

博士丛书

明渠挟沙水流运动的 力学和统计规律

胡春宏 惠遇甲 著

科学出版社

博 士 丛 书

明渠挟沙水流运动的 力学和统计规律

胡春宏 惠遇甲 著

科 学 出 版 社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 提 要

本书系统地阐述了作者近年来在明渠挟沙水流运动基本规律方面的研究成果,其中包括清水流速分布和阻力规律、边壁对水流结构的影响、浑水流速分布和阻力规律、推移质和悬移质运动的力学和统计规律等内容。本书以大量实测资料为基础,通过采用力学和统计分析相结合的研究方法,对明渠水流和泥沙运动的确定性和随机性规律进行了深入系统的研究。

本书可供从事泥沙运动和河床演变等研究工作的科技人员,以及大专院校有关专业的师生参考。

博士丛书

明渠挟沙水流运动的 力学和统计规律

胡春宏 惠遇甲 著

责任编辑 林鹏

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年5月第 1 版	开本: 850×1168 1/32
1995年5月第一次印刷	印张: 11 $\frac{1}{2}$
印数: 0 001—800	字数: 282 000

ISBN 7-03-004549-1/O·783

定价: 21.60 元

序

环顾当今世界，国家的发达，民族的振兴，无一例外地离不开科学技术的推动作用。年轻博士们历来是科技队伍中最活跃、最富创造性的生力军。他们的科研成果是学科发展强有力的推动力量，是体现一个国家高层次教育水平和科研水平的窗口。为了系统地反映年轻博士们的科研成果，促使他们的快速成长，加强国际国内的学术交流，在老一辈科学家的热心支持下，科学出版社决定出版一套《博士丛书》。

我们的指导思想是突出本丛书的学术性、创造性、新颖性、先进性和代表性，使之成为所有青年博士平等竞争的学术舞台和优秀科研成果的缩影。

这套丛书以专著为主，并适时组织编写介绍学科最新进展的综述性著作。它将覆盖自然科学各个领域，是一套充分体现我国青年学者科研成果和特色的丛书。

丛书编委会将在由著名科学家组成的专家委员会指导下开展编辑工作。本丛书得到了国家自然科学基金委员会和全国博士后管理协调委员会的特别资助。在此我们深表谢意。

《博士丛书》编委会

一九九三年十月

《博士丛书》专家委员会

王 元	王 仁	母国光	庄逢甘
庄 毅	刘西拉	沈克琦	汪培庄
李 未	肖纪美	谷超豪	张存浩
张光斗	陈述彭	郝柏林	赵忠贤
唐敖庆	郭慕孙	高景德	高为炳
谈德颜	阎隆飞	谢希德	路甬祥

《博士丛书》编委会

名誉主编	卢嘉锡	钱伟长		
副主编	白春礼	刘增良		
常务编委	王晋军	尤政	邬伦	林鹏
	屠鹏飞			
编委	王世光	王晋军	王颀安	尤政
	冯守华	冯恩波	白春礼	白硕
	刘增良	安超	乔利杰	邬伦
	许文	宋岩	张新生	汪屹华
	杨国平	林鹏	周文俊	屠鹏飞
	熊夏幸			

前 言

河流是水流和河床相互作用的产物，是水流和河床构成的矛盾的统一体，两者相互作用、相互制约、相互影响，并一直处于发展过程中。水流是这一矛盾统一体的主动因素，水流塑造了河床；河床则是这一矛盾统一体的被动因素，但它反过来又将影响水流的作用。天然河流多数为冲积性河流。所谓冲积性河流是指其河床由松散泥沙颗粒组成，例如黄河下游河段。冲积性河流都是以泥沙运动为纽带的水流与河床边界之间的相互作用的统一系统。天然河流在洪水期非恒定流动的过程中，由于水流的侵蚀作用和岸壁崩塌，在不规则的河床中所挟带的泥沙经历着冲刷和堆积交替变化的过程，不断地进行着河床演变和塑造着河床地形。整个河流系统在演变过程中，自动地调整着断面形态与河床比降，以便达到与水流、泥沙和河床的平衡状态，这就是水流、泥沙和河床边界相互作用过程中的自动调整作用。

河床上的泥沙之所以会运动，就是由于水流具有挟沙能力和冲刷河床的能力，当然河床也具有抗冲能力，只有在水流的作用力超过了河床的抵抗能力之后，泥沙才会运动。起动后的泥沙将可能以在床面附近滚动、跃移或在水体中悬移等形式在水流中运动着，且这些运动形式的泥沙将不断地进行着转化，与之相伴随的是河床形态、高程和组成的不断变化，而这种变化又反过来改变着水流的结构和性质。这充分说明了冲积性河流水沙运动的复杂性。

对于如此复杂的冲积性河流水沙运动的研究将是一个十分困难和艰巨的工作，一方面是由于各种因素之间在力学上的确定性

关系十分复杂，难以直接从理论上加以解决，另一方面还表现为在天然的冲积性河流中，其水流条件、河床泥沙组成以及水流中运动着的泥沙还都具有随机性，这就要求我们在研究天然冲积性河流水沙运动规律时，不仅要研究其力学机制，而且还要研究其随机特性，这样才能更好地了解和反映问题的全貌。基于以上认识，本书试图对明渠挟沙水流的力学和统计规律作一系统的探讨，从一个侧面揭示一些明渠挟沙水流运动的规律性。

全书共分六章。第一章重点介绍了二维均匀紊流流速分布及阻力规律，作为明渠水流研究的基础，同时介绍了边界剪应力的测量方法和边界剪应力的分布规律，以及宽明渠和窄明渠的流速分布与阻力规律。

第二章重点研究了明渠边壁对水流流速分布、阻力系数等的影响，提出了二维流动的判别标准，并对边壁影响的校正方法进行了探讨，提出了一种较为实用的边壁校正方法，还对 Einstein 阻力分割原理中的基本假定 $V = V_b = V_w$ 的可靠性进行了验证。

第三章在介绍了水流中泥沙运动图形后，分析了明渠挟沙水流的随机特性，其中包括水流的脉动特性，床面泥沙所处位置的随机性和水流中泥沙运动的随机性。

第四章探讨了明渠水流挟沙后的水沙相互作用、泥沙的存在对水流结构的影响、挟沙水流流速分布规律及冲积性河流的阻力规律。

第五章着重分析了近底流区内推移质泥沙的运动规律，从力学和统计学的角度对滚动和跃移及推移质输沙率的确定性和随机性规律进行了探讨。

第六章对悬移质运动机理、悬移质浓度分布、悬移质单步运动参数和悬移质输沙率进行了力学和统计分析，同时还对悬移质和推移质泥沙运动的统一性进行了探讨。

在全书的最后为两个附录，其中附录一详细介绍了高速摄影

技术在泥沙研究中的应用，附录二则给出了作者利用高速摄影技术测量得到的系统的跃移运动资料。

在本项研究过程中，先后得到了中国水利水电科学研究院泥沙研究所和清华大学水利水电系泥沙研究室有关领导和专家的大力支持与帮助，费祥俊教授审阅了全书，提出了许多宝贵的意见，本项研究还得到了国家自然科学基金的资助，特在此一并致谢。由于作者水平所限及时间仓促，书中一定会有不少缺点和错误，恳请读者予以批评指正。

目 录

第一章 明渠水流流速分布与阻力规律	1
1.1 边界剪切流的分区模式	1
1.2 二维均匀紊流流速分布与阻力系数	3
1.2.1 二维均匀紊流的运动方程与紊流附加应力	3
1.2.2 二维层流流速分布	6
1.2.3 二维紊流的半经验理论	7
1.2.4 二维紊流的流速分布	11
1.2.5 流速分布与尾流函数	13
1.2.6 二维紊流的阻力系数	16
1.3 明渠水流边界剪应力分布	17
1.3.1 边界剪应力的测量方法	18
1.3.2 矩形明渠边界剪应力分布的定性认识	22
1.3.3 矩形明渠边界剪应力分布的计算	26
1.4 明渠水流流速分布与阻力系数	31
1.4.1 宽明渠水流流速分布	31
1.4.2 窄明渠水流流速分布	32
1.4.3 明渠水流阻力系数	35
参考文献	39
第二章 边壁对于明渠水流结构的影响	44
2.1 引言	44
2.2 宽深比和边壁糙率对流速分布的影响	46
2.2.1 实测流速分布特点及断面分区	46
2.2.2 底部内区垂线流速分布	48
2.2.3 底部外区和表面区垂线流速分布	50
2.2.4 α 和 β 的变化规律	51
2.2.5 窄深矩形明渠流速分布的理论研究	53

2.2.6	垂线平均流速位置的变化	56
2.3	宽深比和边壁糙率对阻力的影响	59
2.3.1	宽深比和边壁糙率对边界剪应力分布的影响	59
2.3.2	宽深比和边壁糙率对光滑明渠阻力的影响	59
2.3.3	宽深比和边壁糙率对粗糙明渠阻力的影响	63
2.4	二维和三维明渠流的判别标准.....	65
2.4.1	现有判别方法的回顾	65
2.4.2	以边界剪应力分布为基础的判别方法	67
2.4.3	作者的判别方法	70
2.5	边壁和床面阻力系数的分割	72
2.5.1	边壁和床面阻力分割的物理模式	72
2.5.2	几种典型的阻力分割方法	73
2.5.3	边壁和床面阻力系数变化规律	77
2.6	边壁影响的校正方法	79
2.6.1	考虑断面形状影响的边壁校正方法	80
2.6.2	作者的边壁校正方法	83
2.6.3	关于边壁校正方法的讨论	86
	参考文献	88
第三章 明渠挟沙水流运动的基本特性		92
3.1	水流中泥沙运动的基本图形	92
3.1.1	泥沙运动的形式及定义	92
3.1.2	滚动、跃移和悬移所占百分比	94
3.1.3	床沙质与冲泻质的划分	96
3.1.4	泥沙运动形式的相互联系与转化	99
3.2	水流运动的随机性及其表达方式	101
3.2.1	水流运动的随机性	101
3.2.2	脉动流速与脉动强度	103
3.2.3	脉动流速的统计规律	105
3.3	床面泥沙颗粒分布的随机性	107
3.3.1	暴露度概念的引入	108
3.3.2	颗粒在床面位置的随机分布	111

3.4	水流中泥沙运动的随机性	113
3.4.1	水流中泥沙运动的基本概率	114
3.4.2	水流中泥沙运动的转移概率	115
3.4.3	泥沙运动的随机性与确定性之间的关系	117
	参考文献	118
第四章	明渠挟沙水流的水流结构和阻力规律	121
4.1	挟沙水流的紊动特性	121
4.1.1	紊动强度	121
4.1.2	脉动幅度（混掺长度）	124
4.1.3	紊动交换系数	125
4.2	挟沙水流的能量损失	127
4.3	挟沙水流的流速分布	130
4.3.1	挟沙水流流速分布形式的三种观点	130
4.3.2	挟沙水流流速分布的研究	137
4.4	冲积河床阻力	140
4.4.1	冲积河床阻力问题	140
4.4.2	冲积河床阻力的组成与表达方式	142
4.4.3	冲积河床阻力的一些重要研究成果	144
4.4.4	作者关于具有沙垄形态的床面阻力的研究	148
	参考文献	160
第五章	推移质泥沙运动的力学和统计规律	164
5.1	颗粒滚动的力学和统计规律	165
5.1.1	颗粒滚动的运动图形及其概化	165
5.1.2	颗粒滚动的力学分析	167
5.1.3	颗粒滚动的统计规律	170
5.2	颗粒跃移的力学分析	179
5.2.1	跃移运动研究现状概述	180
5.2.2	跃移的运动学特性	189
5.2.3	跃移颗粒的受力分析及运动机理	193
5.2.4	跃移运动基本参数的变化规律	203
5.3	颗粒跃移的统计规律	216

5.3.1	引言	216
5.3.2	临界起跃流速与起跃概率	217
5.3.3	跃移参数的统计规律	219
5.3.4	底部浓度与跃高概率密度分布的关系	226
5.4	推移质输沙率的力学和统计规律	229
5.4.1	现有推移质输沙率研究成果的评述	230
5.4.2	Bagnold 推移质输沙理论中有关参数的探讨	236
5.4.3	泥沙颗粒比重对推移质输沙率的影响	246
5.4.4	推移质输沙率的随机性及其统计分布	252
	参考文献	260
第六章	悬移质泥沙运动的力学和统计规律	266
6.1	悬移质泥沙运动机理	266
6.1.1	紊流的猝发现象	266
6.1.2	悬移质泥沙运动的受力分析	268
6.1.3	悬移质运动机理及其运动图形的概化	272
6.2	悬移质浓度分布理论	274
6.2.1	悬移质运动的扩散方程及其简化	274
6.2.2	现有悬移质浓度分布研究成果的评述	275
6.2.3	悬移质浓度分布的类型及其形成条件	283
6.2.4	悬移质浓度Ⅱ型分布的通用公式	286
6.3	悬移质运动的统计规律	288
6.3.1	临界起悬流速与起悬概率	288
6.3.2	垂线浓度分布与悬浮高度概率密度分布的关系	291
6.3.3	单步和单次悬移距离的统计规律	294
6.4	悬移质输沙率的力学和统计规律	296
6.4.1	现有悬移质输沙率研究成果的述评	296
6.4.2	悬移质输沙率计算一般模式的探讨	299
6.4.3	悬移质输沙率的随机性及其统计分布	301
6.5	悬移质与推移质泥沙运动的统一性	304
6.5.1	悬移质和推移质泥沙在运动形式上的相互联系与转化	304
6.5.2	悬移质和推移质泥沙运动在力学上的统一性	305

6.5.3 悬移质和推移质泥沙运动在统计学上的统一性	307
参考文献	308
附录 1 高速摄影技术及其在泥沙研究中的应用	312
附录 2 部分利用高速摄影技术测量的跃移资料	320

第一章 明渠水流流速分布与阻力规律

明渠水流流速分布与阻力规律的研究是明渠挟沙水流研究的基础。在本章中，作者首先对二维均匀紊流的半经验理论及有关的研究成果进行了回顾。其次，考虑到由于边壁的存在，以及明渠水流运动的特点，对明渠边界剪应力的测量方法及其分布规律进行了分析研究，最后对宽明渠和窄明渠的水流运动规律进行了探讨。

1.1 边界剪切流动的分区模式

由于固体边界的存在，通过平板、管流和明渠的水流流动均属于边界剪切流范畴，即各流层间存在流速梯度的流动。根据现代流体力学的研究，边界剪切流一般可划分成两个区^[1,2,3]，如图1.1所示，图中的两个区分别称为内区和外区，内区又包括粘性底层、过渡层和惯性层。在各个区内，决定水流运动的因素有所不同，其运动规律也是不同的，各区具有如下特性。

1. 内区

粘性底层：在这一层内，水流的粘性起决定作用，水流直接受边界控制，其厚度约为边界层厚度的1%—1%，即 $\frac{u_* y}{\nu} \approx 0-5$ ，其中 u_* 为摩阻流速， y 为距边界的垂直距离， ν 为水流运动粘滞系数。粘性底层的厚度与边界糙率高度之比决定了水流的流动性质是属于光滑流动，还是粗糙流动。

过渡层（缓冲层）：在这一层内，水流的粘性和惯性共同起作

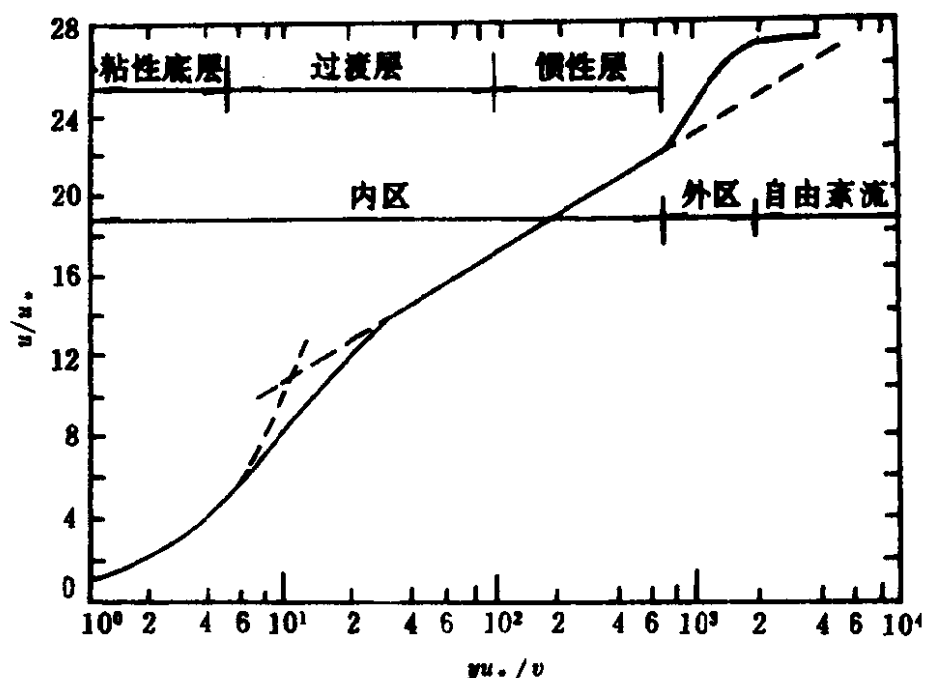


图 1.1 边界剪切流的分区

用，水流直接受边界的控制，过渡层范围约为 $\frac{u_* y}{\nu} \approx 5-60$ ，粘性底层和过渡层都很薄，占整个内区的很小一部分。

惯性层：在这一层内，水流的惯性起主要作用，水流仍直接受边界控制，这一层厚度约为边界层厚度的 15—20%，或 $\frac{u_* y}{\nu} \approx 60-1000$ ，内区主要是指惯性层。

2. 外区

在这个区内，水流的紊动能能量交换主要是通过传递、消散和扩散的方式进行，因此，水流的性质同上游的历史有关；在平板二维流动时，受到边界层厚度的影响，在明渠中，则还受到边壁的限制。

值得注意的是，在明渠中，实测垂线流速分布表明，垂线最大流速往往并不一定在水面，如图 1.2 所示，这时外区只到垂线最大流速处，上面还存在一个“表面区”，在后文中，还将对这个区的存在原因、条件和范围等进行深入分析。

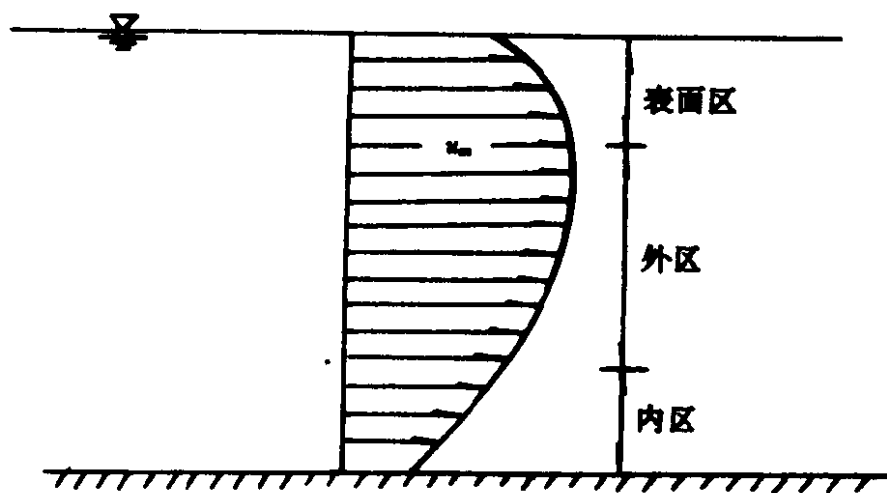


图 1.2 明渠垂线流速分布示意图

1.2 二维均匀紊流流速分布与阻力系数

1.2.1 二维均匀紊流的运动方程与紊流附加应力

上一节中介绍了边界剪切流的分区，在本节中论述的紊流半经验理论仅适用于内区或对数流速分布公式也可以近似表示的外区，且为最大流速在水面的二维均匀紊流，至于其它情况（如窄深明渠流等）将在以后的章节中陆续提到。

众所周知，自然界的水流流动现象通常分为层流和紊流，并采用雷诺数 $Re \left(= \frac{uR}{\nu} \right)$ 来判别，其中 u 和 R 分别为水流的流速和水力半径，当 $Re < 1000-1500$ 时，认为是层流， $Re > 1000-1500$ 为紊流。关于层流和紊流的基本特性可参阅有关的文献，在此就不详细叙述了。

无论是层流还是紊流，其不可压缩流动的瞬时运动都可采用