

中国现代科学全书·水利工程

河流动力学

RIVER MECHANICS

王兴奎 邵学军
王光谦 吴保生 等 编著



 科学出版社
www.sciencep.com

中国现代科学全书·水利工程

河 流 动 力 学

River Mechanics

王兴奎 邵学军 等编著
王光谦 吴保生

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了河流动力学的起源及演化、泥沙颗粒的基本性质、明渠紊流的基本概念及河床沙波特性和阻力规律等内容。书中对泥沙的起动、推移和悬移运动规律进行了系统的阐述,对河流学的另一个分支——河床演变学做了扼要的介绍,展望了本学科的发展趋势。全书以泥沙颗粒在水流中运动的力学规律为主线,辅以现象描述、机理分析和实测资料验证,对河流动力学的基础知识进行了阐述。

本书可作为水利工程、环境水利、地质地理专业的设计、科研和教学人员及相关专业的管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

河流动力学/王兴奎等编著. —北京:科学出版社,2004
(中国现代科学全书·水利工程)
ISBN 7-03-012743-9

I. 河… II. 王… III. 河流动力学 IV. TV143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 003138 号

责任编辑:杨家福 吴寅泰 宛 楠/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年9月第一版 开本:850×1168 1/32

2004年9月第一次印刷 印张:10 3/4

印数:1—2 500 字数:273 000

定价:26.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《水利工程》卷编写说明

1998年春,我接受了清华大学水利水电工程系的委托,承担《中国现代科学全书》的《水利工程》卷的主编。《中国现代科学全书》是在全国人大常委会办公厅研究室、全国政协研究室、中共中央党校教研部、中国现代文化研究中心的共同组织下进行编辑工作的。其目标为系统地、全面地概述现代自然科学和社会科学各学科的建设、发展及其学术研究成果,为繁荣和发展我国的科学文化事业,提高全民族的科学文化素质,增进我国与世界各国之间的科学文化交流服务。显然,这是一项迎接21世纪的科学文化建设工程。

1998年5月28日由全国人大常委会办公厅研究室主持召开了第一次编撰工作会议。全国人民代表大会常务委员会副秘书长布赫和中国人民政治协商会议全国委员会副主席钱伟长、罗豪才等参加了会议,讨论了这套规模宏大的全书的编撰方针与原则。根据《中国现代科学全书》编委会的卷目规划大纲,全书分12个门类,690卷。其中《水利工程》卷属于工学门类,又包括五个分卷,分别是《水力学》、《河流动力学》、《水工结构工程》、《水利水电工程》、《海岸及近海工程》。水利工程对我国具有特殊的重要性,这几卷的内容尚不能反映水利工程学科的全貌(如水文水资源已被归入《水文学》卷中),但由于卷数的限制,只能遵守《中国现代科学全书》编委会的决定。

1988年夏,经多方酝酿确定了《水利工程》卷各分卷主编:

- 《水力学》 四川大学杨永全教授
- 《河流动力学》 清华大学王兴奎教授
- 《水工结构工程》 清华大学麦家煊教授

● 《水利水电工程》 清华大学李仲奎教授

● 《海岸及近海工程》 河海大学薛鸿超教授

由以上五位教授和我本人共同组成《中国现代科学全书》的《水利工程》卷的编委会。经过五位教授辛勤努力,2000年初各卷书稿陆续完成,并由编委会分别聘请国内知名专家对书稿进行了审定。但是由于《中国现代科学全书》出版经费发生始料未及的变故,因而出版工作迟迟未能落实。直至2003年中期,经各卷主编多方筹措,并在《中国现代科学全书》编委会办公室协助下,出版工作方得以实施。现在这五卷书即将出版,实在是一件来之不易、值得高兴的事。

这五卷著作共同的特点是,它们都反映了本门学科国内外最新成就,密切结合我国实际,并对本门学科在21世纪的发展前景进行了深入分析与展望。因此我深信,这五卷书不仅对水利专业人士是很宝贵的参考书,而且对于希望了解水利事业的非专业人士也是极为有益的。

历经6年时间,这五卷著作终于出版面世了,我怀着衷心的喜悦再一次对所有参加编著的学者以及《中国现代科学全书》编委会办公室及出版社的努力表示深深的感谢与敬意。

董曾南

2004年6月30日

前 言

河流以一定的边界形态承载水流和泥沙的输移并且受自然营力和人类活动的影响。河流动力学以力学的方法研究水流、泥沙和河床边界三者共同作用下河流的变化规律。由于三个要素都具有随机的性质,所以大部分问题的研究还难以采用确定性的力学方程来描述,多是采用一些在力学基本原理框架下的试验、分析、归纳等方法得出统计特征值。泥沙在河流中运动,影响河道的阻力,使河道的断面变形、纵比降调整,所以泥沙运动是河流动力学研究的核心。

钱宁教授于1983年出版的《泥沙运动力学》是本学科的重要标志;由美国土木工程师协会1999年出版的该书的英译版 *Mechanics of Sediment Transport* 表明了中国泥沙研究在世界学术界的重要地位。作者亲聆钱先生的教诲,在先生指导下历时七载,完成学业,成为泥沙研究的专业人员,在多年教学科研中反复研读《泥沙运动力学》。作者在编写本书的过程中,以《泥沙运动力学》为骨架,在基本理论的推导、普通原理的阐述等方面继承了老师的成果;而在学术观点的论述、研究成果的介绍方面则以近20年来世界范围的结果为主。

本书共分十章,第一章主要介绍本学科的起源、研究方法和与其他学科的交叉关系,第二至五章阐述水流、泥沙和河床的基本性质,第六至八章论述泥沙运动力学的基本内容,第九章介绍河床演变学概论,最后一章简述了本学科的发展趋势。各章的编写分工为:第一章王兴奎和邵学军;第二章邵学军和李丹勋;第三、四、五章邵学军和王兴奎、王光谦;第六章王兴奎和李丹勋;第七章王兴奎和王殿常;第八章王兴奎和禹明忠;第九章吴保生和王光谦;第十章王光谦和王兴奎。全书由王兴奎统稿,北京大学倪晋仁教授

主审。

本书的出版得到国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金(No.50221903)的资助,特致谢意。

清华大学水沙科学教育部重点实验室 王兴奎

2001年6月于清华园

《水利工程》卷编辑委员会

主 编 董曾南

编辑委员 (以姓氏笔画为序)

王兴奎 麦家煊 李仲奎

杨永全 薛鸿超

常用符号

A	面积;水面波的半振幅	F_D	拖曳力
B	宽度;平均河宽	F_L	上举力
C	黏结力;谢才系数;标志近壁层流 层厚度的系数	F_r	水流福氏数
C_D	阻力系数	f	函数;摩擦系数;线性频率;达西 - 韦斯巴赫阻力系数
C_L	上举力系数	f_b	与床面阻力有关的阻力系数
c	空气分子平均运动速度;波速	$\dot{f}_b$	与沙粒阻力有关的阻力系数
D	泥沙(球体、固体)粒径	$\ddot{f}_b$	与沙波阻力有关的阻力系数
D_A	与泥沙颗粒表面积相同的球 体的直径	g_b	以干重计的推移质单宽输沙率
D_m	平均粒径	$\dot{g}_b$	以水下重量计的推移质单宽输 沙率
D_n	等容粒径	g_{bv}	以容积计的推移质单宽输沙率
D_r	分散度	g_s	以干重计的悬移质单宽输沙率
D_s	泥沙颗粒的外接球体直径	g_T	以干重计的全沙单宽输沙率
D_{50}	泥沙级配中以重量计 50% 较之 为小的粒径(中值粒径)	H	水库水深;水面波波高
d	管径;地表以下松散沉积物的厚 度	h	水深
E	能量;离散系数;悬浮功与水流在 单位时间内提供的势能的比值	h_a	与大气压力相应的水柱高度
e	孔隙率	h_c	临界水深
e_b	水流搬运推移质的效率	h_l	水头损失
e_s	水流搬运悬移质的效率	I_1, I_2	悬移质输沙率数值积分中的 参数
F	作用力;阻力;絮凝因素;概率密 度	i_b	推移质中粒径为 D 的泥沙所占 百分数
		i_0	床沙组成中粒径为 D 的泥沙所

占百分数	q_c 泥沙起动时的单宽流量
i_s 悬移质中粒径为 D 的泥沙所占百分数	R 圆半径;水力半径;管道半径
i_T 全沙中粒径为 D 的泥沙所占百分数	R_b 与河床阻力有关的水力半径
J 坡降	R_b' 与沙粒阻力有关的水力半径
J' 克服沙粒阻力所要求的能坡	R_b'' 与沙波阻力有关的水力半径
J'' 克服沙粒阻力所要求的能坡	Re 雷诺数
J_e 能坡	Re_s 沙粒雷诺数
K 幂律流体的稠度系数;阻力校正系数;渗透系数	R_w 与河岸阻力有关的水力半径
K_b 河床阻力系数	r 半径;曲率半径
K_b' 沙粒阻力系数	S 含沙量,以 kg/m^3 计
k_s 糙率尺寸	S_v 体积比含沙量
L 长度;推移质运动的单步距离;	S_{va} 悬移质在高程 a 处的体积比含量
L_s 大尺度漩涡尺寸	S_w 重量比含沙量
l 掺混长度;漩涡尺度;气体分子的平均自由行程	s 相邻两颗沙粒的间距
l_k 最小漩涡尺度	T 时间;周期;颗粒剪切力
M 泥沙可动性参数	t 时间
m' 泥沙在水下的质量	U 在水流运动方向的流速
n 频率;曼宁糙率系数	U_c 泥沙的起动流速
P 粒间离散力	u_s 摩阻流速
PE 势能	u_{sc} 起动摩阻流速
P 压力;湿周;泥沙进入运动的或然率	u 水流纵向脉动流速
Q 流量	u' 纵向流速脉动强度
Q_b 通过与沙粒阻力有关的面积 A_b 的流量	U_b 推移质的运动速度
q 单宽流量;泥沙在床面上保持静止状态的或然率	U_0 作用在床面沙粒上的流速
	u_p 宾汉流体流核运动速度
	U_s 悬移质的运动速度
	U_{max} 垂线最大流速
	V 体积
	v 水流垂直方向的流速
	v' 竖向(垂向)脉动流速强度

W 重力	ϵ_m 动量交换系数
W' 泥沙的水下重量	$\epsilon_{x,y,z}$ 在 x, y, z 方向的扩散系数
W_b 单位床面面积上水柱中推移质的水下重量	η 宾汉体的刚度系数; 涡动黏性系数; 床面距某一参考平面的距离; 反映作用在泥沙颗粒上的上举力的肋动值; 相对高程 ($= y/h$)
W_c 使泥沙起动所需的功率	
W_s 单位床面面积上水柱中悬移质的水下重量	
w' 横向脉动流速的强度	θ 角度; 斜面或岸滩的倾角; 高度混合沙运动中细颗粒泥沙上举力校正系数
X 泥沙颗粒在 x 一方向的位移; 混合中受到隐蔽作用的泥沙的最大粒径; 泥沙粒径参数 x 水流前进的方向	k Karmm 常数
Y 泥沙颗粒在 y 一方向的位移; 混合沙运动中上举力的校正系数	λ 推移质运动单步距离与泥沙粒径的比值; 沙波波长; 阻力系数
y 与水流垂直的方向	μ 黏滞系数
y_n 跃移运动的有效高度	ν 运动黏滞系数
Z 扩散指数	ξ 水面距某一参考平面的距离; 混合沙运动中反映隐蔽作用的参数
z 横向	
z_i 扩散指数的实测值	Π 泥沙的圆度
β 动摩擦系数; 泥沙交换系数与动量交换系数的比值; 角度	σ 标准偏差; 泥沙粒径分配的几何均方差; 泥沙组成的分散度
γ 水的容重	τ 水流剪切力
γ_b 考虑孔隙在内的床沙的容重	τ' 粒间液体的剪切力
γ_f 液体的容重	τ_b 作用在河床上的剪切力 (河床阻力)
γ_m 水沙混合物的容重	τ'_b 床面沙粒阻力
γ_s 泥沙的容重	τ''_b 床面沙波形状阻力
Δ 沙波波高; 边壁粗糙度	τ_B 宾汉极限剪切力
δ 沙波稳定分析中的相位差; 近壁层流层的厚度	τ_c 起去剪切力
ϵ 单位质量水体的能耗率; 亚林的泥沙起动判别准则	τ_0 作用在周界上的剪切力 (如周界为河床, 则 $\tau_0 = \tau_b$)

τ_0	河床表面处粒间液体的剪切力	ρ_s	泥沙(固体、球体)密度
τ_w	作用在河岸或管壁的剪切力	$\Delta\rho$	上下层液体的密度差
Φ	衡量泥沙粒径的尺度;推移质输沙强度参数	X	流速公式中反映自光滑向粗糙边壁过渡的参数
Φ_T	全沙输沙强度参数	Ψ	决定泥沙运动的水流参数
φ	泥沙内摩擦角;泥沙休止角	ω	泥沙(球体)的沉速
ρ	水的密度		

目 录

前言

常用符号

第一章 河流动力学概述	(1)
1.1 起源和发展历史	(1)
1.2 研究对象	(10)
1.3 研究方法	(20)
1.4 与其他学科的交叉关系	(29)
参考文献	(32)

第二章 泥沙颗粒的基本性质	(34)
2.1 风化过程与泥沙的成分	(34)
2.2 泥沙的基本物理性质	(37)
2.3 泥沙颗粒的沉速	(46)
2.4 含沙水体(浑水)的性质	(53)
参考文献	(59)

第三章 明渠紊流的基本概念	(61)
3.1 紊流研究简介	(61)
3.2 紊流基本方程	(63)
3.3 明渠水流的时均流速分布	(65)
3.4 明渠水流的紊动结构	(73)
3.5 明渠紊流的试验研究	(83)
参考文献	(90)

第四章 沙波运动	(93)
4.1 床面形态	(93)

4.2	床面形态的理论分析	(98)
4.3	冲积河流床面形态的判别准则	(105)
4.4	潮流及底流作用下的底面形态	(113)
4.5	研究床面形态的意义	(120)
	参考文献	(123)
第五章 冲积河流的阻力		(126)
5.1	阻力的本质及划分	(126)
5.2	边界稳定时综合糙率的计算方法	(131)
5.3	存在床面形态时的水流阻力	(137)
	参考文献	(153)
第六章 泥沙的起动		(155)
6.1	泥沙起动的随机性	(155)
6.2	无黏性均匀沙的起动	(162)
6.3	无黏性非均匀沙的起动	(167)
6.4	黏性颗粒和轻质沙的起动	(172)
	参考文献	(177)
第七章 推移质运动		(180)
7.1	推移质运动的力学和统计分析	(180)
7.2	均匀推移质的运动规律	(184)
7.3	非均匀推移质的运动规律	(196)
7.4	推移质公式的比较和验证	(202)
	参考文献	(209)
第八章 悬移质运动		(211)
8.1	紊动猝发和泥沙扩散方程	(211)
8.2	悬移质含沙量的垂线分布	(216)

8.3 悬移质输沙率	(227)
8.4 水流挟沙力	(233)
参考文献	(239)
第九章 河床演变学概论	(242)
9.1 河流分类与河型成因	(242)
9.2 不同河型的河床演变	(259)
9.3 河相关系	(272)
9.4 河流系统	(284)
参考文献	(287)
第十章 河流动力学研究的展望	(290)
10.1 研究发展趋势	(290)
10.2 水流结构的研究	(298)
10.3 颗粒流研究	(307)
10.4 数字仿真模拟	(314)
参考文献	(323)

第一章 河流动力学概述

1.1 起源和发展历史

人类和河流的关系可以追溯到人类文明的起源,最早的人类文明都是沿着河流和河谷发展的,如尼罗河、黄河和印度河流域文明。可以说河流对人类文明的发展有巨大的影响。

河流动力学研究的发展与人类为谋求生存而对河流进行的治理和利用有必然的联系。从大禹的疏导百川、治理江河到正在修建的三峡工程,都是人们利用河流动力学的基本原理在开发水利资源、抵御洪水灾害方面取得的成就。例如黄河流域人类文明的发展过程就深刻揭示了人类对河流的认识和对河流动力学的研究对人类历史发展的影响。远古的人类只能“择丘陵而处之”,即逃避洪水。鲧筑坝挡水,虽较逃避洪水有所进步,但也因洪水溃决而成灾,大禹变堵为疏是大的进步。从战国开始修建堤防后出现了具有现代意义的平原河流。明代潘季驯(1521~1595)提出的“束水攻沙”等治河方略,则已涉及河流动力学研究的范畴。

Simons (1977)认为,由于水是中国第一重要的事情,所以大禹修建了堤防沟壑以防治洪水,把他的治水经验和完成的治水工程与现代的理论和工程相比较,很难说泥沙工程学是现代才发展起来的,河流动力学应起源于4000多年前的大禹时代。

1.1.1 古代

相传4000多年前的夏族首领鲧采用修筑堤坝围堵洪水的方法治水失败,其子禹承其业继续治水。禹总结前人的经验,采用疏

导的策略,以水为师,利用水往低处流的自然流势开挖和疏通河道,使洪水和积涝归于河道,流入大海(顾浩,1997)。大禹治水是史传的第一次河流治理,他也因治水有功而被推选为部落联盟的领袖。大禹治水为我国第一个奴隶制国家的建立奠定了基础。

2200多年前蜀守李冰修建的都江堰则是我国古代劳动人民治理河道、兴修水利的典范。都江堰枢纽位于岷江出山口后进入成都平原起点的都江堰市,主要由鱼嘴、金刚堤、飞沙堰和宝瓶口等组成分流、引水、排沙枢纽,河势见图 1.1。河心滩在低水位时出露,高水位时行洪。鱼嘴位于江心,将干流分为内、外江,内江河口过水宽度 130 m,外江河口过水宽度 96 m。金刚堤不过流,飞沙堰距鱼嘴约 1000 m,长约 260 m,高出河槽约 2 m。宝瓶口距鱼嘴 1224 m,底宽 12 m,上部宽 24 m。

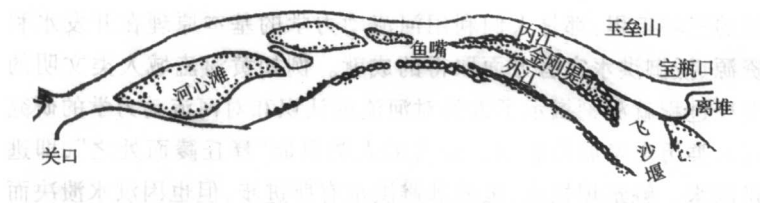


图 1.1 都江堰河势图

在中小流量时,水流出关后主流趋左,平顺进入内江。在内江流量小于 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,飞沙堰不溢流,水流过宝瓶口进入引水渠。当岷江流量为 $600 \sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,内江分流比为 56%。在较大洪水时,河心滩过流,主流趋中,到鱼嘴时偏右,大于 50% 的水流进入外江下泄。大量输移的卵石亦在上游微弯河势弯道环流的作用下进入外江。飞沙堰位于内江弯道的下段,在弯道环流的作用下进入内江的卵石 90% 以上从飞沙堰排到外江,实测从飞沙堰排出的卵石直径最大可在 600 mm 以上。在飞沙堰顶,底流横切,卵石和高浓度的近底悬沙能被有效地排走,表层水流则基本与堰顶平行流向下流,形成堰顶溢流时底部的单宽流量大、上部的单宽