

渠江风洞子航运工程施工导流优化方案设计



马育斌¹, 王常红², 李 维¹, 肖 丹¹

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究院, 天津 300456)

摘要: 针对渠江风洞子航运工程施工导流方案中二期导流时段过流断面流速大, 下游河道抗冲刷能力不足、上游围堰堤头头部冲刷显著等问题, 在施工导流物理模型试验研究的基础上进行施工导流设计方案优化研究。采用优化施工导流平面布置、加强下游消力池抗冲设施设计, 优化全年纵向围堰堤头结构形式、枯期纵向围堰长度等方案, 结合枢纽总布置、施工工期、施工强度、工程投资等因素, 并对优化后的施工导流模型进行试验验证, 提出满足施工要求的导流设计方案, 用于指导工程施工。

关键词: 施工导流; 模型试验; 水流条件

中图分类号: U 615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0075-05

Construction diversion optimization scheme of Qujiang Fengdongzi navigation project

MA Yu-bin¹, WANG Chang-hong², LI Wei¹, XIAO Dan¹

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: In the construction diversion scheme of the Qujiang Fengdongzi navigation project, the flow velocity at the flow section is large during the phase II diversion period. Meanwhile, the anti-scour ability of the downstream river channel is insufficient, and the scour at the head of the upstream cofferdam is significant. In response to these problems, this paper optimizes the construction diversion design scheme on the basis of the physical model test of construction diversion. The paper takes measures of improving the construction diversion plane layout, strengthening the design of the anti-impact facilities of the downstream stilling pool, and optimizing the structural form of the head of the longitudinal cofferdam throughout the year and the length of the longitudinal cofferdam in the dry season, taking into account the general layout of the hub, construction period, construction intensity, project investment, and other factors. It also tests and verifies the optimized construction diversion model and puts forward the diversion design scheme meeting construction requirements for guiding project construction.

Keywords: construction diversion; model test; flow conditions

1 工程概况

渠江风洞子航运工程是渠江梯级规划中自上而下的第 3 个梯级, 是一座以航为主, 兼顾发电、防洪与改善城市水环境、完善综合交通运输体系的综合性工程。规划的风洞子枢纽上接舵石鼓枢纽, 下接凉滩枢纽。枢纽采用集中布置形式, 从左至右依次为左岸接头坝、船闸、连接坝、鱼道、电站、泄洪冲沙闸、右储门槽段和右岸接头坝, 坝轴线长 846.5 m。工程正常蓄水位 243.00 m,

正常蓄水位下库容 1.79 亿 m³。船闸和航道按Ⅲ级航道标准设计, 采用单线单级船闸, 船闸有效尺度 200 m×23 m×4.2 m(有效长度×有效宽×门槛水深), 可通行 1 000 吨级船舶(主尺度 63 m×11 m×2.4 m), 单向通过能力 1 240 万 t/a。

工程河段地处渠江微弯河段, 两岸山体不高, 渠江汛期洪水流量较大, 河心洲范围较大, 推荐坝轴线处河谷宽度约 750 m, 地面高程 236~245 m, 左岸为百蹯滩河心洲及汉道, 其中河心洲地面高

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 马育斌(1985—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程设计工作。

程为 233~239 m，左汊河道地面高程 232 m，河心洲枯期长年露出水面，汛期洪水时被淹没，左汊过流，主流位于右汊。推荐方案船闸及厂房均布置于左岸河心洲，结合枢纽总平面布置方案，充分考虑地形地势条件，根据相关施工规范^[1]确定施工导流采用分期导流方案。

2 施工导流设计

2.1 施工导流方案

根据枢纽总体布置特点，结合坝址地形条件、

水文条件和施工期通航要求等因素，本工程采用束窄河床的分期导流、枯水期和全年导流相结合的方案^[2]，共分两期施工，总工期 46 个月。电站厂房和船闸均位于左岸河心洲区域，是本项目的控制性工程，左岸的水工建筑物施工采用全年导流的方式，保证主体工程全年不间断施工，一期施工左岸接岸建筑物、船闸、厂房及 5 孔泄洪闸，二期施工右岸 15 孔泄洪闸及右岸接岸建筑物，其中二期一枯时段利用左岸 5 孔泄洪闸过流。施工导流方案见图 1。

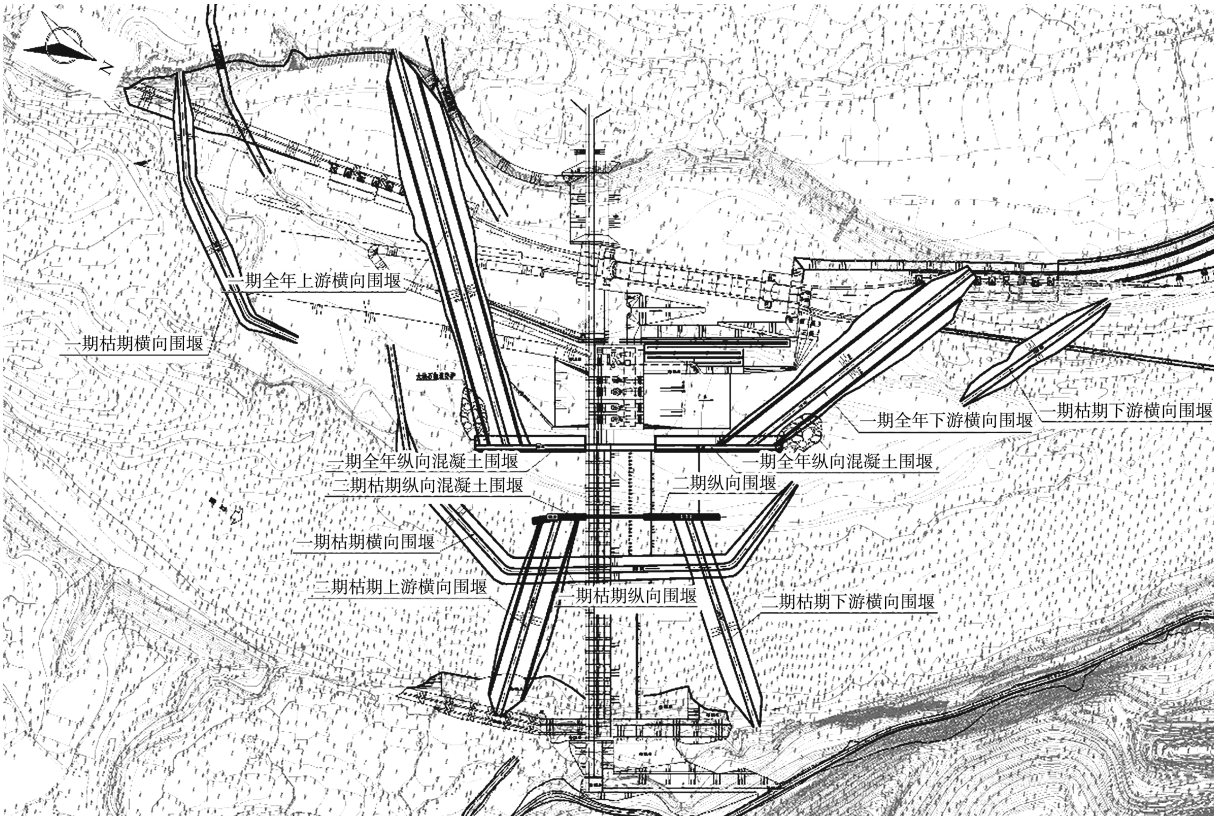


图 1 风洞子工程施工导流布置

2.2 施工导流标准

工程枯水期导流时段均选取 11 月至次年 4 月底，枯期导流标准采用 10 a 重现期洪水， $Q_{10\%} =$

$4\,390\text{ m}^3/\text{s}$ ；全年导流标准采用 10 a 重现期洪水， $Q_{10\%} = 21\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 。原设计方案的施工导流水位特性见表 1。

表 1 施工导流水流特性

导流时段		围堰 级别	围堰 类型	水位/m		堰顶高程/m		过流通道
				上游	下游	上游	下游	
一期导流	第 1 段枯期	4	土石	237. 96	237. 76	239. 50	239. 30	右岸河床
	第 1 段全年	4	土石/混凝土	251. 12	250. 12	252. 60	251. 60	右岸河床
	第 2 段枯期	4	土石	237. 96	237. 76	239. 50	239. 30	右岸河床
二期导流	第 1 段枯期	4	土石	240. 87	237. 76	242. 30	239. 10	左岸 5 孔泄洪闸
	第 2 段枯期	4	土石	240. 87	237. 76	242. 30	239. 10	左岸 5 孔泄洪闸

3 施工导流模型试验

3.1 模型概况

根据施工导流方案开展了施工导流模型试验研究^[3]，模型范围上起坝址上游 3.5 km，下至坝址下游 2.5 km 处，模拟河段全长约 6 km，设计为

定床正态模型，模型比尺采用 1:100。

根据施工导流初步设计方案及有关规范^[4-5]，模型试验分别开展了一期和二期导流的工况模拟，见表 2。

表 2 施工导流试验工况

导流时段		围堰级别	围堰类型	洪水频率/%	试验流量/(m ³ ·s ⁻¹)	过流通道
一期导流	一枯	4	枯期	多年平均	145	右岸河床
				20	2 960	
				10	4 390	
	一汛	4	全年	20	18 600	右岸河床
				10	21 600	
				多年平均	145	
二期导流	一枯	4	枯期+一期全年	20	2 960	左岸 5 孔泄洪闸
				10	4 390	
				多年平均	145	
	二枯	4	枯期	多年平均	145	左岸 5 孔泄洪闸

3.2 施工导流布置方案优化分析

3.2.1 原施工导流方案模型试验结果

模型试验研究表明，在设计的各级流量下，受河道束窄的影响，二期一枯导流时段水流条件较差，过流断面的流速随流量增加增长显著，当达到枯期最大流量 4 390 m³/s 时，坝址下游的消力池段表面流速达到 4.5~7.0 m/s；下游全年横向围堰堤头以下因河道逐渐放宽，流速逐渐衰减，围堰头部流速最大达 5.25 m/s，发生了明显的冲刷。流速分布见图 2。

而引起对围堰堰坡、坡脚及河床的冲刷，王哲鑫等^[6]在大渡河沙坪一级水电站施工导流中，对束窄河床的河道冲刷防护做了研究，提出采用块石防护的加强措施。本工程模型试验过程中，也面临束窄河床流速变大、对河床和围堰堤头冲刷等不利情况，水流条件最不利工况发生在二期一枯导流时段，原设计方案采用 5 孔过流方案。为此，试验阶段提出优化方案，即增加过流断面宽度和在原方案的基础上增加防冲措施，并进行 7、10 孔过流方案的模型试验，见图 3。

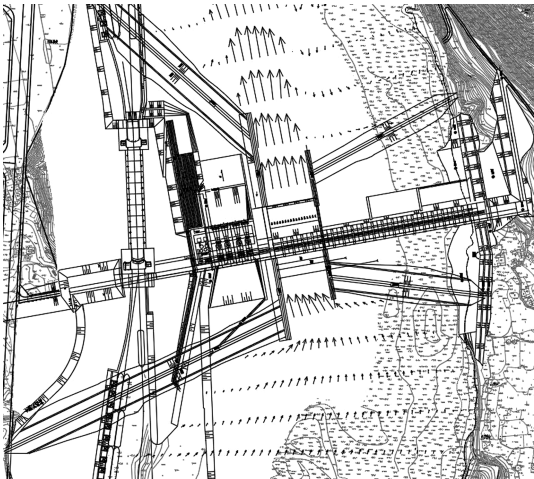
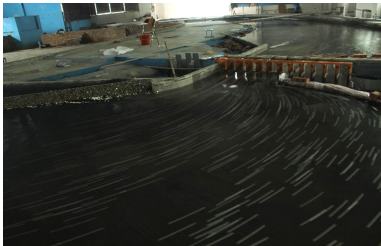


图 2 二期一枯导流时段表面流速分布

3.2.2 优化方案

束窄河床通常会使河道的水流流速变大，进



a) 7孔



b) 10孔

图 3 模型试验过流流场

根据模型试验成果，二期一枯采用 5、7、10 孔过流的河床束窄率分别为 89.5%、85.0%、78.5%，设计导流流量 $Q=4\,390\text{ m}^3/\text{s}$ 。试验结果表明，通过模型试验的优化措施，扩大二期一枯导流时段的过流断面，对消力池表面流速降低显

著，采用 10 孔过流时可降低 42.9%；围堰头部流速方面，枯期导流时段流速降低较大，全年导流时段流速降低较小，采用 10 孔过流降速明显，最大可达 34.3%，最大流速降低至 3 m/s 左右。见表 3。

表 3 二期一枯时段不同过流宽度下的流速对比

位置	5 孔过流流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7 孔过流流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流速降低率/%	10 孔过流流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流速降低率/%
消力池表面	7.00	5.00	28.6	4.00	42.9
上游枯期围堰头部	4.27	3.95	7.5	3.45	19.2
上游全年围堰头部	2.55	2.45	3.9	2.26	11.4
下游枯期围堰头部	4.52	4.01	11.3	3.22	28.8
下游全年围堰头部	5.25	4.35	17.1	3.45	34.3

二期一枯导流时段原方案为 5 孔过流方案，若调整为 7、10 孔过流，随着河床束窄率的提高，流速下降较为明显，对原河床的冲刷影响越来越

小，为确定施工导流优化方案，从水工结构、导流工程量、施工强度、施工工期、工程投资等多方面进行经济技术比较，见表 4。

表 4 二期一枯时段施工导流方案优化分析

过流方案	水工结构	土石围堰/ 万 m^3	高喷防渗/ km	施工工期	混凝土浇筑量/ 万 m^3	增加工程投资/万元
5 孔	增加消力池大块石防护	98.64	59.6	总工期 46 个月，一期 5 孔泄洪闸施工经历 1 个枯期	4.3	300
7 孔	补充纵向隔墙 C20 混凝土增加 $1\,840\text{ m}^3$	107.00	69.2	总工期 46 个月，一期 7 孔泄洪闸施工经历 1 个枯期	4.8	2 417
10 孔	补充纵向隔墙 C20 混凝土增加 $3\,680\text{ m}^3$	106.10	73.3	总工期 46 个月，一期 10 孔泄洪闸施工经历 2 个枯期	5.5	3 206

通过模型试验和设计方案调整等因素的对比分析可知，采用减小河床束窄率、加宽过流断面的施工导流优化方案，施工总工期维持不变的情况下，施工强度逐步加大，且工程总投资受总平面布置和导流方案布置的调整而增加显著。因此，维持原导流布置方案，对围堰头部加强防护，并在消力池末端设置大块石防护，对河床的变形适应性较好，也可达到抗冲刷的效果，且施工进度快、成本较低。

3.3 堰顶高程优化方案

根据风洞子枢纽工程坝址处的典型洪水过程线，对典型系列年的洪水过程概化成三级流量，分别为 1.0 万、1.3 万、2.0 万 m^3/s ，按照洪峰历时模拟完整的洪水过程。在拟定的导流时段和设计流量下，模型试验得出的设计水位值见

表 5，通过与初步设计方案拟定的上下游水位对比分析，根据模型试验的水位情况，一期枯期上游、一期一汛下游水位高于设计水位，设计方案增高了围堰顶高程；二期二枯的上游水位低于设计水位，优化降低了二期二枯的上游堰顶高程。优化后的围堰顶高程与原设计围堰顶高程对比见表 6。

表 5 水位设计值与模型值对比

位置	导流时段	设计值	模型值	差值
上游	一期一枯	237.96	238.11	0.15
	一期一汛	251.12	251.08	-0.04
	二期一枯	240.87	240.86	-0.01
	二期二枯	240.87	240.48	-0.39
下游	一期一枯	237.76	237.73	-0.03
	一期一汛	250.12	250.30	0.18
	二期一枯	237.76	237.79	0.03
	二期二枯	237.76	237.72	-0.04

表 6 围堰堰顶高程优化前后对比

位置	导流时段	计算值	实际取值	优化后
上游	一期一枯	239. 41	239. 50	239. 65
	一期一汛	252. 57	252. 60	252. 60
	二期一枯	242. 32	242. 40	242. 40
	二期二枯	242. 32	242. 40	242. 00
下游	一期一枯	239. 21	239. 30	239. 30
	一期一汛	251. 57	251. 60	251. 80
	二期一枯	239. 21	239. 30	239. 30
	二期二枯	239. 21	239. 30	239. 30

3.4 围堰结构形式优化方案

3.4.1 原施工导流方案试验结果

模型试验针对一期一汛施工导流时段开展了局部动床模型试验，结果表明，随着洪水流量逐渐加大，全年纵向围堰堤头处河床冲刷由少量泥沙启动、逐步形成 1 个半径约 25 m 的椭圆形冲刷坑，泥沙向全年纵向围堰与枯期纵向围堰的 5 孔泄洪闸之间移动、堆积在河床；随着流量的加大，枯期纵向围堰的堤头处也形成 1 个半径约 10 m 的冲坑，泥沙在枯期纵向围堰右侧输移和大量堆积，下游围堰附近由于水流条件减弱呈淤积状态，见图 4a)。

3.4.2 优化方案

针对局部动床模型试验发现的纵向围堰堤头的冲刷情况，对全年纵向围堰及枯期纵向围堰进行了布置优化调整。

1) 全年纵向围堰堤头结构优化。堤头结构形式由直线结构调整为弧形结构，并将横向围堰轴线往上游侧偏转，调顺上游来流流态，对堤头冲刷范围进行防护，试验证明，调整结构并加强防护可有效减少堤头的冲刷，但调整横向围堰轴线对水流条件的优化效果并不明显。

2) 枯期纵向围堰长度调整。枯期纵向围堰上游端缩短 30 m，减小水流的扰动，提高泥沙往右侧的输送，减少 5 孔泄洪冲沙闸内泥沙的淤积。

通过优化全年围堰堤头结构形式、缩短枯期纵向围堰端部长度，并根据冲刷范围加强对围堰堤头的防护，水流冲刷及泥沙淤积情况均有大幅改善，效果显著，见图 4b)。



a) 优化前



b) 优化后

图 4 局部动床模型试验

4 结论

1) 本工程枢纽采用河床式布置，施工导流采用常规的束窄河床分期导流方案，模型试验研究表明，施工分期导流布置方案是合适的，施工导流方案满足施工总体进度要求，导流建筑物设计方案根据模型试验成果局部优化后，可以用于指导工程施工。

2) 定床模型试验研究表明最不利的导流时段为二期一枯，原施工导流方案采用 5 孔过流的方案，施工水流条件较差，为此，模型试验开展了优化水流条件的方案研究，分别采用 7、10 孔过流扩大过流断面的方案，研究表明采用减小河床束窄率、增加过流断面宽度的方案，水流条件向好的效果显著，综合水工结构、导流工程量、施工强度、施工工期、工程投资等因素，采用增加围堰堤头防护和消力池末端防冲防护措施的方案也取得较好的效果，且工程投资更低，对枢纽总体布置方案影响较小，更为合理。

3) 通过局部动床试验研究得出，采用调整全年围堰堤头结构形式、缩短枯期纵向围堰上游段长度、加强纵向围堰堤头防护等措施优化，水流冲刷及泥沙淤积情况均有大幅改善，效果显著。