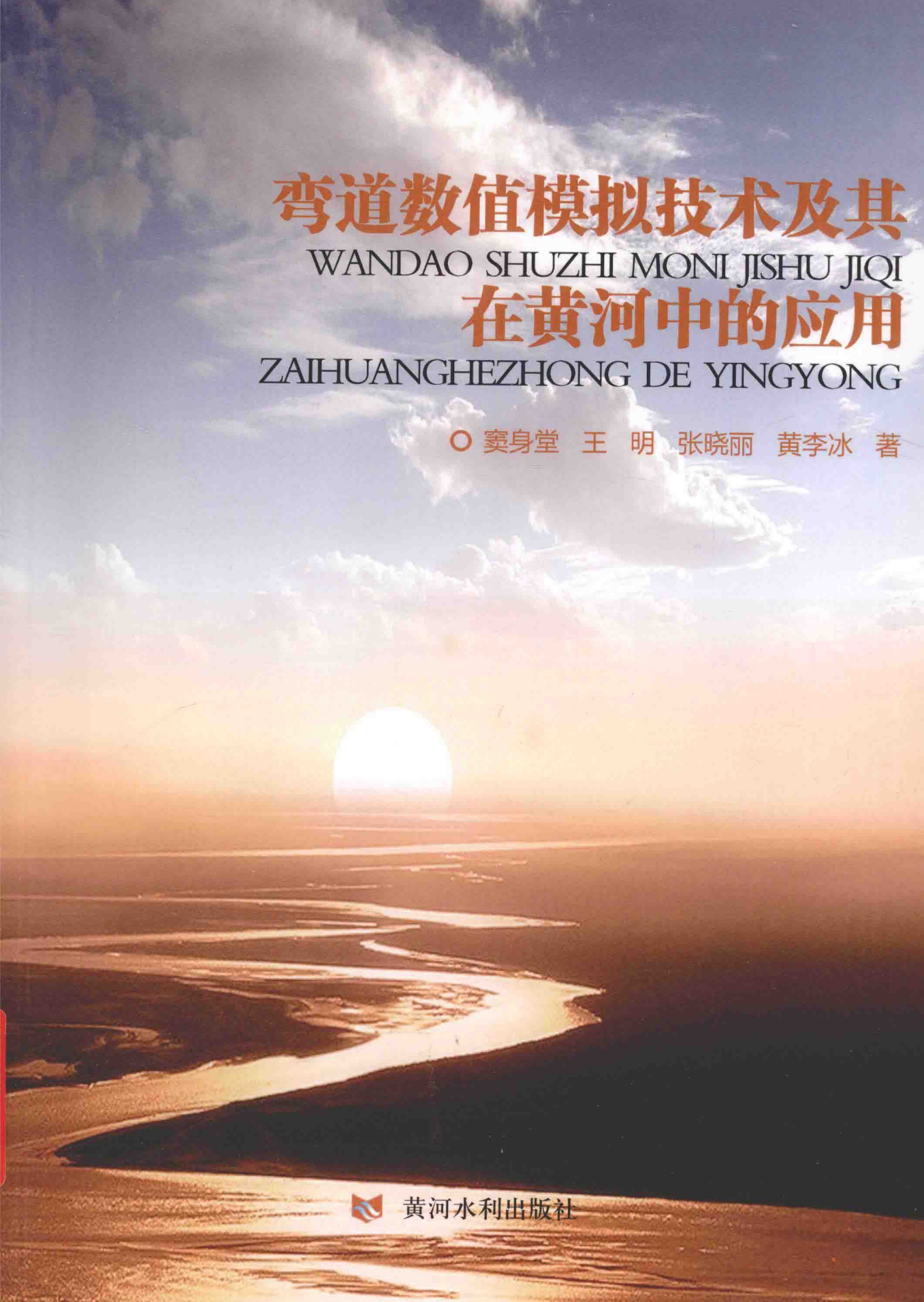




弯道数值模拟技术及其 WANDAO SHUZHI MONI JISHU JIQI 在黄河中的应用 ZAIHUANGHEZHONG DE YINGYONG

○ 窦身堂 王 明 张晓丽 黄李冰 著



黄河水利出版社

弯道数值模拟技术及其在黄河中的应用

窦身堂 王 明 张晓丽 黄李冰 著

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书论述了弯道水沙输移规律及其数学模拟与应用,全书共分八章。第1章介绍了弯道水沙输移基本特性及河流数学模型的基本问题;第2、3章重点论述了弯道水流的数学模型及弯道水槽试验成果,包括三维紊流模型,水深积分二维模型及二、三维嵌套水流模型建模与关键问题处理,弯道水流运动的基本规律,弯道水流结构,横向环流的形成、发展及消退过程,以及数学模型的验证与测验;第4、5章论述弯道泥沙运动规律及数学模拟方法,包括泥沙分级起动、河床粗化、动态保护层的形成与破坏规律过程,探讨了弯道三维泥沙数学模型及关键问题处理方法;第6、7、8章介绍了河流水沙数值模拟中的前、后处理技术,以及弯道数学模型在黄河中的应用情况等。

本书是一部涉及水力学、河流动力学和数学模拟技术的科技专著,可供广大河流及治河工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

弯道数值模拟技术及其在黄河中的应用/窦身堂等著. —郑州:黄河水利出版社,2015. 12

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1295 - 3

I. ①弯… II. ①窦… III. ①黄河 - 泥沙输移 - 数值模拟 - 研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 286277 号

组稿编辑:李洪良 电话:0371 - 66026352 E-mail:hongliang0013@163.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:hhslebs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8.25

字数:190千字

印数:1—1 000

版次:2015年12月第1版

印次:2015年12月第1次印刷

定价:32.00元

前 言

弯曲河流是自然界中较为常见的河型之一,弯曲河流的水沙输移特性及河道演变规律对河岸稳定、河道整治及近岸工程建设起到了非常重要的作用。由于弯曲河道边界条件的不同,弯道中行进的水流泥沙运动特性也与顺直河段中的有所不同,特别是强弯河段,岸线曲折、地形复杂,水流具有明显的三维特性,河道中具有主流引起的纵向输沙及环流引起的横向输沙,两方向输沙是决定弯曲河流冲淤的主要动力因素。

本书基于弯道水沙输移基本理论,结合弯道水槽试验,对弯道水沙输移特性及水流泥沙数学模型展开研究,模型主要包括三维水沙数学模型、弯道修正二维水沙模型、水深平均二维水沙数学模型及二、三维嵌套水流模型;并利用弯道水槽试验分析比较了各模型在弯道中的预测效果及计算时间;最后以天然河道为例检测了二、三维嵌套水流模型的可行性与合理性。

本书的出版得到了“十二五”科技支撑计划项目“黄河中下游高含沙洪水调控关键技术研究”(2012BAB02B02)的资助。

本书共分8章,主要内容如下:

第1章介绍了本书研究的背景与意义,并对弯道水沙输移基本特性及河流水沙数学模型的基本问题进行了探讨。

第2章介绍了基于正交曲线网格,并分别采用壁函数法和 Poisson 方程法处理近底和自由水面问题的三维紊流模型数值模拟方法;然后,在考虑纵向、横向流速垂线分布不均的同时,简化三维因素,忽略垂向流速,结合弯道水流流速分布、床面阻力分布、水流紊动特性等因素,将三维水流方程沿水深积分建立了弯道修正二维水流模型;最后,探讨了二、三维水流模型的嵌套问题,提出二、三维嵌套水流模型的网格布设方法与水力要素守恒型连接模式。

第3章通过弯道水流试验揭示弯道水流运动的基本规律,深入认识弯道水流结构,分析横向环流的形成、发展及消退过程,并将试验成果用于数学模型验证,以检测、检验数学模型准确性与适用性。

第4章理论分析泥沙分级起动、河床粗化、动态保护层的形成与破坏规律,并通过弯道水槽试验,研究弯道泥沙输移、河床变形、床沙级配调整及河湾形态变化的基本规律。

第5章在水流模型基础上,分别建立三维泥沙数学模型、弯道修正二维泥沙模型(考虑横向输沙的二维模型),修正模型中考虑了悬移质垂线分布、弯道低沙输移特性及弯道床面泥沙起动特性等影响因素;并利用弯道水槽试验分析比较了各模型在弯道中的预测效果及计算时间,分析各模型的贴真性。

第6章首先探讨了河流水沙数值模拟中的前、后处理技术,主要包括正交曲线网格生成、河道地形数值化及背景网格生成、流场及流(迹)线的绘制、等值线生成及地形图填充等;然后,将二维、三维嵌套水流模型应用于天然河道,检验其可行性与合理性。

第7章介绍了弯道数学模型在黄河中的应用情况。

第8章为结论与展望。

由于编者水平有限,书中难免存在不足和疏漏,欢迎读者提出宝贵意见。

作 者

2015年5月

目 录

前 言

第 1 章 弯道水沙基本特性	(1)
1.1 弯道基本情况	(1)
1.2 弯道水沙特性	(1)
1.3 河流水沙数学模型	(13)
1.4 小 结	(20)
参考文献	(21)
第 2 章 弯道水流数学模型	(25)
2.1 $k-\varepsilon$ 两方程紊流模型	(25)
2.2 坐标系及基本方程的变换	(26)
2.3 基本方程的离散	(29)
2.4 模型的求解	(31)
2.5 自由水面及边界处理	(35)
2.6 定解条件	(38)
2.7 弯道修正二维水流模型	(40)
2.8 弯道水流二维、三维嵌套模型	(41)
2.9 小 结	(42)
参考文献	(43)
第 3 章 弯道水流试验及其数学模型验证	(44)
3.1 弯道水流试验	(44)
3.2 三维水流数学模型计算结果验证与分析	(52)
3.3 二维水流数学模型计算结果与分析	(59)
3.4 小 结	(62)
第 4 章 河床粗化及弯道冲刷试验研究	(63)
4.1 河床粗化	(63)
4.2 弯道水槽冲刷试验	(69)
4.3 河湾形态变化研究	(74)
4.4 小 结	(77)
参考文献	(78)
第 5 章 弯道泥沙数学模型及验证	(79)
5.1 三维泥沙数学模型	(79)
5.2 弯道二维泥沙模型	(85)
5.3 弯道冲刷三维模型计算结果验证分析	(87)

5.4	二维泥沙数学模型计算结果分析	(91)
5.5	小 结	(95)
	参考文献	(96)
第6章	水沙数学模型前后处理及二维、三维嵌套水流模型应用	(97)
6.1	水沙数学模型基本前后处理技术	(97)
6.2	二维、三维嵌套水流模型的应用	(104)
	参考文献	(105)
第7章	弯道数学模型在黄河中的应用	(111)
7.1	黄河小北干流引水渠效果计算分析	(111)
7.2	黄河下游弯道计算分析	(117)
第8章	结论与展望	(122)
8.1	结 论	(122)
8.2	展 望	(123)

第 1 章 弯道水沙基本特性

1.1 弯道基本情况

弯曲河流是天然河流中最常见的河型,天然冲积河流通常具有向弯曲型发展的倾向。在我国,这种河型分布得十分广泛,如淮河流域的汝河下游和颍河下游,黄河流域的渭河下游,长江流域的汉江下游以及素有“九曲回肠”之称的长江下荆江河段等,都是典型的弯曲型河道^[1]。

天然弯道弯曲程度是沿程变化的,但在一定范围内常近似为圆弧形,就横断面而言,一般呈不对称三角形,凹岸一侧坡陡水深,凸岸一侧坡缓水浅。弯道中行进的水流泥沙在重力和惯性力综合作用下,水位沿横向呈曲线变化,凹岸一侧恒高于凸岸,弯道凸岸水流含沙量较大,河床泥沙颗粒较粗;凹岸水流含沙量相对较低,河床泥沙颗粒相对较细。

弯道水流泥沙规律,在河道整治的规划设计和工程建设、港口兴建、改善河道航运以及引水防沙等方面得到了广泛的利用,如利用弯道凹岸坡陡水深的有利条件,兴建港口、码头;利用弯道横向环流的作用,确定引水口的最佳位置,即引水口布置在含沙量较低、泥沙颗粒较细位置;利用弯道水流泥沙运动的特点,合理地布置电站的排水口,实施“正面引水、侧面排沙”的工程布置,以期发挥最大效益。

天然河流和弯道试验均表明:弯道处在不断的演变当中,凹岸的不断蚀退和凸岸的相应淤长使河湾在平面上不断发生位移和形状改变;随着弯道的演变发展,会出现河道自然裁弯、撇弯、切滩等突变现象。上述现象会使河势发生变化,任其发展下去会对整治工程、河岸建筑物产生不利影响,有时会带来严重后果。

由此可见,研究弯道水沙输移特性及其演变发展规律,不仅对于弯道本身的稳定性,而且对依附于弯道河岸的相关建筑物正常发挥效用都具有非常重要的意义,具有广泛的科学价值和实用价值。

1.2 弯道水沙特性

1.2.1 弯道水沙输移规律研究现状与进展

J. Thomson^[2]于 1870 年首先在试验中发现了弯道水流同时存在着纵向和横向流动,至 19 世纪末期,J. Thomson^[3]、H. Engels^[4]等著名学者都在试验中发现弯道泥沙存在横向输运,凹岸的模型沙被异岸转移。

我国学者张瑞瑾^[5]早在 20 世纪 60 年代对河道水流的环流结构及河段冲淤动态进行了研究,提出了以下认识:弯道环流是河道水流中最常见、最重要的因离心惯性力而产生

的环流。弯道河流中的横向输沙主要是由横向环流造成的,而不是由纵向水流造成的,河道水流的输沙是有纵横两方面联系的。因此,一个河段的冲淤除受纵向水流的重要影响外,还受环流的重要影响。如果只看到纵向水流的作用,而忽略环流作用,则对河段冲淤动态全面了解,在很多情况下是不可能的。此后,张瑞瑾和丁君松对此做了大量开创性的研究工作,如张瑞瑾通过比较弯道水槽试验后不同部位颜色沙的分布来研究弯道泥沙输移特性(研究泥沙同岸输移及异岸输移规律);丁君松首次提出了弯道横向挟沙力的概念,并基于理论分析和弯道试验给出了弯道横向挟沙力的计算公式。

此外,国内外很多学者都对弯道水流、泥沙的特性进行了研究,并取得了丰硕成果。对弯道水流、泥沙的研究主要集中在弯道水流水面横比降、纵向流速分布、横向环流及输沙特性规律等方面。

1.2.1.1 水面横比降

当水流由直段进入弯段后,由于惯性离心力的作用而使弯道的径向自由水面从凸岸向凹岸逐渐升高,形成具有一定倾斜角度的横比降,凹、凸两岸的水面高度不同,使得自由水面的平衡状态遭到破坏。

张红武^[6]将弯道分为进口直段、弯道段和出口直段进行研究,得到了分段计算水面超高的公式,并推导出水面超高的起始和终止位置。王平义^[7]认为弯道中凹岸区水流结构较凸岸区水流结构更复杂,会形成不同的水面横比降,应分别导出弯道凹岸区和凸岸区的水面横比降公式。黄河水利科学研究院开展的浑水动床模型试验结果表明,弯道水面出现的横比降还与水体所含泥沙的浓度有较明显的关系,据此刘焕芳^[8]给出了水面横比降在全弯道上的分布公式。武彩萍等^[9]认为弯道悬沙水流水面横比降与清水相比略有差异,悬沙水流较清水时弯道水面横比降小,弯道半径越大,差异越小。工程上应用较多的横比降计算公式是罗索夫斯基对数公式^[10]和马卡维耶夫抛物线公式^[11]。

1.2.1.2 纵向流速分布

弯道中的环流强度及分布规律与纵向流速分布密切相关,在研究弯道横向环流流速分布时,需先了解水流纵向流速分布,通常是从试验或理论的角度来揭示受弯道环流作用时纵向流速的分布规律。

早在20世纪30年代,波达波夫^[12]根据 $N-S$ 方程,并假设液体沿圆形轨迹运动,导出了沿河宽的流速分布公式,但该公式的前提假设并不成立。1946年,卡日尼科夫从紊流理论及试验两个方面研究了纵向流速,并假设不存在横向环流,同实际水流运动情况不符。罗索夫斯基^[13]从三维水流角度把弯道分成三段来研究弯道水流问题,由于公式的推导过程中未计及能量损失,故只能在较短的距离内使用。1985年,Thorne^[14]等根据Fall河观测资料,对凹岸区域纵向流速分布进行了研究,给出了纵向流速在凹岸区域的经验表达式。1986年,黄河水利委员会水利科学研究所大型河湾模型中的测验结果表明研究弯道纵向均流速的分布尚需考虑弯道的边界条件和来水条件,刘焕芳^[8]根据弯道水流运动的边界条件和连续方程式,由雷诺方程沿垂线积分,得到弯道水流垂线平均的纵向运动方程式,该公式在一定程度上考虑自由水面变形和横向水流运动对纵向流速的影响,但仅适用于规则弯道中的水流运动,对断面形状或边界沿程发生变化的情况,公式的适用性就受到限制。王伟、蔡金德^[15]于1989年对矩形断面的人工弯道水深和流速平面分布进行了

理论分析,从谢才公式和水面超高公式入手,建立了弯道内任一点水深和纵向垂线平均流速的计算公式。

1.2.1.3 弯道环流分布

弯道中行进的水流运动特性与顺直河段中的有所不同,特别是强弯河段,岸线曲折变化,地形复杂,水流具有明显的三维特性^[16]。通常表层水流的流速较大,而底层流速较小,表层水流的向心加速度大于底层水流的向心加速度,水流在垂直方向存在径向压力梯度。这样,表层水流趋向于向外运动,而底层水流则向内运动,靠近河岸处将形成平衡性垂向流速分量,该流速分量的方向在凸岸为向上,在凹岸为向下,从而在弯道横断面上形成环流。

20 世纪 30 年代波达波夫^[17]利用 $N-S$ 方程,并借助纵向流速的抛物线分布公式,研究了弯道水流的运动规律。张红武等^[18]认为该公式仅适用于层流或瞬时紊流的 $N-S$ 方程,不宜导出时均紊流的环流公式。1933 年,马卡维耶夫^[9]直接利用雷诺方程导出了轴对称水流条件下的运动方程式,为弯道环流的近似理论解奠定了基础,并于 1940 年利用纵向流速的抛物线分布公式解出了环流计算公式,具有代表性的是 1948 年他利用流速沿垂线分布的椭圆公式导出的公式,但该公式过于复杂,而且推演过程中取紊动动力黏性系数为常数的做法也显粗糙。1950 年,罗辛斯基及库兹明^[19]借助指数流速分布公式提出了弯道中纵向流速分布公式。20 世纪 50 年代乌克兰学者罗索夫斯基^[13]系统地研究了弯道水流的运动规律,取得了较以前的研究者更为杰出的成就,他撰写了世界上第一部弯道水流的专著,至今仍不失很大的参考价值。1964 年,张定邦^[20]用简化了的对数分布公式解得环流流速公式,将环流流速分布由定床向动床过渡。1972 年,Englelund^[21]采用了“河底任一点的流速向量应与该点的剪切力方向相同”的不正确假设,针对长的圆形河湾中充分发展的紊流进行分析,使得计算的横向流速值随谢才系数 C 的增减而变化过大的缺点。后张红武与吕昕^[18]研究表明,当 C 较小时,Englelund 公式计算的结果要较实测值偏小。1977 年,Vriend^[22]应用摄动法、对数型纵向流速分布式和不可滑动底边界条件,得到弯道环流的通用公式。张红武等^[18]于 1984 ~ 1986 年在大小不同的河湾的概化模型上,采用 Prandtl 的处理方式,并利用弯道中纵向流速的实测资料进行分析,得出了比较简便的环流沿水深分布公式,但仅对在近壁区有明显的优势。孙东坡^[23]于 1992 年从紊流雷诺方程出发,采用普朗特紊流切应力构架,由因次分析确定掺长,探讨了明渠恒定二元环流的流速分布,导出了环流流速分布公式。

20 世纪后期,随着计算机的发展,不少研究者从数学模型的角度对弯道流动进行了研究,比较有代表性的有:1976 年 De Vriend^[24]成功地计算了浅式弱弯曲低雷诺数弯道流。1979 年,M. A. Leschziner 和 W. Rodi^[25]成功地计算了 180° 强弯曲明渠流动。R. D. Moser 和 P. Moin^[26,27]对小曲率低雷诺数的弯槽流动进行直接数值模拟,模拟的结果显示了凹壁和凸壁对紊流统计量和雷诺应力影响上的显著差异。我国学者李义天、谢鉴衡^[28]对冲积平原河道平面二维流速分布的数值模拟进行了研究,他们提出的方法可以计算弯道断面不规则的天然河湾水流的流场,较他人有很大的进步。董耀华^[29]进行了矩形弯道水流部分抛物线三维数学模型的研究和计算,取得了一定成果,但还不适用于天然河湾的模拟。李治勤等^[30]用准二维水流数学模型对桃河部分长连续弯道中急流的运动进行了

数值模拟。蒋莉、王少平等^[31]利用应用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模式数值模拟 90° 弯曲槽道内的湍流流动。

1.2.1.4 弯道泥沙输移特性

弯道中悬移质泥沙运动与弯道环流,环流将表层含沙较小而粒度较细的水体带到凹岸,将底层含沙较多而粒度较粗的水体带向凸岸,形成横向输沙不平衡;而推移质底沙的运动主要与纵、横向近底流速及河床形态(主要是横向底坡)密切相关,从趋势上讲,同弯道螺旋流底部流向一致,因此推移质底沙的运动方向也是由凹岸斜指凸岸。

19 世纪末, J. Thomson^[3]、H. Engels^[4] 等著名学者在试验中发现,凹岸的模型沙都存在异岸转移。而后众多学者的研究表明,只有在弯曲半径很小且弯角较大的陡弯上,横向环流强、底部螺旋流的旋度大的情况下,才存在异岸转移现象。张瑞瑾、谢葆玲^[32]的弯道水槽试验表明,同岸输移的规模一般超过异岸输移的规模,异岸输移的规模随流量的增加而减小。1975 年, Hooke^[33]对弯道输沙率和剪切力分布进行了试验,认为虽然横向环流对弯道剪切力的分布有一定影响,并使得冲刷能力较强的表层水流沿凹岸折向河底,但对于凸岸边滩的形成起决定作用的不是横向环流,而是泥沙运动的横向和纵向分布。1984 年, Parker^[34]在 Kikkawa 等提出的计算推移质输沙率方法的基础上,提出了关于推移质横向输移的通用方程,研究中考虑了床面横比降、环流的影响。1992 年, Li Ligeng 和 Schiara^[35]对河湾蠕动速率问题进行了研究,指出河流蠕动流速与凹岸区域单宽推移质输沙率和河湾的曲线长度有关。

近期对于弯道泥沙输移特性的研究已经由以前的单一模型试验发展到今天的数值模拟或模型试验与数值模拟相结合的阶段。芮德繁^[36]基于多种模式的三维紊流模型进行了分析比较,对连续弯道的水沙输移及河床冲淤特性进行研究。方春明^[37]通过求解立面二维弯道环流运动的方法,在平面二维水流泥沙数学模型中考虑弯道环流的作用。钟德钰、张红武^[38]考虑弯道环流输沙效应对平面二维水沙数学模型的悬移质、推移质输沙方程和河床变形过程进行了扩展,经扩展后的平面二维水沙数学模型能模拟环流横向输沙及由其引起的河床冲淤和河岸变形。

1.2.2 弯道水沙的基本特性

1.2.2.1 弯道水流的基本特性

弯曲河道的床面和岸壁组成了弯道水流的外边界。由于边界条件的不同,弯道中行进的水流运动特性也与顺直河段中的不同,特别是强弯河段,岸线曲折变化,地形复杂,水流具有明显的三维特性^[16]。仅就弯道水流而言具有以下几方面特性:

第一,当水流由直段进入弯段后,惯性离心力的作用使弯道的径向自由水面从凸岸向凹岸逐渐升高,形成具有一定倾斜角度的横比降,出现水面超高。

第二,弯道中,表层水流的流速较大,而底层流速较小,因表层水流的向心加速度大于底层水流的向心加速度,水流存在着径向的压力梯度。因此,表层水流趋于向外运动,而底层水流则趋于向内运动,靠近河岸处将形成平衡性垂向流速分量,该流速分量的方向在凸岸为向上,在凹岸为向下,从而形成对弯道河床断面产生很大影响的螺旋流。

第三,弯道中床面附近水流切应力的分布与顺直河段中有所不同,尤其是在次生环流

发展较强时。最大剪切力区在弯道进口段靠近凸岸,至弯道中段开始向凹岸过渡,低剪切力区位于弯道上段的凹岸、弯道下段的凸岸边滩附近。

第四,弯道中水流紊动结构复杂。进入弯段后,其紊动强度要较入弯前自然状态时有所增大,从而会引起水流能量损失的较大增加。

1. 水面横比降

当水流由直段进入弯道后,由于离心力的存在,自由水面的平衡状态遭到破坏。由试验^[18]可知,进入弯段后水面即有从凸岸向凹岸倾斜的横比降 J_r 出现(通过凸岸水位降低来实现),最大横比降发生在弯顶以下,继而逐渐减小(通过凸岸水位回升及凹岸水位下落来实现),但直至弯段出口处仍有一定数值,出弯段后迅速消失。

以二元恒定环流为例,在弯道水流中取距离曲率中心为 r 处的单位底面积、高为 H 的微小水体,分析其横向受力,包括离心力 F 、内侧水压力 P_1 、外侧水压力 P_2 、河底横向阻力 Γ ,见图 1-1。

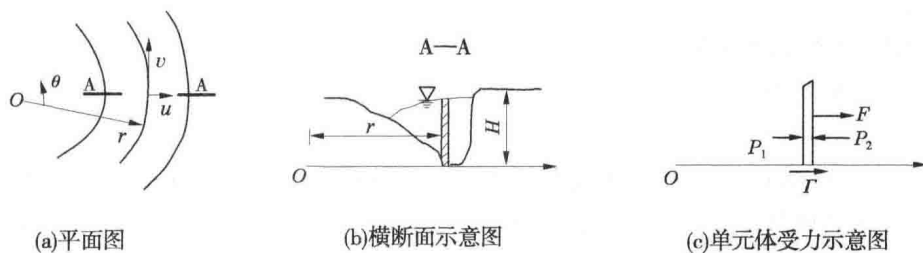


图 1-1 弯道水流示意图

规定水流纵向为 $\vec{\theta}$ 方向,横向为 $\vec{r}$ 方向, u 、 v 分别为 $\vec{\theta}$ 、 $\vec{r}$ 方向流速, U 、 V 分别为 $\vec{\theta}$ 、 $\vec{r}$ 方向垂线平均流速。

按照达朗贝尔原理列出平衡式,若忽略河底横向阻力 Γ 可得到一般惯用的弯道水面横比降近似计算式,即

$$J_r = a_0 \frac{u^2}{gr} \quad (1-1)$$

式中: a_0 为流速分布系数,可依纵向流速分布公式求得。

从天然弯曲型河流的观测结果看,理论计算和室内试验测量的结果基本上是一致的,但由于天然弯道不是一个简单的圆弧,河岸参差不齐,河床形态差异很大,情况自然要比水槽试验的结果复杂得多。

应该说明的是,采用上述横比降公式计算出的 J_r 为环流充分发展的部位的值,也即横比降的最大值,而对于环流的发展与消退阶段,横比降则是沿程发生变化的。根据张红武、吕昕^[18]试验研究结果,全弯段的横比降应表示为

$$J_{r\text{全}} = f\left(\frac{\theta}{\varphi_0}\right) J_r \quad (1-2)$$

式中: φ_0 为河湾转角; θ 为所在断面与进口断面的夹角; $f\left(\frac{\theta}{\varphi_0}\right)$ 可表示为

$$f\left(\frac{\theta}{\varphi_0}\right) = a_1 \left(\frac{\theta}{\varphi_0}\right)^2 + b_1 \left(\frac{\theta}{\varphi_0}\right) + c_1 \quad (1-3)$$

式中: a_1 、 b_1 、 c_1 为系数,需由实测资料确定。

若对式(1-2)沿河宽进行积分,则可求两岸的水面高差 Δz_0 ,通常称之为超高(r_1 、 r_2 分别为凸岸和凹岸曲率半径):

$$\Delta z_0 = \int_{r_1}^{r_2} J_{r\pm} dr \quad (1-4)$$

实际上,常见河湾的曲率半径 r_0 多为河宽 B 的 2~4 倍以上,纵向流速沿河宽的分布变化对超高的影响并不明显。可采取另一种更简便的做法,采用弯段水流轴线的曲率半径 r_0 及断面平均流速 $\bar{U}$ 来表示:

$$\Delta z_0 = a_0 \frac{\bar{U}^2}{gr_0} (r_2 - r_1) \quad (1-5)$$

2. 弯道水流结构影响因素

在不考虑泥沙方面因素的前提下影响弯道环流的因素可分为三类^[7]:一是与河道形态有关;二是与水流条件有关;三是与水流特性有关。

1) 河道形态参数

这些参数包括横断面参数以及描述弯道特征的参数。它们是水深 H 、河宽 B 、岸坡坡度 α 、弯道中心轴线半径 r_0 、弯道中心角 φ_0 、粗糙度 C 和河道纵向坡度 i_b 。一般说来,环流强度与弯曲半径成反比,与水深成正比,因此常把相对水深 H/r_0 作为影响环流的一个主要因素。

2) 水流参数

水流参数包括水流流速 (u, v) 在任一点的大小和方向、压力 P 分布、进口处的水流条件,紊动特征参数 γ_t 也包括在内。

3) 水流特性参数

弯曲河道中两个重要的特征参数是水流动力黏性系数 μ 和密度 ρ 。

3. 纵向流速分布

弯道流速分布受过水断面形状及其纵向变化、边壁粗糙程度、因弯道离心力而中泓偏离等因素的影响,而呈现复杂的三维流动。应当承认,全面考虑各种影响因素,对全断面的流速分布用一个通用公式加以描述是极其困难的,因此多限于讨论恒定、均匀、二维时均流中的分布问题。

常用的主流流速的垂线分布有对数型流速分布、抛物线型流速分布、指数型流速分布、椭圆曲线型流速分布等,见表 1-1。

但是,对于具有次生流的弯道流动来说,还需考虑横向环流对纵向流速分布的影响,也就是弯道水流流速再分布问题。实测资料以及试验数据表明,在弯道的凸岸区、弯道进口区及弯道出口区纵向流速基本服从以上所提到的几种典型分布,但在凹岸区流速沿垂线具有“凸肚”的特性即最大流速位于水面以下,见图 1-2。

表 1-1 几种典型主流流速分布公式

公式名称	公式	备注
对数型 流速 分布	$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{H}{z}$	此公式应用最为广泛, $u_{\max}$ 、 u 、 u_* 分别为水面处最大流速、 z 处流速及摩阻流速, κ 为卡门常数
指数型 流速 分布	$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{z}{H}\right)^m$ 或 $\frac{u}{U} = (1 + m) \left(\frac{z}{H}\right)^m$	此结构简单, 出现较早, 高含沙量较对数流速精度高, $u_{\max}$ 、 u 、 U 分别为水面处最大流速、 z 处流速及垂向平均速度, m 为指数
抛物线 型流速 分布	$u = u_{\max} - m \sqrt{HJ} \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2$	$u_{\max}$ 、 u 分别为水面处最大流速、 z 处流速, m 为经验数, 取 22 ~ 24
椭圆曲 线型流速 分布	$u = u_{\max} \sqrt{1 - P \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2}$	$P = MU/Cu_{\max}^2$, U 为垂向平均速度, M 为与谢才系数有关的常数, $u_{\max}$ 为水面处最大流速

弯道凹岸处的流速可采用 Thorne 和 Rains^[14] 通过实测资料给出以下表达式:

$$\frac{u}{U} = 11z_m^{-0.75} \left[z_m^2 - \left(\frac{z}{H} - z_m \right)^2 \right] \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-m} \quad (1-6)$$

这里

$$m = 1500 \left(\frac{r_0}{B} \right)^{-0.1} \left(\frac{\bar{H}}{B} \right)^{0.3} (Re)^{-0.3} \quad (1-7)$$

式中: z_m 为流速最大处的相对水深; r_0 为弯道中心线半径; B 为水流宽度; $\bar{H}$ 为断面平均水深; Re 为水流雷诺数。

4. 横向流速分布

对于弯道, 通常人们更关心的是横向环流分布。河流中的横向输沙主要是由有关的环流造成的, 它会影响到一个河段的动态冲淤, 如果只看到纵向主流的作用, 而忽视了环流的作用, 要想全面了解一个河段的冲淤特性是不可能的。一般来说, 对于确定的河道及水深 (R 、 B 、 H 一定), 主流的垂线分布直接影响了横向环流的强度及分布形式。

迄今为止, 国内外已借助紊流半经验理论和纵向流速垂线分布的假定, 引入相应的边界条件、连续条件及假定, 提出了许多关于稳定、充分发展的弯道环流流速分布的理论计算公式, 如波达波夫^[17]、马卡维耶夫^[9]、罗辛斯基及库兹明^[19]、罗索夫斯基^[8]、Engelund^[20]、Odgaard^[39]、Vriend^[40] 和张红武^[18] 等, 见表 1-2。

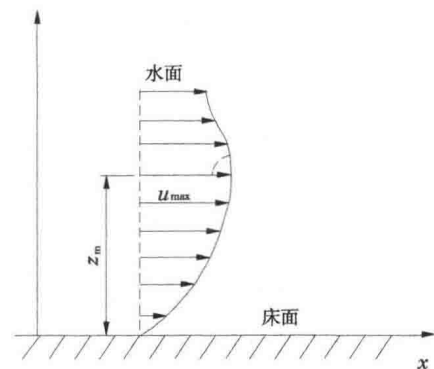


图 1-2 凹岸区纵向流速分布图

表 1-2 几种典型环流流速分布公式

研究者	公式形式
波达 波夫	$v = \frac{mu_{\max}^2 H^2}{6\nu_t r} \left[-\frac{m}{5} (1-\eta)^6 + (1-\eta)^4 - 2\left(1 - \frac{3}{10}m\right)(1-\eta)^2 + \frac{7}{15} - \frac{6}{35}m \right]$ 式中, $\eta = z/H$, 表示相对水深; ν_t 为运动黏滞系数
马卡维 耶夫	$v = \frac{mC}{6g} \frac{u_{\max} H}{r} \left\{ (1-3\eta^2) + \frac{1}{20}P(1-5\eta^4) + \frac{5}{162}P^2(1-7\eta^6) - \frac{1}{96}P^3(1-9\eta^8) - \right.$ $\left. 3 \frac{N_1}{N_2} \left[\frac{1}{3}(1-3\eta^2) + \frac{1}{20}P(1-5\eta^4) + \frac{1}{56}P^2(1-7\eta^6) \right] \right\}$ 公式基于椭圆型纵向流速垂线分布; 式中, $p = MU^2/Cu_{\max}^2$, $\frac{N_1}{N_2} = \frac{1 + \frac{1}{10}P + \frac{5}{56}P^2 - \frac{5}{24}P^3 + 3 \times \frac{1-P}{P} \left(1 + \frac{1}{6}P + \frac{5}{24}P^2 - \frac{1}{8}P^3 \right)}{1 + \frac{3}{10}P + \frac{9}{56}P^2 + 3 \times \frac{1-P}{P} \left(1 + \frac{1}{2}P + \frac{3}{8}P^2 \right)}$
罗辛斯 基及库 兹明	$v = 1.53 \times \frac{C^2 H}{gr} U (\eta^{0.30} - 0.8) \eta^{0.15}$ 公式借助于纵向指数流速分布
罗索夫 斯基	$v = \frac{1}{k^2} U \frac{H}{r} \left[F_1(\eta) - \frac{\sqrt{g}}{kC} F_2(\eta) \right]$ 公式基于纵向流速对数分布, 式中 $F_1(\eta)$ 和 $F_2(\eta)$ 可由经验图查得
EngLelund	$v = \frac{u_0 H}{r} f(\eta)$ 公式基于纵向流速抛物线分布; u_0 为参考流速, 以中心水面流速为标准
Vriend	$u = U \left[1 + \frac{\sqrt{g}}{kC} + \frac{\sqrt{g}}{kC} \ln \eta \right] = U f_m(\eta)$ $v = V f_m(\eta) + \frac{U}{k^2 r} \left[2F_1(\eta) + \frac{\sqrt{g}}{kC} F_2(\eta) - 2 \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{kC} \right) f_m(\eta) \right]$ 公式基于规则断面宽浅弯道在低雷诺数时的情形, 在柱坐标系下进行方程系进行无量纲化求其解析解; 式中, $f_m(\eta) = 1 + \frac{\sqrt{g}}{kC} + \frac{\sqrt{g}}{kC} \ln \eta$, $F_1(\eta) = \int_0^1 \frac{\ln \eta}{\eta - 1} d\eta$, $F_2(\eta) = \int_0^1 \frac{\ln^2 \eta}{\eta - 1} d\eta$
张红武	$v = 86.7 \frac{UH}{r} \left[\left(1 + 5.75 \frac{g}{C^2} \right) \eta^{1.875} - 0.88 \eta^{2.14} + \left(0.034 - 12.5 \frac{g}{C^2} \right) \eta^{0.857} + 4.72 \frac{g}{C^2} - 0.88 \right]$ 假定纵向流速垂向按指数分布

表 1-2 中公式大多是在假定纵向流速服从某一垂线分布的前提下, 求得的环流充分发展时的情形。若需详细了解弯道纵向主流与横向环流相互影响而形成的弯道流速再分布, 还需进行试验或数学模型来具体研究。

5. 弯道河床剪切力分布

弯道河床剪切力分布对弯道中水流调整起到一定的积极作用, 另外弯道水流通过河

床切应力影响完成了对河床的塑造。因此,研究弯道底部切应力分布,对于了解弯道水流结构及预测河道发展趋势显得尤为关键。1979年,J. C. Bathurst^[41]分析了几个天然弯道,将实测流速分布曲线外延至河底,以近似计算其局部应力,得出结论:最大剪切力由进口时在凸岸随主流逐渐向凹岸过渡,但略微滞后于主流;弯道曲率及中心角大小、宽深比、雷诺数均影响剪切力的数值。Bathurst 还认为,在小流量时,主流和环流流速很弱,然而剪切力可能很大;在中等流量下,也可能是这种情况;但是在流量大时,主流流速的强度比环流流速中的强度增大得更明显,所以最大剪切力与最大流速的“核心”相一致。

弯道切应力的均匀性是根据次生环流强度和雷诺数决定的。一般情况下,当雷诺数增加时,切应力分布变得更均匀;在小流量和大流量下,当环流的影响很小时,弯道剪切力分布的均匀性可与直河段相比;在中等流量下,当次生环流最强时,弯道剪切力分布比直河段更不均匀。

因此,弯道切应力可分环流充分发展和环流未充分发展分别研究,所谓环流充分发展是指水流进入弯道一段距离,已经达到稳定。通常将底部切应力 τ 分解为纵向底部切应力 τ_θ 及横向底部切应力 τ_r 加以研究。

1) 环流充分发展时底部切应力

该情形下,纵向切应力可采用近似采用顺直河道表达式,横向切应力可采用 Jansen^[42] 的计算公式。

$$\text{纵向切应力:} \quad \tau_\theta = \gamma H J_\theta = \rho g \frac{U^2}{C^2} \quad (1-8)$$

$$\text{横向切应力:} \quad \tau_r = -\rho H \frac{U^2}{r} \left[2 \left(\frac{\sqrt{g}}{kC} \right)^2 - 2 \left(\frac{\sqrt{g}}{kC} \right)^3 \right] \quad (1-9)$$

另外,Zimmerman 和 Kennedy^[43] 以及 Falcon-Ascanio^[44] 等采用力矩法,利用切向流速的幂律分布,亦导出横向切应力公式如下:

$$\tau_r = \frac{1+m}{(2+m)m} \rho \frac{H}{r} U^2 \quad (1-10)$$

式中: $m = \kappa \left(\frac{8}{f} \right)^{1/2}$ 是指数的倒数,与摩阻系数和卡门常数 κ 有关。

2) 环流未充分发展时底部切应力

环流未充分发展时的床面切应力可参考王平义^[7] 的研究方法,首先定义环流发展强度参数 C_r 为环流强度与其极限值的比值(其值为 0~1),表达式为

$$C_r = \frac{v_{rc0}}{V_{\theta c}} \frac{F_2 r}{F_1} \quad (1-11)$$

式中: v_{rc0} 为弯道中心线表面环流流速; $V_{\theta c}$ 为弯道中心线纵向垂线平均流速; F_1 为与阻力因素 C 有关的参数, $F_1 = \frac{20\sqrt{g}}{3C} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{3kC} \right)$; F_2 为与阻力因素 C 及水深 H 有关的参数,

$$F_2 = \frac{20k\sqrt{g}}{3CH \left(1 + \frac{\sqrt{H}}{kC} \right)}。$$

据此,王平义给出的切应力公式如下:

$$\tau_{\theta} = \rho g H \left(J_{\theta} - \frac{\alpha_0}{2} \frac{U^2}{g H r} \frac{\partial H}{\partial \theta} \right) \quad (1-12)$$

$$\tau_r = \frac{\rho H U^2}{r} [\alpha_0 - F_1 (1 - C_r)] - \gamma H J_r \quad (1-13)$$

式中: $\alpha_0 = 1 + \frac{g}{k^2 C^2}$, 为流速修正系数。

式(1-12)表明,当环流未充分发展时,水能比降 J_{θ} 并未全部用来克服床面阻力 τ_{θ} , 而是将一部分能量 $\frac{\rho \alpha_0}{2} U^2 \frac{\partial H}{r \partial \theta}$ 消耗于克服主要因水深变化而增加的阻力。当环流充分发展时认为变量与 θ 无关,即 $\frac{\partial H}{\partial \theta} = 0$, 式(1-12)变为顺直情形;在弯道中高切应力区的位置是变化的,变化的原因是在进口段纵向流速 U 的高速区由凸岸向凹岸转移,在弯顶以上忽略特殊地形原因靠近凸岸的 $\frac{\partial H}{r \partial \theta} < 0$, 凹岸的 $\frac{\partial H}{r \partial \theta} > 0$;而在弯顶以下正好相反,从而导致切应力 τ_{θ} 的峰值区由凸岸转移到弯道出口附近的凹岸一侧,与以往研究结果一致,并基本符合于流速分布。

1.2.2.2 弯道泥沙基本特性

河道输沙特性与水流特性直接相关,弯道横向环流的存在决定了弯道中不但存在纵向流速引起的沿程纵向输沙,还应包括横向输沙问题。

1. 弯道中悬移质

弯道中的悬沙横向输移主要与环流强度和含沙量垂线分布有关,通常表层水流指向凹岸、底部流速指向凸岸,含沙量上稀下浓,故总的横向悬沙输移是不平衡的,净输沙量总是朝向环流下部所指的方向。关于其输沙特性,张红武等^[18]曾给予论述,悬移质运动与螺旋流的关系也是非常密切的,螺旋流将表层含沙较小而粒度较细的水体带到凹岸,并折向河底攫取泥沙,而将下层含沙较多而粒度较粗的水体带向凸岸边滩,形成横向输沙不平衡,见图 1-3。

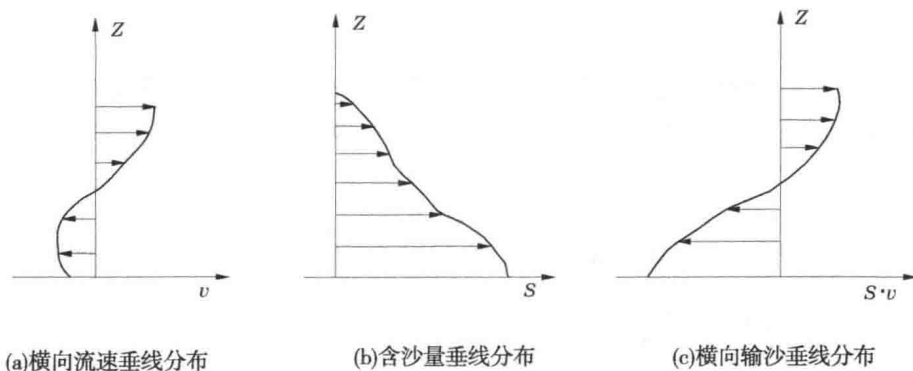


图 1-3 弯道横向输沙示意图