



大藤峡水利枢纽施工期通航水流条件优化布置

黄春华，刘霞，马茂原

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院，广东广州 510611)

摘要：大藤峡水利工程施工量大、建设周期长，必须采取措施保障枢纽施工期航道通行安全。针对一期施工导流围堰布置方案建立物理模型，研究该工程措施下明渠通航水流条件及可能造成安全隐患的因素。结果表明：纵向围堰上游头部处挑流引起结构腰部产生缓流区，明渠水体顺流束窄，不利于施工期船舶通航。在削除主槽局部凸滩、头部增设临时导流墙后导流明渠内水流流态明显改善。最大通航流量条件下各测点流速值均小于 5.00 m/s；在下泄流量小于 1.20 万 m³/s 时，各测点流速值均小于 3.00 m/s，满足自航通行要求。导流明渠沿程水面比降较小，最大水面比降为 -1.9‰。

关键词：施工期通航；导流明渠；物理模型；通航水流条件；优化试验

中图分类号：U64

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)11-0137-06

Optimization of navigation water flow conditions for construction of Datengxia Water Conservancy Project

HUANG Chunhua, LIU Xia, MA Maoyuan

(The Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The Datengxia Water Conservancy Project has a large amount of construction with long period. It's necessary to take measures to guarantee the safety of channel navigation during the construction period of the hub. This paper establishes a physical model for the the layout plan of the first phase construction diversion cofferdam, and studies the water flow conditions and potential safety hazards of the open channel navigation under the engineering measures. The results show that the upstream head of the longitudinal cofferdam causes the slow flow area in the waist of the structure, and the open channel water body is narrow, which is not conducive to the navigation of ships during the construction period. After excavating the protruding part of the bottom of the main channel channel and adding a diversion structure at the front of the structure, the water flow in the open channel has been significantly improved. The velocity values of each measuring point are less than 5.00 m/s under the condition of maximum navigable flow rate. When the discharge flow rate is less than 12 000 m³/s, the velocity values of each measuring point are less than 3.00 m/s, which meets the requirements of self-navigation. The water surface along the diversion open channel with low gradient, and the maximum is -1.9‰.

Keyword: navigation during construction period; diversion waterway; physical model; navigable flow condition; optimization test

随着我国大力推动经济建设及航运事业的蓬勃发展，水利枢纽通航需求逐年增高，在枢纽建设期保持一定航运能力的前提下，尽可能缩短施工周期成为水利工程建设的主要需求。20 世纪

60 年代以来立堵法截流已得到普遍推广及应用，过水围堰为世界各国普遍采用，截流的成败直接关系到工程建设的速度和造价^[1-3]。国内研究以改善通航条件为主，例如：为解决渠江风洞子航运

工程导流时的断面流速大以及下游河道泥沙淤积的问题，在下游增强消力池抗冲能力，并对纵向围堰堤头结构形式进行改进^[4]；尹崇清等^[5]对岷江龙溪口航电枢纽施工期通航问题进行研究，通过导流模型试验成果分析各施工导流期的通航水流条件，并提出了提高通航流量的综合性工程措施；黄伦超等^[6]发现枢纽施工期枯水期河道进、出口段在枯水期出浅碍航，汛期右汊进口段出现急流滩险，设计枯水期临时航道及航线规划。在大源渡枢纽施工期通航水流条件分析中，针对施工期航道束窄、水流条件恶化引起船舶通行困难，采取了岸坡开挖及疏浚、炸礁的航道整治措施^[7]。陈仁峰^[8]在纵向围堰头部靠前位置安装拦沙坎缺口、并防止堤头塌滑，降低截流施工难度，提高截流施工效率。

大藤峡水利枢纽结合周边地形地质条件及工

程规划(图 1)，采用河床分期导流形式，一期导流工程先围左岸，利用右岸束窄主河床过流，在一期围堰的保护下，施工河床左侧 13 个底孔、3 个高孔、左岸厂房、左岸船闸、左岸挡水坝等建筑物。利用一期建成的导流设施围右岸；在二期围堰的保护下，完成河床 6 个底孔、右岸厂房、右岸挡水坝、鱼道等建筑物的施工^[9]。大藤峡枢纽上下游引航道受布置空间限制，口门区通航水流较复杂^[10-12]。在大流量、大水位变幅的各种复杂工况下，为满足枢纽施工期水流条件满足通航要求，本文通过建立大藤峡枢纽施工期物理模型，模拟一期导流明渠建成后上下游口门区在各种工况下的水流流态、流速分布及水面比降等参数，分析通航水流条件，针对存在的水流问题提出改善措施，进行优化试验，得出改善枢纽施工期通航水流条件的方案。

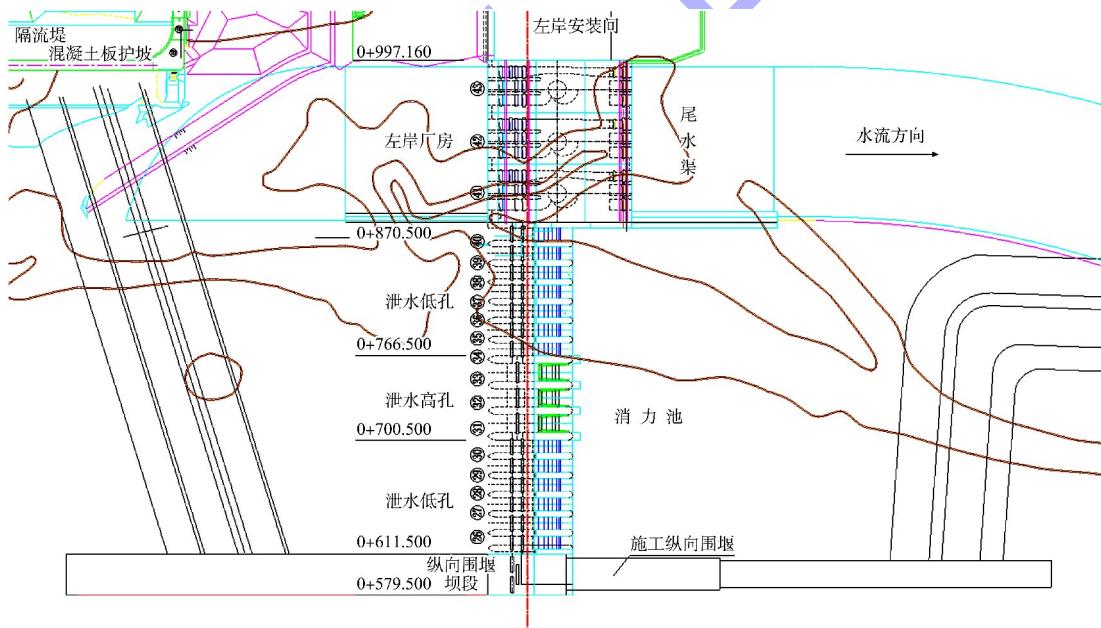


图 1 大藤峡水利枢纽施工期一期导流平面布置

1 物理模型的建立与验证

1.1 模型建立

大藤峡水利枢纽水工模型采用正态模型^[13]，模型雷诺数 $Re \geq 1000$ 、水深 $h > 3$ cm，水流处于紊流区，满足表面张力限制条件。为确保模型制作精度，采用平面导线控制系统放样，误差控制

在 1 cm 以内。河道地形根据坝址区 1:1 000 地形资料采用断面板法制作，通过调整水泥砂浆收光程度达到糙率相似。断面间距以 60 cm (模型距离) 为控制标准，对断面间变化较大的地形，通过增加内插点加以控制，平面误差控制在 ± 2 cm，高程误差控制在 ± 2.0 mm。采用精细的水准仪控制

枢纽建筑物各部位高程, 误差控制在 ± 0.2 mm。消力池底板、隔流墙、纵向围堰段采用水泥刮制, 并打磨光滑, 模型见图 2, 比尺见表 1。



图 2 大藤峡水利枢纽一期导流明渠物理模型

表 1 大藤峡枢纽水工模型比尺

比尺名称	公式	比尺值
几何比尺	$\lambda_L = \lambda_H$	100
流速比尺	$\lambda_T = \lambda_L^{1/2}$	10
流量比尺	$\lambda_Q = \lambda_L^{5/2}$	10 000
河床糙率比尺	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	2.15
时间比尺	$\lambda_T = \lambda_L^{1/2}$	10

1.2 仪器设备

模型放水流量采用电磁流量计量测, 水位采用固定测针量测, 流速由架设在可自由活动测杆角度测架上的 LS-3C 光电旋浆流速仪施测, 流向由测架底部绑定浸水棉线与航槽中线的夹角确定, 流态采用数码相机拍摄。流速测线位置从 0-755 开始至 0+845 结束、水位测点从 H_1 至 H_6 结束, 见图 3。

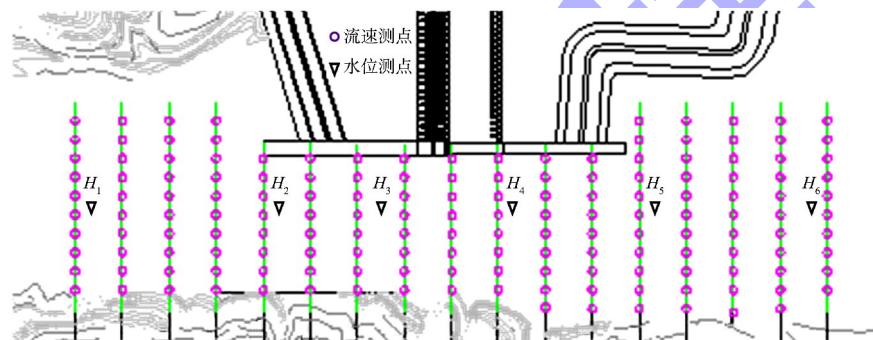


图 3 测点位置布置

1.3 模型验证

试验河段两岸山沟、石梁密布, 地形较为复杂, 因此河道水面线验证以形体阻力为主。为使模型河道与原型相似, 在制模完成后对局部地形进行修正和糙率调整。按照实测的天然河道(流量 0.24 万 m^3/s)水面线资料, 在模型上进行多次验证, 验证结果见图 4。由图可知, 各工况下模型水面线与原型实测值基本一致, 模型与原型相似性较好。

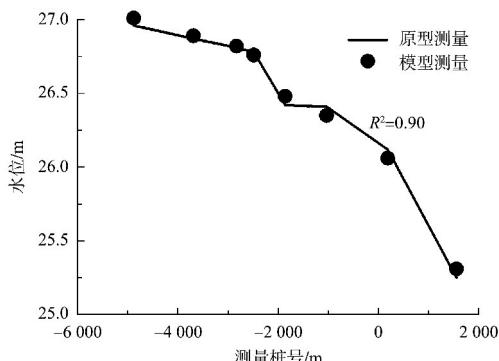


图 4 水面线验证成果

2 试验成果

2.1 施工期导流方案布置

根据一期导流工程先围左岸, 利用右岸束窄主河床过流的设计原则, 纵向围堰坝段宽 32 m, 在经过坝轴线后, 施工纵向围堰宽度稍有收缩。围堰头部采用近梯形结构, 往上游方向伸出 79 m 位置。利用最大通航流量($Q=2.35$ 万 m^3/s)对设计方案的合理性进行验证, 方案布置及明渠内的水流流态见图 5。



图 5 $Q=2.35$ 万 m^3/s , 一期导流明渠设计方案通航水流流态

2.2 通航水流条件分析

2.2.1 水流流态

受河道左滩右槽地形的影响，主流基本位于导流明渠的中央，流线顺直；左岸上、下游横向围堰附近均产生回流区，且上游横向围堰附近回流区的强度略大于下游；受纵向围堰上游头部挑流的影响，通过左侧下泄的水流被挑至明渠中央，纵向围堰附近形成缓流区，其宽度越向下游越大，最大可达 75.0 m。根据河道内流量守恒原则，缓流区的存在使得导流明渠中央水流汇聚，局部流态变差、流速加大、通航水流条件恶化。陈稚聪等^[14]对丁坝回流区水流紊动强度试验的研究表明，

回流区的存在同样增大了水流的紊动情况，导致船舶行进方向难以控制。

2.2.2 流速分布

试验对设计方案导流明渠内的水流流速分布进行量测，一期导流明渠内水流流速分布见图 6。纵向围堰上游头部的挑流作用导致一期导流明渠内断面流速分布不均匀，其中，纵向围堰附近流速值在 1.50 m/s 以内，甚至出现回流流速；而纵向围堰头部挑流及纵向围堰附近缓流区的存在，加大导流明渠中央水流的汇聚，使得部分断面流速值超过 5.00 m/s。

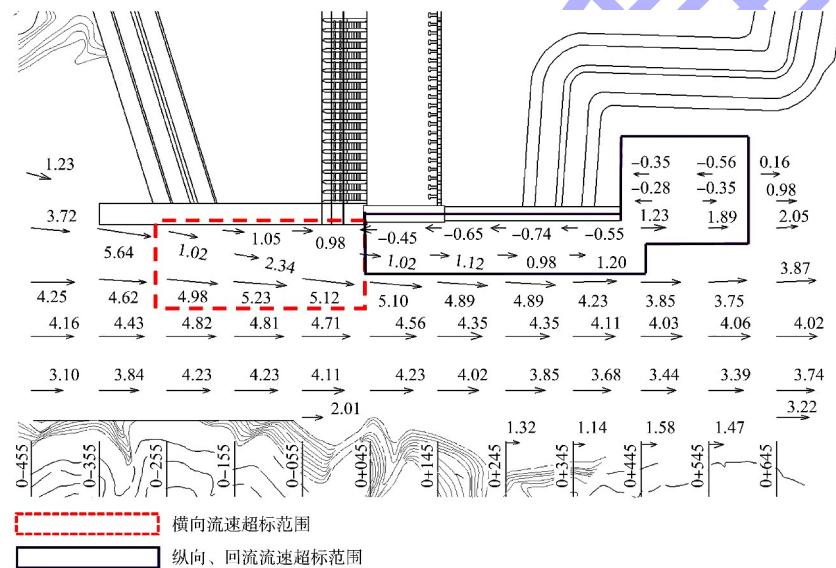


图 6 $Q=2.35 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$, 设计方案下导流明渠流速分布 (单位: m/s)

2.3 明渠、围堰头部优化试验

纵向围堰上游头部的挑流作用恶化了导流明渠内的通航水流条件，需要在纵向围堰上游头部采取工程措施^[15]，降低纵向围堰头部挑流对导流明渠内的水流影响，经过多方案对比试验得出推荐方案，即在纵向围堰上游头部增加 1 个圆弧形临时导流段(二期导流前拆除)，并以半圆头部结束，并顺应河势削平导流明渠中段高程在 24.0 m 左右的凸滩，优化方案见图 7。



图 7 $Q=2.35 \text{ 万 } \text{m}^3/\text{s}$, 优化方案通航水流流态

2.3.1 优化后水流条件

围堰头部优化后导流明渠内水流流线顺直，

纵向围堰上游头部水流衔接平顺, 右岸内凹岸坡附近形成强度较弱的回流区, 不影响整体流态。导流明渠内水流流态整体较好, 有利于船舶通航; 在下泄流量较小时, 主流位于导流明渠中央主槽内, 河道水流几乎接近天然状态, 满足施工期船舶的通航要求。

2.3.2 优化后流速分布

如图 8 所示, 在下泄流量 $Q = 2.35 \text{ 万 m}^3/\text{s}$

时, 导流明渠内的主流流向与纵向围堰平行, 导流明渠末端受河道拐弯影响较小, 水流流向向左岸扭转 5° 。导流明渠上游河道主流流速在 4.33 m/s 以内; 导流明渠内主流流速均在 4.85 m/s 以内; 导流明渠下游河道主流流速均在 4.18 m/s 以内; 导流明渠及上下游连接段流速值均小于 5.00 m/s , 满足助航允许表面流速为 5.50 m/s 的规范要求。

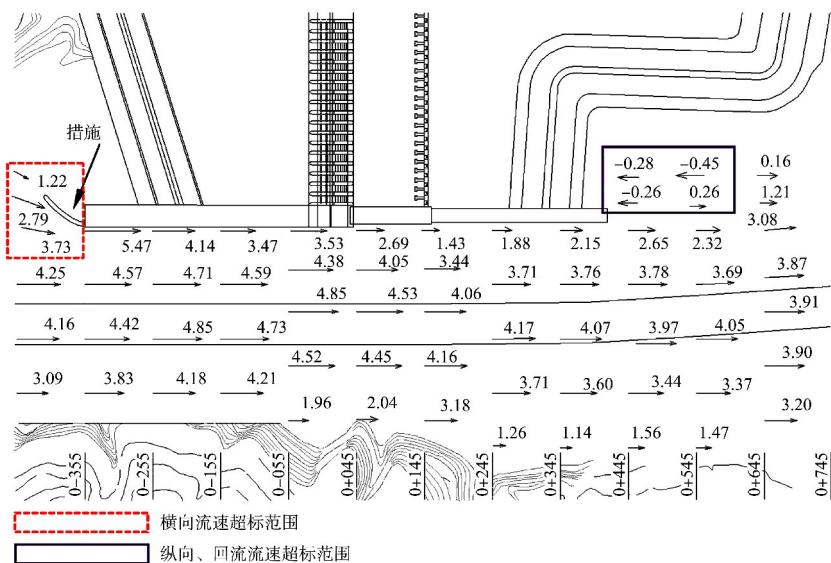


图 8 $Q = 2.35 \text{ 万 m}^3/\text{s}$, 优化后导流明渠流速分布 (单位: m/s)

3 优化方案成效

3.1 纵向水面比降与通航水深

优化方案后一期导流明渠沿程水位分布及水面比降(流量 $0.20 \text{ 万 } \sim 2.35 \text{ 万 m}^3/\text{s}$)见表 2、3。可以看出, 各试验工况下一期导流明渠上游至下游 $0-755$ — $0+845$ 范围内水面比降较小, 且泄流量越小,

水面比降也越小, 在最大通航流量 $Q = 2.35 \text{ 万 m}^3/\text{s}$ 的水面比降为 -1.9% , 出现负比降主要是明渠前部河道收缩, 流速加大, 明渠中后段河道宽度增加, 流速略有降低, 导致局部水位壅高, 桩号 $0-105$ — $0+145$ 断面出现水面负比降, 符合水力学规律。

表 2 优化方案后一期导流明渠沿程水位分布

桩号	位置	水位/m				
		$2.35 \text{ 万 m}^3/\text{s}$	$1.70 \text{ 万 m}^3/\text{s}$	$1.20 \text{ 万 m}^3/\text{s}$	$0.60 \text{ 万 m}^3/\text{s}$	$0.20 \text{ 万 m}^3/\text{s}$
0-755	明渠上游	39.09	36.60	34.05	29.69	25.79
0-355	纵向围堰上游头部	38.68	36.25	33.80	29.55	25.75
0-105	导流明渠	38.35	36.03	33.65	29.44	25.73
0+145	导流明渠	38.82	36.33	33.80	29.54	25.71
0+400	纵向围堰下游头部	38.65	36.16	33.68	29.48	25.68
0+845	明渠下游	38.50	36.02	33.57	29.44	25.65

表 3 优化方案后一期导流明渠沿程水位比降

桩号	位置	比降 / ‰				
		2.35 万 m ³ /s	1.70 万 m ³ /s	1.20 万 m ³ /s	0.60 万 m ³ /s	0.20 万 m ³ /s
0-755—0-355	明渠上游至纵向围堰上游头部	1.0	0.9	0.6	0.4	0.1
0-355—0-105	纵向围堰上游头部至导流明渠	1.3	0.9	0.6	0.4	0.1
0-105—0+145	导流明渠	-1.9	-1.2	-0.6	-0.4	0.1
0+145—0+400	导流明渠至纵向围堰下游头部	0.5	0.5	0.3	0.2	0.1
0+400—0+845	纵向围堰至下游头部明渠下游	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1

3.2 纵向及横向围堰的安全性

根据试验测得纵向及横向围堰附近的水流流速分布，在各试验工况下，纵向围堰附近流速值基本在 4.20 m/s 以内，小于河床基岩 5.00 m/s 的抗冲流速要求，但应注意纵向围堰上游头部的安全性，该位置最大通航水流条件下，流速值可达 5.47 m/s，大于河床基岩抗冲流速，而且一期导流通航洪水标准为 20 a 一遇，随着下泄量的增加，围堰附近的流速值势必增大。上下游横向围堰附近均产生回流流速，试验测得的围堰附近回流流速值均小于 1.50 m/s，横向围堰的安全性得到保证。

4 结论

1) 一期导流纵向围堰上游头部易产生挑流，主流将在施工围堰处形成弱流区，造成围堰出口位置横向流速严重超标，恶化大流量时导流明渠内的通航水流条件。通过在纵向围堰上游头部增设圆弧形临时导流墙、削减明渠中部主槽河床局部凸起等优化措施，使导流明渠内的水流流态得到明显改善。

2) 弧形导流墙对上游来流与导流建筑物起到了较好的平顺衔接作用，进一步降低了航道水流整体流速，流向变化较小，通航流态较好。在最大通航流量条件下，各测点位置流速值均小于 5.00 m/s，极大地改善了助通行条件，为类似工程提供了参考经验。

参考文献：

- [1] 戴会超, 胡昌顺, 朱红兵. 施工导截流理论与科技进展[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 78-83.
- [2] 王家柱. 导流与截流[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [3] 林金波. 水利枢纽分期导截流数值模拟方法及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [4] 马育斌, 王常红, 李维, 等. 渠江风洞子航运工程施工导流优化方案设计[J]. 水运工程, 2023(S1): 75-79, 84.
- [5] 尹崇清, 刘峰钻, 张湛, 等. 岷江龙溪口航电枢纽施工期通航问题试验研究[J]. 水运工程, 2013(1): 114-120.
- [6] 黄伦超, 江诗群, 刘诚. 湘江株洲枢纽工程施工期通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2001(11): 31-34.
- [7] 黄伦超. 湘江大源渡枢纽施工期通航水流条件分析[J]. 长沙交通学院学报, 1998(1): 67-71.
- [8] 陈仁峰. 金沙水电站导流明渠截流施工技术研究[J]. 人民长江, 2022, 53(6): 159-162.
- [9] 曾新民, 马彩云, 李勇, 等. 大藤峡水利枢纽工程布置和施工导流设计方案探讨[J]. 人民珠江, 2013, 34(1): 46-49.
- [10] 潘明鸿, 陈辉, 左永振, 等. 大藤峡水利枢纽二期围堰截流研究[J]. 中国水利, 2020(4): 48-50.
- [11] 朱卫国, 何贞俊. 大藤峡水利枢纽船闸上引航道口门区水流条件模型试验 [J]. 水运工程, 2017 (9): 137-143.
- [12] 王建平, 杨聿, 张金明, 等. 大藤峡水利枢纽船闸下游引航道口门区方案优化研究 [J]. 人民珠江, 2016, 37(4): 59-64.
- [13] 长江水利委员会长江科学院, 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河工模型试验规程: SL 99—2012[S]. 北京: 中国水利水电出版社. 2012.
- [14] 陈稚聪, 黑鹏飞, 丁翔. 丁坝回流区水流紊动强度试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12): 2053-2056.
- [15] 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.

(本文编辑 赵娟)