

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230429

复杂河型下槽蓄量计算模式改进方法研究

原 松¹, 沈 健²

(1. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 2. 长江水利委员会水文局荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州 434000)

摘要: 河道槽蓄量变化是河道演变分析的重要内容, 以往多采用断面法进行简化计算, 但在多级分叉或有支流汇入的复杂河型中, 断面法通常需人工单独处理, 计算效率较低。通过引入分叉河道水面宽度比, 优化分叉处断面计算面积的分配、增补断面估算支流河口附近漏测区间槽蓄量、采用地形法还原不同水位下断面间距等方法改进后, 实现了槽蓄量批量运算。对比结果表明, 改进方法大幅提高了槽蓄量计算效率及精度, 可为各类复杂河型下的槽蓄量批量运算提供参考。

关键词: 复杂河型; 多级分叉河道; 断面间距; 河道槽蓄量

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0023-04

1 引言

河道槽蓄量计算主要采用地形法与断面法, 其中地形法计算结果较断面法更接近真值, 如在三峡水库与长江中下游部分区域, 利用地形法计算的槽蓄量较断面法有 20%~30% 的差距^[1]。实际测量中, 由于河道地形数据较固定断面数据的获取难度与成本均大幅增加, 施测频次远低于固定断面, 故断面法成为更经济、常用的河道槽蓄量计算方法, 但固定断面数据密度较低, 支流河口处存在一段漏测区域, 断面间距的取值往往因人而异^[2], 均不同程度影响计算结果的精度; 另外, 天然河道河型复杂, 局部呈多级分叉或网状形态, 以往按顺序连续计算相邻断面间槽蓄量难度较大, 通常须将出现复杂河型部分的断面拆分后人工单独处理, 很大程度上影响计算效率。鉴此, 本文提出基于树结构的复杂河型描述方法, 组织断面按一定顺序排列, 从河道分叉、支流河口漏测区域、断面间距取值方面优化断面法槽蓄量计算模式, 基于该方法设计运算脚本文件后, 可实现槽蓄量的批量运算, 提高了复杂河型下断面法槽蓄量计算效率及结果精度。

2 断面法槽蓄量计算方法

利用断面法计算某流域或河段槽蓄量的原理

是以河道上连续布设的固定横断面地形数据为数据源, 先分别计算每两个相邻断面间的槽蓄量, 并将其作为计算单元, 然后将各计算单元的槽蓄量累加。将每个计算单元的槽蓄量近似看作以上下断面为平行底面的梯形体积^[3,4], 体积计算公式为:

$$V_i = L_{ij} (A_i + A_j) / 2 \quad (1)$$

式中, V_i 为两相邻断面间槽蓄量; L_{ij} 为两相邻断面的间距; A_i 、 A_j 分别为上、下断面面积。

当 $A_i > A_j$ 且 $(A_i - A_j) / A_i > 0.40$ 时使用截锥公式:

$$V_i = (A_i + A_j + \sqrt{A_i A_j}) L_{ij} / 3 \quad (2)$$

总槽蓄量 $V = \sum V_i$ 。

其中断面面积为该断面计算水位下的过水面积, 断面间距为两断面沿河道方向的距离, 槽蓄量批量计算即采用程序按断面的先后顺序逐个计算相邻断面间的槽蓄量后进行累加。

3 计算模式改进方法

3.1 河道与断面的组织

在复杂河型下(图 1), 首先指定一条分叉河道为全范围的干流, 其余为分叉、支流, 若分叉河道再出现分叉或支流中再次出现分叉, 则仍从中指定一条为主干。以每个分叉点为节点, 将节点

收稿日期: 2023-03-21, 修回日期: 2023-04-06

基金项目: 长江水科学联合研究基金项目(U2240224, U2240206); 长江委水文局科技创新基金(SWJ-CJX23Z03)

作者简介: 原松(1983-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水利信息化, E-mail: yuan8259@163.com

通讯作者: 沈健(1985-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为河道演变分析, E-mail: 289798793@qq.com

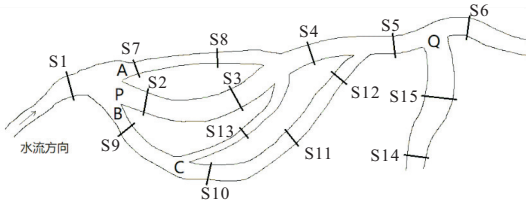


图 1 复杂河道形态与断面分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of complex channel morphology and section distribution

按树状结构组织,对河道进行分段概化,形成树状图(图 2)。从上游至下游,按先干流、后分叉、再支流的顺序,利用先序遍历的方式分别记录各分叉起始点或支流汇入点,将分叉节点按树结构进行组织,则分叉节点顺序为 P、A、B、C、Q。

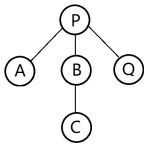


图 2 分叉节点的树状结构

Fig. 2 Tree structure of branching node

将每个分叉起点至分叉汇流点的河道作为一个河段,每条河段起点为分叉前的第一个断面,终点为分叉汇流后的第一个断面。由此,图 1 中河道可划分为 5 条河段,每个河段所包含的断面见表 1,所有断面的顺序即按河段顺序依次排列。

表 1 各断面排列顺序

Tab. 1 Arrangement order of each section

河段顺序号	河段名称	所含断面顺序
1	干流 P	S1, S2, S3, S4, S5, S6
2	分叉 A	S1, S7, S8, S4
3	分叉 B	S1, S9, S10, S11, S12, S5
4	分叉 C	S9, S13, S4
5	支流 Q	S14-S15

3.2 支流河口断面的处理

由于实际测量中一般并不在支流河口交汇处进行断面测量,导致断面法槽蓄量计算时,无法计算支流河口第一个断面下游的槽蓄量。图 3 中 S15 为支流 Q 距汇入口前最后一个断面,且距支流河口距离为 d_{15} 。为此,可在支流河口处添加与 S15 相同的断面 S15',支流河口未测区域的槽蓄量可近似看作 S15-S15'断面间槽蓄量。同时,

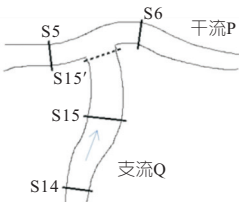


图 3 支流河口未测区域添加断面

Fig. 3 Add section in unmeasured area of tributary estuary

断面排序方案需相应修改,支流 Q 所含断面排列为 S14-S15-S15',断面 S15-S15'的间距为 d_{15} 。

3.3 分叉断面的处理

通常利用断面法计算分叉河道处的槽蓄量时,公用断面面积重复使用,导致槽蓄量偏大,为提高计算精度,常将公用断面按面积分配给每个河道。公用断面的计算面积分配方法^[5-7]主要归纳有分流比法(即按通过每个分叉的过水流量比来分配计算面积比)、面积比法(即按第一个分叉断面的过水面积比来分配计算面积比)。由于分叉断面的形态与过水面积均随水位的变化而变化,公用断面面积的分配方法应同步发生变化,而分流比法中的面积分配采用固定值,面积比法中虽考虑到不同水位下面积变化,但未考虑某些断面从高水位到低水位时形态发生了较大变化,面积分割线将会产生较大范围的移动。在断面面积分配比一定时,高水位处的面积分割线较低水位时有大幅移动,因此本文提出水面宽度比法,即按第一个分叉断面的水面宽度比来分配计算面积比,同理,在最后一个分叉断面与下游公用断面计算时也用法,使公用断面面积的分配更趋合理。以断面 S1 为例(图 1),具体方案为假定分叉断面 S7、S2、S9 的水面宽分别为 W_7 、 W_2 、 W_9 ,则按 $W_7:W_2:W_9$ 的比例将断面 S1 在水面线下的面积 a_1 分为 a_{1-7} 、 a_{1-2} 、 a_{1-9} 三部分(图 4)。

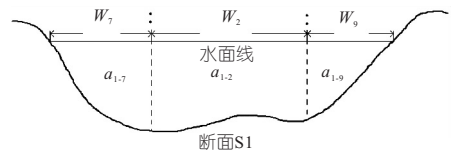


图 4 水面宽度比法分配公用断面计算面积

Fig. 4 Allocate common section calculation area with water surface width ratio method

3.4 断面间距的确定

断面间距是计算断面法槽蓄量的关键要素之一,在断面法槽蓄量计算中,上下断面的面积均由实测数据获取,精度较高,但断面间距由人为指定,其获取方法^[8,9]均是以将河道概化成梯形体后计算槽蓄量的方法为基础,而实际上两相邻断面并不平行,断面间的河道并非梯形体。故用于计算的断面间距并非实际间距,而是一种计算间距。因此,合理的断面间距的选取将直接影响槽蓄量、冲淤量计算结果精度,同时也可弥补由于断面布置的局限性给计算结果精度带来的影响。

由槽蓄量体积计算公式(1)、(2)可知,断面间距 L_{ij} 为:

$$L_{ij} = 2V / (A_i + A_j) \quad (3)$$

或

$$L_{ij} = 3V / (A_i + A_j + \sqrt{A_i A_j}) \quad (4)$$

由于地形法槽蓄量计算值相对精确,可近似作为槽蓄量的真值,槽蓄量 V 可利用地形法槽蓄量计算获得,河道地形数据取与计算断面数据时间相隔最近的河道地形。上下断面面积 A_i 、 A_j 由上下断面线切割地形获得断面数据。由于河道在不同水位时,河道形态有所变化,按本文方法计算不同水位级下的断面间距均不相同,但相邻断面距离较近,断面间距将在小范围内变化。

断面间距对槽蓄量计算精度的影响取决于断面间河段在不同水位下河道形态的变化程度。在弯道或断面形态不规则的河段,不同水位下的断面间距变化较大。在实际计算中,断面间距可选择常用水位计算范围中间值下的断面间距为固定值,如计算三峡水库不同水位级下槽蓄量时,计算水位一般在 145~175 m 之间,可取 160 m 时的断面间距作为近似代表。

4 改进后运算结果对比与分析

4.1 支流河口处对比分析

由式(1)可知,支流河口增补断面后,槽蓄量计算精度取决于增补断面与实际断面之间的面积差异,差异越大,则计算槽蓄量精度提高越小。本文漏测断面借用距离河口最近的断面,断面形态较为相似。

三峡水库梅溪河河口位于长江干流上断面 S113-S114 间(图 5),梅溪河下游最后一个断面 MX01 距离河口约 1.3 km。利用断面法(本文改进方法)与地形法计算 MX01、S113、S114 三断面所围范围的槽蓄量^[10]可知,各水位级下槽蓄量误差均小于优化前,在 175 m 正常蓄水位下,不考虑支流河口漏测区域,槽蓄量误差达 8.8%;反之,槽蓄量误差约 2.6%(表 2),可见加设支流河口断面后,槽蓄量计算精度有所提高。

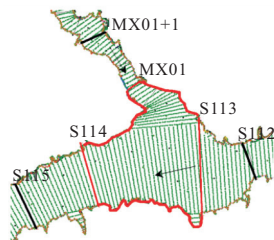


图 5 梅溪河口断面布置图

Fig. 5 Section layout plan of Meixi estuary

4.2 汉道处对比分析

分汉河道处槽蓄量计算精度损失主要是由于

表 2 支流河口断面处理前后槽蓄量对比

Tab. 2 Comparison of channel storage capacity before and after treatment of tributary estuary section

计算 高程 /m	槽蓄量/ 10^4 m^3			两者相差 百分比/%	
	断面法		地形法	优化前	优化后
	S113-S114	MX01-河口	(全范围)		
175	32 723	2 220	35 891	8.8	2.6
165	27 794	1 794	30 047	7.5	1.5
155	23 066	1 440	24 435	5.6	-0.3
145	18 554	1 052	19 090	2.8	-2.7

公用断面面积的重复使用,在理想的 V 型河道下,断面过水面积随水位高程的增加呈指数增大。分汉区域槽蓄量优化前后的比值随计算水位增加也呈指数增大,槽蓄量计算值更接近真值,精度逐渐提高。由于天然河道均为上宽下窄型,可与 V 型河道类比,故本文改进方法在不同水位下槽蓄量精度变化的总体趋势与理想河道下相同。

选取三峡水库干流江津至大渡口间的大中坝汉道河段,从干流固定断面 S354-S351 之间的范围(图 6 中的断面覆盖区域),采用地形法计算该分汉河段在不同计算水位下的槽蓄量,断面法采用与地形同测次断面数据,将优化后的分汉断面与断面间距在不同计算水位下进行对比(表 3),发现在不同水位下的槽蓄量均未超过 5%,在高水位下不超过 2%,远高于一般断面布设方案 10% 的误差精度。



图 6 大中坝分汉河段地形

Fig. 6 Topography of bifurcated reach of Dazhongba

表 3 分汉断面处理前后槽蓄量对比

Tab. 3 Comparison of channel storage before and after treatment of bifurcated section

计算 高程/m	槽蓄量/ 10^4 m^3		两者相差 百分比/%
	断面法	地形法	
	185	10 803	10 764
182	8 643	8 531	1.31
179	6 563	6 447	1.80
176	4 653	4 573	1.75

5 结论

a. 从断面间距、分汉断面面积、漏测区间等多方面对复杂河型下的断面法槽蓄量计算模式优化

后,结果精度均有所提高。使用先序遍历树结构算法将复杂河型上的断面排序,并制作计算脚本后可大幅提高计算效率,可为河道演变分析计算提供可靠的软件基础。

b. 随着实测断面与地形资料的不断积累,机器学习等人工智能方法在进一步提高槽蓄量计算结果精度上具有更大优势,不仅可为固定断面优化布设提供更多依据,也为下一步研究提供了方向。

参考文献:

[1] 白亮,王伟,原松,等. 基于断面法的长江分汊河道冲淤计算方法[J]. 人民长江,2021,52(10):7-12.

[2] 沈健,孙苏里,李振林. 断面法计算河道冲淤量方法中断面间距探讨[J]. 人民珠江,2016,37(5):60-62.

[3] 吴昌洪,姚瑶. 基于平面二维数值模拟的长江世业洲分汊河道水流特性研究[J]. 广西水利水电,2020(2):8-17.

[4] 原松,李圣伟,翁正平. DEM在三峡库尾河道演变分析中的应用[J]. 人民长江,2014(2):38-41.

[5] 魏林云,李强,谢静红. 长江下荆江监利河段乌龟洲汉道分流分沙变化及演变特征分析[J]. 水利水电快报,2021,42(2):24-30.

[6] 凌哲,罗龙洪,吕馨怡,等. 长江镇扬河段世业洲左汊口门演变分析与思考[J]. 江苏水利,2021(3):6-10,14.

[7] 金中武,任实,吴华莉,等. 三峡水库淤积排沙及河型转化规律[J]. 长江科学院院报,2020,37(10):9-15,27.

[8] 侯珺,戴巧玉. 河道冲淤量不同计算方法的结果分析[J]. 陕西水利,2021(9):83-85.

[9] 邹振华,黎炎庆,毛北平,等. 松西河水沙特性变化及冲淤响应[J]. 水电能源科学,2019,37(10):30-33,55.

[10] 陈立,崔超,袁晶,等. 长江中游典型顺直分汊河段冲刷调整的特性与机理[J]. 泥沙研究,2023,48(1):1-7.

Study on Improved Method of Calculation Model of Storage Capacity of Complex River Pattern

YUAN Song¹, SHEN Jian²

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Jingjiang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou 434000, China)

Abstract: The change of channel storage capacity is an important content of river evolution analysis. In the past, the section method was mostly used for simplified calculation. However, in the complex river pattern with multistage branching or tributaries, the section method often needs to be dealt with separately, and the calculation efficiency is low. By introducing the water surface width ratio of the branching channel, optimizing the distribution of the calculated area of the section at the branching point, adding the section, estimating the storage capacity of the channel in the missing section near the tributary estuary, and using the topographic method to restore the section spacing under different water levels, the calculation model of the section method under the complex river pattern is improved. The comparison results show that the calculation accuracy of tank storage capacity is greatly improved by using the above method, which can provide a reference for batch calculation of tank storage capacity under various complex river types.

Key words: complex river types; branching channel; section spacing; channel storage capacity

(上接第 38 页)

Effect of Large-scale Ecological Water Replenishment on Infiltration Capacity of Beijing Section of Long-term Cut-off River Yongding River

GOU Shao-jie^{1,2}, QIU Wen-shun³, LI Shu³, YANG Mo-yuan¹, LI Xiao-lin¹, WANG He^{1,4}, LI Guang-he⁵

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Beijing Water Resources Management Center, Beijing 100195, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 5. Water Conservancy Bureau of Kaizhou District, Chongqing 40400, China)

Abstract: Aiming at the impact of large-scale ecological water replenishment (four times of ecological water replenishment in Beijing section of Yongding River) on the long-term cut-off river, a MIKE 11 hydrodynamic model was established. The variation characteristics of runoff and infiltration capacity before and after water replenishment were quantitatively evaluated by scenario simulation analysis. The results show that the inflow runoff sequence of Guanting Reservoir can be divided into three stages: natural stage, human weak interference stage and human strong interference stage. During the three ecological replenishment periods from 2019 to 2020, the flow of the main section of the Beijing section of Yongding River is much larger than the ecological flow of human strong interference stage. In the autumn of 2021, the loss of permeability coefficient and leakage of ecological water supplement was the lowest, indicating that the leakage of Yongding River was significantly reduced through three consecutive years of large-scale ecological water supplement. Taking the ecological replenishment in autumn of 2021 as an example, the fitting functions of channel storage and replenishment flow, submerged area and replenishment flow, submerged area and channel storage, permeability coefficient and replenishment flow were established, which can provide some guidance for the development of ecological replenishment in Yongding River. The results of this study can effectively guide the optimization and formulation of ecological water supplement scheme in the Beijing section of the Yongding River, and provide reference for the comprehensive management of the Yongding River Basin and the exploration of ecological restoration of long-term river courses in North China.

Key words: ecologic water compensation; Yongding River basin; MIKE 11; permeability coefficient