



平陆运河马道枢纽上游航道主尺度论证*

袁 鹏¹, 高成岩², 吴志龙²

(1. 平陆运河集团有限公司, 广西 南宁 530000; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对限制性运河航道主尺度设计缺乏明确标准的问题, 以平陆运河马道枢纽上游航道为研究对象, 开展航道主尺度参数的论证研究。基于 2035 和 2050 年货运量预测及 5 000 吨级散货船为代表船型, 采用航道断面系数法、航行下沉量计算及航迹带宽度模型, 系统确定了航道设计航速、最小水深、最小宽度及弯曲半径等核心参数。提出航道断面尺度为 80 m(宽)×6.3 m(深), 弯曲半径为 360 m, 可保障船舶以 11.96 km/h 航速安全通行。该宽浅型断面设计在满足通航安全与经济性的同时, 显著降低岩石开挖工程量, 提升航道适应远期升级的灵活性。

关键词: 平陆运河; 限制性航道; 航道尺度

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0132-06

Demonstration of main dimensions for upstream channel of Madao Hub in Pinglu Canal

YUAN Peng¹, GAO Chengyan², WU Zhilong²

(1. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530000, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Addressing the lack of clear standards for the design of main dimensions in restricted canals, we focus on the upstream channel of the Madao Hub in the Pinglu Canal, conducting a demonstration research on its main channel parameters. On the basis of freight volume forecasts for 2035 and 2050 and using a 5,000-ton class bulk carrier as the representative ship type, we systematically determine key parameters such as design speed, minimum water depth, minimum width, and bending radius through methods including the channel cross-sectional coefficient approach, calculation of navigation sinkage, and ship track width modeling. The proposed channel cross-section of 80 m (width) × 6.3 m (depth) with a bending radius of 360 m can ensure safe navigation of vessels at a speed of 11.96 km/h. This wide-shallow section design not only meets navigational safety and economic efficiency but also significantly reduces rock excavation volume and enhances the flexibility for future channel upgrades.

Keywords: Pinglu Canal; restricted channel; channel dimension

平陆运河始于西江干流西津库区南宁横州市平塘江口, 跨沙坪河与钦江支流旧州江分水岭, 经钦州市灵山县陆屋镇沿钦江干流南下进入北部湾钦州港海域, 止于钦州港东航道起点。总体线路划分成 5 个区段, 分别为沙坪河段、分水岭段

(含旧州江)、钦江干流段、钦江城区段和入海口近海段航道^[1-2]。

本文针对限制性运河在库区段航道主尺度设计缺乏系统标准和明确依据的问题, 以平陆运河马道枢纽上游航道为具体研究对象, 开展限制性

收稿日期: 2025-01-20

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2600183); 中交水规院“揭榜挂帅”科技攻关项目(RP2025048681)

作者简介: 袁鹏(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通(公路、水运)工程建设。

航道主尺度论证。目前, 国内相关规范对高等级限制性航道的部分核心参数尚未给出具体建议值, 尤其缺乏结合船舶航行性能的系统性研究方法, 导致实际工程中往往依赖经验设计, 通航安全性与经济性难以协同优化。因此, 提取并论证航道主尺度参数, 对提升限制性航道设计的科学性、适应大吨位船舶通航需求具有明确的必要性和工程意义。

1 工程概况

平陆运河工程马道枢纽及上游航道工程航道线路起点为三阳桥, 与先导建设工程三标段相衔接, 沿沙坪河而上, 在沙坪镇南侧郁江调水入口处进入干地开挖区间, 终点位于马道枢纽上游引航道分界处, 全长约 14.35 km。

平塘江口—沙坪镇段属于平陆运河规划线路, 现状航道长约 31 km, 西津水库建库前可季节性通航 1~5 t 的小木船, 1964 年西津水库建成后, 回水区—沙坪镇段航道有较大改善, 西津水库正常挡水位 61.60 m 时, 航道尺度最小为 2.0 m×30 m×100 m (水深×宽×弯曲半径), 可通航 300 吨级左右的船舶。枯水期当西津水库蓄水位降低至最低通航水位时, 最浅滩险航道水深不足 1.0 m, 个别地方形成露头沙洲, 航宽不足 10.0 m, 只能通航几十吨的小船。

结合航道线路沿线河道特性, 该段航道线路主要分为沙坪河段和分水岭马道枢纽之前干地开挖段 2 个区间段, 见图 1, 其中沙坪河段线路长度约 7.5 km, 干地开挖段线路长度约 6.85 km^[3]。

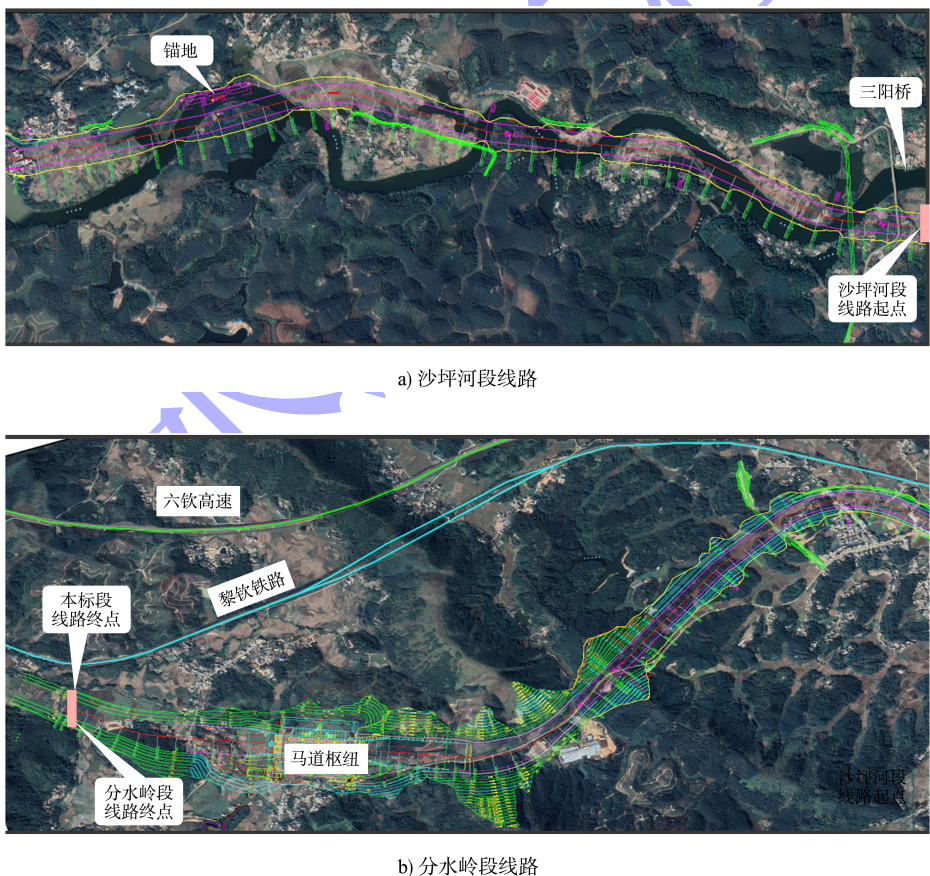


图 1 沙坪河段和分水岭段线路

Fig. 1 Routes of Shaping River section and Fenshuiling section

2 航道规模

2.1 运量预测

常规情景下,本段航道沿线生成的大部分货运量由于运至航道沿线港区和六景港区均需要一定距离的公路接驳运输,从港区集约发展和节省社

会总成本的角度来看,在六景港区接卸的经济性更优,采用常规预测方法时^[4],预测 2035、2050 年将分别达到 9 550 万、12 000 万 t,分货类、分上下行货运量预测见表 1。

表 1 常规方法预测马道枢纽上游航道货运量结果

Tab. 1 Forecast results of freight volume in upstream channel of Madao Hub using conventional methods

年份	航向	煤炭/ 万 t	金属 矿石/万 t	非金属 矿石/万 t	水泥/ 万 t	粮食/ 万 t	矿建 材料/万 t	集装箱		其他	合计
								箱量/万 TEU	货物质量/万 t		
2035	上行	2 000	1 400	1 000	0	430	0	70	950	360	6 140
	下行	0	0	100	1 000	0	1 000	70	1 150	160	3 410
	小计	2 000	1 400	1 100	1 000	430	1 000	140	2 100	520	9 550
2050	上行	1 800	1 350	950	0	700	0	140	1 900	800	7 500
	下行	0	0	50	900	0	950	140	2 100	500	4 500
	小计	1 800	1 350	1 000	900	700	950	280	4 000	1 300	12 000

2.2 设计船型

平陆运河规划航道通航技术等级为内河 I 级,根据经济技术性、环保性、适航性分析,设计代表船型为 5 000 吨级散货船,船型主尺度取 90 m×15.8 m×5.0 m(总长×总宽×满载吃水),其他为兼顾船型,马道枢纽上游航道作为平陆运河工程的一部分,设计船型与平陆运河工程总体一致,各通航船型尺度见表 2。

表 2 平陆运河通航船型尺度

Tab. 2 Dimensions of navigable ship types in Pinglu Canal

船型	等级	总长/m	总宽/m	满载吃水/m
散货船	1 000 吨级	45.0~50.0	10.8~11.0	2.6~3.0
	2 000 吨级	68.0~74.0	13.8~14.0	2.8~3.5
	3 000 吨级	74.0~80.0	15.5~15.8	3.4~3.8
	3 000 吨级	86.0~90.0	15.5~15.8	3.2~3.5
	5 000 吨级	86.0~90.0	15.5~15.8	4.8~5.2
集装箱船	70 TEU	54.0~60.0	10.8~11.0	2.4~3.0
	160 TEU	68.0~74.0	13.8~14.0	3.0~3.4
	200 TEU	68.0~74.0	15.5~15.8	4.2~4.8
	250 TEU	86.0~90.0	15.5~15.8	4.6~4.8

3 航道主尺度

3.1 设计航速

平陆运河按内河 I 级航道标准建设,可通航 5 000 吨级船舶。根据 50139—2014《内河通航标准》^[5]规定,航道通航保证率取 98%。马道枢纽—三阳桥段属于限制性航道。限制性航道由于受到

航道尺寸的限制,较开放水域航道会有较大的差异,主要表现在船舶阻力、船舶浮态以及兴波等方面,船舶航行受到浅水效应及岸壁效应的影响,航道尺度的确定需要综合考虑船舶尺度、航行速度、断面系数、断面形状以及通航条件等因素^[6-7]。

船舶在受限水域中航行存在极限航速,航速的大小主要与断面系数和等效深度有关。船舶速度接近极限航速时,所受阻力明显增大、燃料消耗明显增加、推进效率降低,船舶浮态也处于极不稳定状态,航速难以继续增加。在实际运行过程中,为保证航行安全及经济性,设计航速一般取极限航速的 80% 左右,这是船舶在受限水域实际航行时的上限航速。按照设计航速确定的航道断面尺度下,船舶实际运行时航速略低于设计航速时阻力减少值也是较为可观的^[8]。

对于内河限制性航道,GB 50139—2014《内河通航标准》和 JTS 180-2—2011《运河通航标准》^[9]未给出 I 级(5 000 吨级)限制性航道尺度的建议值,但规定了“限制性航道的断面系数不应小于 6,流速较大的航道不应小于 7”。JTS 181—2016《航道工程设计规范》^[10]给出了运河航道尺度计算方法,但对于航行速度、断面系数、断面形状以及通航条件等影响航道尺度的因素没有量化参数指

标。当船舶设计航速过低时, 船舶舵效低, 操纵性差, 通航效率低, 而航速过高时又将增加船舶油耗, 因此合理取定设计航速是限制性航道设计的关键。

经统计, 长江水系船舶设计航速普遍在 15~18 km/h, 集装箱船则更高, 可达到 20 km/h 以上。珠江水系船舶设计航速相对偏低, 通常在 12 km/h 左右。因此设计航速取 12 km/h, 对应的航道断面系数在 6~7。

3.2 航道最小水深

航道最小水深是指在当地一定的自然条件下, 满足设计船型满载吃水航行所要求的最小安全深度, 满足船舶在高速航行时, 无触底风险且阻力较小。对于限制性航道, 最小航道水深应包括船舶吃水以及富余水深, JTS 181—2016《航道工程设计规范》第 7.5.5 条规定了运河航道水深计算方法, 为:

$$h = T + \Delta t \quad (1)$$

式中: h 为航道水深, m; T 为船舶或船队的最大吃水, m; Δt 为富余水深, m。

对于内河限制性航道, 富余水深主要包括船舶航行下沉量和龙骨下富余水深。国际航运协会总结了国际上各种计算航行下沉量的方法, 有三种常用的计算方法, 分别是赫斯卡/盖里夫 (Huuska/Guliev) 方法 (ICORELS)、巴勒斯 II

(Barrass II) 方法和欧宇兹鲁 (Eryuzlu) 方法^[11]。Barrass 通过大量的试验研究^[12], 对其 Barrass II 公式进行了修改, 新的计算公式为:

$$\delta = \frac{C_B S^{0.81} v_k^{2.08}}{20} \quad (2)$$

式中: δ 为船舶航行下沉量, m; C_B 为船舶的方形系数, 取 0.85; v_k 为航速, kn; S 为阻塞系数。

根据式(1)和(2)计算得到的 5 000 吨级船舶航行下沉量为 0.5 m, 5 000 吨级岩石质底质航道的船舶龙骨下富余水深取 0.6 m, 则航道富裕水深为 1.1 m。

计算得到的航道最小水深为 6.1 m (5.0 m + 1.1 m)。

3.3 航道最小宽度

平陆运河平塘江口—马道枢纽段处于西津水库库区, 运河水面线呈现库区航道的一般特点, 水面线平稳, 比降较小, 支流来流为 20 a 一遇洪水时, 沙坪河入汇口—平塘江口段大部分流速分布于 0.4~1.0 m/s, 沙坪河入汇口—马道枢纽段几乎为静水。局部流速范围: 沙坪河入汇口—平塘江口段航槽内最大流速 1.77 m/s, 其中航道左边线最大流速 1.70 m/s, 航道中心线最大流速 1.17 m/s, 航道右边线最大流速 1.77 m/s; 沙坪河入汇口—马道枢纽段航槽内最大流速 0.84 m/s, 除临近沙坪河汇口处流速稍大以外, 其余位置处流速均在 0.05 m/s 以下。航道流速见表 3。

表 3 航道流速
Tab. 3 Velocity of channel

区段	支流洪水频率	航道左边线最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	航道中心线最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	航道右边线最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	航槽内最大流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
平塘江口— 沙坪河入汇口	5 a 一遇	1.28	0.94	1.02	1.28
	10 a 一遇	1.44	1.02	1.62	1.62
	20 a 一遇	1.70	1.17	1.77	1.77
沙坪河入汇口— 马道枢纽	5 a 一遇	0.08	0.15	0.27	0.27
	10 a 一遇	0.12	0.20	0.36	0.36
	20 a 一遇	0.15	0.84	0.43	0.84

JTS 181—2016《航道工程设计规范》第 7.5.3 条给出了运河双线航道宽度的计算方法, 为:

$$B_2 = 2B_1 + 2d + c \quad (3)$$

$$B_f = B_s + L \sin \beta \quad (4)$$

式中: B_2 为直线段双线航道通航宽度, m; B_1 为船舶或船队航迹带宽度, m; d 为船舶或船队外舷

至航道边缘的安全距离, m ; c 为船舶或船队间的航行安全距离, m ; B_s 为船舶或船队宽度, m ; L 为船舶或船队长度, m ; β 为船舶或船队航行漂角, ($^\circ$), 取 2.5° ; $2d+c$ 为各项安全距离之和, m , 取 1.5 倍航迹带宽度。

采用式(3)和(4)计算的参数取值和结果见表 4, 平塘江口—青年枢纽段航道船舶航行漂角取 2.5° , 计算得到的马道枢纽上游航道最小宽度为 70 m 。

表 4 航道最小宽度计算参数取值和结果
Tab. 4 Calculation parameter value and result of minimum channel width

船长/ m	船宽/ m	航行漂角/ ($^\circ$)	航迹带 宽度/ m	安全距离 之和/ m	航道最小 宽度/ m
90	15.8	2.5	19.73	29.60	70

3.4 航道断面尺度拟定

通过上述计算得到了限制性航道中满足船舶安全航行所需的最小航道水深和最小航道宽度。若采用最小水深和最小宽度的组合, 航道断面系数已小于 6, 不满足 50139—2014《内河通航标准》第 3.0.5 条要求。因此在满足船舶安全航行所需要的最小航道水深和最小航道宽度的条件下, 为达到某一特定航速并满足断面系数要求, 需要增加航道断面面积以减小船舶阻力。考虑工程建设条件以及远期发展趋势, 航道断面面积的增加主要采用增加航道宽度, 少量增加航道水深的方式, 形成宽浅型航道断面。采用宽浅型航道断面主要考虑了以下因素。

1) 平陆运河货运量需求大, 船舶密度大, 对于狭长的运河航道, 保证一定的航道宽度有利于减轻船舶会船时的相互影响, 提高航行安全保障, 提高水运通道的韧性。

2) 运河底质主要为岩石, 增加航道水深导致岩石开挖量较大, 投资敏感性高。

3) 运河工程以及经济带开发与珠江水运网开发、西部地区经济产业发展形成联动, 将产生更多的诱增需求, 远期存在更高等级船舶通航以及航道提等升级的需求。宽浅型航道断面可采用向内挖深的方式实现航道升级, 不会对已建成的边坡护岸产生影响。

根据以上原则, 结合设计代表船型尺度, 航道断面尺度为 80 $m \times 6.3$ m (航道宽度 $\times$ 航道水深), 断面系数为 6.88, 5 000 吨级散货船航速可达到 11.96 km/h 。

3.5 最小弯曲半径

航道最小弯曲半径取 4 倍货船设计船长, 为 360 m 。同时考虑转弯角及水流条件的影响, 针对转弯角大于 30° 的航道, 应加大转弯半径。局部无法满足最小弯曲半径要求时, 要求进行加宽处理。

综合考虑船舶尺度、航行速度、断面系数、断面形状以及通航条件等因素, 马道枢纽上游航道设计尺度为 80 $m \times 6.3$ $m \times 360$ m 。

4 结语

1) 航道关键设计参数实现定量化确定。本文提出航道断面尺度为 80 m (宽) $\times$ 6.3 m (深), 弯曲半径 360 m , 断面系数 6.88, 可满足 5 000 吨级船舶以 11.96 km/h 航速安全通航, 各项指标均优于规范最低限值。

2) 宽浅型断面结构兼具安全性与经济性。在保障通航安全(断面系数 >6.5)的同时, 降低岩石地基开挖量, 节约工程投资, 并为远期航道升级预留条件, 具备良好的全生命周期适应性。

3) 适应库区水文特征与船舶操纵需求。结合西津库区低流速、缓比降的水文特点, 通过控制航速与弯曲半径(≥ 4 倍船长), 有效减轻浅水与岸壁效应, 提升船舶操纵稳定性。

4) 成果为运河限制性航道主尺度设计提供了系统、量化的技术依据, 后续可结合实船试验与航行模拟, 对航道尺度-航速-阻力关系做进一步优化。

参考文献:

- [1] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.
LIU N. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 1-11.

- [2] 邢佩旭,潘海涛.新时期运河战略及平陆运河规划建设实践[J].水运工程,2024(9):1-6.
XING P X, PAN H T. New era canal strategy and practice of Pinglu Canal planning and construction [J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 1-6.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司.西部陆海新通道(平陆)运河初步设计总报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2022.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design report for the Pinglu Canal of the new western land-sea corridor [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [4] 吕小龙,吴澎,刘晓玲.平陆运河航道等级论证[J].水运工程,2021(10):266-270.
LYU X L, WU P, LIU X L. Demonstration on waterway classification of Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 266-270.
- [5] 内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [6] 高成岩,程建中,蔡翠苏,等.平陆运河水资源论证[J].水运工程,2024(11):8-12,47.
GAO C Y, CHENG J Z, CAI C S, et al. Water resources assessment for Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 8-12, 47.
- [7] 饶思梁.内河航道尺度与通航能力关系研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
RAO S L. A Study on the relationship between inland waters channel dimensions and navigation capacity [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [8] 冯伟.通航建筑物中间渠道断面系数和船舶阻力关系研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
FENG W. Study on the section coefficient and ship resistance of navigable buildings [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [9] 运河通航标准:JTS 180-2—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
Navigation standard of canal: JTS 180-2-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [10] 航道工程设计规范:JTS 181—2016[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
Design Code for Waterway Engineering: JTS 181-2016 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [11] 吴澎.深水航道设计[M].北京:人民交通出版社,2011.
WU P. Deepwater channel design [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [12] 缪吉伦,吴俊,李晓飙,等.浅窄内河航道船舶航行下沉量试验研究[J].中国港湾建设,2020,40(12):20-24.
MIAO J L, WU J, LI X B, et al. Experimental study on navigation subsidence of ships in shallow and narrow inland waterway [J]. China harbour engineering, 2020, 40(12): 20-24.

(本文编辑 王璁)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部