

跨河建筑物控制下长江扇沱水道航道布置

周玉洁, 林 勇, 谢玉杰, 胡 阳

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 渝怀铁路长寿长江大桥于三峡水库变动回水区长江扇沱水道跨越长江, 水道被长寿桥主跨桥分为左右两孔, 该桥梁不满足 I 级航道单孔双向或双孔单向通航净空尺度要求。从通航安全角度出发, 结合代表船型及航道特点, 以《航道工程设计规范》要求的 I 级航道宽度作为跨河建筑物的最小跨度, 结合河道条件在高水位期开通右孔为辅助通航孔, 通过合理设置浮标界定桥区通航水域, 并采取加装桥梁防撞主动预警系统等措施保障通航安全。

关键词: 桥区航道; 长江; 航道布置; 通航孔; 最小跨度

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0085-06

Channel layout of Shantuo waterway in the Yangtze River under control of river crossing structures

ZHOU Yu-jie, LIN Yong, XIE Yu-jie, HU Yang

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

Abstract: The Changshou Yangtze River Bridge from Yubei to Huaihua Railway crosses the Yangtze River at the Shantuo Waterway in the fluctuating backwater area of the Three Gorges Reservoir. The waterway is divided into left and right navigation holes by the main span bridge of Changshou Bridge. The bridge does not meet the requirements for the navigation clearance of single span two-way or double span one-way in Class I channel. From the perspective of navigation safety, this paper takes the width of Class I channel required by the *Code for Design of Waterway Engineering* as the minimum span of river crossing structures combining with representative ship types and channel characteristics, opens the right hole as an auxiliary navigation hole in combination with river channel conditions during high water level periods, defines the boundaries of the navigable water area in the bridge area by reasonably setting buoys, and takes measures such as adding a bridge anti-collision active early warning system to ensure navigation safety.

Keywords: bridge area channel; the Yangtze River; channel layout; navigation hole; minimum span

全国内河航道通航里程约 12.7 万 km, 跨越内河等级航道 (VII 级以上航道) 的桥梁约 1.7 万座, 随着综合立体交通网建设加快实施, 过江通道数量不断增多。截至 2019 年底, 长江干线跨航道桥梁已建 128 座。近年来我国水路运输需求持续增长, 港口和船舶大型化发展趋势明显, 船舶通过桥区的安全任务越来越重。

早期建设的桥梁由于法律要求和通航净空尺度标准的迭代更新, 航道等级提升、船舶大型化发展导致我国内河高等级航道普遍存在大量现有桥梁通航净空不足的问题^[1]。一方面跨河建筑物对桥区航道布置起到了控制性的影响; 另一方面合理的航道布置、规范桥区水域船舶通航秩序是桥梁安全运行的重要保障。

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 周玉洁 (1986—), 女, 高级工程师, 从事内河港口与航道工程设计与研究。

1 工程概况

渝怀铁路是连接重庆市渝北区和湖南省怀化市的国铁 I 级双线电气化铁路, 2000-12-16 开工建设, 2006 年 1 月投入临管运营。渝怀铁路长寿特大桥采取主跨 (144+2×192+144) m (连续钢桁梁) 于长江上游航道里程 593.1 km 跨过扇沱水道。桥梁涉水主墩从左至右分别为 6[#]~8[#]桥墩。

长江全长 6 300 km, 流域面积在 180 万 km² 以上, 是我国第一大河。长江干线朝天门—涪陵河段扇沱水道 (589~595 km), 现状航道技术等级为 II 级, 最小维护尺度为 3.5 m×100 m×800 m (水深×直线段宽度×弯曲半径), 根据《长江干线航道发展规划 (2035 年)》^[2] 等相关文件要求, 到 2035 年, 重庆 (寸滩)—武汉航道等级规划为 I-(5) 级航道标准, 远期规划最小航道维护尺度标准为 4.5 m×(150~200) m×1 000 m, 可通航 5 000 吨级内河船舶。

桥区河段正在进行长江上游朝天门—涪陵河段航道整治工程建设, 该工程设计标准为 I-(5) 级航道; 桥区河段航道尺度为 4.5 m×150 m×1 000 m; 所有代表船型可单线通行, 5 000 t 干散货船、300 TEU 集装箱船、滚装货船 (600 车位) 等代表船型双线通行; 通航保证率为 98%。

2 桥区航道条件

2.1 桥区设计通航水位

桥区河段属于三峡枢纽回水变动区, 依据长寿水文站水位-流量关系曲线统计分析得出, 当流量大于 2.2 万 m³/s 后, 桥区河段不受三峡枢纽正常蓄水位的影响, 开始恢复天然河道特性。

航道等级规划为 I-(5) 级航道, 最高通航水位标准为 20 a 一遇, 根据桥位上下游鱼嘴水文站和长寿水文站的水位-流量关系曲线, 在 20 a 一遇流量的情况下, 两站的水位已不受三峡坝前水位的影响。根据两站水位内插得到桥位的水位值为 187.68 m, 该水位已高于三峡枢纽的正常蓄水位, 因此最高通航水位取值 20 a 一遇的洪水位对应桥位处水位值 187.68 m。最低通航水位标准为保证

率 98% 流量时三峡运行方式多组工况的下包线水位为 149.38 m。

2.2 桥区河段河型河势及河床演变

扇沱水道 (589~595 km) 位于长江上游航道三峡水库变动回水区中下段, 同时具有库区和天然河道双重特性, 为单一弯曲河道, 桥轴线位于上下游两个反向弯道的连接段。上游弯道弯曲半径约 1.5 km, 左岸为凹岸, 右岸为凸岸; 下游弯道弯曲半径约 1.4 m, 右岸为凹岸, 左岸为凸岸, 两弯道连接段约 2.0 km。

桥区河段河道控制性节点为: 1) 桥轴线上游 1.0~3.0 km 右岸有一个长约 2.0 km、宽约 0.4 km 的石盘伸入江中, 向左侧挤压主航道, 主航道内满足 3.5 m 水深的航宽约 200 m, 石盘顶高程最高约 153.0 m (筲箕石), 因此船舶在桥轴线上游 1.0 km 以上仅能靠左岸行驶。2) 桥轴线下游 0.5~1.0 km 右岸有长约 1.0 km、宽约 0.28 km 的凸嘴浅区, 凸嘴顶高程最高达 164.0 m (娃娃滩)。

对比分析建桥前 2001 与 2019 年测图可知, 桥区河段河道地形较为稳定, 桥区附近河床演变受桥位上游弯道水流影响, 凸岸 (右岸) 淤积, 凹岸 (左岸) 冲刷, 右岸缓流区存在局部淤积, 18 年以来河床断面最大冲淤点为主航槽 (6[#]墩) 附近河床下切 0.35 m。

2.3 桥轴线断面河道条件

桥位距离上游弯道出口约 350 m, 距离下游弯道入口约 1.65 km。河道断面左岸岸坡较陡, 右岸较缓, 受上游较近距离的弯道主导河岸控制 (左岸), 河道内深槽靠左, 右岸为边滩。最低通航水位时, 桥轴线断面水面宽度 355 m, 深泓点水深 23.0 m, 满足现状航道维护水深 3.5 m 的宽度为 340 m; 最高通航水位时, 桥轴线断面水面宽度 355 m, 深泓点水深 58.0 m。

渝怀铁路长寿长江大桥以主跨 2×192 m 桥式跨越河道, 河道被长寿桥 6[#]~8[#]桥墩分割为 4 个区域, 见图 1。其中: 1) 6[#]桥墩至左水边线区域: 6[#]桥墩距离最低通航水位左水边线约 40 m, 距离最高通航水位左水边线约 105 m, 该区域

较窄且左岸岸坡较陡, 因此不满足通航条件; 2) 6[#]、7[#]桥墩之间的左主孔区域: 该区域位于河道主流、深槽, 各种水位期均满足水深条件; 3) 6[#]、7[#]桥墩之间的右主孔区域: 该区域位于弯道出口凸岸(右岸)缓流、浅滩, 在最低通航水位时边滩出露, 仅约 115 m 满足水深条件, 中高

水期(水位高于 159.20 m 时)该区域全断面均满足水深要求; 4) 7[#]桥墩至右水边线之间的区域: 该区域远离左岸主流区域, 位于弯道出口凸岸(右岸)浅滩, 在最高通航水位时水面宽度仅 90 m, 在最中、低水位期大部分断面不过水, 不满足通航条件。

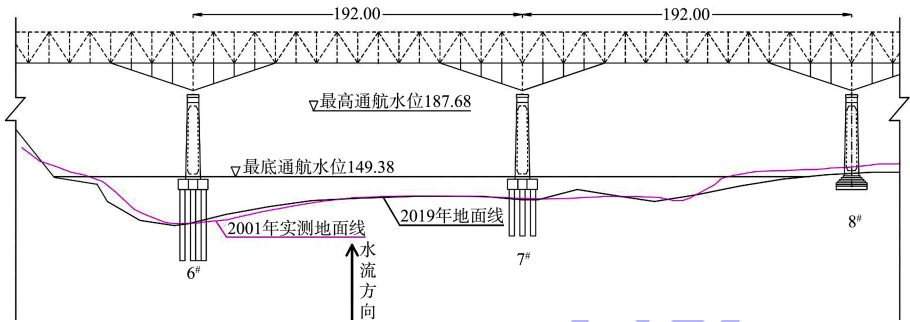


图 1 渝怀铁路长江桥桥位断面 (单位: m)

2.4 桥区河段水流条件

2021-03-07(起讫水位 164.60~164.62 m)实测流速、流向资料见图 2, 桥轴线上游 3 倍代表船长范围内(948 m), 水流流速最大为 0.31 m/s, 主流位于河道中偏左岸, 水流顺直, 桥轴线与河

道主流基本正交, 但由于河势整体微弯, 桥轴线与偏右岸缓流区的水流存在一定夹角。最大夹角出现在上游 3 倍代表船长的位置最右岸流线, 交角为 12°, 对应流速为 0.14 m/s, 横向流速为 0.03 m/s。

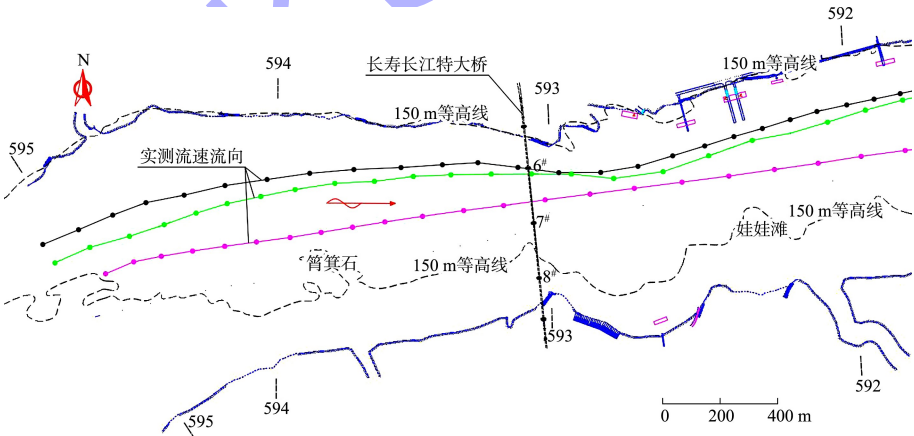


图 2 桥区实测流速、流向

为了分析航道通航水流条件, 对桥区河段数值模拟计算工况选择受三峡枢纽影响的临界流量 2.2 万 m³/s 对应三峡枢纽正常蓄水位 175 m、临界流量 2.2 万 m³/s 对应该流量最低水位、规划航道等级 I 级对应的最高通航流量(20 a 一遇), 共 3 个代表工况。

数学模型计算成果显示各种代表工况下流速

相对较大河段均分布在桥位下游, 最大横向流速出现在左主孔上游 30 m 范围内靠左岸区域: 1) 流量为 7.5 万 m³/s 工况下, 工程河段沿程水流流速 2.11~3.91 m/s, 桥区河段最大横向流速 1.92 m/s; 2) 流量为 2.2 万 m³/s、水位 159.06 m 工况下, 工程河段沿程水流流速 1.07~2.94 m/s, 最大横向流速 1.92 m/s; 3) 流量为 2.2 万 m³/s、水位

175.00 m 工况下, 工程河段沿程水流流速 0.77 ~ 1.41 m/s, 最大横向流速 0.30m/s。

受河道地形条件及桥墩影响所致, 且在桥位下游分布有深沱, 桥位附近比降相对较大。流量为 7.5 万 m³/s 工况下, 工程河段平均比降 0.16‰; 流量为 2.2 万 m³/s、水位 159.06 m 工况下, 工程河段平均比降 0.14‰; 流量为 2.2 万 m³/s、水位 175.00 m 工况下, 工程河段平均比降 0.03‰。

3 通航环境现状

受桥区河段河型河势影响, 上下游右岸浅区为控制性节点, 上下行船舶均在左岸主航道行驶,

在较短距离内难以调整至右孔, 且桥轴线断面右主孔低水位期局部区域水深不足, 目前桥区全年均采用 6[#]、7[#]桥墩之间孔跨单孔双向通航。实测船舶航迹线显示: 下行船舶靠左行驶, 下行船舶航迹线与 6[#]桥墩最小距离仅 64.67 m, 上行船舶航迹线与 7[#]桥墩最小距离为 42.22 m。

桥区航标配布情况为: 右岸桥轴线上游 280 m 侧面标(扇沱桥右 1)与桥轴线下游 800 m 侧面标(娃娃滩)连线, 左岸桥轴线上游 360 m 侧面标(扇沱桥左 1)与桥轴线下游 150 m 侧面标(鳝鱼尾)连线界定出 6[#]、7[#]桥墩之间 192 m 孔跨为通航水域, 见图 3。

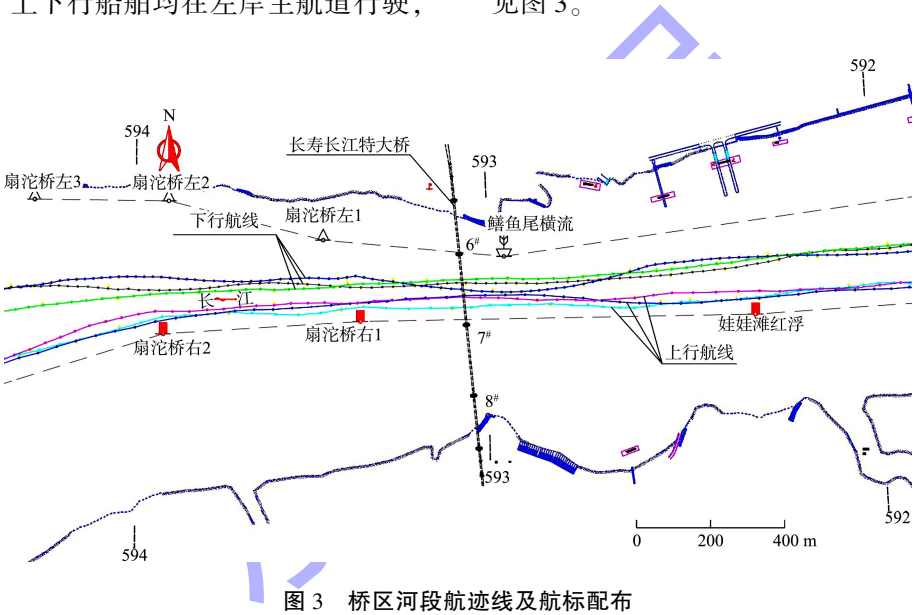


图 3 桥区河段航迹线及航标配布

4 桥区河段航道布置

桥区航道布置的关键问题是科学论证航道宽度^[3]。目前我国桥区航道的布置方法主要是参考《内河通航标准》^[4]、《长江干线通航标准》^[5]及《航道工程设计规范》^[6]的相关要求。

4.1 按《内河通航标准》《长江干线通航标准》计算过河建筑物最小通航净宽

为了保证船舶安全通过桥区河段, 减小桥梁对通航的影响, 《内河通航标准》对跨河建筑物的净宽要求包括船舶的航迹带宽度^[7]、船间间距、船与建筑物墩部的最小距离、弯道附加宽度^[8]等, 特别是受横向流速这一重要参数影响, 当桥区水域横向流速大于 0.8 m/s 时, 需要一孔跨过通航水域。

依据数模计算的桥区水流条件(最大横向流速), 采用《内河通航标准》《长江干线通航标准》, 分析计算各代表工况下, 代表船型(总长×型宽×设计吃水为 223 m×32.4 m×3.5 m)所需的单向通航净宽、双向通航净宽值。

根据通航代表船型对应的大桥桥区河段通航等级确定为 I-(3) 级, 查表得到: 单孔双向通航净宽为 110 m; 双孔单向通航净宽为 220 m。

《内河通航标准》《长江干线通航标准》规定, 天然和渠化河流上过河建筑物的法线方向与水流流向的交角不大于 5°时, 通航净宽可按下列公式计算:

$$B_{m1} = B_F \Delta B_m + P_d \tag{1}$$

$$B_{m2} = 2B_F + b + \Delta B_m + P_d + P_u \tag{2}$$

$$B_F=B_S+L\sin\beta \tag{3}$$

式中： B_{m1} 为单孔单向通航净宽(m)； B_F 为船舶或船队航迹带宽度(m)； ΔB_m 为船舶或船队与两侧桥墩间的富余宽度(m)，I级航道可取 $0.6B_F$ ； P_d 为下行船舶或船队偏航距(m)； B_{m2} 为单孔双向通航净宽(m)； B_S 为船舶或船队宽度(m)； b 为上下行船舶或船队会船时的安全距离(m)，取 B_S ； P_u 为上行船舶或船队偏航距(m)，取 $0.85 P_d$ ； L 为顶

推船队或货船长度(m)； β 为船舶或船队航行漂角($^{\circ}$)，I级航道可取 6° 。

《内河通航标准》《长江干线通航标准》规定，当水上过河建筑物轴线的法线方向与水流流向的交角大于 5° 且横向流速大于 0.3 m/s 时，其通航净空宽度应加大。

分别计算各代表工况下所需要的过河建筑物最小通航净宽，结果见表1。

表 1 过河建筑物最小通航净宽计算结果

工况	船型	船型尺度/m	航迹带宽度/m	最大横流/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	单向通航净宽/m	双向通航净宽/m
流量 $2.2\text{ 万 m}^3/\text{s}$ +坝前水位 175 m	通航代表船队	$223\times32.4\times3.5$	55.71	0.30	119.14	232.75
流量 $2.2\text{ 万 m}^3/\text{s}$ +该流量最低水位	($4\times3\text{ 000 t}$ 船队)			0.54	162.14	318.75

按照规划航道等级I级、最不利工况20 a一遇时，横向流速大于 0.8 m/s ，需要一孔跨过通航水域。

4.2 按照《航道工程设计规范》计算航道尺度

《内河通航标准》明确指出，内河航道弯曲段的宽度应在直线段航道宽度的基础上加宽，其加宽值应通过分析计算或试验研究确定。但究竟加宽多少，标准中并没有明确界定。

根据《航道工程设计规范》，弯曲段航道宽度应根据弯曲半径、流速、流向、流态、船型或船队长度及操纵性能因素确定。当弯曲半径小于等于3倍设计船队长度时，应在直线段航道宽度的基础上加宽；当弯曲半径大于3倍设计船队长度，但小于6倍设计船队长度时，应根据水流等具体条件确定加宽值；当弯曲半径大于6倍设计船队长度时，弯曲段航道宽度可不加宽。弯段航道加宽值宜通过实船试验或船舶操作模拟试验确定。

按照《长江上游朝天门—涪陵段航道整治工程初步设计》^[9]的通航代表船型尺度为 $223\text{ m}\times32.4\text{ m}\times3.5\text{ m}$ ，即当弯曲半径大于6倍设计船队长度 1 338 m 时，弯曲段航道宽度可不加宽，根据河型河势及实测航迹线显示，桥位虽然位于弯道出口，但是弯道半径约 1 600 m ，大于6倍设计船队长度 1 338 m ，航道宽度不需要加宽，即双线航道宽度值为 150 m 。

4.3 桥梁净宽分析

建筑物墩部存在大量的紊流漩涡区，在漩涡区内，水流条件复杂，复杂的水流不但会对船舶产生吸引作用，而且在此区域内，船舶的保向性和旋回性都较差^[10]。因此桥梁有效通航净宽除了扣除桥墩宽度以外，还应扣除桥墩紊流宽度。

根据《内河通航标准》规定，当水上过河建筑物的墩柱附近可能出现碍航紊流时，其通航孔净宽可在标准5.2.2条规定的通航净宽基础上加大，加大值宜通过模拟试验研究确定。桥墩紊流宽度参考《长江干线通航标准》中的公式计算：

$$E=0.88K_s\nu^{0.75}b^{0.56}h^{0.44} \tag{4}$$

式中： E 为通航孔两侧桥墩紊流宽度(m)； K_s 为与桥墩形状相关的系数，取 1.0 ； ν 为墩前水流流速(m/s)； b 为墩形计算宽度(m)； h 为桥墩附近水深(m)。

根据长寿桥竣工资料，分别计算在各种代表工况下左右两通航孔的紊流宽度，扣除桥墩宽度、桥墩紊流宽度后，计算得出桥梁有效通航净宽见表2。大桥两主孔($2\times192\text{ m}$)内满足长江干线(三峡大坝—小南海河段)桥梁最小通航净空高度 24 m 的宽度均为 168.40 m 。对比分析各代表工况下满足桥梁最小净空高度的条件，桥梁有效通航净宽见表3。

表 2 桥梁有效通航净宽计算结果

工况	桥墩	墩形系数	墩前流速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	桥墩附近 水深 h/m	桥墩宽度/ m	紊流宽度/ m	紊流半宽/ m	桥梁净宽/ m
20 a 一遇流量	6 [#]	1.2	2.98	58.18	7.11	42.94	21.47	144
	7 [#]	1.2	3.12	44.15	7.11	39.36	19.68	
临界流量+该流量最低水位	6 [#]	1.2	1.84	36.24	8.09	26.11	13.05	158
	7 [#]	1.2	2.40	22.21	8.09	25.69	12.84	
临界流量+坝前水位 175 m	6 [#]	1.2	0.98	52.18	7.82	18.75	9.37	156
	7 [#]	1.2	1.15	38.15	7.82	18.42	9.21	

表 3 各工况下桥梁有效通航净宽

工况	船型	单向通航净宽/m	双向通航净宽/m	桥梁净宽/m
流量 2.2 万 m^3/s +坝前水位 175 m	通航代表船队	119.14	232.75	156
流量 2.2 万 m^3/s +该流量最低水位	(4×3 000 t 船队)	162.14	318.75	158

4.4 桥区航道布置研究

按照《内河通航标准》《长江干线通航标准》所要求的的过河建筑物最小通航净宽，桥梁仅在桥区河段受三峡枢纽正常蓄水位影响时(流量小于 2.2 万 m^3/s)满足跨河建筑物单向通航净宽要求。

桥梁改建耗资巨大，若对跨河建筑物的净宽不满足《内河通航标准》要求的桥区河段采取通航限制措施，流量大于 2.2 万 m^3/s 后限制通航，将大幅降低航道的使用率。长江横贯我国西、中、东三大经济地带，集“黄金水道”和“黄金岸线”于一身，是西部唯一的水上出海通道，船舶航行密度较大^[11]，故通航限制措施对长江水路交通运输大动脉影响巨大。

跨河建筑物的跨度不能小于可航水域的宽度，也可以说弯曲航道的宽度即是跨河建筑物的最小跨度，这也说明，对于此航道而言，其上空的跨河建筑物跨度不应小于根据《航道工程设计规范》计算出的 I-(5)级双线航道宽度值 150 m。

结合桥区航道条件，考虑长寿桥修建至今未发生船桥碰撞事故，也未发生因为桥梁修建导致的海损事故，可将航道宽度作为跨河建筑物的最小跨度，并合理设置浮标界定桥区河道通航水域，并加装桥梁防撞主动预警系统，降低船撞的风险。结合河道地形分析，在高水位期开通右孔为辅助通航孔，即上行船舶通过右孔上行，右孔为河道凹岸，整体流速小于左孔，更有利于船舶上行。

5 结论

1)2000 年建设的跨长江长寿大桥由于航道等级提升、船舶大型化发展带来了净空尺度不够问题。(2×192)m 的桥跨布置仅在桥区河段在受三峡枢纽正常蓄水位影响时(流量小于 2.2 万 m^3/s)满足跨河建筑物单向通航净宽要求。桥梁改建耗资巨大，若采取通航限制措施将大幅降低航道的使用率。

2)为了确保船舶航行的方便与安全，以航道宽度作为跨河建筑物的最小跨度。经复核，桥梁净宽满足《航道工程设计规范》要求的 I-(5)级双线航道宽度。结合桥区航道条件，考虑桥区河段未发生因为桥梁修建导致的海损事故，桥区河段在设置安全保障设施的前提下采用单孔双向通行，通过加装桥梁防撞主动预警系统降低船撞的风险，并通过合理设置浮标界定桥区河道通航水域等措施，并在高水位期开通右孔为辅助通航孔，采用双孔单向通行，增大船舶的有效通航净宽，保障通航安全。

参考文献：

[1] 李文艳,黄力,李歌清,等.山区航道跨河桥梁通航净空尺度研究[J].水运工程,2021(7):142-148.
[2] 长江航道规划设计研究院.长江干线航道发展规划(2035 年)[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2020.
[3] 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.