



岷江龙溪口航电枢纽施工期通航问题试验研究

尹崇清¹, 刘峰钻², 张 湛¹, 刘 洋¹

(1. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 岷江龙溪口航电枢纽是一座以航运为主、航电结合的大(2)型综合利用水利枢纽工程。该工程施工期通航条件的好坏, 将直接关系到岷江乐山至宜宾段航道能否满足大件船舶安全畅通的运输要求, 意义重大。根据龙溪口航电枢纽工程施工导流模型试验成果, 分析了各施工导流期的通航水流条件, 并针对施工通航存在的问题特别是二、三期围堰区段流速超标、流态较差、通航流量较低等相关问题, 提出了改善施工期通航水流条件、提高通航流量的综合性工程措施, 较好地解决了本枢纽工程施工期的通航问题, 其研究成果可作为类似工程借鉴和参考。

关键词: 航电枢纽; 施工导流; 通航条件; 试验研究

中图分类号: U 661

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0114-07

Test study on navigation in construction period of Longxikou navigation-power junction on Min river

YIN Chong-qing¹, LIU Feng-zuan², ZHANG Zhan¹, LIU Yang¹

(1. Southwestern Hydro Engineering Research Institute for Waterway, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The Longxikou navigation-power junction on Min river is a comprehensive hydro-junction of navigation combining with hydropower. Because of the importance to Min river navigation, the flow condition during the construction period of Longxikou power station will be directly concerned if Min river navigation channel can meet the transport requirements of the large ship or not. Based on the hydraulic model test, the navigation water condition in each construction period is studied. In some cofferdam sections of the second and the third period of diversion, the condition of navigation flow is very poor. To solve these problems, some comprehensive measures, which improve the navigation flow conditions in the construction period, are proposed. The research result may serve as reference for similar engineering.

Key words: navigation-power junction; construction diversion; navigation condition; experimental research

岷江是长江径流量最大的支流, 是四川航运“一横两纵”水运进出川的主通道。岷江下游(乐山—宜宾段)航电开发按照“以航为主, 航电结合, 以电补航”的原则, 以“渠化上中游, 整治下游”为目标, 近期开发上段的老木孔、东风岩、犍为和龙溪口4个梯级, 结合整治下游约80 km河段, 使岷江下游全河段达到Ⅲ级航道标准。由于岷江担负着四川重型机械和成都经济区

大宗货物运输的重任, 在综合交通运输和区域经济发展中具有重要作用, 是四川重型机械制造业出川的大动脉和生命线, 也是四川大件运输的唯一水上运输通道。因此岷江龙溪口航电枢纽工程施工期的通航问题, 是建设单位、设计单位、地方政府及相关主管部门十分关心的重大问题, 该工程施工期通航条件的好坏, 将直接关系到岷江乐山—宜宾段航道能否满足大件船舶安全畅通的

收稿日期: 2012-10-25

作者简介: 尹崇清(1964—), 男, 副研究员, 从事水工水力学及航道整治工程方面的研究。

运输要求, 意义重大。

1 工程概况^[1]及研究方法

龙溪口航电枢纽工程为规划河段岷江(乐山—宜宾)的第4个梯级, 位于岷江下游乐山市犍为县境内, 上距大渡河汇合口80.9 km。坝址处控制流域面积131 980 km², 多年平均流量为2 680 m³/s, 枢纽设计洪水流量 $Q_{P=1\%}=49\,500\text{ m}^3/\text{s}$, 校核洪水流量 $Q_{P=0.1\%}=68\,800\text{ m}^3/\text{s}$, 水库正常蓄水位317 m, 相应的水库库容为0.96亿m³。通航建筑物为III级船闸, 船闸尺度为200 m×34 m×4.5 m(闸室有效长度×有效宽度×门槛水深); 电站利用落差16.1 m, 装机容量为420 MW, 多年平均发电量为20.54亿kW·h, 具有日调节能力。

龙溪口航电枢纽是一座以航运为主, 航电结合, 兼顾防洪、供水、旅游和环保等综合利用的大(2)型水利枢纽工程, 其等别为II等。采用100 a一遇洪水设计, 1 000 a一遇洪水校核, 主要建筑物按2级设计, 次要建筑物按3级设计, 临时建筑物按4级设计。主要建筑物从左至右的布置依次为电站厂房、24孔泄洪(冲沙)闸和船闸3大部分。采用分期导流的施工方式: 一期疏浚左岸河漫滩, 二期同时围左岸厂房段和右岸船闸以及7孔泄洪闸, 三期围中间剩余17孔泄洪闸。枯期(11月1日—次年5月31日)导流标准为10 a一遇枯期洪水, 相应流量为6 750 m³/s。汛期导流标准为10 a一遇汛期洪水, 相应流量为32 100 m³/s。根据有关单位编制及航务主管部门批复的《岷江航电枢纽工程建设期安全通航专题研究报告》(2010年4月)中的建设期通航标准, 结合岷江航道实际情况, 以及岷江现有船舶特点, 为确保船舶航行安全, 对岷江航电枢纽建设期通航水力要素要求如下: 允许最大流速 $v_{\text{允max}}\leq 3.5\text{ m/s}$, 允许最大横向流速 $v_{\text{允横max}}\leq 0.5\text{ m/s}$,

允许最大比降 $j_{\text{允max}}\leq 3\text{‰}$, 无碍航流态。

根据本工程主要研究内容及重点难点, 拟采用龙溪口枢纽整体水工模型试验的方法, 观测枢纽各施工期明渠及围堰河段的通航水流条件, 论证围堰布置的合理性, 并对围堰布置位置及结构尺寸等存在的问题提出改善工程措施。根据《水工模型试验规程》要求, 模型必须满足重力相似、阻力相似和水流流态相似, 以保证研究水域水流相似和河床形态相似准则, 并综合考虑了模型场地大小、供水能力要求等因素, 本模型决定采用几何比尺为 $\lambda_L=\lambda_h=100$ 的正态模型, 模拟从距坝轴线以上2.3 km开始至坝轴线以下2.2 km止全长约4.5 km的原型河道, 分析研究各期围堰施工期工程河段的通航问题。模型各比尺见表1。

表1 龙溪口航电枢纽水工模型比尺		
比尺名称	公式	比尺值
几何比尺	$\lambda_l=\lambda_h$	100
流速比尺	$\lambda_v=\lambda_l^{1/2}$	10
流量比尺	$\lambda_Q=\lambda_l^{2.5}$	100 000
河床糙率比尺	$\lambda_n=\lambda_h^{1/6}\left(\frac{\lambda_h}{\lambda_l}\right)^{1/2}$	2.15
水流运动时间比尺	$\lambda_t=\lambda_l^{1/2}$	10

2 一期围堰施工期通航水流条件^[2-7]

龙溪口航电枢纽工程一期围堰施工导流主要是对左岸河漫滩进行疏浚, 开挖导流明渠, 疏浚范围包括厂房和部分泄洪闸所在的左岸河漫滩河床, 其长度为闸址上游约1 050 m, 下游约1 380 m, 疏浚河床底高程至298 m。疏浚河床过程中, 在左岸滩地预留土埂保护下进行左岸纵向混凝土围堰施工。其中枯期进行左岸河漫滩疏浚和左岸纵向混凝土围堰施工, 汛期浇筑至307 m高程, 由原右岸主河床过流、通航。汛期拆除左岸土埂, 纵向混凝土围堰浇注完毕, 利用右岸河床和清理后的左岸河床联合过流、通航(图1)。

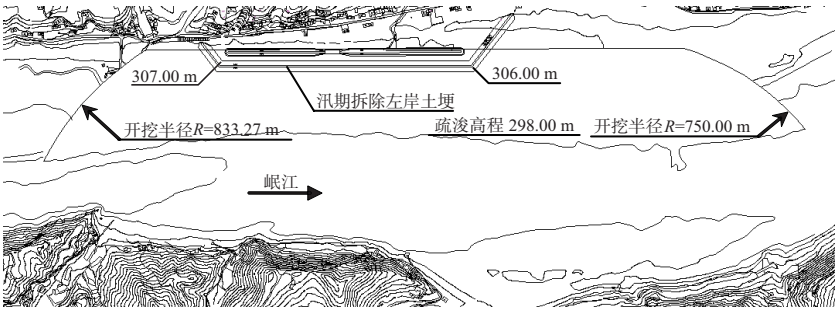


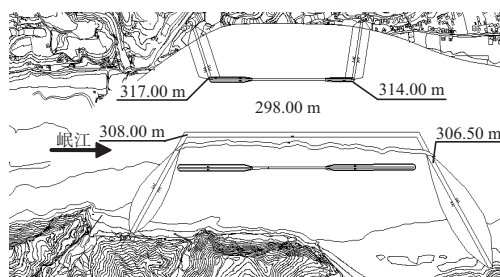
图1 一期施工导流期围堰布置

枯期（一期一段）由于来流量较小，左岸河床进行开挖疏浚后，拓宽了过流宽度，增大了河道过水面积，围堰河段沿程水面比降较小，流速分布均匀，无不良流态，对改善工程河段通航水流条件较为有利。在 $Q \leq 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的各级流量下，工程河段流速普遍在 3 m/s 以下，水面比降及航深均可满足设计船舶（队）安全通航的要求，船舶可较顺利通过工程河段上下行。

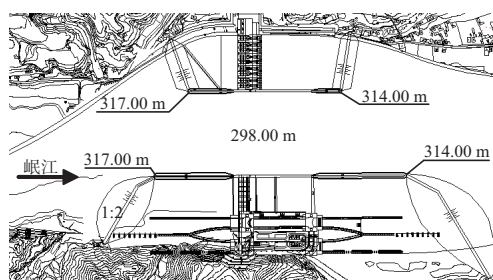
汛期（一期二段）拆除左岸土埂后，河道过流宽度略有增大，当来流量较小时，主流仍居右岸一侧，工程河段沿程水位及水面比降与枯期变化不大。当 $Q=8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q=9\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，纵向围堰段最大表面流速为 $2.32\sim 3.53\text{ m/s}$ 和 $2.48\sim 3.61\text{ m/s}$ ，其流速指标等能够满足设计船舶（队）安全通航的要求。当流量 $Q \geq 10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，明渠上游进口段流速已普遍超过 3.5 m/s ，流速最大峰值达 4.35 m/s ，水面最大比降为 1.21‰ ，其水流条件不能满足船舶安全通航要求。

3 二期围堰施工期通航水流条件

二期施工导流同时围左岸厂房段和右岸船闸以及7孔泄洪闸，枯期在左岸纵向混凝土围堰和上、下游横向土石围堰保护下施工厂房，同时扩大左岸厂房尾水下游的河床开挖范围，开挖底高程 298.0 m ，右岸在土石围堰保护下进行纵向混凝土围堰的施工。汛期拆除右岸土石围堰，利用已建纵向混凝土围堰和上下游横向围堰保护，进行右岸船闸和7孔泄洪闸的施工，同时左岸在全年围堰保护下进行厂房施工。期间利用两侧纵向围堰束窄后明渠泄流、通航（图2）。



a) 枯期



b) 汛期

图2 原方案二期施工导流期围堰布置

3.1 二期导流通航水流条件

实测枯期在 $Q \leq 3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，工程河段的水流平缓，水面比降小，流速分布均匀，流态良好，明渠内流速普遍在 3 m/s 以下，各项水流指标基本能满足船舶安全航行的要求。随着流量的增大，工程河段的流速也随之增大，纵向围堰头部的绕流、挑流流态也更加明显，局部流态紊乱，当 $Q=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，纵向明渠段流速普遍在 4 m/s 左右，局部最大流速达到 4.55 m/s ，超过船舶安全航行的允许值，此时船舶无法自航通过施工河段。

汛期在 $Q \leq 9\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，纵向明渠内流速一般在 3.5 m/s 以下，工程河段沿程水面比降及流速指标基本可以满足船舶安全通行要求。随着上游来流量的增大，工程河段的流速、水面比降也相应增大，明渠上游进口段水流条件形似卡口型急流险滩，航行条件差，当 $Q=10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，明渠上游进口段最大表面流速为 4 m/s ，纵向明渠内流速普遍超过 3.5 m/s 。

3.2 改善通航水流条件的措施及效果

原方案二期施工导流存在的主要问题是：由于明渠过流宽度较窄，致使在较大通航流量情况下明渠上游进口段流速大、比降陡、流态差，其通航条件较差，不能满足船舶安全通航的要求。修改方案主要采取了以下工程措施：1）将右岸土石围堰头部由折线连接改为 $R=20\text{ m}$ 的圆弧连接；2）上游横向围堰迎水面坡度由 $1:2$ 减小至 $1:1.75$ ；3）调整纵向土石围堰的位置，其轴线向右岸移动约 50 m ，尽可能扩大明渠泄流宽度（图3）。

针对上述修改方案，模型实测资料（表2）表明：通过采取调整纵向围堰轴线位置与头部线型等工程措施使得导流明渠过流面积明显增大，例

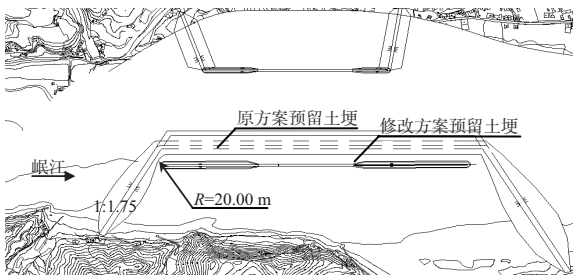
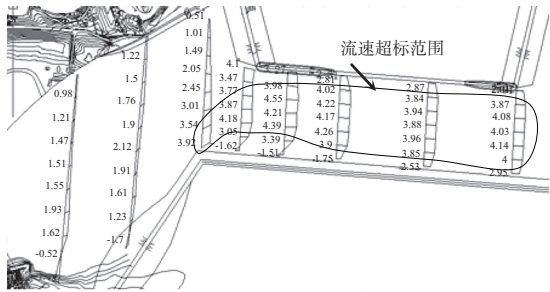
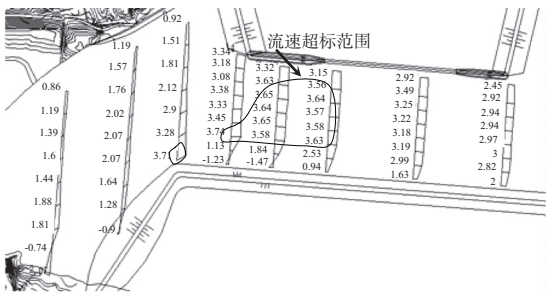


图3 修改方案二期施工导流期围堰布置

如,当 $Q=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,该修改方案导流明渠过流面积 $2\,638.85\text{ m}^2$,较原方案增加约 260.95 m^2 (原方案过流面积为 $2\,377.9\text{ m}^2$)。在枯期各级流量情况下,工程河段的水面比降、流速及流态情况较原方案均有不同程度的改善,明渠上游进口段水面比降趋缓,明渠内流速峰值减小,不良流态范围进一步压缩,工程河段通航水流条件得到有效改善。实测当流量 $Q=568\text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠上游进口段水面最大比降 0.06‰ ,较原方案减小 0.14‰ ;当 $Q=2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠上游进口段水面最大比降分别为 0.41‰ 和 0.71‰ ,较原方案分别减小 0.28‰ 和 0.15‰ ,最大表面流速分别为 2.31 m/s 和 3.13 m/s ,较原方案分别减小 0.69 m/s 和 0.42 m/s ;当 $Q=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠上游进口段水面最大比降为 1.26‰ ,较原方案减小 0.23‰ ,最大表面流速 3.74 m/s ,较原方案减小 0.81 m/s ,明渠内流速一般在 3.5 m/s 以下,仅主流区域少数个别测点略有超标,超标值均在 0.15 m/s 以内。考虑到船舶上行主要走右侧围堰附近缓流区,能有效避开主流流速峰值,通过自航船模试验亦表明,船舶上、下行最大舵角和最小航速均优于船模试验最大舵角和最低航速的安全限值,过往船舶是可以安全通过该工程河段。随着流量的增大,当 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,明渠内流速已普遍在 4 m/s 以上,其纵向流速指标全面超过船舶安全航行的允许值(图4,5)。

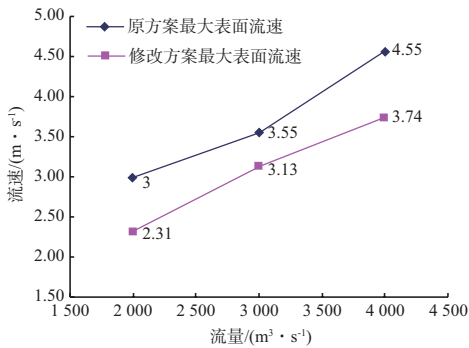


a) 二期原方案

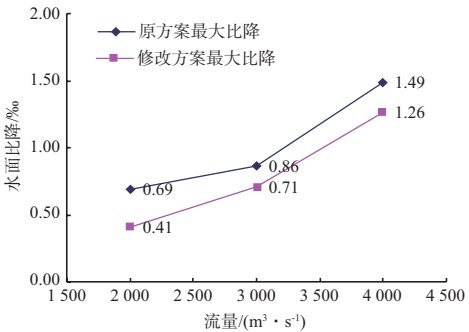


b) 二期修改方案

图4 二期导流期原方案与修改方案明渠进口段与明渠段流速分布 ($Q=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 流速单位: m/s)



a) 表面流速



b) 水面比降

图5 二期导流期原方案与修改方案明渠进口段与明渠段最大表面流速和最大水面比降变化对比

表 2 二期导流期不同流量明渠进口段最大流速与最大比降(修改方案)

流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	方案	$v_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$J_{\text{max}}/\text{‰}$
568	原方案	1.72	0.20
	修改方案	1.23	0.06
2 000	原方案	3.00	0.69
	修改方案	2.31	0.41
3 000	原方案	3.55	0.86
	修改方案	3.13	0.71
4 000	原方案	4.55	1.49
	修改方案	3.74	1.26
6 000	原方案	5.12	2.35
	修改方案	4.92	2.14

4 三期围堰施工期通航水流条件

三期施工导流在左、右岸纵向混凝土围堰和上、下游横向围堰保护下施工中间剩余17孔泄洪闸, 枯期利用右岸已建7孔泄洪闸调节流量, 汛期17孔泄洪闸停止施工, 与右岸已建7孔泄洪闸联合渡汛。期间利用右岸已建成船闸通航(图6)。

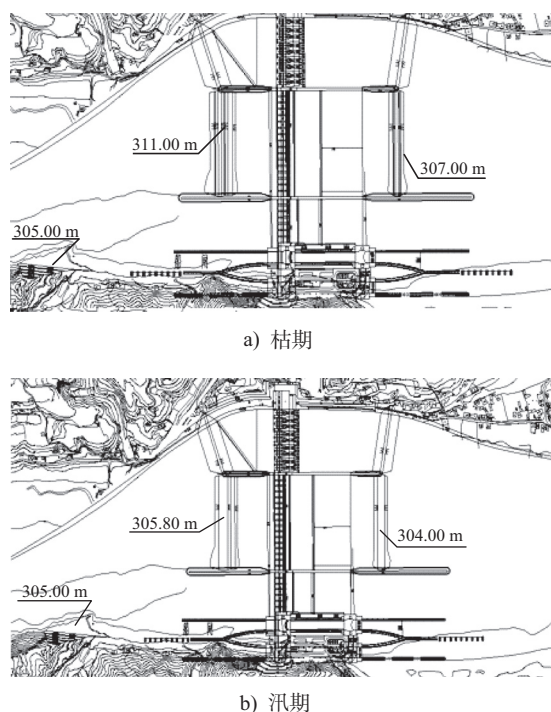


图6 三期施工期原方案围堰布置

4.1 三期导流通航水流条件

三期围堰施工导流利用右岸已建船闸通航, 为此试验在模型上观测了船闸上、下引航道及口门区的水位、水面比降、流速分布及流态(图7)。

枯期在 $Q \leq 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 各级流量情况下, 上引航道口门区及连接段的流速小, 水面比降平缓, 流态较好。实测当 $Q=3\,000\text{ m}^3/\text{s}$, $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大流速分别为 1.39 m/s , 1.85 m/s 和 2.17 m/s 。试验同时还观测到在泄洪闸控制开启, 坝前水位保持最低通航水位 307.00 m 时, 坝上游右岸边坡开挖后, 该河段航道水深仅 2.0 m , 不能满足设计提出的 2.5 m 通航水深要求, 同时由于开挖底坡线型不合理, 航道转弯半径小, 船舶无法顺利进出闸, 影响船舶航行。对于船闸下引航道口门区及连接段的通航水流条件, 当 $Q \leq 3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 经泄洪闸下泄的水流流速不大, 对下引航道口门区及连接段的水流影响

较小; 当 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 全闸敞泄时, 下引航道口门区及连接段最大纵向流速达 3.80 m/s , 横向流速在 0.3 m/s 以上, 其纵、横向流速已不能满足安全通航要求。

汛期随着流量的增加, 上引航道口门区的最大纵、横向流速具有增大的趋势, 当上游来流量较大时, 其流速指标出现一定程度的超标; 下引航道口门区受河道地形影响, 从上游下泄的水流沿右岸深槽向下引航道口门区及连接段集中, 使该处水流集中, 流态较差, 造成下引航道口门区连接段横向流速较大, 且分布不均匀, 同时在下引航道口门区附近形成大范围的回流水流区域, 对船舶的安全通航影响较大。例如当 $Q=8\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 全闸敞泄时, 上引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为 3.18 m/s , 0.28 m/s 和 0.89 m/s , 下引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为 3.47 m/s , 0.83 m/s 和 0.96 m/s ; 当 $Q=10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为 3.41 m/s , 0.29 m/s 和 0.88 m/s , 下引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为 3.66 m/s , 0.83 m/s 和 0.97 m/s ; 当 $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为 3.75 m/s , 0.31 m/s 和 0.85 m/s , 下引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为 3.86 m/s , 0.82 m/s 和 1.07 m/s 。

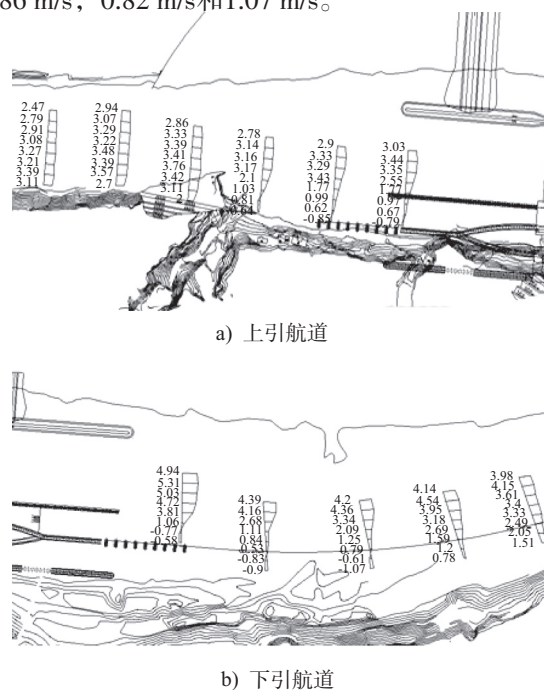


图7 三期原方案上下引航道口门区及连接段流速分布
($Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 敞泄, 流速单位: m/s)

4.2 改善通航水流条件的工程措施及效果

原方案三期施工导流船闸引航道口门区及连接段存在的主要问题是: 坝上游右岸边坡开挖线型不尽合理, 航道转弯半径小, 上引航道连接段局部航段水深浅、航深不足、通航条件较差, 船舶无法顺利进出船闸; 下游由于纵向混凝土围堰的束水作用影响, 出消力池水流较为集中, 不能充分扩散, 流速大, 动能足, 沿河道直接冲入下引航道口门区以下河段, 造成附近区域流速分布不均, 横向流速大, 流态紊乱, 对船舶的安全航行较为不利。针对上述问题, 提出以下修改措施: 1) 扩大坝上游右岸边坡的开挖范围, 调顺开挖线型, 以使船舶能顺利进出船闸, 开挖高程降低至304.00 m, 达到完全满足船舶安全航行的最低吃水水深要求。2) 将下游横向土石过水围堰向上游移动50 m, 同时将右岸下游纵向混凝土围堰减短250 m, 以此达到扩散出闸下泄水流, 减弱主流直冲下游航槽之目的(图8)。

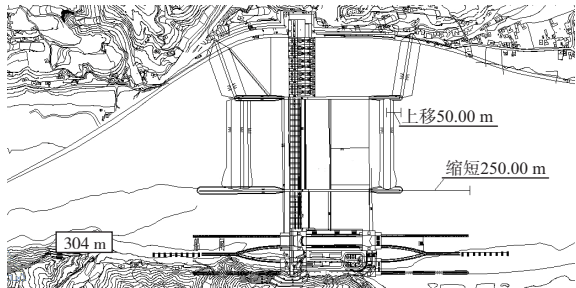


图8 三期施工期修改方案围堰布置

模型实测流速资料(表3)表明, 修改方案在各级流量情况下船闸上下游引航道口门区及连接段通航水流条件均有较明显改善。在 $Q \leq 6\,750\text{ m}^3/\text{s}$ 的各级流量下, 由于流量相对较小, 上游来水经右岸已建成的7孔泄洪闸控制下泄, 围堰上下游附近河段均为静水区或缓流区, 其通航水流条件良好。当 $Q=8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为3.02 m/s, 0.18 m/s和0.36 m/s, 较原方案分别减小0.16 m/s, 0.10 m/s和0.53 m/s, 下引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为3.13 m/s, 0.42 m/s和0.35 m/s, 较原方案分别减小0.34 m/s, 0.41 m/s和0.61 m/s; 当 $Q=10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为3.28 m/s, 0.21 m/s和0.45 m/s, 较原方案分别减小0.13 m/s, 0.08 m/s和0.43 m/s, 下引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为3.23 m/s, 0.44 m/s和0.42 m/s, 较原方案分别减小0.43 m/s, 0.39 m/s和0.55 m/s; 当 $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为3.56 m/s, 0.24 m/s和0.43 m/s, 较原方案分别减小0.19 m/s, 0.07 m/s和0.52 m/s, 下引航道口门区最大纵、横向及回流流速分别为3.66 m/s, 0.50 m/s和0.47 m/s, 较原方案分别减小0.20 m/s, 0.32 m/s和0.60 m/s, 同样, 仅靠近引航道口门区外侧主流区域附近个别测点略有超标, 超标值也相对较小, 船舶上行走岸边一侧缓流区, 仍可安全通过本工程河段(图9, 10)。

表 3 三期导流船闸上下引航道口门区附近特征流速变化范围(修改方案)

航道	位置/m	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)								
		$Q=8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (敞泄)			$Q=10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (敞泄)			$Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ (敞泄)		
		纵向流速	横向流速	回流	纵向流速	横向流速	回流	纵向流速	横向流速	回流
上引航道	0-445	1.94~3.02	0	0	2.32~3.28	0	0	2.49~3.56	0	0
	0-300	0~1.90	0~0.17	0~0.36	0~2.77	0~0.16	0~0.32	0~3.04	0~0.24	0~0.41
	0-145	0~1.87	0	0~0.30	0~1.95	0	0~0.38	0~2.53	0	0~0.43
	0+0	0~0.96	0~0.18	0	0~0.99	0~0.21	0~0.45	0~1.15	0~0.20	0~0.38
下引航道	0+160	0~0.98	0~0.09	0~0.30	0~0.93	0~0.07	0~0.36	0~0.95	0~0.08	0~0.40
	0+330	0~2.10	0~0.21	0~0.35	0~2.15	0~0.26	0~0.42	0~1.31	0~0.25	0~0.47
	0+530	0.79~2.87	0.15~0.21	0	0.92~2.98	0.04~0.18	0	0.24~3.32	0.27~0.35	0
	0+700	1.42~3.13	0.26~0.42	0	1.49~3.23	0.28~0.44	0	1.73~3.66	0.32~0.50	0

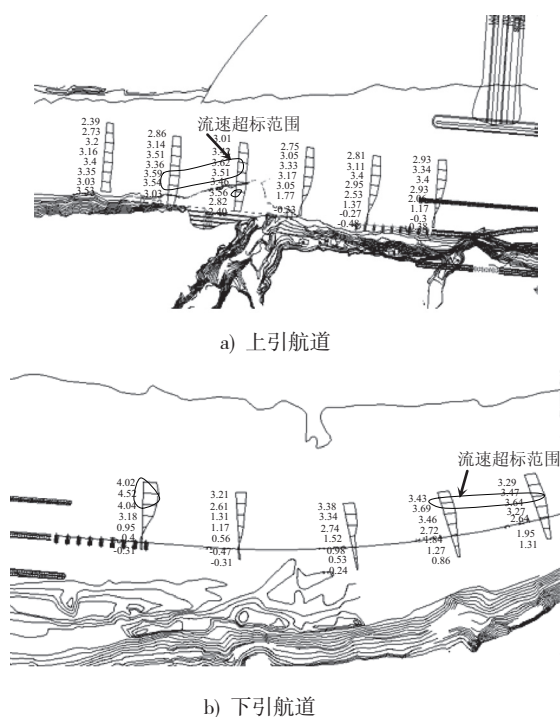


图9 三期修改方案上下引航道口门区及连接段流速分布
($Q=12\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 敞泄, 流速单位: m/s)

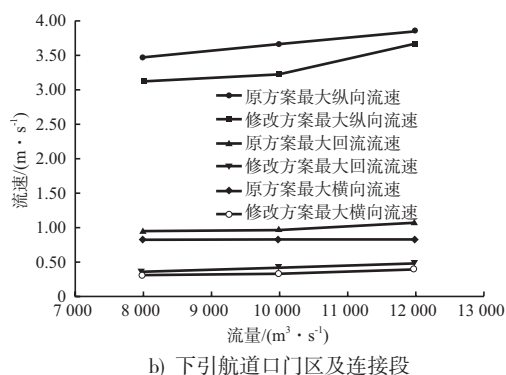
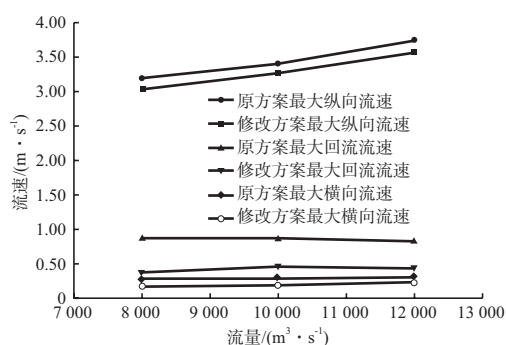


图10 三期原方案与修改方案上下引航道口门区及连接段流速变化对比

5 结语

1) 岷江担负着四川重型机械和成都经济区大宗货物运输的重任, 是四川重型机械制造业出川的大动脉和生命线, 也是四川大件运输的唯一水

上运输通道。龙溪口航电枢纽工程施工期通航条件的好坏, 将直接关系到岷江乐山—宜宾段航道能否满足大件船舶安全畅通的运输要求, 其施工期通航条件的试验研究十分必要, 意义重大。

2) 龙溪口枢纽施工期原设计方案一期导流枯期最高通航流量 $Q=6\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 汛期为 $Q=10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$; 二期枯期导流最高通航流量为 $Q=3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 汛期为 $Q=9\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$; 三期导流在枯期 $Q<4\ 680\ \text{m}^3/\text{s}$ 时不能通航, 汛期在 $Q\geq 8\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 各级流量下均不能通航。

3) 修改方案通过采取一系列工程措施, 有效地改善了二、三期施工导流期各级通航流量下该河段流态差、流速峰值大、航深不足等通航水流条件问题, 使得二期枯期最高通航流量由 $3\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 提高至 $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$; 三期枯期最高通航流量提高至 $Q=6\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 汛期提高至 $Q=12\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

4) 通过对本枢纽各期施工导流建筑物线型和布置位置等进行适当调整, 局部开挖河床等综合性工程措施, 有效地降低了工程河段流速指标, 改善了不良流态, 提高了满足船舶安全通航的最高通航流量, 各施工期该河段通航条件具有显著改善, 较好地解决了本工程施工期的通航问题, 其研究成果对于解决类似航电枢纽工程施工期通航问题具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 尹崇清, 张湛. 龙溪口航电枢纽工程施工导流与通航水工模型试验研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2011.
- [2] 周华兴. 船闸通航水力学研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007.
- [3] 河海大学. 河流动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1986.
- [4] 孙尔雨, 刘力中, 杨文俊, 等. 三峡工程施工通航水力学研究[J]. 长江科学院院报, 1997(4): 32–36.
- [5] 肖焕雄. 施工导截流与围堰工程研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [6] 郑守仁, 王世华, 夏仲平, 等. 导流截流及围堰工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [7] Chao Daihui. The applications and study of numerical simulation of turbulence flow with free surface in hydraulic spillway structure[J]. Journal of Hydrodynamics, 1997, B(4): 54–59.

(本文编辑 武亚庆)