

尾间段河网一维水流数学模型应用研究

戴文鸿^{1,2,3}, 张云², 高嵩², 李开杰², 王得祥²

(1. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 尾间段河网常常是连接上下游的水上通航要道,且上游洪水需要通过尾间段河网下泄,这就使得尾间段河网水流运动的研究成为非常重要和十分必要的课题之一.在对尾间段河网水流的运动特点及一维河网计算的研究现状评述的基础上,选用自编程序“河网水动力模型”和商用软件 HEC-RAS 分别建立一维河网水流模型,应用于赣江尾间段,针对洪水流量、中水流量和枯水流量分别计算沿程水位.在洪水流量下,根据计算所得的水面线,找出各主要站点的水位作为警戒水位,当该站点水位有接近警戒水位的趋势时,提请有关部门应做好防洪工作.在中水期,主要考虑造床流量的影响.在枯水期,根据计算得出的水位,得到各主要站点的最低通航水位,为枯水期能否顺利通航提供依据.

关键词: 一维水流; 数学模型; HEC-RAS; 尾间段河网

中图分类号: U612.1⁺4; TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2011)04-0097-05

尾间段河网是连接上下游的重要水上通航要道,且上游洪水需要通过尾间段河网下泄,因此,尾间段河网水流运动的研究非常必要^[1].

赣江尾间段位于赣江下游,赣江干流在南昌市裘家洲头首次分为东西两河后又分四汊入湖:东河于礁矶头分汊为中支、东支,中支经南新、大口湖在朱港入湖,河长 43 km;东支是东河的主流,经叶楼、滁槎,在三江口与抚河、信江两支交汇后入湖,河长 56 km;西河在樵舍分汊为北支和西支,北支干流经蒋埠在朱港同中支汇合,长 28 km,仅在中洪水分流,枯水过流少;西支经樵舍、昌邑于吴城入湖,是赣江入湖进长江的主要通道.吴城至湖口属鄱阳湖区,长约 81 km,枯水平均比降 0.047‰,吴城以下 20 km 的褚溪河口是鄱阳湖五河来水的总汇口.由此可见赣江尾间段河道纵横交错,桥梁密布,水流条件复杂^[2-3].本文利用自编程序和商用软件 HEC-RAS 分别建立一维河网水流模型对赣江尾间段河网水流进行计算分析并提出建议.

1 一维水流数学模型

本文选用自编程序“河网水动力模型”和商用软件 HEC-RAS^[4]分别建立一维河网水流模型,两者控制方程和求解方法一致,使用两种模型是为了互相验证.

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center-River Analysis System) 是由美国陆军工程兵团水文工程中心开发的水面线计算软件包,适用于河道稳定和非稳流一维水力计算,其功能强大,可进行各种涉水建筑物(如桥梁、涵洞、防洪堤、堰、水库、块状阻水建筑物等)的水面线分析计算,同时可生成横断面形态图、流量及水位过程曲线、复式河道三维断面图等分析图表^[5].

收稿日期: 2011-09-05

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901005);江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2009B02214).

作者简介: 戴文鸿(1966-),男,江苏泰州人,教授,博士,主要从事河流动力学及河流演变等方面研究.

E-mail: wdai@hhu.edu.cn

1.1 控制方程

水流在平底、棱柱形明渠中一维非恒定流动的基本方程组——圣维南方程组为:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

$$\text{动力方程: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = q_L v_x \quad (2)$$

式中: x, t 为距离(m)和时间(s), 属自变量; A 为过水面积(m^2); Q 为断面流量(m^3/s); Z 为水位(m); α 为动量修正系数; K 为流量模数; q_L 为旁侧入流(m^2/s), 入流为正, 出流为负; v_x 为入流沿水流方向的速度(m/s), 若旁侧入流垂直于主流, 则 $v_x = 0$.

计算思路为: 先将各单一河道划分为若干个计算断面, 在计算断面上对圣维南方程组进行有限差分运算, 得到单一河道方程——即以各断面水位和流量为自变量的差分方程组, 然后根据节点连接条件辅以边界条件形成封闭的各节点水位方程, 求解此方程组得到各节点水位, 再将各节点水位回代到单一河道方程, 最终得到各单一河道各断面的水位及流量. 采用的差分方法为四点线性隐式差分法, 节点处满足的条件是能量守恒和质量守恒, 边界条件一般为上游给定流量条件, 下游给定水位条件.

1.2 模型验证

天然河道蜿蜒曲折, 过水断面不规则, 糙率往往沿程变化. 天然河道的糙率与河道形态、床面粗糙程度、植被的生长状况、河道的弯曲情况以及水位高低等多种因素有关. 因其复杂多变, 本文在水面线计算中, 对河道糙率 n 采用从外洲(水文站)向下游, 西河延伸至西支水尺, 东河延伸至东支水尺范围内的实测水位、流量和地形数据对模型(还是对 n) 进行验证.

对于某一河段, 根据实测水位 Z , 流量 Q , 断面面积 A , 湿周 P 等, 应用谢才公式及曼宁公式得

$$n = \frac{A}{Q} R^{2/3} J^{1/2} \quad (3)$$

式中: J 为水面比降, R 为水力半径.

具体推算步骤为: 按式(3)拟定一个糙率, 然后自下而上依次推算各断面水位, 如推算至河道末端与实际水位相符合, 则拟定的 n 为所求, 否则重新修正 n 值, 重复以上步骤, 直到符合为止^[6-7].

水位及分流比验证结果分别见表1和2. 由表1和2可知, 当流量为 $1\,248.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 运用自编程序计算的水位误差在 $-0.005 \sim 0.002 \text{ m}$ 之间, 东河分流比误差为 3.89% (相对误差 = |计算值 - 实测值| / 实测值, 下同), 西河分流比误差为 1.12% ; 运用 HEC-RAS 计算的水位误差在 $-0.006 \sim 0.002 \text{ m}$ 之间, 东河的分流比误差为 3.44% , 在西河的分流比误差为 0.99% ; 当流量为 $4\,545.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 运用自编程序计算的水位误差在 $-0.02 \sim 0.02 \text{ m}$ 之间, 东河的分流比误差为 1.27% , 在西河的分流比误差为 0.75% ; 运用 HEC-RAS 计算的水位误差在 $-0.020 \sim 0.023 \text{ m}$ 之间, 东河的分流比误差为 1.31% , 在西河的分流比误差为 0.779% . 验证结果表明, 两个模型都可以应用于赣江尾间段河网的一维水流计算.

表1 流量为 $1\,248.43$ 和 $4\,545.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的水位验证

Tab. 1 Water levels verification with discharge of $1\,248.43 \text{ m}^3/\text{s}$ and $4\,545.57 \text{ m}^3/\text{s}$

位 置	流量为 $1\,248.43 \text{ m}^3/\text{s}$ 水位验证					流量为 $4\,545.57 \text{ m}^3/\text{s}$ 水位验证				
	实测水位	自编程序		HEC-RAS 模型		实测水位	自编程序		HEC-RAS 模型	
		计算水位	误 差	计算水位	误 差		计算水位	误 差	计算水位	误 差
外洲水尺(S2)	13.56	13.561	0.001	13.562	0.002	16.160	16.162	0.002	16.160	0
西河(S4)	13.48	13.482	0.002	13.481	0.001	16.060	16.044	-0.016	16.040	-0.020
英雄桥下(S5)	13.45	13.448	-0.002	13.449	-0.001	15.950	15.970	0.020	15.970	0.020
集装箱码头水尺	13.43	13.426	-0.004	13.428	-0.002	15.900	15.871	-0.020	15.883	-0.017
东河(S4)	13.48	13.482	0.002	13.481	0.001	16.060	16.044	-0.016	16.040	-0.02
洪都大桥下(S6)	13.43	13.428	-0.002	13.429	-0.001	15.860	15.872	0.012	15.876	0.016
礁矶头水尺	13.42	13.415	-0.005	13.414	-0.006	15.780	15.800	0.020	15.803	0.023

表2 分流比验证结果

Tab.2 Water discharge ratio verification between branches

外洲流量	1 248.43 m ³ /s		4 545.57 m ³ /s	
	东河	西河	东河	西河
实测(%)	22.36	77.64	37.15	62.85
自编程序计算(%)	23.23	76.77	37.62	62.38
HEC-RAS 模型计算(%)	23.13	76.87	37.64	62.36

2 赣江尾间段一维河网计算及应用分析

2.1 河网概化

根据“南昌涉河工程群地理信息系统 NCGCQ”,将赣江尾间段河网概化成如图1所示,并为节点编号,以方便计算与查看.

2.2 洪水流量下的计算分析

在洪水流量下的计算工况中,外洲流量取为 20 700 m³/s,此时,各支流的上游流量分别为:昌江 8 680 m³/s,乐安河 9 340 m³/s,抚河 11 000 m³/s,信江 13 000 m³/s,修河 9 980 m³/s.下游处,湖口水位为 19.05 m^[8].

地形资料采用实验室 GIS 软件“南昌涉河工程群地理信息系统 NCGCQ”进行断面套绘,大约每 0.8 km 取一个断面,并量出各断面至该河道起点的距离,作为地形资料输入模型.中水流量下和枯水流量下的计算所使用的地形资料都与洪水流量下的地形资料相同,以下计算中不再赘述.

糙率的选择仍以利用河道实测水文资料推算为主;无实测资料时,根据河道特征参照类似河道来确定糙率.最终,在洪水流量下,确定糙率如下:主流河道为 0.018 ~ 0.040,东河为 0.017 ~ 0.045,西河为 0.017 ~ 0.035,各支流为 0.015 ~ 0.033.

使用 20 年一遇的洪水流量计算赣江尾间段的水位,可得各主要水文站水位^[9],并作为警戒水位的参考,当丰水期水位增长较快,接近警戒水位时,提请有关部门提前进入警戒状态,制定合理的方案度汛.具体计算数据为(以黄海水位为基准):赣江外洲水文站 23.50 m,赣江南昌水文站 23.16 m,修河永修水文站 20.82 m,信江梅港水文站 26.20 m,乐安河虎山水文站 26.83 m,抚河李家渡水文站 32.10 m.

其次,通过计算可以得到赣江尾间段的各点水位.作者将计算结果提交江西省相关水利部门,为重修堤岸线工程提供参考.

2.3 中水流量下的计算分析

中水流量下的计算受水文资料限制,所使用的中水流量下的水文资料为外洲流量 1 796 m³/s,下游水位资料为:西河出口吴城 10.64 m,东河出口三江口 12.88 m.糙率采用与洪水流量下相同的确定方法,最终选取主流河道糙率在 0.018 ~ 0.040,东河糙率在 0.017 ~ 0.045,西河糙率在 0.017 ~ 0.035.

中水流量下一般可以考虑造床方面的影响.造床流量是指在河相关系式选取的造床作用最显著的某一级流量.由于造床流量下水位与河漫滩大致齐平,同时,当水位平滩时,造床作用也最大,所以一般认为平滩流量就是造床流量^[10-11].

从 HEC-RAS 导出的平滩流量横断面(图2,由于论文篇幅有限,仅给出具有代表性的两个断面)来看,河床变形明显的区域应该从外洲向下游东河延伸至距离外洲 31.695 km 处,即 HEC-RAS 概化模型中 29 号断面,西河延伸至距离外洲 13.99 km 处(概化模型中 42 号断面).因此,该区域内可适当采取一些防护措施.



图1 赣江尾间段河网的概化

Fig.1 Sketch of lower Ganjiang River networks

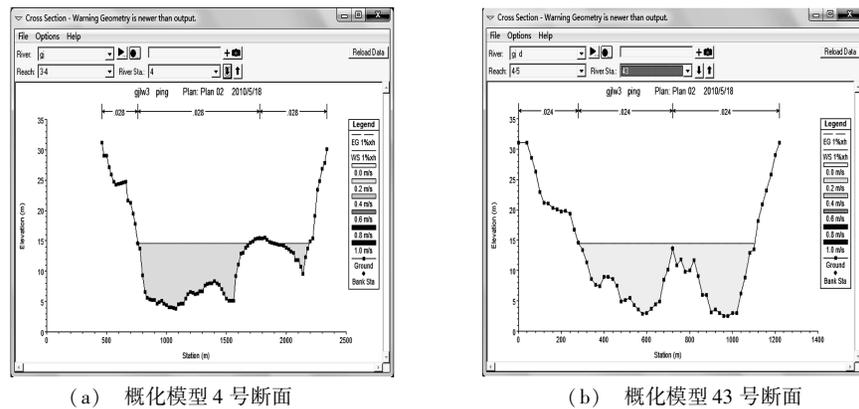


图2 典型平滩流量横断面示意图

Fig. 2 Sketch of general river cross-section with plain flood

2.4 枯水流量下的计算分析

枯水流量下的水流计算,外洲的流量为 $426 \text{ m}^3/\text{s}$,各支流的上游流量分别为:抚河 $2.21 \text{ m}^3/\text{s}$,信江 $22.66 \text{ m}^3/\text{s}$,修河 $58.95 \text{ m}^3/\text{s}$,乐安河 $21.98 \text{ m}^3/\text{s}$ 。下游湖口给定水位 5.33 m 。糙率采用与上述两种流量下相同的确定方法,可得主流河道糙率在 $0.018 \sim 0.040$ 之间,东河糙率在 $0.017 \sim 0.045$ 之间,西河糙率在 $0.017 \sim 0.035$ 之间,各支流糙率在 $0.015 \sim 0.033$ 之间。从计算结果来看,赣江尾间段有些区域到了枯水期可能会出现阻航或者断航的现象。从西河的计算结果可见,距离外洲 $31.659 \sim 40.580 \text{ km}$ 的区域,通航水深只有 $3.00 \sim 3.31 \text{ m}$;距离外洲 $51.540 \sim 56.209 \text{ km}$ 的区域,通航水深只有 $3.34 \sim 4.20 \text{ m}$;距离外洲 $78.376 \sim 90.289 \text{ km}$ 的区域,通航水深只有 $3.43 \sim 5.00 \text{ m}$ 。东河的计算结果比西河要差,在距外洲 $14.963 \sim 16.215 \text{ km}$, $21.353 \sim 22.097 \text{ km}$, $30.040 \sim 32.743 \text{ km}$, $34.399 \sim 61.886 \text{ km}$, $78.377 \sim 114.862 \text{ km}$ 和 $117.475 \sim 130.495 \text{ km}$ 的区域,通航水深都在 3 m 以下,有的区域甚至在 1 m 以下。从各支流的计算结果看,虽然修河的最高通航水深有 7.24 m ,但其绝大多数区域都在 3 m 以下;信江的通航情况略差于修河,最高通航水深为 7.05 m ,很多区域的通航水深在 2 m 以下;信江西支的最低通航水深 0.46 m ,最高 5.59 m ;信江东支的最低通航水深为 0.46 m ,最高 5.98 m ;乐安河的最高通航水深虽然达 11.37 m ,但是,在距离乐安河上游 $14.316 \sim 16.126 \text{ km}$, $17.875 \sim 19.185 \text{ km}$, $23.755 \sim 26.214 \text{ km}$ 等区域,通航水深仍在 2 m 以下,有些甚至在 1 m 以下;通航情况最差的是抚河,半数以上的区域通航水位在 1 m 以下。

综上,在该枯水流量下,各支流的通航条件均很差,其中抚河的通航条件最差,赣江东河的通航条件略好于各支流,赣江西河的通航条件略好于东河。限于篇幅,仅列出各主要水文站的水位,作为枯水期通航的参考(以黄海水位为基准):赣江外洲水文站 12.63 m ,赣江南昌水文站 12.60 m ,修河拓林水文站 18.45 m ,信江梅港水文站 13.34 m ,乐安河虎山水文站 11.47 m ,抚河李家渡水文站 24.74 m 。

3 结 语

本文在分析尾间段河网重要性和赣江尾间段河网情况的基础上,建立两种一维水流数学模型,针对赣江尾间段河网,选用洪水流量、中水流量和枯水流量分别计算得出沿程水位,各级流量下的计算结果均连成水面线进行对比分析。在丰水期,根据模型得出水面线,找出各主要站点的水位作为警戒水位,当该站点水位接近警戒水位或有接近警戒水位趋势时,提请有关部门做好防洪工作,以减少洪灾损失。在中水期,主要考虑造床流量的影响。在枯水期,根据模型计算得出的水位,得到各主要站点最低通航水位,为枯水期能否顺利通航提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 张蔚. 河网与河口地区耦合模型的研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2006. (ZHANG Wei. Research and application of the coupled model of the river networks and estuary[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))

- [2] 陈雄波,唐洪武. 赣江南昌段东西河分流处河床演变与航道整治[J]. 人民长江, 2002, 33(4): 32-33. (CNEN Xiong-bo, TANG Hong-wu. River bed evolution and navigation channel regulation for distributary stretch of the east and west rivers at Nanchang City downstream the main Gangjiang River[J]. Yangtze River, 2002, 33(4): 32-33. (in Chinese))
- [3] 戴文鸿,肖洋. 南昌市民公园三期工程防洪影响评价报告[R]. 南京:河海大学, 2010: 53-90. (DAI Wen-hong, XIAO Yang. Evaluation report for flood influence in the 3rd projection of Nanchang citizen park[R]. Nanjing: Hohai University, 2010: 53-90. (in Chinese))
- [4] USACE. HEC-RAS River analysis system, user's manual (Version 4.0) [M]. Davis: U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2008.
- [5] 蔡新明,蓝志勇,张永华. HEC系列水利软件的应用[J]. 浙江水利科技, 2005(6): 20-27. (CAI Xin-ming, LAN Zhi-yong, ZHANG Yong-hua. Application of HEC serious hydraulic softwares[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2005(6): 20-27. (in Chinese))
- [6] 傅宗甫. 赶潮河网引水增流水力水质计算及河道糙率优化[D]. 南京:河海大学, 2002. (FU Zong-fu. Hydraulics and water quality calculation and roughness optimization of water diversion and flow strengthen in tidal river networks[D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese))
- [7] 赵振兴,何建京. 水力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2007: 311-313. (ZHAO Zhen-xing, HE Jian-jing. Hydraulics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 311-313. (in Chinese))
- [8] 陈界仁,肖洋. 赣江(南昌~湖口)Ⅱ级航道整治工程防洪影响评价报告[R]. 南京:河海大学, 2008: 36-39. (CHEN Jie-ren, XIAO Yang. Evaluation report for flood influence in Ⅱ level waterway regulation of Gangjiang (Nanchang to Hukou) [R]. Nanjing: Hohai University, 2008: 36-39. (in Chinese))
- [9] 陈建峰,王颖,李洋. HEC-RAS在洪水模拟中的应用[J]. 东北水利水电, 2006(4): 12-13. (CHEN Jian-feng, WANG Yin, LI Yang. Application of HEC-RAS Model in flood season[J]. Water Resources and Hydropower of Northeast China, 2006(4): 12-13. (in Chinese))
- [10] 李福田,高澜. 造床流量计算方法初探[J]. 河海大学学报, 1990, 18(4): 113-116. (LI Fu-tian, GAO Lan. Exploring in computing method of dominant discharge[J]. Journal of Hohai University, 1990, 18(4): 113-116. (in Chinese))
- [11] 王秀英,王东胜,赵梁明. 造床流量法确定整治水位的适用性探讨[J]. 水运工程, 2008(7): 115-120. (WANG Xiu-ying, WANG Dong-sheng, ZHAO Liang-ming. Discussion on the applicability of bed-forming discharge method in calculating regulation water level[J]. Port and Waterway Engineering, 2008(7): 115-120. (in Chinese))

Application of 1-D mathematical model of lower river networks

DAI Wen-hong^{1,2,3}, ZHANG Yun², GAO Song², LI Kai-jie², WANG De-xiang²

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The lower river networks often connect the upstream and downstream of navigation routes, and the river flood discharges have to pass from the upstream to the river networks. This makes the research on the flow in lower river networks one of the most important and necessary researches. In this paper, the authors first review and summarize the methods for the river networks; then, apply the self established 1-D hydrodynamic program, namely "hydrodynamic model for river networks", and the 1-D commercial software "HEC-RAS" to the lower Ganjiang River networks, separately; and calculate and analyze the flow in the flooding season, normal water period and dry season in lower Ganjiang river networks. In the flooding season, water surface is derived from the model to identify the major site of water level as a warning level, when the water level is close to the site warning level or has the trend to become close to the warning water level. At this point, the department concerned should prevent floods to reduce loss. In the normal water period, the effects made by dominant discharge should be considered. In the dry season, the water level at the main site according to the calculation of the model is considered to be the of lowest navigable level for the dry season. It can provide the basis for the smooth navigation.

Key words: one-dimensional flow; mathematical model; HEC-RAS; lower river networks