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln y + C \quad (2-36)$$

式(2-36)即为紊流的对数型流速分布公式,用于描述光滑床面明渠的流速分布,这个公式较为常用,有关它的研究的也较多。在用式(2-36)描述光滑明渠水流的时均流速分布时,其系数 κ 和积分常数 C 需由试验确定。不同学者实测的 κ 和积分常数 C 在一定范围内有所不同,通常认为 κ 在 0.35 ~ 4 之间、 C 在 4 ~ 6.5 之间都是合理的。

改写式(2-36),可以得到对数流速分布的其他形式。如改写式(2-36)为

$$u = u_* \left(\frac{1}{\kappa} \ln y + \frac{C}{u_*} \right) \quad (2-37)$$

则可得到

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + c \quad (2-38)$$

式中, c 为积分常数。

在水面处 ($y = H$) 流速最大,以 u_{\max} 表示。将此边界条件代入式(2-38),可得

$$c = \frac{u_{\max}}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \ln H \quad (2-39)$$



将式(2-39) c 值代入式(2-38)可得

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{H}{y} \quad (2-40)$$

式(2-40)就是普朗特得出的流速差定律,也是以流速差(或速缺)表示的流速分布公式,又称为流速分布的速缺形式。

知道了最大流速、水面比降和水深,应用式(2-40)就可以计算流速沿水深的分布。

虽然根据普朗特的假定,式(2-40)只适用于边壁附近,但实测资料表明,该式可推广应用用于全部水流。

2. 不同边壁粗糙度的流速分布公式

因为水面最大流速值 u_{\max} 往往并不知道,所以式(2-40)实际上并不好应用,而且它也没有反映不同边壁粗糙度的影响。前面介绍紊流的发生时,已经说明过边界粗糙情况可以分为光壁、糙壁及过渡三种情况,相应地,其流速分布公式也不相同。

进一步改写式(2-36)为

$$u = u_* \left[\frac{1}{\kappa} \ln y + \frac{1}{u_*} \left(\frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{u_*}{\nu} + u_* C_1 \right) \right] = u_* \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} + C_1 \right) \quad (2-41)$$

则无量纲的对数流速分布公式为

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} + C_1 \quad (2-42)$$

式中系数 κ 和积分常数 C_1 需由试验确定。尼古拉兹在光滑管试验中得到的 $\kappa = 0.4$, $C_1 = 5.5$,代入式(2-42)得

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \lg \frac{u_* y}{\nu} + 5.5 \quad (2-43)$$

式(2-43)为公认的光滑壁面无量纲的对数流速分布公式。

对于紊流粗糙管,对式(2-36)进行整理后可得

$$\frac{u}{u_*} = \frac{2.3}{\kappa} \lg \frac{y}{K_s} + C_2 \quad (2-44)$$

式中, K_s 表示明渠水流周界上的粗糙突起高度。

尼古拉兹通过试验得到紊流粗糙管的流速公式为

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \lg \frac{y}{K_s} + 8.5 \quad (2-45)$$

式(2-45)为公认的粗糙壁面无量纲的对数流速分布公式。

寇利根(Keulegan, G. H.)曾根据巴辛(Bazin, H. E.)的试验资料证明式(2-43)与式(2-45)对于二元明渠水流的糙壁和光壁情况同样适用。

对于过渡区,爱因斯坦(Einstein, H. A.)于1950年研究了寇利根的试验资料后,通过引入一个校正值得式(2-43)与式(2-45)合并成如下的一个公式的形式

$$\frac{U}{u_*} = 5.75 \lg \left(\frac{30.2y\chi}{K_s} \right) \quad (2-46)$$

式中, χ 为校正值得,是 $\frac{K_s}{\delta}$ 的函数(δ 是近壁层流层的厚度),如图2-13所示。

根据以上分析可得:当 $\frac{K_s}{\delta} > 10$ 时,属于糙壁, $\chi = 1$; 当 $\frac{K_s}{\delta} < 0.25$ 时,属于光壁, $\chi = \frac{0.3K_s u_*}{\nu}$;



当 $0.25 < \frac{K_s}{\delta} < 10$ 时,属于过渡区, χ 值由图 2-13 确定。

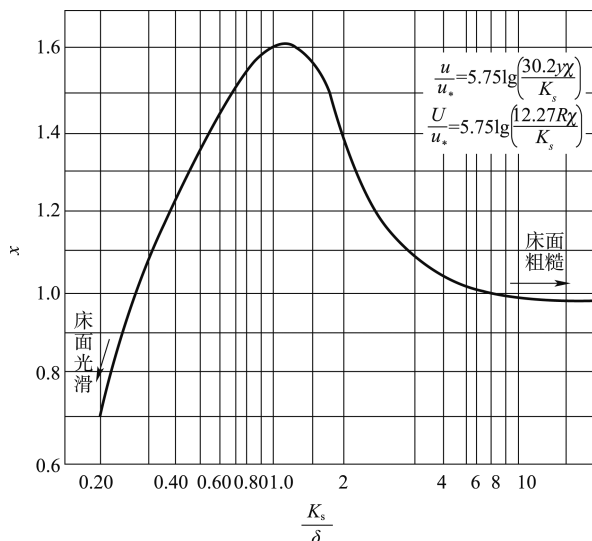


图 2-13 对数流速公式中床面从光滑到粗糙时校正系数 χ 与 $\frac{K_s}{\delta}$ 的关系图

事实上,边界粗糙情况不同,影响其流速分布的主要因素也不同:①光壁条件下,相对粗糙度 $\frac{K_s}{\delta}$ 很小,壁面突起高度深埋在近壁层流层内,以致近壁层流层完全掩盖了突起高度对层流层之外紊流运动的影响,紊流运动只受到近壁层流层的粘性作用。影响其流速分布的主要因素是床面切力、水的密度和粘滞性。②糙壁条件下,当流速加大、雷诺数增加时, δ 值减小,比值 $\frac{K_s}{\delta}$ 增大,如果 $K_s \gg \delta$ 时,近壁层流层将被突起高度破坏,甚至在突起高度的顶上发生水流分离现象而形成漩涡,产生形状阻力。这时边界处的紊流阻力已远远超过粘滞阻力,因而此时的粘滞阻力可以忽略不计。影响糙壁流速分布的主要因素为床面切应力和相对粗糙度。

还需注意的是,也有用如下标准来判断边界粗糙情况的:① $K_s < \delta$ 时,称为水力光滑面。② $K_s > \delta$ 时,称为水力粗糙面。③介于①和②之间的壁面称为过渡粗糙面。这里的水力光滑和水力粗糙是对某一具体管道在一定流量的前提下的。当该管道的流量增大后,水力光滑管可以变为水力粗糙管;当流量减小后水力粗糙管也可以变成水力光滑管。一般可用 $\frac{K_s}{\delta}$ 和 $\frac{u_* K_s}{\nu}$ 这两个指标对紊流的边界情况进行分区:

当 $\frac{K_s}{\delta} \leq 0.4$ 或 $\frac{u_* K_s}{\nu} \leq 5$,属于光滑面;当 $0.4 < \frac{K_s}{\delta} < 6$ 或 $5 < \frac{u_* K_s}{\nu} < 70$,属于过渡粗糙面;当 $\frac{K_s}{\delta} \geq 6$ 或 $\frac{u_* K_s}{\nu} \geq 70$,属于粗糙面。

这里, K_s 为壁面的当量粗糙度, δ 是近壁层流层的厚度, $\frac{u_* K_s}{\nu}$ 称为摩阻雷诺数,可用 Re_* 表示。



【例 2-1】 有一直径 200mm 的新的铸铁管,已知其当量粗糙度 $K_s = 0.35\text{mm}$,水温 $T = 15^\circ\text{C}$,管长 500mm,试求:维持水力光滑管紊流的最大流量时管轴处的流速。

解:水力光滑管时,最大摩阻雷诺数为

$$Re_* = \frac{u_* K_s}{\nu} = 5, \quad \text{即 } u_* = \frac{5\nu}{K_s}$$

$T = 15^\circ\text{C}$ 时水的粘滞系数 $\nu = 1.139 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$,故由上式可以求出此时的摩阻流速为

$$u_* = \frac{5\nu}{K_s} = \frac{5 \times 1.139 \times 10^{-6}}{0.00035} = 0.0163 \text{m/s}$$

管轴线处的流速计算可由式(2-43)计算。此时式中 $y = d/2 = 0.1\text{m}$,则代入得

$$u = u_* \left(5.751 \lg \frac{u_* y}{\nu} + 5.5 \right) = 0.0163 \times \left(5.751 \lg \frac{0.0163 \times 0.1}{1.139 \times 10^{-6}} + 5.5 \right) = 0.385 \text{m/s}$$

【例 2-2】 圆管内径 $d = 300\text{mm}$,内壁粘有 0.6mm 的沙粒,水温 15°C ($\nu = 1.14 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$),求粗糙区最低流量时的壁面切应力 τ_0 。

解:紊流粗糙区的下限 $Re_* = \frac{u_* K_s}{\nu} = 70$,

$$\text{则 } u_* = \frac{70\nu}{K_s} = \frac{70 \times 1.14 \times 10^{-6}}{0.0006} = 0.133 \text{m/s}$$

相应的壁面切应力

$$\tau_0 = \rho u_*^2 = 1000 \times 0.133^2 = 17.7 \text{N/m}^2$$

3. 紊流的断面平均流速

通过以上的推导与分析,紊流的流速分布情况基本上已知。进一步通过对已求得的流速分布公式进行积分即可求得断面的平均流速。

寇利根分析巴辛的实测资料后,得出了光壁条件下的断面平均流速公式为

$$\frac{U}{u_*} = 3.25 + 5.751 \lg \frac{Ru_*}{\nu} \quad (2-47)$$

糙壁条件下的断面平均流速公式为

$$\frac{U}{u_*} = 6.25 + 5.751 \lg \frac{R}{K_s} \quad (2-48)$$

式中, U 为断面平均流速; R 为水力半径; u_* 为摩阻流速, $u_* = \sqrt{gRJ}$ 。

如果仿照式(2-46),引进校正值得 χ ,则式(2-47)与式(2-48)可以合并成为一个公式,即

$$\frac{U}{u_*} = 5.751 \lg \left(\frac{12.27R\chi}{K_s} \right) \quad (2-49)$$

其中,校正值得 χ 的取值同样参考图 2-13。

寇利根还证明出:在糙壁条件下,对湿周上具有相同突起高度的不同形状的过水断面,有

$$\frac{U}{u_*} - 5.751 \lg R = \text{常数} \quad (2-50)$$

从式(2-50)可知对于不同形状的断面,只要比降、水力半径和突起高度相同,它们的断面流速是相同的,因此式(2-49)还可适用于一般的明渠均匀流。