



沙坪河—郁江交汇口航道优化设计与 试验研究*

张永恒, 张勇

(中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要: 沙坪河与郁江交汇口的夹角较小, 不利于船舶转弯航行, 特别是郁江上游进出沙坪河的船舶转弯困难; 此外, 在交汇口航道右岸岛屿上分布着大量居民房, 征地、拆迁较为困难。如何统筹兼顾航行条件与少征地、少开挖是该河段航道线路布置的难点。为使船舶在运河航道中的适航性和安全性达到良好, 按照直线为主、弯道为辅的原则布置2条航道线路。经技术经济比较, 选择航行安全、施工难度小、工程造价低的航道线路, 并选择代表船型、建立电子航道图对该航道线路进行船舶操纵仿真试验。船模试验表明, 优化设计方案的航道宽度及转弯半径均满足通航安全的要求。

关键词: 航道设计; 船舶操纵; 沙坪河; 郁江

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0107-06

Optimized design and experimental study of navigation channel at confluence of Shaping River and Yu River

ZHANG Yongheng, ZHANG Yong

(China Pearl River Water Resources Planning Designing & Surveying Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

Abstract: The angle of the confluence of Shaping River and Yu River is small, which is unfavourable for ships to turn and navigate, especially for ships entering and leaving Shaping River from the upper reaches of Yu River. In addition, a large number of residential houses are distributed on the islands on the right bank of the channel at the confluence, which makes land acquisition and demolition difficult. How to balance the navigation conditions with less land acquisition and less excavation is a difficult point in the channel route layout of this section. To achieve good seaworthiness and safety of ships in the canal channel, two channel routes are arranged according to the principle of straight line as the main and curve as the auxiliary. Through the comparison of technology and economy, the channel line with safe navigation, low construction difficulty and low engineering cost is selected. Furthermore, the representative ship type is selected and electronic channel chart is established for the ship manoeuvring simulation test. The ship model test shows that the channel width and turning radius of the optimised design meet the requirements of navigational safety.

Keywords: channel design; ship manoeuvring; Shaping River; Yu River

运河与其他河道间存在着宽度和水深的差别, 两者的水流流速可能有较大差别, 如有的运河排涝时期是大流量、大流速, 有的灌溉时期发生大

流量, 有的经常引水出现大流量。运河与其他河道交汇口的水流流速、流态有可能不利于船舶航行。因此, 应当有针对性地进行连接段的设计。

收稿日期: 2024-04-12

*基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2023YFB2604704)

作者简介: 张永恒(1982—), 男, 高级工程师, 从事水利水电工程及水运工程设计工作。

针对复杂航道设计,很多学者开展了大量的研究工作,并取得一定的成果。如杨崑^[1]针对临涣船闸下游引航道受地形影响等问题,通过物模试验分析后,提出相应的改善措施,有效地解决了下游引航道设计指标不满足规范要求的问题;李桑名^[2]针对石板沙水道通航条件复杂、航道整治工程建设条件约束多、方案布置调整空间受限等问题,进行航道尺度优化,从而减少大量工程投资;江涛等^[3]针对黔江大藤峡水利枢纽下游段航道存在复杂流态问题,提出航道优化设计思路,并通过物模和船模试验验证优化设计方案的正确性;沈立群等^[4]针对碾盘山水电枢纽通航条件受枢纽布置等影响,建立物理模型试验研究通航条件,提出满足通航水流条件要求的航道优化设计方案;李鸟英^[5]针对航道规划和建设在港口设计和建设实践中的重要性,提出航道平面布置方案的规划和设计时,需基于不同的要素形成最优航道布置方案;艾万政等^[6]研究船舶在桥区操纵性及水流特性,并结合船舶操纵理论及统计理论方法,提出桥区顺直航道及弯曲航道的优化布置设计方法。

为确保航道交汇口的适航性和安全性达到良好,本文提出航道交汇口Y形衔接方案,对上行弯曲段航道加宽,扩大交汇口水域,并将交汇口的上、下行航道岸线修圆,通过圆弧段与直线段平顺连接。河道出口处变宽段的岸线按1:20~1:16的变率设计。根据规范控制交汇口转弯设计半径值并按规定进行弯道加宽。结合相关水文气象资料,建立电子航道图,选取设计代表船型,在5 a一遇设计通航水位流场和6级强风工况下,进行船舶双线通航操纵仿真模拟试验,进一步验证航道交汇口设计方案的合理性。

1 航道现状条件

沙坪河航道线路起点位于沙坪河与郁江汇流的交汇口,沿沙坪河而上,终点至三阳桥。本段航道位于西津水库的支流回水区,水位受西津水电站水库调控,属从无到有的江海连通新通道,

建成后将为珠江水系通江达海开辟新的出海口,其潜在运输需求体现在珠江水系内河水运量、北部湾港吞吐量和西南地区经其他路径出海运量等方面。

本段航道与一般山区天然河道有较大不同,具有库区航道和天然河道的双重特性。航道交汇口在非汛期时水流平稳;在汛期泄洪时,水流流速、流态有可能出现不利于船舶航行的情况。航道常年通航船舶多以500吨级以下为主,洪水期最大可通航1000吨级船舶,枯水期一般只能通航几十吨级的小船。

2 交汇口航道方案设计

为了充分利用现有沙坪河库区的天然条件,沙坪河段线路总体趋势上沿沙坪河现有河道走向,充分利用库区淹没水域、养殖鱼塘水域及原河道水域进行布置,在河道变窄、蜿蜒曲折处,利用较矮地势的一级阶地进行布置,按航道尺度进行开挖和裁弯取直,遇碍航岛礁时切岛或挖除。

航道线路比选时,在满足同等航行条件的前提下,优先考虑船舶的适航性和安全性,其次为减少征地范围,最后为开挖量少。运河航道线路布置拟定2个方案进行比选,航道中心线路方案比选见图1。

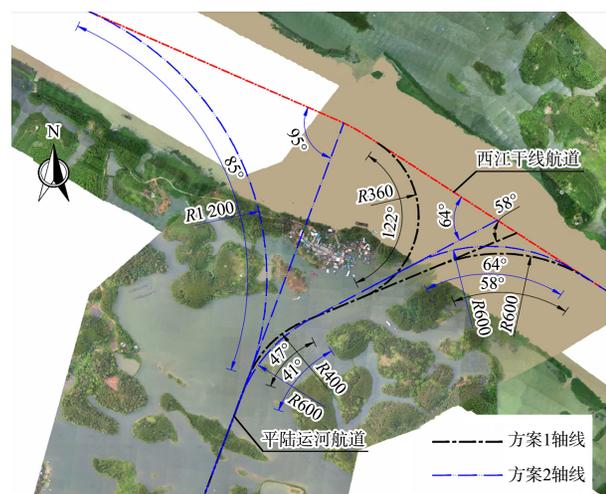


图1 交汇口航道中心线路方案比较(单位:m)

Fig. 1 Comparison of navigation channel centre route schemes at confluence (unit: m)

方案 1: 根据原河道走向布置交汇口线路, 为避开居民房, 航线稍靠左岸, 沙坪河航线与郁江航线夹角 58° 。沙坪河与郁江上行的弯道半径取 4 倍船长, 即 360 m, 船舶航行转弯角度为 122° ; 下行的弯道半径 600 m, 船舶航行转弯角度为 58° 。考虑船舶的适航性, 对沙坪河与郁江上游的弯道加宽 15 m, 航道加宽渐变段长度分别为 300 m (郁江航道段) 和 244 m (沙坪河航道段)。方案 1 交汇口的航道布置见图 2。

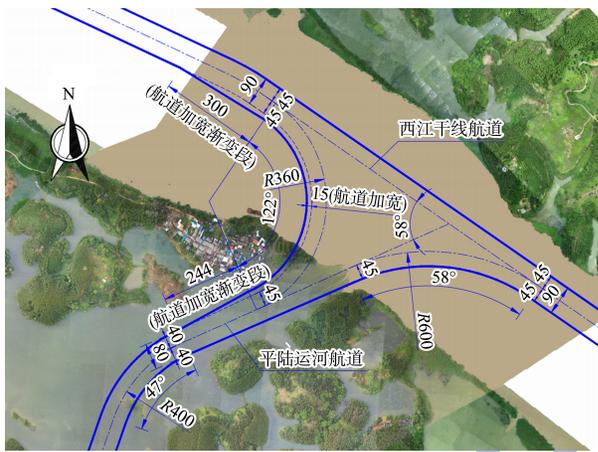


图 2 方案 1 交汇口航道布置 (单位: m)
Fig. 2 Scheme 1 for channel arrangement at confluence (unit: m)

方案 2: 优先考虑船舶航行的舒适性, 将沙坪河航道的上、下行方向分开布置, 使得船舶航行无交叉, 水流条件相对更平稳。沙坪河上行航线与郁江航线夹角 95° , 与郁江下行航线夹角 64° ; 沙坪河与郁江上行的弯道半径为 1 200 m, 船舶航

行转弯角度为 85° ; 沙坪河与郁江下行由 2 个弯道组成, 第 1 个弯道半径 600 m, 船舶航行转弯角度为 64° , 第 2 个弯道半径 600 m, 船舶航行转弯角度为 41° 。方案 2 交汇口的航道布置见图 3。

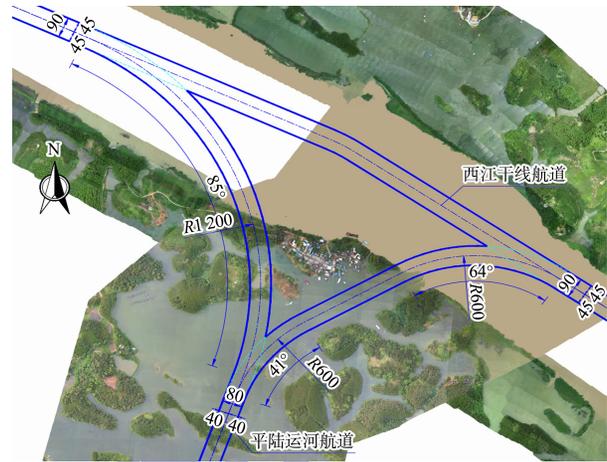


图 3 方案 2 交汇口航道布置 (单位: m)
Fig. 3 Scheme 2 for channel arrangement at confluence (unit: m)

从船舶航行安全性、工程投资合理性及航道航标维护等方面对 2 个方案进行综合比选, 见表 1。由表可知, 在土石方开挖量方面, 方案 2 为方案 1 的 2.1 倍; 在线路长度方面, 上行段方案 2 为方案 1 的 2.44 倍, 下行段方案 2 为方案 1 的 1.67 倍; 在工程占地和拆迁费用方面, 方案 2 为方案 1 的 20.2 倍。综合考虑, 方案 1 绕行交汇口附近的居民区, 土石方工程量、征地拆迁量均更小, 工程投资最省, 可节省投资约 1.4 亿元, 选为推荐方案。

表 1 航道线路综合比选

Tab. 1 Comprehensive comparison of channel routes

方案	平面布置及航行条件	上行线路长度/m	下行线路长度/m	土石开挖量/ 万 m ³	土石开挖 费/万元	对沿线 影响	征地拆 迁费/万元
1	交汇口上行航道转弯角度较大, 与下游航道线路为反 S; 交汇口在排涝时, 水流流速、流态或有不利于船舶航行的情况; 交汇口面积较小, 船行密度大时, 需注意航行安全问题	765	922	70.36	3 532.20	航道底边线与居民活动岛屿相距 65 m	520.58
2	上行航道转弯角度偏大, 但比方案 1 要小, 无 S 航道线形。船舶航行无交叉, 水流条件相对更稳定, 航行条件更好; 船行密度大时, 无上下行船舶航行交叉问题	1 865	1 541	148.77	7 468.05	由于平塘村两岸交通阻断, 整个村民房屋需征地搬迁	10 539.57

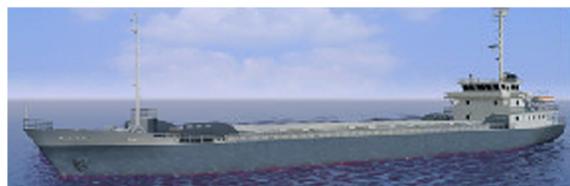
3 船舶操纵仿真试验

3.1 设计船型选择

根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[7]，结合沙坪河航道设计船型，船舶操纵仿真试验的设计船型选取 250 TEU 集装箱船和 5 000 吨级散货船。两种船型三维视景见图 4。



a) 250 TEU 集装箱船



b) 5 000 吨级散货船

图 4 两种船型三维视景

Fig. 4 Three-dimensional views of two ship types

3.2 电子航道图的建立

根据工程设计方案和试验水域的通航要素资料，进行数字化处理并生成数字化海图，对其数据进行变换、整理，形成试验要求的数字化平面图，用于显示试验过程中的航行环境和船舶^[8]，并在最新海图的基础上建立相应设计方案的电子航道，见图 5。



图 5 沙坪河电子航道

Fig. 5 E-channels of Shaping River

3.3 通航模拟试验

根据项目水域通航自然环境要素，对 250 TEU 集装箱船和 5 000 吨级散货船双线通航模拟试验进行工况设计^[9]。

沙坪河航道的常风向和强风向以北向为主^[10]，试验风要素选取北风及对应的 6 级风力强度；试验水域为内河，波浪方向同风向一致；水流流场按照 5 a 一遇不泄洪设计通航水位考虑。模拟试验过程中的船舶通航航迹见图 6。



图 6 船舶通航航迹

Fig. 6 Ships' navigational tracks

3.4 试验结果分析

3.4.1 船舶通航最大航迹带宽度及所需航道宽度

根据模拟试验数据，两种船型在工程水域附近的最大航迹带宽度见表 2。由表可知，5 000 吨级散货船下行、250 TEU 集装箱船上行时的最大航迹带宽度分别为 16、15 m，所需双向航道宽度为 56 m；250 TEU 集装箱船下行、5 000 吨级散货船上行时的最大航迹带宽度均为 16 m，所需双向航道宽度为 58 m。

表 2 船舶通航最大航迹带宽度及所需航道宽度

Tab. 2 Maximum track width and required channel width for ship navigation

试验船型	航行方向	航迹带宽度/m	所需双向航道宽度/m	风	水文
5 000 吨级散货船	下行	16	56	N 向	5 a
250 TEU 集装箱船	上行	15			
5 000 吨级散货船	上行	16	58	6 级	一遇
250 TEU 集装箱船	下行	16			

结合项目实际情况, 根据 GB 50139—2014《内河通航标准》, 双线通航所需航道宽度为:

$$B_2 = B_{F,d} + B_{F,u} + d_1 + d_2 + C \quad (1)$$

$$B_{F,d} = B_{S,d} + L_d \sin\beta \quad (2)$$

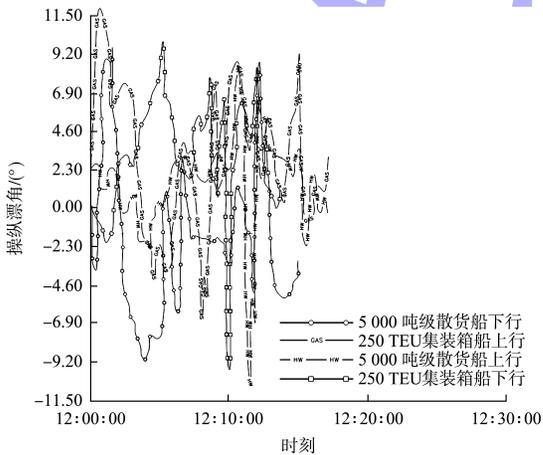
$$B_{F,u} = B_{S,u} + L_u \sin\beta \quad (3)$$

式中: B_2 为直线段双线航道宽度, m; $B_{F,d}$ 为下行船舶或船队航迹带宽度, m; $B_{F,u}$ 为上行船舶或船队航迹带宽度, m; d_1 为下行船舶或船队外舷至航道边缘的安全距离, m; d_2 为上行船舶或船队外舷至航道边缘的安全距离, m; C 为船舶或船队会船时的安全距离, m; $B_{S,d}$ 为下行船舶或船队宽度, m; L_d 为下行顶推船队长度或货船长度, m; β 为船舶或船队航行漂角, ($^\circ$); $B_{S,u}$ 为上行船舶或船队宽度, m; L_u 为上行顶推船队长度或货船长度, m; $d_1 + d_2 + C$ 为各项安全距离之和, m。

设计航道宽度为 80 m, 满足安全通航的要求。

3.4.2 设计船型的操纵漂角及舵角

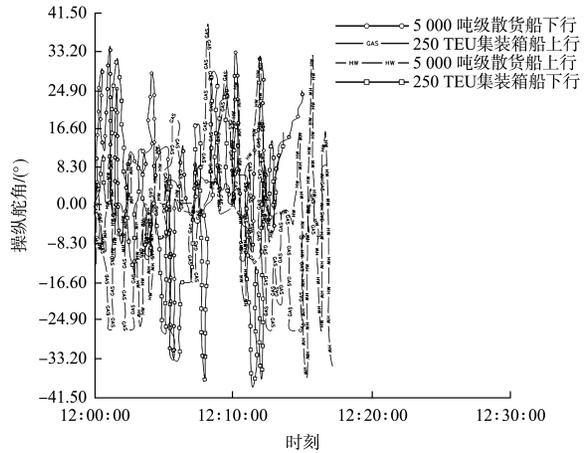
根据模拟试验数据, 6 级风、设计 5 a 一遇通航水位流场条件下, 两种船型的操纵漂角、舵角、艏向角、航速等参数见图 7~10。



注: “+”表示沿首位线偏右漂移, “-”表示沿首位线偏左漂移。

图 7 两种船型不同工况下的最大操纵漂角

Fig. 7 Manoeuvring drift angle under different working conditions of two ship types



注: “+”表示右舵, “-”表示左舵。

图 8 两种船型不同工况下的最大操纵舵角

Fig. 8 Manoeuvring rudder angle under different working conditions of two ship types

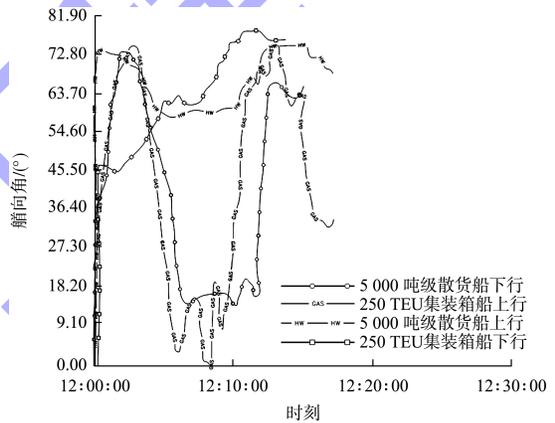


图 9 两种船型不同工况下的艏向角

Fig. 9 Bow angle under different working conditions of two ship types

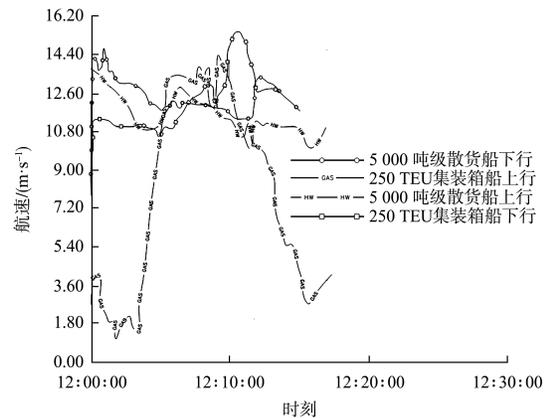


图 10 两种船型不同工况下的航速

Fig. 10 Speed under different working conditions of two ship types

由图可知,在设计5 a一遇通航水位流场、北风6级条件下,250 TEU集装箱船下行过弯时,最大操纵漂角和舵角分别是 7.5° 和 -35° ,船舶最大航速为14 km/h;5 000吨级散货船下行过弯时,最大操纵漂角和舵角分别是 -9.2° 和 -33° ,船舶最大航速为14.4 km/h。250 TEU集装箱船上行过弯时,最大操纵漂角和舵角分别是 -11.5° 和 -35° ,船舶最大航速为11.1 km/h;5 000吨级散货船上行过弯时,最大操纵漂角和舵角分别是 -16° 和 -35° ,船舶最大航速为11.4 km/h。

为减小船舶通过交汇口航段的操纵难度,设计船型下行航速控制在20 km/h以下,上行航速控制在7 km/h以上,在靠近弯道附近时,可根据具体情况控制航速,保持船舶与航道两侧岸壁的安全距离,并应充分考虑弯道附近的岸形对瞭望视线的遮挡。

3.4.3 船舶通过弯道的转弯半径

根据模拟试验数据,船舶上行或下行通过沙坪河-郁江交汇口弯道水域时,过弯最小转弯半径约为350 m,小于该航段设计转弯半径360 m。设计船型试验轨迹距离弯道凹岸侧最小距离为35 m,距离凸岸侧最小距离为40 m。

4 结语

1) 在进行航道交汇口设计时,对横向流速、流态、弯道半径、船舶交会和漂角等情况的处理非常复杂。将Y形衔接方案应用于交汇口航线的设计,可确保船舶航行的适航性和安全性。

2) 当运河航道受到地形、地物、地质和经济地理条件制约时,采取绕道而行,以直线为主、弯道为辅,将两者结合起来方能完成航道全线的

定线设计,并符合航行安全、减少工程难度、控制工程造价的要求。

3) 当船舶从郁江通过交汇口进入沙坪河时,为确保船舶操作性,建议提前减速,船位靠航道轴线右侧;反之,建议提前加速,船位靠航道轴线左侧。

4) 针对航道交汇口的设计优化,本文建立交汇口电子航道图和船舶数学模型,开展船舶双线通航操纵仿真模拟试验,研究成果可为同类运河工程的设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] 杨崧. 临涣船闸下游引航道优化设计[J]. 水运工程, 2023(11): 153-157.
- [2] 李燊名. 石板沙水道航道尺度优化及平面布置方案[J]. 珠江水运, 2024(7): 21-24.
- [3] 江涛, 钱黎辉, 于忠涛, 等. 来桂航道铜鼓滩—羊栏滩段航道优化设计[J]. 水运工程, 2022(5): 139-146, 190.
- [4] 沈立群, 陈雷. 碾盘山水电枢纽通航条件优化模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 61-66.
- [5] 李鸟英. 航道平面布置方案设计与优化[J]. 珠江水运, 2022(17): 30-32.
- [6] 艾万政, 丁天明. 桥区航道优化布置设计研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(1): 131-137.
- [7] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [8] 马劲. 船舶操纵仿真模拟试验在解决澳氹第四条跨海大桥桥群巷道效应问题中的应用[J]. 珠江水运, 2018(13): 46-47.
- [9] 孔宪卫. 桥区水域船舶通航安全研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [10] 杨雅涵. 基于运河通航水流条件的典型支流口治理措施数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.

(本文编辑 王传瑜)