

乌江银盘航电枢纽明渠通航方案数值模拟

杨忠超, 文 岑, 许光祥, 陈明栋, 杨 斌

(重庆交通大学 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 采用平均水深的二维有限元法建立了乌江银盘枢纽导流明渠水流数学模型, 计算了多级流量下的明渠内水流条件. 根据乌江代表船型确定了船舶自航的流速与比降的组合标准, 依此标准绘制了明渠各级流量的适航区域. 采用复式断面法对导流明渠进行3个方案的优化, 得到了较优的明渠断面形式, 调整明渠内水流流速与比降分布, 改善了导流明渠的通航条件, 提高了导流明渠的通航流量, 保证了通航安全.

关 键 词: 导流明渠; 通航条件; 数值模拟; 流速分布

中图分类号: TV551.11; TV741 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2009)03-0059-08

乌江是长江上游重要支流之一, 是贵州、重庆两省市的重要水路交通运输线, 同时乌江下游河段也是重庆的水电能源基地. 拟建银盘水电站是该河段仅次于彭水水电站的骨干水电站, 施工拟采用明渠三期导流方案, 其中在二期导流期间, 将利用导流明渠通航, 历时总共约22个月. 为了论证明渠通航方案的可行性, 研究配置绞滩设施的方法和必要性, 配置绞滩助航设施后明渠的通航条件、通过能力和通航安全等能否满足相关要求, 有必要开展乌江银盘航电枢纽明渠通航方案研究.

大型水电工程明渠通航研究大多采用物理模型试验方法, 如三峡工程的导流明渠, 采用物模成功地解决了弯道上明渠导流及施工通航的关键技术问题^[1-3]. 但物模试验费时费力, 测量信息量有限, 难以测定局部区域的比降. 随着计算技术的日趋完善, 数值模拟在工程领域的应用越来越多^[4-8], 三峡明渠通航研究中, 这一技术同样发挥了巨大作用^[9,10].

1 控制方程及数值方法

1.1 控 制 方 程

采用沿水深平均的封闭浅水方程组描述二维水流运动, 基本控制方程如下:

$$\text{水流连续方程} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

$$x \text{ 方向动量方程} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial x} \right) - fv - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

$$y \text{ 方向动量方程} \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

以上各式中, t 为时间; u, v 分别为沿 x, y 方向的流速; h 为水深; g 为重力加速度; n 为糙率系数; 紊动粘

收稿日期: 2008-09-23

基金项目: 交通部西部交通建设资助项目(200532800030); 重庆市教委基金资助项目(KJ050408)

作者简介: 杨忠超(1972-), 男, 四川眉山人, 副研究员, 博士后, 主要从事水力学、河流动力学及计算流体力学研究.

E-mail: yangzc998@yahoo.com.cn

性应力 ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{xy} 分别为

$$\varepsilon_{xx} = \rho\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \varepsilon_{yy} = \rho\nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \varepsilon_{xy} = \rho\nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \nu_t = \alpha u_* h = (0.6 \pm 0.3) u_* h.$$

其中 ν_t 为紊动粘性系数; u_* 为摩阻流速.

1.2 基本方程的数值离散与求解

浅水方程的离散包括时间离散和空间离散,时间的离散采用差分法,空间的离散采用有限单元法;运用伽辽金加权余量法把浅水方程离散成非线性代数方程,然后采用 Newton-Raphson 方法求解. 离散区域内采用三角形六节点等参单元和四边形八节点等参单元相耦合. 单元插值采用混合插值方法. 具体参见文献 [11]. 计算常数取值见表 1.

表 1 计 算 常 数

Tab. 1 Computing parameters

动量通量修正系数			紊动系数		单元干湿计算常数		松弛因子
κ	β_0	C_β	α	σ_t	α	η_b	ω
0.4	1.0	6.25	0.8	1.0	0.01	3	0.8

1.3 计算区域及验证

明渠计算区域上起坝轴线上游约 1.05 km,下至坝下 1.17 km,全长约 2.22 km. 平面二维数模在计算域内共布置 18 079 个网格点,8 292 个三角形或四边形有限单元,局部网格加密,提高了计算精度(见图 1).

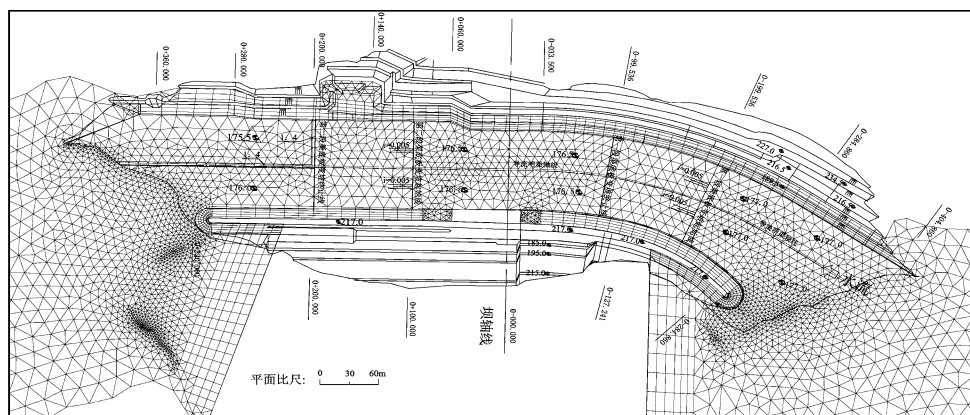


图 1 导流明渠原方案平面图及计算网格

Fig. 1 The original design layout of open diversion channel and computational grid

明渠河段实测流量 713 和 1 101 m^3/s 时,测流断面流速和瞬时水位验证表明,计算结果与实测值较为吻合,符合《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》要求.

2 代表船舶及通航标准

调查乌江通航船舶后,拟定明渠通航代表船舶为 46.8 m×8.8 m×2.2 m 的机动驳,主机功率 367 kw,上下行通常装载 300~500 t,实际行载重按 400 t 计算. 导流明渠为临时工程,根据相关研究确定银盘水电站导流明渠最小通航流量为 345 m^3/s ,最大通航流量为 6 000 m^3/s ,最大通航流速 4.4 m/s,水深大于 2.6 m. 采用《内河通航标准》公式验算,导流明渠单线航道宽度为 19.6 m.

船舶上滩航行阻力 R_H 由水流阻力 R_V 和坡降阻力 R_J 两部分组成,在一定的流速和水面比降组合下,当船舶的推力 T_0 小于航行阻力后,船舶就不能自航上滩. 根据乌江代表船舶及上滩阻力研究,采用修正后的兹

万科夫公式进行计算,得到明渠通航船舶自航上滩允许的比降和流速组合为 $j=0, v=4.4 \text{ m/s}; j=1\text{‰}, v=4.2 \text{ m/s}; j=2\text{‰}, v=3.8 \text{ m/s}; j=3\text{‰}, v=3.4 \text{ m/s}; j=4\text{‰}, v=2.8 \text{ m/s}; j=5\text{‰}, v=2.2 \text{ m/s}; j=6\text{‰}, v=1.1 \text{ m/s}$.

结合三峡明渠通航实践经验^[1-3]及本明渠内的流态流速分布,规划航线如图2所示。(1)上行航线:在乌江3 m水深以下的枯水期,明渠内最大流速2 m/s左右,船舶可自航上滩.为增大航深,渠道下段航线规划位于渠道中心稍偏右岸一侧.3 m水深以上,由于明渠流速逐渐增大,船舶均需避开主流上行.此时,上行船舶抵达渠尾以后,先绕下堤头进入明渠,然后沿左岸纵向围堰岸边一侧上行.在流量3 500 m³/s(明渠的8 m水位)以下,船舶自航至坝轴线附近,然后过河至右岸,沿流速稍小的区域上行,直至进入上游河道;当流量超过3 500 m³/s,船舶不能自航过渠,需设置绞滩助航设施.为保证明渠通过能力和通航安全,船舶沿左岸上行至坝轴线附近后,船舶接到浮筒抛过的缆绳后,由设在上游右岸起绞点的绞滩机助拖上行。(2)下行航线:下行航线规划在渠道中心偏左岸一侧,与上水航线位置较接近.即下行船舶从上游进入明渠后,应沿明渠左岸(纵向围堰)一侧下行,经过弯道后沿中轴线稍偏左岸下行.原因是大流量时纵向流速也较大,为使船舶有足够的舵效,船舶将加速行驶,导致船舶对岸航速较大,靠左航行可防止船舶落弯,避免漂移至明渠右岸导墙.分析规划航线,最困难航线是洪水期上行.

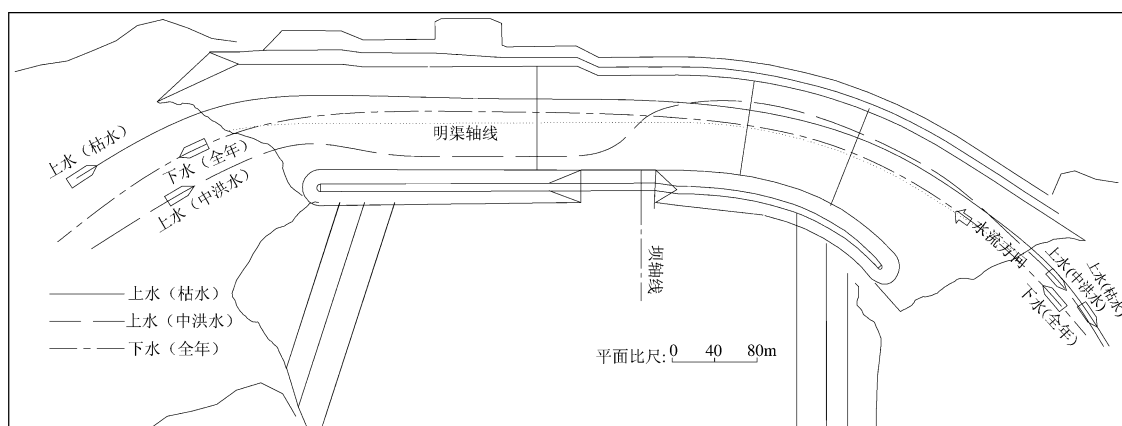


图2 规划航线

Fig.2 Design shipping route

3 导流明渠通航条件及方案优化

为了直观评价明渠通航条件,根据确定的导流明渠航线上流速与比降组合标准及乌江船舶上滩能力比较,绘制了明渠中船舶能自航的适航区域.以船长计算水面比降,充分反映了局部水面比降的影响.

3.1 原方案成果分析

原方案5 000 m³/s流量的流场图见图3,相应的流速等值线、比降等值线和适航区域图见图4.可见,受围堰的阻流,堰前水位抬高,在上围堰前形成小强度逆时针回流.明渠上游进口水流经堤头挤压,在左岸纵向围堰堤头以下形成较大水面跌落,局部比降达到7‰以上,左岸区域流速大于右岸区域.在坝轴线前区,由于比降较大,流速明显增大.明渠中段受弯道环流影响,右岸流速略大于左岸流速,主流基本位于明渠轴线偏右.明渠下段由于右侧高程较低,加之环流作用,右岸流速明显大于左岸.明渠出口过流面积突然增加,流速减缓,水面上升,形成倒比降,在下围堰后形成逆时针回流.

分析原方案的适航区表明:(1)枯水期($Q < 400 \text{ m}^3/\text{s}$),明渠通航水深不足2.6 m,不能自航过渠;(2)小流量($400 < Q < 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$),明渠全段表面流速均小于2.8 m/s,水面比降基本均小于3‰,全渠段水深大于2.6 m,船舶可全段自航过渠;(3) $Q = 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠自航区没有贯通,不能自航上渠.不过,在明渠下段的左侧和上段的右侧存在一定范围满足19.6 m航宽的自航区,其碍航段长度随着流量的增大而增长(见表

2), 当 $Q=3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 碍航段达 360 m, 明渠上半段整个水域均不能自航; (4) $Q=3\,500\sim5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 碍航区长度达 360~475 m. $Q>5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 后, 碍航区几乎占据整个明渠, 碍航区段已超过 600 m, 特别是 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 碍航区段达到 650 m, 整个明渠碍航.

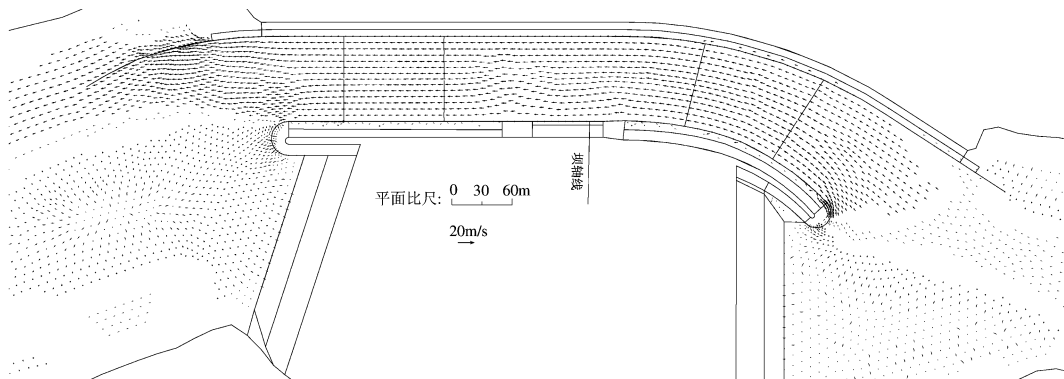


图 3 导流明渠原方案流速分布

Fig. 3 Velocity distribution of original design open diversion channel

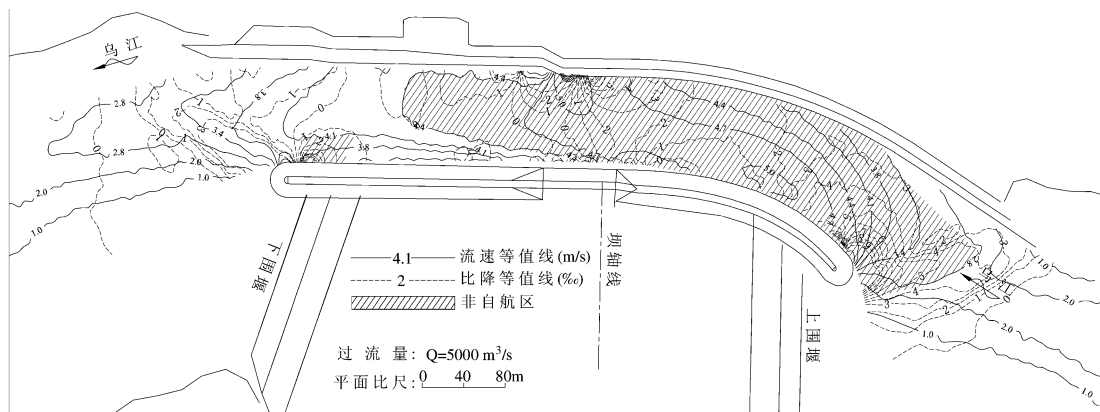


图 4 导流明渠原方案适航区分布

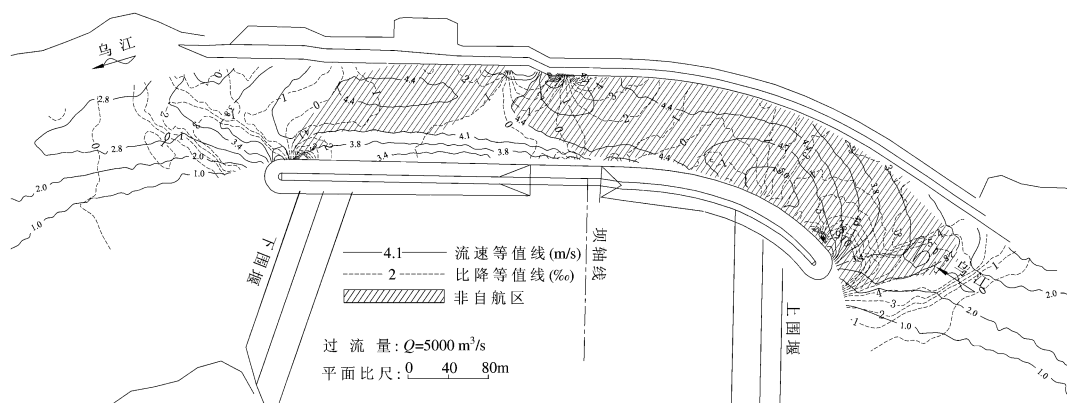
Fig. 4 Passable scope of original design open diversion channel

根据适航区域, 可将通航条件分为 3 种情况: 全渠段自航, $Q=400\sim3\,000\text{ m}^3/\text{s}$; 配合绞滩, 部分渠段通航, $Q=3\,000\sim5\,000\text{ m}^3/\text{s}$; 全渠段碍航, $Q>5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q<400\text{ m}^3/\text{s}$. 因此, 原方案最小禁航流量为 $400\text{ m}^3/\text{s}$, 最大自航流量为 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$.

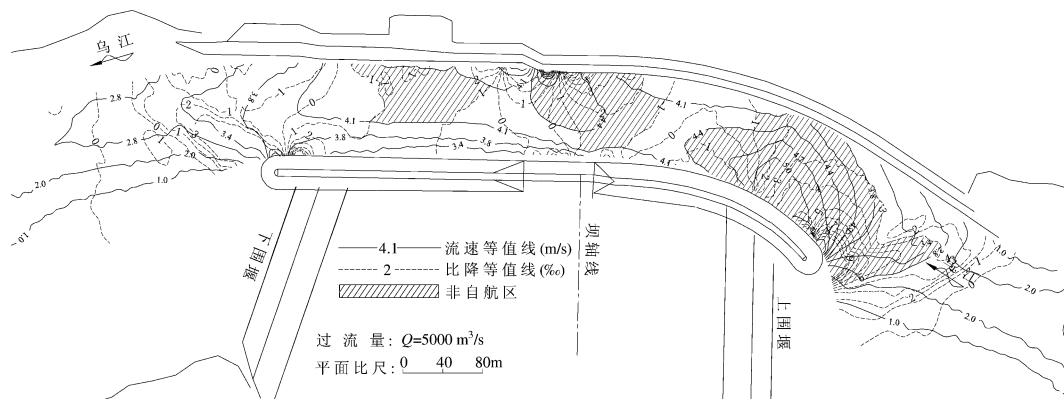
3.2 优化方案成果分析

原方案存在的主要问题是小流量时航深不足, 不能通航; 中高洪水期船舶航线上流速过大, 适航区域范围较小, 不能满足自航要求. 据此提出以下方案优化措施: 调整明渠底断面形状和底坡, 增加小流量时的航深, 改善大流量时的流速分布, 减小上水航线区域流速和水面比降, 缩短急流段范围, 配合绞滩方案及起绞点的布局, 使船舶在洪水绞滩期能安全到达起绞点.

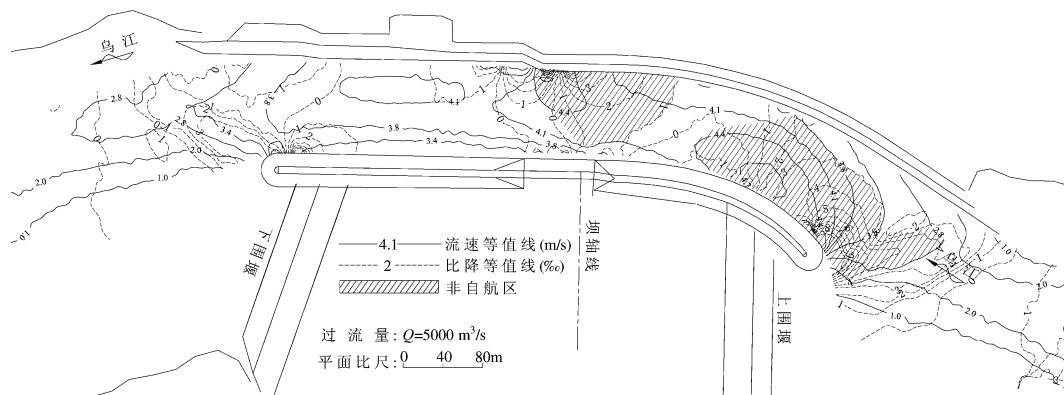
乌江航道整治中常采用的方法是: 设置整治建筑调整主流、人为制造缓流区、调整渠底坡降、改变渠头和渠尾型式等. 由于本工程明渠上、下堤头型式已基本确定, 采用以上方法不仅收效不大, 反而会不同程度地恶化明渠内流态. 经反复试验, 决定降低明渠右岸一侧渠底高程, 将明渠主流导向右岸, 目的是调整流速分布, 利用深区的吸流作用, 增大右岸流速, 在左岸浅区 (即设计航线上) 形成缓流区, 以利通航. 并提出 3 个优化方案, 各优化方案的适航区域见图 5, 各方案明渠底高程见图 6, 各方案碍航范围的比较见表 2.



(a) 方案 I



(b) 方案 II



(c) 方案 III

图5 方案 I、II、III适航区分布

Fig.5 Navigable scope of optimum open diversion channel

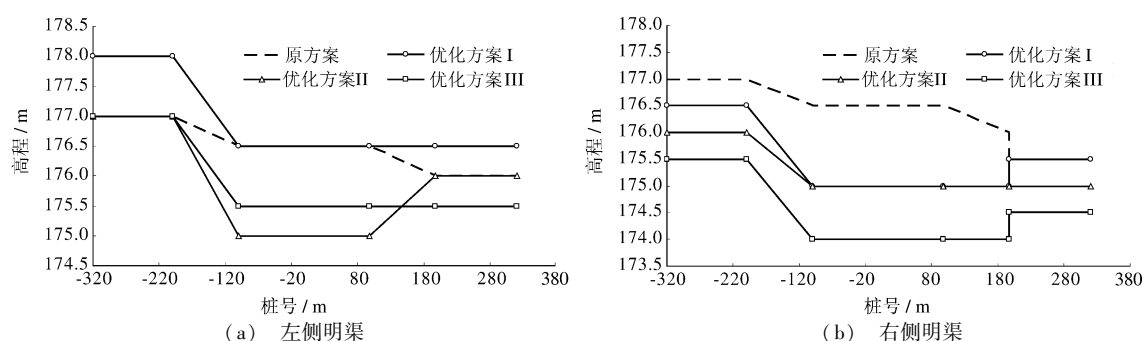


图 6 明渠底高程

Fig. 6 Open diversion channels bottom elevation

表 2 各方案碍航范围比较

Tab. 2 Impassable scopes statistics for all designs of open diversion channel

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	原方案	优化方案 I	优化方案 II	优化方案 III
3 000	+15 ~ -310	-182 ~ -310	-186 ~ -300	/
3 500	+50 ~ -310	-120 ~ -310	-170 ~ -310	/
4 000	+84 ~ -310	+19 ~ -310	-144 ~ -311	-158 ~ -310
4 500	+108 ~ -310	+26 ~ -310	-121 ~ -300	-138 ~ -310
5 000	+145 ~ -310	+38 ~ -310	0 ~ -310	+28 ~ -310
6 000	+352 ~ -310	+348 ~ -310	+316 ~ -310	+75 ~ -310

注:①表中数值以坝轴线为零点,“-”表示上游方向里程,“+”表示下游方向里程,单位为 m;②碍航段表示自航区宽度不足 26 m 的连续里程长度;③自航区、非自航区(碍航区)由表 1 提及的流速~比降组合进行判定。

优化方案 I 的计算结果表明,全渠段自航流量为 $Q < 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。虽然在 $Q = 345 \text{ m}^3/\text{s}$ 设计流量时左侧浅区进口段水深不足 2.0 m,但深区航宽航深可满足要求;部分渠段通航流量为 $Q = 3\,500 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,全渠段碍航流量为 $Q > 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。与原方案相比,优化方案 I 的主要优点是将主流引向右岸,延长了部分渠段通航的长度,左岸适航区横向航宽增加。如 $Q = 4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时碍航段由 394 m 缩短到 329 m,位置上移 65 m; $Q = 4\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时碍航段由 418 m 缩短到 336 m,位置上移 82 m; $Q = 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时碍航段由 455 m 缩短到 348 m,位置上移 107 m。存在的不足是,流量 $Q > 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,堤头区仍为全渠宽碍航, $Q > 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠尾部左侧形成“关门”。

优化方案 II 的全渠段自航流量为 $Q < 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,部分渠段通航流量为 $Q = 3\,500 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,全渠段碍航流量为 $Q > 6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。与优化方案 I 相比,该方案的改善之处在于过水面积增加,流速减小,适航区域范围增加。特别是 $Q = 3\,500 \sim 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,适航区域上移 40 ~ 75 m。但该方案在流量 $Q > 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,堤头区仍为全渠宽碍航,流量 $Q > 6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,全渠段碍航。

优化方案 III 的流场(图 7)显示,大流速区位于堤头以下左侧和明渠下段右侧,航线附近流速降低:(1)低流量时($Q < 1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$),明渠全段表面流速均小于 2.8 m/s,水面比降小于 3‰,且设计流量($Q = 345 \text{ m}^3/\text{s}$)时,全段水深大于 2.6 m,船舶可全段自航过渠;(2) $Q = 3\,000 \sim 3\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,虽然在明渠进口段左侧和中段右侧存在局部的非自航区,但自航区全航段贯通,且其宽度大于 19.6 m,船舶可全段自航过渠;(3) $Q = 4\,000 \sim 4\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,在明渠进口段左侧和中段右侧存在局部的非自航区,中部航宽大于 20 m,碍航区不影响自航,但进口段碍航区使得右岸适航宽不足,碍航区域为 -158 ~ -310 m 和 -138 ~ -310 m,故不能自航过渠,可通过助航设施上滩;(4) $Q = 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠中段右侧的碍航区范围扩大,左侧适航宽不足验算的 19.6 m,船舶不能自航通过,碍航区域为 +28 ~ -310 m;(5) $Q > 6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠中段右侧的碍航区与堤头碍航区连成一片,且随着流量增加,范围增大, $Q = 6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,船舶可自航到坝轴线下游 75 m,即碍航区为 +75 ~ -310 m。

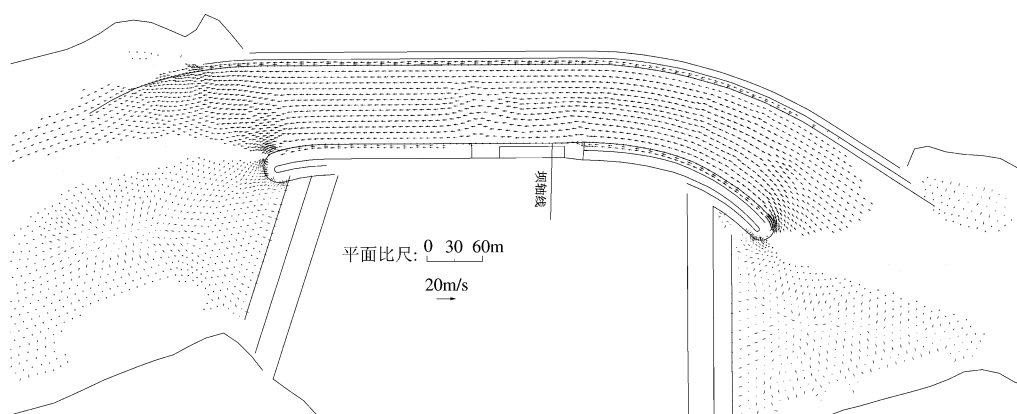


图7 导流明渠优化方案Ⅲ流速分布

Fig.7 Velocity distribution of optimum design III of open diversion channel

可见,本方案全段自航流量提高到 $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$,且设计流量全渠段水深满足通航要求;同时将 $Q = 4\,000 \sim 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 从前述方案的全渠段碍航改善为部分渠段通航,碍航长度缩短到 $152 \sim 340\text{ m}$,下游自航位置上提到坝轴线下 $25 \sim 75\text{ m}$,船舶自航的范围可到达设于坝轴线附近的助航设施起绞点。

再进一步对明渠进行优化,水流条件的改善已经较小,且工程量增加较大,故从通航条件和工程量综合比较,推荐优化方案Ⅲ为导流明渠建设方案。

4 结 语

(1)采用平均水深的二维有限单元法建立了乌江银盘枢纽导流明渠水流数学模型,计算了多级流量下的明渠水流条件,对明渠断面型式进行了优化研究.该方法能较好模拟山区河流和明渠的复杂边界条件,能经济、快速解决工程实际问题,表明本文采用的数值方法是研究明渠通航的有力工具,切实可行;

(2)根据乌江代表船型建立了船舶自航的流速与比降组合标准,绘制了导流明渠内的适航区域,直观分析了明渠通航条件;

(3)推荐的导流明渠优化方案Ⅲ改善了明渠通航条件,提高了通航流量,确保通航安全,同时节省了工程投资,又加快了工程进度,为银盘水利工程提前发电创造了条件。

参 考 文 献:

- [1] 刘力中,刘乃义,柏 林,等.三峡工程导流明渠通航水力学试验研究[J].长江科学院院报,1995(4):7-13. (LIU Li-zhong, LIU Nai-yi, BO Lin, et al. Hydraulic model test on navigation condition in diversion channel of Three Gorges Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1995(4):7-13. (in Chinese))
- [2] 陈元清,史德亮,汪世鹏.三峡导流明渠施工通航原型观测与模型验证[J].长江科学院院报,2000(3):1-4. (CHEN Yuan-qing, SHI De-liang, WANG Shi-peng. Prototype observation on navigation hydraulics in diversion channel of TGP during construction period and its verification on model[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(3):1-4. (in Chinese))
- [3] 宁廷俊,汪世鹏,刘秀华.三峡导流明渠施工通航模型试验研究与工程实程[J].水力发电学报,2002(3):45-53. (NING Ting-jun, WANG Shi-peng, LIU Xiu-hua. Hydraulic experiment on navigation in diversion channel of TGP and engineering practice[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002(3):45-53. (in Chinese))
- [4] 杨忠超,邓 军,杨永全,等.多股多层水平淹没射流数值模拟研究[J].水利学报,2004(5):69-73. (YANG Zhong-chao, DENG Jun, YANG Yong-quan, et al. Numerical simulation of multiple submerged jets on multilevel discharged into

- plunge pool[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(5): 69-73. (in Chinese))
- [5] 赵升伟, 茅泽育, 罗 昇. 等宽明渠交汇水流数值计算[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 494-499. (ZHAO Sheng-wei, MAO Ze-yu, LUO Sheng. Depth-averaged turbulence models for flow simulation at equal-width open-channel junction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(5): 494-499. (in Chinese))
- [6] JANRETT R D. Hydraulics research in mountain rivers[C]//Proceedings of the International Conference on Channel Flow and Catchment Runoff: Centennial of Manning's Formula and Kuichling's Rational Formula, Charlottesville VA: University of Virginia, 1989: 599-608.
- [7] SHIMIZU Y, YAMAGUCHI H, HAKURA T. Three-dimensional computation of flow and bed deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (9): 1090-1109.
- [8] WOJCIECH B, ALICJA M. Fluvial hydraulics of streams and mountain rivers with mobile bed[C]//Proceedings of National Conference on Hydraulic Engineering, New York: ASCE, 1994: 767-771.
- [9] 戴会超, 王玲玲, 朱红兵. 三峡工程导截流数值实验室的建立及关键技术[J]. 长江科学院院报, 2000(3): 7-13. (DAI Hui-chao, WANG Ling-ling, ZHU Hong-bing. Development of hydraulics numerical laboratory and its application in river closure and diversion engineering of Three Gorges Project and key techniques[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(3): 7-13. (in Chinese))
- [10] 戴会超, 杨文俊. 三峡工程明渠导流通航及数值实验研究概述[J]. 水力发电, 2004(7): 69-73. (DAI Hui-chao, YANG Wen-jun. The research of the navigation and diversion in TGP channel and its numerical simulation[J]. Water Power, 2004(7): 69-73. (in Chinese))
- [11] 文 岑, 陈景秋, 陈明栋. 南京长江第四大桥航行条件数值模拟研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004(7): 34-37. (WEN Cen, CHEN Jing-qiu, CHEN Ming-dong. Numerical simulation on navigation condition of Nanjing Fourth Bridge on Changjiang River[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004(7): 34-37. (in Chinese))

Numerical simulation on navigation condition in open diversion channel of Yingpan Hydro-junction Project in Wujiang River

YANG Zhong-chao, WEN Cen, XU Guang-xiang, CHEN Ming-dong, YANG Bin

(Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Communications, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: A Flow numerical model of the open diversion channel of the Yingpan Hydro-junction Project in the Wujiang River is established By means of two-dimension finite element method, and flow conditions under a variety of flux in open diversion channel are computed. Based on typical watercraft in the Wujiang River, the combined standard between velocity and water surface gradients under which watercraft can be steered by itself power is confirmed. The navigable scope under many variety of flux in open diversion channel is plated according to the standard. Using complex Section method, three optimizing designs are researched and the optimum section is achieved, and the velocity and water surface gradients in open diversion channel are redistributed, and thereby the navigation condition is improved, the navigation flow is increased and the navigation safety is ensured.

Key words: open diversion channel; navigation condition; numerical simulation; velocity distribution