

新干枢纽下游河床冲淤及航道条件变化计算*

徐十锋, 陈界仁

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据赣江流域规划, 在赣江下游三湖镇河段规划兴建新干航电枢纽, 枢纽建成后坝下游的河床冲淤及水位变化需要进行预测研究。建立了坝址至南昌 118 km 长河段的一维水沙数学模型, 计算了拟建新干枢纽坝下河道河床下切与水位下降情况。结果表明: 在现状河道条件下, 经过 6~7 个水文年河床调整后, 枢纽下游河段河床冲淤接近平衡; 经过 10 个水文年作用后, 新干枢纽坝址下游附近河段河床最大冲刷深度为 1.76 m, 坝址下游附近水位最大下降值为 1.56 m。分析了河床调整后坝址至南昌河段航道条件的变化。

关键词: 水沙模型; 航电枢纽; 河床冲淤; 水位下降

中图分类号: TV 145 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)07-0124-05

Analysis of riverbed erosion and waterway conditions' change downstream Xin'gan hub

XU Shi-feng, CHEN Jie-ren

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the river basin planning of the Ganjiang river, the Xin'gan navigation electricity hinge will be proposed at about 1.5 km upstream from Sanhu town. It must be predicted that the change tendency of river bed and water levels downstream hub after completion of the project. The 1-D flow and sediment mathematical model are established from Sanhu town to Nanchang for 118 km long reach. The deformation of river bed and the declining water levels are computed by numerical model after completion of the project. The conclusion shows that under the current river status, the river bed will reach a equilibrium state by scouring and deposition for 6~7 hydrological years; the maximum scour depth of the river bed will be 1.76 m and the maximum value of the declining water levels will be 1.56 m after the self-adjustment of river bed about 10 hydrological years. The change of waterway condition downstream of the Xin'gan hub is analyzed.

Keywords: flow and sediment model; navigation electricity hinge; riverbed scour and deposition; drawdown of water stage

赣江是江西省第一大河流, 自南向北纵贯全省, 是沟通该省南北的水运干线, 也是全国高等级航道网和长江黄金水道的重要组成部分。根据《关于内河航道技术等级的批复》、《江西省内河航运发展规划》, 赣江赣州至湖口 606 km 河道航道规划实施目标是: 结合赣江干流的水资源综合梯

级开发, 并辅以必要的航道整治措施, 2020 年前使赣江干流赣州至南昌 450 km 航段达到Ⅲ级航道标准。主要措施是: 赣江下游和中、上游拟分别采取航道整治和河流渠化的工程措施达到规划目标。规划中的新干航电枢纽位于新干县三湖镇上游 1.5 km 附近, 可渠化上游约 56 km 的航道。拟建新

收稿日期: 2014-11-12
*基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(2011CB403303), 国家青年自然科学基金 (51109065)
作者简介: 徐十锋 (1989—), 男, 硕士研究生, 从事河流动力学数值模拟研究。

干枢纽建成运用后, 将引起枢纽下游河道沿程冲刷, 水位下降; 河床下切水位降低后对枢纽船闸门槛高程及航道整治设计水位确定带来影响, 应对枢纽下游的航道条件变化情况进行预测研究^[1-2]。

研究河段为拟建新干枢纽坝址至南昌外洲水文站河段, 全长约 118 km。枢纽坝址至樟树河段现状为 V 级航道, 规划为 III 级航道, 航道里程约 24 km; 樟树至南昌河段为 III 级航道, 河段长 94 km。研究河段属冲积平原河道, 河道顺直微弯, 弯曲系数约为 1.3, 平面形态多为莲藕状, 河槽宽浅, 枯水河宽约为 350 ~ 1 000 m, 最大为 1 300 m, 最小为 280 m; 洪水河宽约为 700 ~ 2 600 m, 最大为 3 000 m, 最小为 640 m。新干至外洲河段有江心洲 (滩) 25 个, 总长约 80 km, 绝大多数为双分汊, 分汊类型有顺直型、弯曲型和弓型。两岸有宽阔的河漫滩, 河漫滩高程在 19 ~ 25 m, 由细沙组成, 洪水时滩面水深在 4 ~ 10 m。在樟树公路桥上游 5.8 km 的左岸有袁河汇入, 其来水来沙由樟树水文站控制; 在市汊街下游 3 km 的左岸有锦河汇入, 锦河流域面积 7 650 km², 锦河来水、来沙为外洲水文站控制。研究河段河道见图 1, 研究河段有樟树、外洲水文站, 丰城、市汊水位站。



图 1 研究河段河道示意图

本文建立了一维水沙数学模型, 依据实测水文资料进行了水面线及河床冲淤的模型验证, 采用验证的数学模型计算新干枢纽建成运用后枢纽下游长距离河段的河床冲淤、水位变化及航道条件变化^[3-5]。

1 河道一维水沙数学模型建立和验证

1.1 模型建立

河道水流泥沙运动基本方程组包括水流连续方程、水流运动方程、悬沙不平衡输沙方程、河床变形方程。

水流运动基本方程组:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{n^2 Q^2}{A^2 H^{4/3}} \right) = 0 \quad (2)$$

一维非恒定流悬沙不平衡输移方程:

$$\frac{\partial (AS_k)}{\partial t} + \frac{\partial (QS_k)}{\partial x} - \alpha \omega B (S_{k*} - S_k) - q_{sk} = 0 \quad (3)$$

河床变形方程:

$$\rho' g B \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (G_s + G_b) = 0 \quad (4)$$

式中: Q 为流量; Z 为水位; A 为过水断面面积, x 为沿主流向的河道纵向距离; t 为时间; q 为单位长度河段均匀旁侧入汇流量 (侧向入流为正, 出流为负); g 为重力加速度; S_f 为河道的阻力坡降, $S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}$; S_k 为第 K 粒径组含沙量, S_{k*} 为第 K 粒径组水流挟沙力, q_{sk} 为单位长度旁侧入汇输沙率, $q_{sk} = q_l S_k$, ω 为泥沙沉速; α 为泥沙恢复饱和系数, 淤积时取 0.25, 冲刷时取 0.50; B 为水面宽度; ρ' 为床沙干密度; Z_b 为河床高程; G_b 、 G_s 分别为推移质和悬移质输沙率, $G_b = B g_b$, $G_s = QS$ 。

水流挟沙力采用武汉水院公式:

$$S_* = k \left(\frac{v^3}{g H \omega} \right)^m \quad (5)$$

式中: k 和 m 为系数和指数。

推移质输沙率采用窦国仁公式:

$$g_b = P_b \left(\frac{k_1}{C_0^2} \right) \left[\frac{\rho \rho_s}{\rho_s - \rho} \cdot \frac{(v - v_0) v^3}{g \omega} \right] \quad (6)$$

式中: P_b 为推移质粒径部分泥沙在床沙中所占比例; v_0 为起动流速。

$$v_0 = 0.265 \lg \left(11 \times \frac{H}{\Delta} \right) \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_{cp}} \quad (7)$$

式中: Δ 为粗糙高度; ρ 、 ρ_s 分别为水和泥沙的密

度； d_{cp} 为推移质平均粒径。

计算范围为拟建新干枢纽坝址至南昌外洲水文站河段；进口条件为流量及含沙量，出口条件为水位。

1.2 模型验证

1.2.1 水位验证

坝址至外洲河段共布置 158 个计算断面。依据 2012 年 1 月 12 日和 3 月 12 日的实测水面线进行数学模型验证，结果见图 2。根据水位率定糙率，糙率值介于 0.022 ~ 0.030，平均糙率 0.025。图 2 分别为枯水（樟树站流量为 300 m³/s）与中水（樟树站流量为 2 400 m³/s）条件下计算水位与实测结果比较，计算的水位与实测结果最大差值为 0.056 m，一般小于 0.03 m，计算结果和实测结果基本吻合。

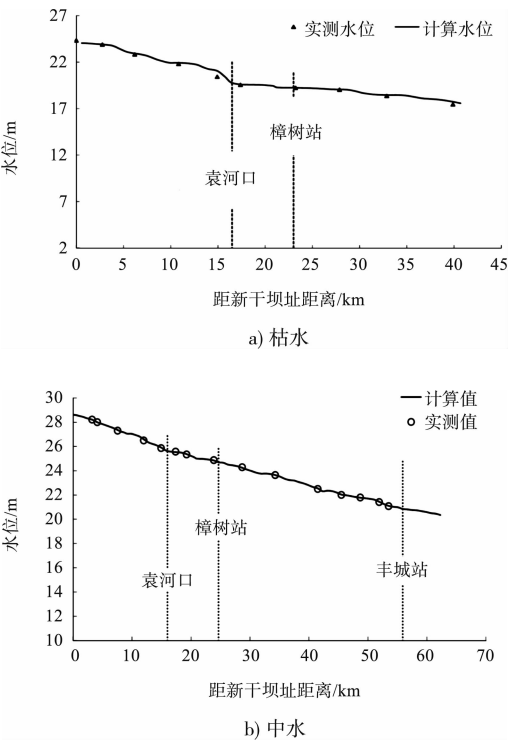


图 2 实测水面线验证

1.2.2 冲淤量验证

经河床演变分析，三湖至袁河口河段河床冲淤受河床采砂影响较小，以该河段的 2006—2012 年实测河床冲淤量作为数学模型验证基础。动床计算以 2006 年实测的地形作为起始计算地形，计算至 2011 年 12 月。计算中采用日均流量、水位及含沙

量，悬沙泥沙粒径 0.007 ~ 0.5 mm 共分为 7 组，床沙泥沙粒径 0.01 ~ 20 mm 共分为 10 组。表 1 为计算河床冲淤量与实测值的比较，可见计算的冲刷量为 543 万 m³，实测值为 578.7 万 m³，计算与实测结果二者比较接近。各河段计算的冲淤量与实测结果基本相符，最大误差为 14.6%，总量误差小于 10%。模型验证结果符合 JTJ/T 232—1998《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》要求。

表 1 2006 年 8 月至 2011 年河床冲淤计算与实测结果比较					
断面 编号	间距/km	冲淤/(万 m³)			
		计算值	实测值	计算-实测	偏差/%
1~9	4.59	126.4	110.3	16.1	14.60
10~18	4.59	113.4	118.8	-5.4	-4.55
19~27	7.20	303.2	349.6	-46.4	-13.30
1~27	16.38	543.0	578.7	-35.7	-6.17

注：“+”为冲刷、“-”为淤积。

2 新干枢纽下游长河段河床冲淤变化

拟建新干航电枢纽建成运用后，为预测枢纽下游河床冲淤及水位变化，基于现状河道地形条件，选择 2001—2010 年连续 10 个水文年的水沙资料，运用上述验证的一维数学模型计算。水文系列年采用万安枢纽运用后的情况，水沙系列包括丰水年（2001、2010）、中水年（2002、2003、2005—2009）、枯水年（2004、2011）同水文年情况。分析樟树水文站实测资料，2001—2010 年水文系列年均流量为 1 767 m³/s，径流量为 557.4 亿 m³，年均输沙量为 282 万 t；其中 2010 年为丰水年份，年均流量为 2 480 m³/s，洪峰流量为 19 100 m³/s，径流量为 783 亿 m³，输沙量为 483 万 t；2011 年为枯水年，年均流量为 2 480 m³/s，洪峰流量为 3 830 m³/s，径流量为 333 亿 m³，输沙量为 90 万 t；1960—2011 年年均流量为 1 804 m³/s，径流量为 579 亿 m³，年均输沙量为 719 万 t。选取的水文系列年均流量与多年平均值接近，输沙量明显小于多年平均值，计算结果偏于冲刷。计算得河床冲淤总量随时间变化结果见图 3。由图 3 可见，坝址至外洲长距离河段总体有所淤积，10 个水文年后河段总淤积量为 84.8 万 m³，经过 6 ~ 7 个水文年的河床调整，河床冲淤接近平衡。

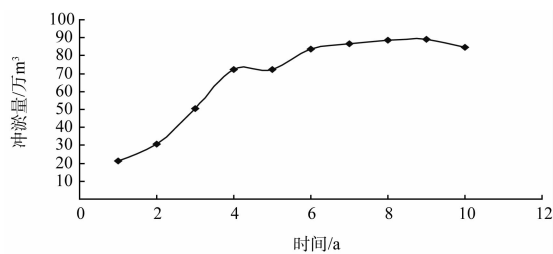


图 3 三湖至外洲河段冲淤总量逐年变化

经过 10 个水文年的河床调整后, 各河段冲淤厚度及深泓线沿程变化结果分别见图 4 和图 5。由图可见, 坝址至袁河口河段明显冲刷, 10 a 间累计冲刷量达 356 万 m^3 , 袁河口至丰城河段有冲有淤, 丰城以下河段河床有一定淤积。坝址下游 80 km 范围内河床总体冲刷, 经过 10 个水文年的河床调整, 其最大冲刷深度为 1.76 m。河床调整后的深泓线变化为, 坝下游河段河床冲刷下降, 局部深泓点有所淤积, 樟树以下河段深泓变化不大, 市汊以下河段河床淤积抬高。

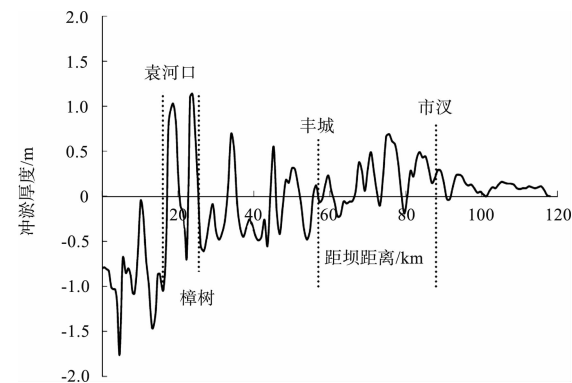


图 4 河段冲淤厚度沿程变化

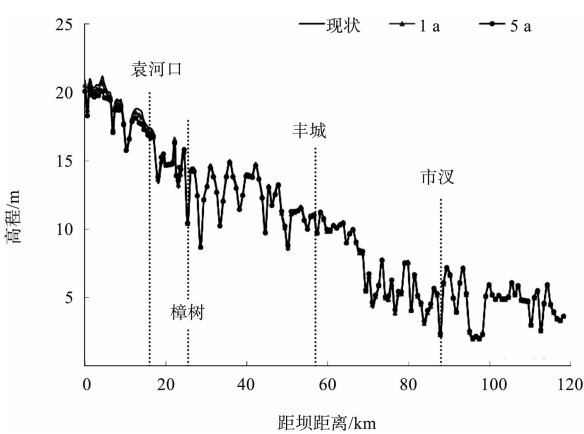


图 5 河段河床调整后河槽深泓线变化

3 新干枢纽下游河段的航道条件变化

3.1 枢纽下游河道水位变化

在新干航电枢纽工可研究中, 确定的航运基流为 $281 \text{ m}^3/\text{s}$, 对应的坝址下游现状条件的设计最低通航水位为 23.95 m。考虑到新干枢纽与樟树站之间河道左侧的支流袁河入汇作用, 其流量约占峡江站平均流量的 8%, 考虑支流入汇后, 袁河口至樟树站的流量约为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$, 仍小于樟树站的Ⅲ级航道所需的设计流量 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这一航运基流较Ⅲ级航道樟树站设计流量 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 偏小了 $100 \text{ m}^3/\text{s}$, 现状条件下新干枢纽坝址至樟树河段不满足Ⅲ级航道的设计流量要求。

依据新干枢纽航运基流作为新的设计流量条件, 计算坝址至外洲河段沿程水面线结果见图 6。河床调整后, 设计的航运基流流量下的计算水位呈下降趋势, 在河床调整 1 a 后, 水位下降的最大值为 0.28 m; 经过 5 个水文年后, 水位下降的最大值为 1.20 m; 经过 10 个水文年的河床调整, 水位最大下降了 1.56 m。由数模计算表明: 现状河道条件下, 经过 10 个水文年的河床调整, 坝下河床最大下切值为 1.76 m, 水位下降值为 1.56 m, 在新干枢纽可研中预估的水位下降值为 1.50 m, 结果基本接近, 由此分析得到的坝下远期门槛水位为 22.45 m。

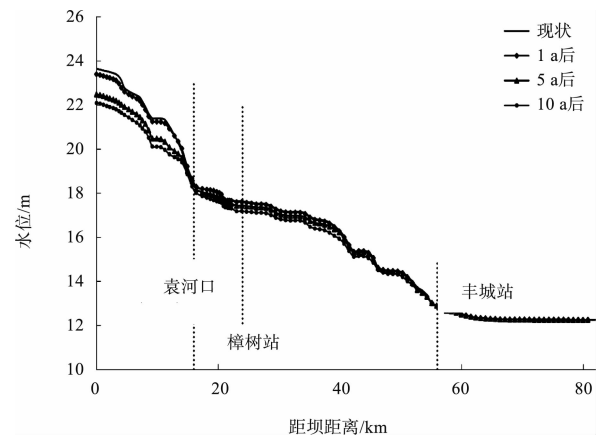


图 6 河床调整后航运基流流量的水位变化

3.2 河床调整后的航深变化

经过 10 个水文年的河床调整后的航运基流下研究河段 2.2 m 航深变化见图 7。从图 7 可见, 在航运基流 $281 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下, 近坝址下游 8 km 的河段不能满足设计的 2.2 m 航深要求, 主要分布在

坝址至袁河口河段，在龙头山上游局部 2 km 河段不能满足设计的 2.2 m 航深要求。现状河道条件下，局部碍航河段可通过航道整治等工程措施改善通航条件，或者依托新干枢纽下游规划的龙头山水电枢纽解决。

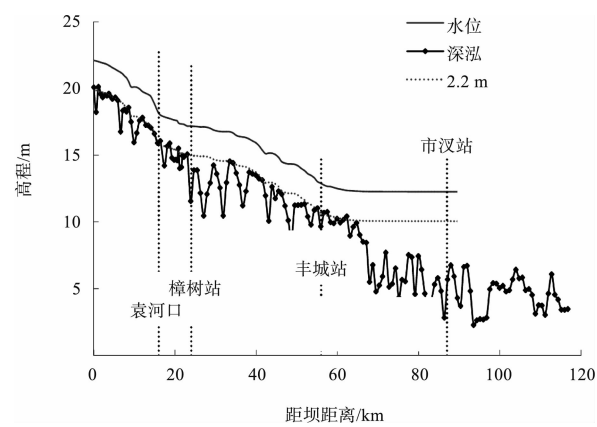


图 7 河床调整 10 a 后的 2.2 m 航深变化

4 结论

1) 坝址至外洲长距离河段总体有所淤积，10 个水文年后河段总淤积量为 84.8 万 m³，经过 6~7 个水文年的河床调整，河床冲淤接近平衡。坝址下游河道经过 10 个水文年的河床调整，其最大冲刷深度为 1.76 m。河床调整后的深泓线变化为：坝下游河段河床冲刷下降，局部深泓点有所淤积，樟树以下河段深泓变化不大，龙头山以下河段河床淤积抬高。

2) 拟建新干枢纽运用后经过不同水文年的河床调整后的航运基流流量 281 m³/s 条件下，河道水位呈下降趋势，在河床调整 1、5、10 a 后，水位下降的最大值分别为 0.28、1.20、1.56 m。在新干枢纽可研中预估的水位下降值为 1.50 m，二者结果基本接近，分析得到的坝下远期门槛水位为 22.45 m。

3) 经过 10 个水文年的河床调整后在航运基流 281 m³/s 条件下，坝址下游及龙头山附近局部河段不能满足设计的 2.2 m 航深要求。

参考文献：

[1] 陆永军, 陈稚聪, 赵连白, 等. 三峡工程对葛洲坝枢纽下游近坝段水位与航道影响研究[J]. 中国科学, 2002(10): 67-72.

[2] 周志德. 水库下游河床冲刷下切问题的探讨[J]. 泥沙研究, 2003(5): 28-31.

[3] 许全喜. 三峡工程蓄水运用前后长江中下游干流河道冲淤规律研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 146-154.

[4] 陈飞, 李义天, 唐金武, 等. 水库下游分组沙冲淤特性分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 164-170.

[5] 倪志辉, 易静, 张绪进. 感潮河网区航道整治工程潮流数值模拟[J]. 水运工程, 2013(6): 108-113.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 118 页)

参考文献：

[1] 张群. 软体排顺水流施工受力分析与实船测试研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2014, 38(3): 619-622.

[2] 张秀芳, 王平义, 王伟峰, 等. 软体排护滩带的护滩效果研究[J]. 水运工程, 2010(12): 98-103.

[3] 曹根祥, 丁捍东. 长江口深水航道治理工程护底软体排施工成套工艺及设备的开发[J]. 水运工程, 2006(12): 68-73.

[4] 董朝明, 王兴超, 林垂兴, 等. 软体排缩排原因分析及控制[J]. 中国港湾建设, 2014(9): 24-28.

[5] 刘颖, 杨平. 软体排沉排受力分析与非线性有限元计算[J]. 船海工程, 2011(3): 52-55.

[6] 朱宪武. 混凝土联锁块软体排的受力分析与计算[J]. 水运工程, 2000(12): 21-26.

[7] 张为, 李义天. 系混凝土块压载体软体排受力特性研究[J]. 水运工程, 2006(1): 9-15.

[8] 吴腾, 徐金环, 陶桂兰, 等. 贺江下游航道优化开发等级研究[J]. 水运工程, 2014(4): 106-110.

[9] 付中敏. 潮汐河段消能护滩结构(透水框架)研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2013.

(本文编辑 武亚庆)