

· 航道及通航建筑物 ·



# 长江口南汇边滩大治河出海口航道 整治工程数值模拟优化\*

李波<sup>1</sup>, 顾峰峰<sup>2</sup>, 付桂<sup>1,3</sup>, 翁扬<sup>1</sup>

(1. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003; 2. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201;  
3. 上海航鸿工程管理有限公司, 上海 200137)

**摘要:** 内河出海口口门处通航和水流条件复杂。以大芦线东延伸航道整治工程为例, 采用二维潮流数学模型对工程方案进行数值模拟研究, 分析复杂水域不同导流堤的作用及其对航道条件的影响。结果表明: 口外平行导流堤方案具有一定的削弱外航道横流的作用, 但该方案存在堤头等局部横流及增加回淤量等问题, 不利于船舶航行和航道维护, 不能有效改善口门外通航条件, 因此本工程条件下不推荐此方案; 南、北侧现状促淤堤位置布置直弧形导流堤方案, 可有效减弱口门及口外航道部分水域的横流、优化环流流态、改善口门通航条件, 推荐采用该方案开展后续研究。综合考虑方案效果及经济性, 推荐在大芦线口门南、北现状促淤堤内侧布置南侧长 930 m、北侧长 1 500 m 的直弧形导流堤。

**关键词:** 内河出海口航道; 大芦线东延伸航道; 整治工程; 平行导流堤; 直弧形导流堤; 数值模拟; 通航条件  
**中图分类号:** U617 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2024)11-0079-07

## Numerical simulation optimization of Dazhi River Estuary Channel regulation project in Nanhui Borderland of Yangtze Estuary

LI Bo<sup>1</sup>, GU Fengfeng<sup>2</sup>, FU Gui<sup>1,3</sup>, WENG Yang<sup>1</sup>

(1. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, MOT, Shanghai 200003, China;  
2. Shanghai Estuary and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;  
3. Shanghai Hanghong Engineering Management Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

**Abstract:** The navigation and water flow conditions at the entrance of the inland river estuary are complex. Taking the east extension channel regulation project of the Dalu Line as an example, we use the two-dimensional tidal current sediment mathematical model to simulate the layout scheme, and analyze the influence of different diversion dikes on navigation conditions in complex waters. The results show that the scheme of parallel diversion dike outside the entrance has a certain effect on weakening the cross flow of the outer channel, but the scheme has the problems of increasing the cross flow at the head of the dike, increasing the local cross flow and increasing the amount of siltation, which is not conducive to ship navigation and channel maintenance, and cannot completely improve the navigation conditions outside the entrance, so this scheme is not recommended for the project conditions. The straight curved diversion dikes are arranged at the current siltation-promoting dikes on the south and north sides, which can weaken the cross-flow of some waters at the entrance and the outer channel, optimize circulation flow patterns, and improve the navigation conditions at the entrance, so this scheme is recommended for further study. Considering the effect of the comprehensive scheme and economic factors, it is recommended to set up a straight curved diversion dike with a length of 930 m on the south side and a length of 1 500 m on the north side of the current siltation dike in the south and north of the Dalu Line entrance.

**Keywords:** inland river estuary waterway; east extension channel of Dalu Line; regulation project; parallel diversion dike; straight curved diversion dike; numerical simulation; navigation condition

收稿日期: 2024-02-19

\*基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(21DZ1201700、21DZ1201002)

作者简介: 李波(1987—), 男, 工程师, 从事航道工程技术研究。

内河水运具有运量大、成本低、能耗少的优点，提高水运比例有助于缓解道路交通压力，更加符合绿色生态发展需要。《交通运输部关于推进特定航线江海直达运输发展的意见》(交水发[2017]53号)<sup>[11]</sup>指出，江海直达是一种便捷高效、绿色经济的运输方式。推进江海直达运输发展，是深化交通运输供给侧结构性改革的重要内容，对于提升长江黄金水道功能和构建现代综合交通运输体系具有重要作用。

内河出海口口门处通航和水流条件复杂，急需改善出海口航道，提高内河通航条件。在内河出海口航道整治工程中，一般导流堤的设置主要起到引导水流、稳定航道、改善水流条件、保护河床、提高通航能力等作用，在许多水利工程中得到了广泛的研究和应用，如葛洲坝利用导流堤约束二江主流，进一步刷深二江河槽，方便船队上行<sup>[2]</sup>；黄河口设置导流堤工程束水堵淤，防止河道出汊摆动并提高了水流挟沙能力<sup>[3]</sup>；曹娥江大闸比选了不同导流堤方案<sup>[4]</sup>等。在设计导流堤的方法中，众多学者运用了数值模型进行相关研究，如邹冰等<sup>[5]</sup>以黄河河口潮流泥沙有限元数学模型进行计算和分析，结果表明设置双导堤后，河道水流集中，减少了水流漫滩、减少泥沙在河道和口门的淤积；王建锋等<sup>[6]</sup>基于潮流数学模型对导流堤建成前后的附近海域流场进行数值模拟，

结果表明导流堤的建设使码头前沿海流得到很好的改善，起到了归顺潮流的作用，有利于码头前沿水深的维持；蔡丽婧<sup>[7]</sup>采用数学模型对导流堤加长加固方案进行对比分析，优选出合理的导流堤结构形式和长度；还有其他学者利用数值模型对工程进行优化等<sup>[8]</sup>。导流堤的方案论证，一般主要考虑堤的位置和高度等方面，如李金合等<sup>[9]</sup>分析航道口门区水流条件及影响因素，通过采取改变长度等多种改善措施，提出满足船舶或船队航行条件的布置方案；郑星伟等<sup>[10]</sup>主要考虑导流堤深入河道长度以及与不同泄流量组合工况条件下的下游流场进行模拟，选择将导流堤自墩头向上游缩短约100 m；在方案比选时，同时也要考虑导流堤布置的经济性，包括建设成本、维护成本和工程效益等方面的因素<sup>[11]</sup>。

本文选取上海大治河出海口航道——大芦线东延伸航道整治工程作为研究案例，该工程位于内河与海洋交汇处，面临着潮汐、径流等多种水动力因素共同作用，流场及航道条件复杂，航道位置见图1。通过设置不同平面位置、长度和高程的导流堤，利用二维潮流泥沙数学模型对其进行论证，研究不同的导流堤设置方案对大芦线河口处通航环境的影响，给出最终推荐方案及效果。本文研究结果可为类似河口导流堤工程建设提供一定的实例借鉴和参考。



图1 大芦线东延伸航道平面位置

## 1 研究方法

考虑到河口区域具有显著的三维水流特征,选取二维潮流泥沙数学模型 MIKE21 开展研究,模型计算范围上游位于大通水文站、下游位于长江口陆架水域。模型剖分为 8.622 1 万个网格节点、16.912 3 万个网格单元,最小网格边长约 10 m (图 2),计算步长 60 s,追踪分步长为 2~50 步,粗糙度取值约 0.000 1 m,水平向大涡模拟计算参数取 0.1。

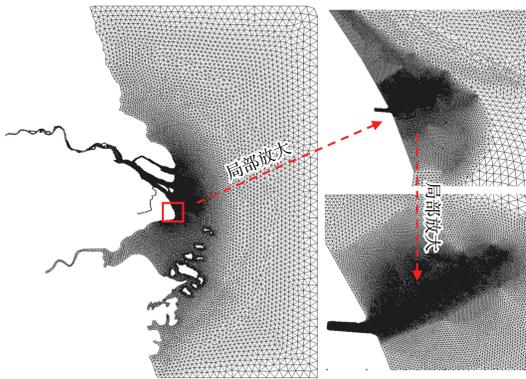


图 2 模型计算网格

水文边界:典型洪季大小潮取 2020 年 8 月水文测验上下游边界,典型枯季大小潮取 2020 年 3 月水文测验上下游边界。泥沙边界:根据近年来实测的上游大通含沙量,取  $0.10 \text{ kg/m}^3$ ;外海含沙量边界取  $0 \text{ kg/m}^3$ 。

地形条件:长江口南支北港部分采用 2019 年 8 月实测 1:10 000 地形,长江口南北槽采用 2021 年 8 月实测 1:10 000 地形,南汇边滩采用 2019 年 1 月实测地形,大治河(大芦线)局部采用 2021 年 3 月实测地形。以上地形高程及计算潮位均采用吴淞基面。

为使模型能较好地重现实测潮流过程,对模型进行率定和验证,主要内容包括潮位、流速、流向以及汊道分流比等。在数学模型计算中采用了 2020 年 8 月实测水下地形,并分别选用了 2020 年 3 月及 8 月两次实测水文资料对模型进行率定和验证。潮位验证选取长江口区域的徐六泾、白茆、崇头、杨林、六淤、共青圩、吴淞、石洞口、长兴、横沙、北槽中、牛皮礁、鸡骨礁、中浚、南槽东等 15 个潮位站的数据进行分析验证;潮流验证选取长江口南槽、江亚南沙等 15 个水文测点的

水文数据进行分析验证;含沙量验证选取长江口南槽 9 个水文点、江亚 2 个水文点、机场 2 个水文点和南汇东滩 2 个水文点的含沙量数据进行分析验证。从验证结果来看,工程区域的测点均能满足 JTJ/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》<sup>[12]</sup>的精度控制要求,可用于工程方案的数值试验研究。

## 2 工程方案模型试验研究

### 2.1 导流堤设置原则

航道整治工程的导流堤设置主要依据如下原则:1)改善闸外航道流态及航道通航条件,保障通航安全;2)方案经济合理,便于长期运营维护,节约工程投资;3)减小对周边水域、工程的不利影响。在这些原则的基础上,分别就口外导流堤的长度、位置和进行比选。

### 2.2 口外导流堤方案试验研究

#### 2.2.1 比选方案设置

以无导流堤为本底方案,分别进行 3 个步骤的方案比选:1)在大治河口门南侧 460 m 处,设置长度分别为 700、1 000、1 300 m,高程均为 2 m 的导流堤为长度比选方案以确定导流堤最优长度;2)在大治河口门南侧 460 m 和北侧 800 m 处作为位置比选方案;3)以导流堤高程分别为 1.0、2.0、3.0、3.7 m 为高程比选方案。各方案名称及参数见表 1。为详细分析方案前后工程水域沿程流速、横流变化情况,在航道沿程布置 26 个采样点 ( $H_1 \sim H_{26}$ ),采样点间隔约 80 m (约 1 倍设计船长),见图 3。

表 1 各方案名称及参数

方案类型	方案名称	长度/m	位置	高程/m
	本底方案	-	-	-
长度比选方案	DLD-SL1	700	南侧	2.0
	DLD-SL2	1 000	南侧	2.0
	DLD-SL3	1 300	南侧	2.0
位置比选方案	DLD-S	推荐长度	南侧	2.0
	DLD-N	推荐长度	北侧	2.0
高程比选方案	DLD-N+1	推荐长度	推荐位置	1.0
	DLD-N+2	推荐长度	推荐位置	2.0
	DLD-N+3	推荐长度	推荐位置	3.0
	DLD-N+3.7	推荐长度	推荐位置	3.7

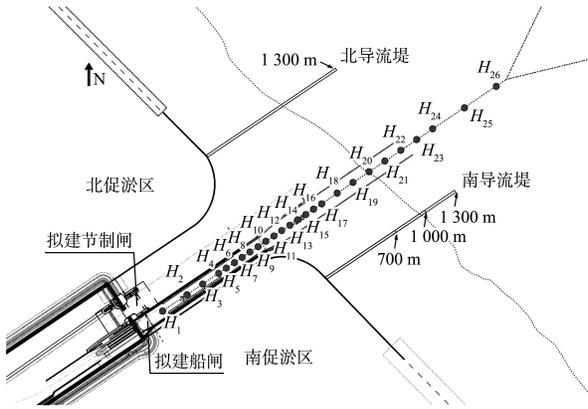


图3 口门外导流堤比选方案平面及采样点布置

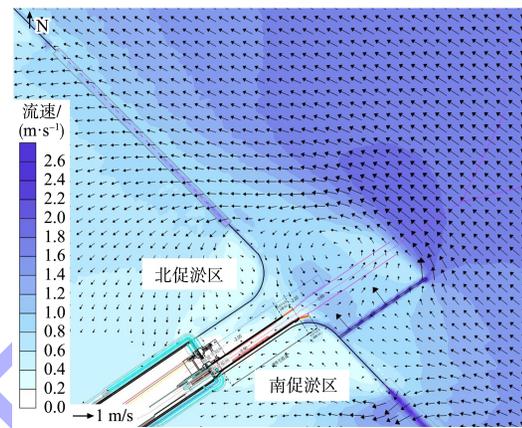
### 2.2.2 试验研究结果与分析

本工程航道位于河口口门位置，口外南槽往复流与航道存在约90°的夹角，工程实施后横流对航道条件的影响值得关注，因此首先分析工程后的航道横流情况。

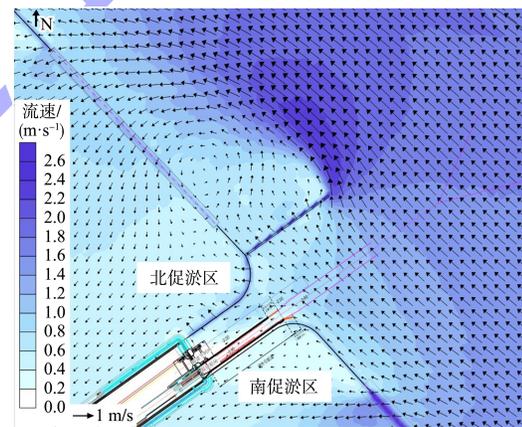
根据口外导流堤长度比选方案的计算结果，横流减小范围与导流堤长度成正比，导流堤越长，流速及横流减小范围越大。3个长度方案均可减弱口门落潮最大横流流速，方案DLD-SL3最大横流流速减幅最大，因此位置比选方案可基于DLD-SL3方案，即导流堤长度1300m方案。

位置比选组涨潮期南北侧导堤流场见图4。可以看出，南侧1300m方案涨潮时在航道长江段易形成逆时针环流，不利于船舶航行，且越堤形成的翻坎流直接影响航道，易造成船舶失稳；北侧1300m方案涨潮时，环流位于导流堤北侧，对航道影响较小。因此高程比选方案DLD-N，即导流堤北侧1300m方案的流场效果相对较优。高程比选组航道涨落潮沿程最大横流流速见图5。可以看出，横流流速减小范围和幅度与导流堤高度成正比，导流堤高程越高，流速减小范围越大，横流流速减小幅度也越大；涨潮横流流速降幅随高程增高依次增大，落潮横流流速工程1.0m方案降幅较大，2.0和3.0m方案逐步增大，3.7与3.0m方案接近，在综合考虑经济性则3.0m方案相对较优。以口门外北侧设长1000m、高程3.0m(DLD-N+3)的方案，模拟实施1年后与本底方案地形差值分布，见图6。由于导流堤挡沙及阻流的作用，其掩护区域内出现了较为明显淤积，航道回淤将明显增加，淤积增幅可达1m/a以上，闸外航道疏浚段淤积总量相对于本底方案增加约为84.6万m<sup>3</sup>/a。泥沙回淤的计算结果表明，口门处的航道整治工程在考虑流态的同时，也要兼顾导流堤对泥沙运输的影响，避免因工程掩护导致的航道大量淤积现象。

作用，其掩护区域内出现了较为明显淤积，航道回淤将明显增加，淤积增幅可达1m/a以上，闸外航道疏浚段淤积总量相对于本底方案增加约为84.6万m<sup>3</sup>/a。泥沙回淤的计算结果表明，口门处的航道整治工程在考虑流态的同时，也要兼顾导流堤对泥沙运输的影响，避免因工程掩护导致的航道大量淤积现象。

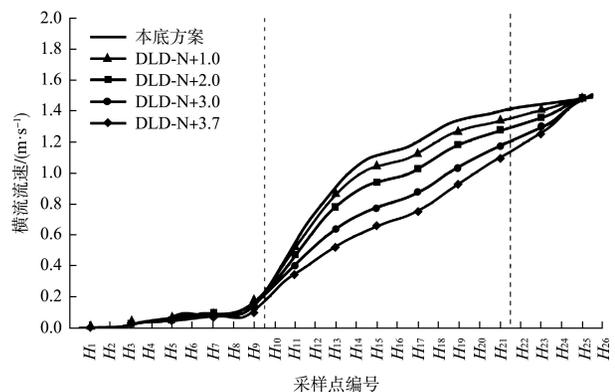


a) 南侧导流堤



b) 北侧导流堤

图4 位置比选组涨潮期南北侧导堤流场



a) 涨潮

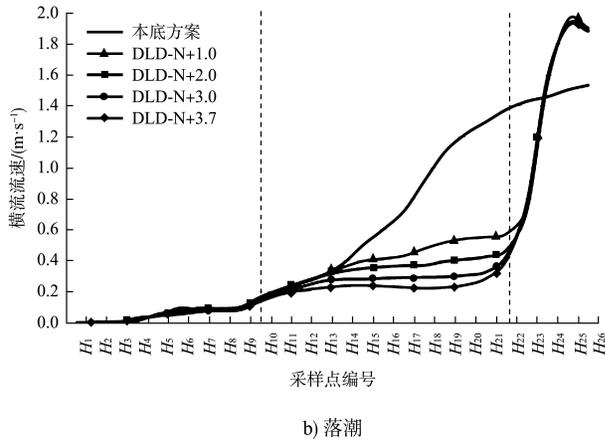


图 5 高程比选组航道涨落潮沿程最大横流流速

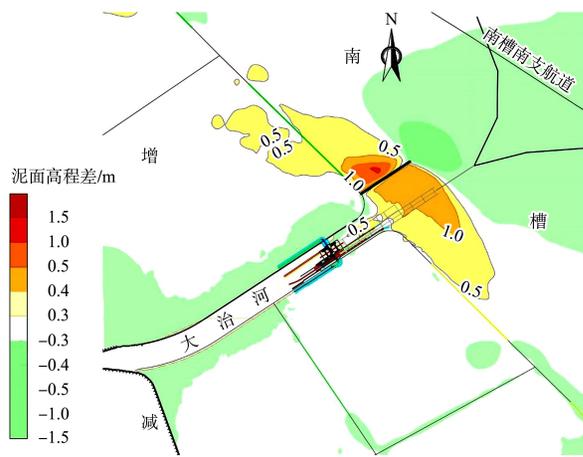


图 6 口外平行导流堤方案实施 1 年后地形差值分布

综上, 口门外设置导流堤后, 航道疏浚段在导流堤掩护范围内, 流速明显减小, 但疏浚段外涨、落急流速增加, 且存在堤头绕流、局部环流及回淤量增加等现象, 不利于船舶航行和航道维护, 即出口门外设置导流堤难以有效改善口门外通航环境, 故本工程条件下没有推荐口外平行导流堤方案。

### 2.3 口外直弧形导流堤方案试验研究

#### 2.3.1 比选方案设置

根据前期研究, 整治工程方案需要减弱口门环流、改善口门通航流态, 但口外导流堤较难实现这一目的, 因此考虑在航道口门南侧、北侧现状促淤堤内侧建立口外直弧形导流堤。

方案比选以无导流堤为本底方案(F<sub>02</sub>), 以南侧设置长度 530 m(F<sub>14</sub>)、930 m(F<sub>15</sub>)、1 330 m(F<sub>16</sub>)直弧形导流堤为第 1 阶段方案; 在第 1 阶段

推荐方案基础上, 在北侧设置长度为 1 500 m(F<sub>17</sub>)直弧形导流堤为第 2 阶段方案, 平面布置见图 7, 比选流程见图 8, 比选方案见表 2。根据防洪管理部门的要求和整治效果, 直弧形导流堤顶只考虑一个高程, 为 5.1 m。

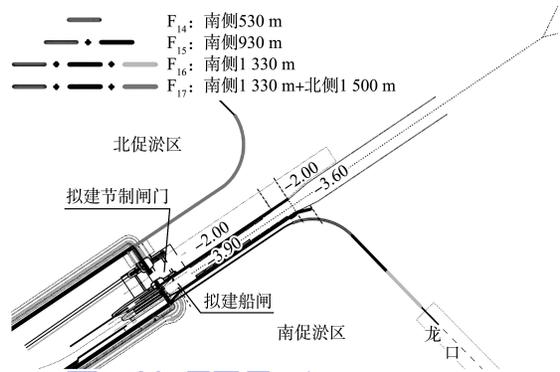


图 7 直弧形导流堤比选方案平面布置 (单位: m)

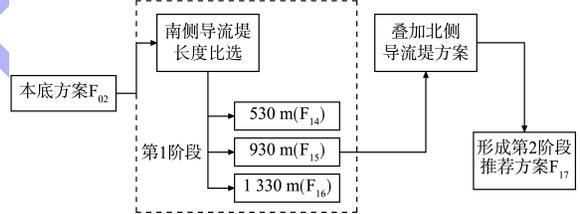


图 8 直弧形导流堤方案比选流程

表 2 斜坡式导流堤第 1、2 阶段比选方案

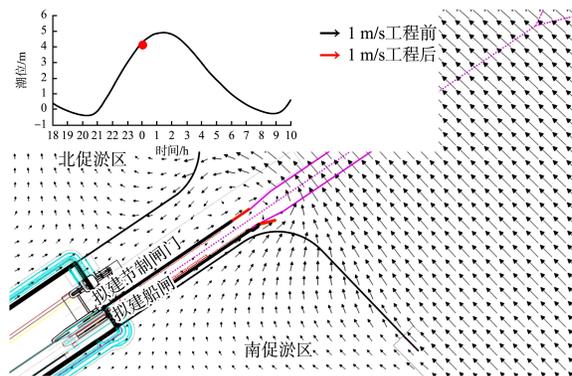
方案名称	斜坡式导流堤长度/m	位置	顶高程/m
F <sub>02</sub>	-	南侧	5.1
F <sub>14</sub>	530	南侧	5.1
F <sub>15</sub>	930	南侧	5.1
F <sub>16</sub>	1 330	南侧	5.1
F <sub>17</sub>	930、1 500	南、北侧	5.1

#### 2.3.2 试验研究结果与分析

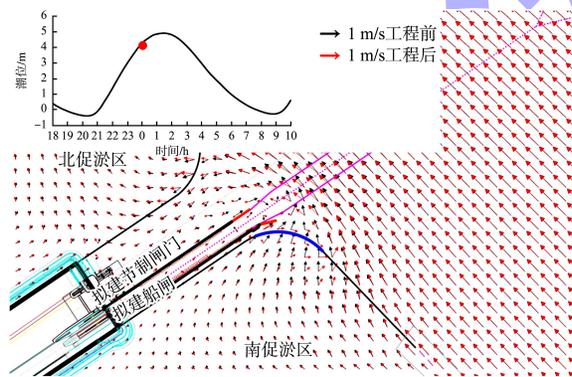
第 1 阶段, 南侧的直弧形导流堤长度比选方案在试验研究后可知: 直弧形导流堤方案 F<sub>14</sub>~F<sub>16</sub> 均可减弱口门及口外航道部分水域的涨潮最大横流流速, 其中 H<sub>12</sub>~H<sub>15</sub> 点涨潮最大横流流速减小 0.07~0.10 m/s。

分析方案实施后的口门流态, 由图 9 可知: 1) 本底方案在口外没有掩护的情况下, 在涨潮后期, 现状南导堤圆弧段会产生往航道方向的越堤流, 与口门 NW 向涨潮流共同作用下, 引航道口门出现逆时针环流, SE 方向最大横流约 0.2 m/s, 同时刻口外 NW 向涨潮流速在 1 m/s 以上, 因此在

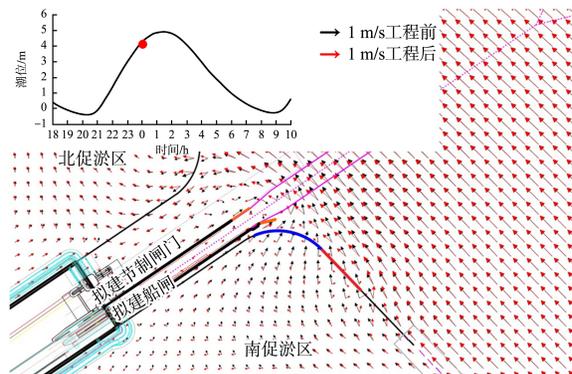
口门适当加宽了航道宽度，并在设计南侧导流墙为平面“八字口”形，以减小船舶进入引航道时触碰南堤的风险。2) 设立口门直弧形导流堤方案，可有效阻挡涨潮期南促淤堤圆弧段产生的往航道方向的越堤流，归顺了口门流态，改善了口门通航条件。从减弱口门环流及经济情况综合考虑，总体来看  $F_{15}$  方案较优；根据其流场变化，现状促淤堤圆弧段两侧涨潮最大流速明显减小，涨潮最大流速减幅在  $0.30\sim 0.75\text{ m/s}$ ，该方案可作为第1阶段推荐方案。



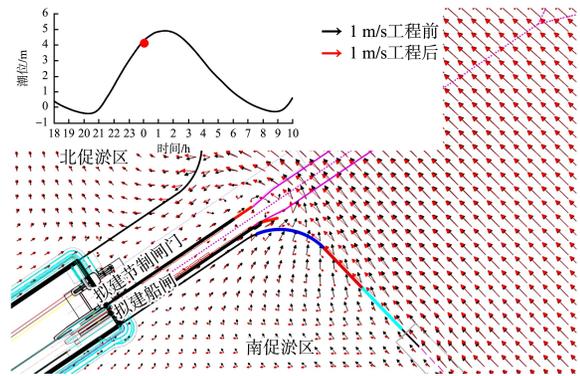
a) 本底方案( $F_{02}$ )



b) 设置530 m导流堤( $F_{14}$ )



c) 设置930 m导流堤( $F_{15}$ )



d) 设置1 330 m导流堤( $F_{16}$ )

图9 南侧直弧形导流堤方案典型时刻流场

第2阶段，为了进一步归顺口门处的流态，减少北侧涨潮期越堤水流，在南侧布置930 m直弧形导流堤的基础上，在北侧设置1 500 m直弧形导流堤(方案  $F_{17}$ )，直弧形导流堤方案  $F_{15}$  和  $F_{17}$  均可减弱口门及口外航道部分水域的涨潮最大横流流速，但  $F_{17}$  方案较  $F_{15}$  方案减幅更大， $F_{17}$  方案  $H_{12}\sim H_{15}$  点涨潮最大横流流速减小  $0.14\sim 0.18\text{ m/s}$ ， $F_{15}$  方案涨潮最大横流流速减小  $0.07\sim 0.10\text{ m/s}$ ，即在南北两侧直弧形导流堤可以有效减小口门航道主要关注区域的横流流速及改善环流流态(图10)。

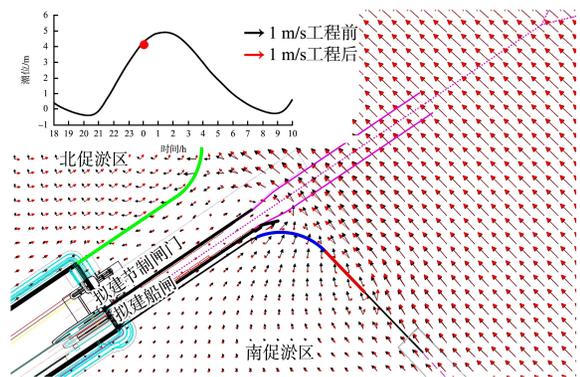


图10 南、北侧直弧形导流堤方案( $F_{17}$ )典型时刻流场

综上，在口门外没有掩护的情况下，南、北侧现状促淤堤位置建立直弧形导流堤，可阻挡大部分南促淤堤圆弧段产生的往航道方向的越堤流，减弱口门及口外航道部分水域的最大横流，改善了口门通航环境。第1阶段南侧直弧形导流堤方案( $F_{15}$ )能使口门横流有所降低，但是减幅有限；第2阶段南、北两侧直弧形导流堤方案( $F_{17}$ )能进

一步降低航道横流和改善环流流态。综合比较第 1、2 阶段方案效果及考虑工程经济性,推荐在大芦线口门南、北现状促淤堤内侧分别建立 930、1 500 m 长的直弧形导流堤。

### 3 结论

1) 口外平行导流堤方案具有一定的削弱外航道横流的作用,但受口门外横流影响,存在堤头等局部横流及增加回淤量等问题,不利于船舶航行和航道维护;即本工程条件下不同的口门外布置方案难以有效改善口门外通航条件,本工程条件下不推荐口外平行导流堤方案。

2) 南、北侧现状促淤堤位置布置直弧形导流堤,可有效减弱口门及口外航道关注水域的横流和优化口门环流流态,改善口门通航条件;从方案实施效果来看,水流条件改善是导流堤平面布置而非导流堤结构起到了作用,推荐直弧形导流堤方案。综合方案效果及经济性考虑,本工程实例最终推荐在大芦线口门南、北现状促淤堤内侧布置南侧长 930 m、北侧长 1 500 m 的直弧形导流堤方案。

3) 本文以大芦线东延伸航道整治工程为例,论证导流堤方案的数模成果,可为类似河口复杂水流条件下航道整治导流堤工程的建设实施提供实例参考,具有技术理论借鉴及工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] 交通运输部. 交通运输部关于推进特定航线江海直达运输发展的意见: 交水发[2017]53 号[A]. 北京: 交通运输部, 2017.
- [2] 王浩林, 王加建, 朱永安. 上海内河集装箱河海直达运输发展研究[J]. 交通与港航, 2022, 9(6): 24-28.
- [3] 程义吉. 黄河口导流堤工程的建设与作用[J]. 人民黄河, 1996(4): 53-56.
- [4] 包中进, 周杰. 曹娥江大闸导流堤方案水力学数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2004(S1): 948-953.
- [5] 邹冰, 李东风, 张红武, 等. 河口导堤对水沙运动影响的二维数值模型[J]. 水利学报, 2006(7): 880-885.
- [6] 王建锋, 邱桔斐, 丁增明, 等. 洋山深水港区码头导流堤工程对附近海域流场的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2014(4): 128-138.
- [7] 蔡丽婧. 基于流场数值模拟的导流堤加固方案优化设计[J]. 水科学与工程技术, 2015(3): 49-51.
- [8] 王欢, 陈江海, 陈翔, 等. 基于 MIKE21FM 模型的厦门筭筭湖水质提升方案[J]. 水电能源科学, 2019, 37(2): 43-46.
- [9] 李金合, 李君涛, 郝媛媛. 湘江长沙综合枢纽通航水流条件及改善措施研究[J]. 水道港口, 2008, 29(6): 414-418.
- [10] 郑星伟, 张铭, 范洪浩, 等. 小溪滩枢纽下游导流堤布置及形式优化[J]. 水运工程, 2018(9): 96-100, 118.
- [11] 吴今权. 防沙导流堤平面设计的研究[J]. 中国港湾建设, 2001(1): 13-17.
- [12] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTJ/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

(本文编辑 王璁)

(上接第 27 页)

- [7] 杨正已, 贺辉华, 潘少华. 波浪作用下抛石堤的稳定性及消浪特性[J]. 水利水运科学研究, 1981(3): 34-45.
- [8] NAGAI S. Perforated vertical wall breakwater [J]. Dock and harbour authority, 1976, 57(671): 194-198.
- [9] URSELL F. The effect of a fixed vertical barrier on surface waves in deep water[J]. Mathematical proceedings of the

cambridge philosophical society, 1947, 43(3): 374-382.

- [10] WIEGEL R L. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier[J]. Waterways & harbors division, 1960, 86: 1-12.
- [11] 任冰, 王永学. 非线性波浪对结构物的冲击作用[J]. 大连理工大学学报, 1999(4): 100-104.

(本文编辑 赵娟)