



山区河流复杂桥群河段通航水域研究

吴林, 曾敏, 刘泓江

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川成都610017)

摘要: 城区段大型山区河流受两岸城市规划、行洪、征地等多因素限制, 新建跨河桥梁线路选择较为困难; 此外还存在已建跨河建筑物较多且修建年代并不一致, 形成复杂的桥群河段且各桥梁的通航技术标准各异的情况。采用平面二维水流数学模型对拟建大桥所在桥群河段水动力条件、有效通航水域范围进行分析研究, 同时结合船舶操纵模拟试验对拟建大桥修建后的桥墩布置情况、船舶航行通过桥群河段的安全性进行研究。结果表明, 经过工程措施后, 桥区河段的通航水流条件得到改善, 拟建大桥船撞概率极小, 桥群河段确定的通航水域是合理的。

关键词: 山区河流; 桥群河段; 通航风险; 船舶操控模拟

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0043-05

Navigable water area of river segments with complicated bridge groups in mountainous rivers

WU Lin, ZENG Min, LIU Hong-jiang

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

Abstract: Due to urban planning, flood discharge, land acquisition, and other factors, it is difficult to select new river-crossing bridge routes for large mountainous rivers in urban areas. In addition, many buildings have been built across the river, and they have been built in different years, which thus forms river segments with complicated bridge groups, and each bridge has different technical standards for navigation. This paper uses a planar two-dimensional flow mathematical model to analyze in detail the hydrodynamic conditions and the range of effective navigable water area of the river segments with bridge groups for the bridge to be built. At the same time, through the ship control simulation test, the paper studies the arrangement of piers and the safety of ships sailing through the river segments with bridge groups after the bridge is built. The results show that after engineering measures are implemented, the navigable flow condition of the river segments in the bridge area is improved, and the ship collision probability for the bridge to be built is very small. Therefore, the navigable water area determined by the river segments with bridge groups is reasonable.

Keywords: mountainous river; river segments with bridge groups; navigation risk; ships maneuvering simulation

随着沿江两岸城区段经济的发展, 两岸货运物流以及人们出行对过江通道的需求日益迫切, 但现有桥梁数量不能满足需要。一大批桥梁正在兴建以及规划之中, 造成城区段桥梁密度增加, 形成通航环境极其复杂的桥群河段。

刘佳仑^[1]基于二维流场数值模拟的桥群河段

通航影响研究, 从桥群区流场仿真试验出发, 分析不同桥梁布设方案对桥群区流场分布的影响, 得出桥群桥梁轴线流速计算公式, 总结桥群区流场整体变化趋势; 宋禹辰等^[2]将二维数值模拟应用在多桥梁河段通航安全评价中, 概化桥墩、碎石等碍航结构, 综合考虑上下游航电枢纽的调度

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 吴林(1982—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计。

规律，计算不同工况下河段桥群对船舶通航的影响，并对航线开放时间提出建议；王红兵^[3]对桥群河段通航环境存在的风险进行识别研究，可有效治理桥群存在的安全隐患，妥善解决桥梁安全和水上通航安全的矛盾。

以上研究对桥群河段的通航水流条件及安全隐 患进行分析，但根据《内河通航标准》^[4]第 5.1.7 条：在两座相邻布置的水上过河建筑物近侧建设第 3 座水上过河建筑物时，其通航孔应加大并对应布置，或采用一孔跨过通航水域。目前，相关规范和 研究尚未对桥群河段通航水域给予明确的规定。因

此，本文以成达万高铁涪江桥^[5]为例，利用平面 二维水流数学模型提供的桥群河段水动力边界开 展船舶操控仿真模拟试验研究，以确定桥群河段 桥梁间通航水域，优化桥梁通航孔墩位布置，为 桥梁方案布置提供科学依据。

1 工程概况

为减小拆迁及对城区的分隔，使线路出站后 与既有达成铁路共用通道，成达万高铁涪江桥桥 位选择具有唯一性。工程河段通航环境见图 1。



图 1 工程河段通航环境

虽然本工程建成后老达成铁路桥将拆除，但 短短 340 m 河段内涪江六桥、成达万高铁涪江桥 和新达成铁路桥 3 座桥梁形成桥群，涪江六桥和 新达成铁路桥航评批复通航等级分别为 IV 和 V 级 航道标准，但根据《四川省综合立体交通网规划纲

要(2021—2035 年)水运专项规划》^[6]的四川省内 河高等级航道布局规划方案，桥区河段涪江发展 规划技术等级为 III 级，加上袁家坝江心洲分流口 的影响，通航条件相当复杂，拟建桥位上下游的 主要跨河建筑物见表 1。

表 1 工程河段主要跨河建筑物

跨河建筑物	位置	建成年份	航道等级	主通航孔	航评情况
老达成铁路桥	上游 1 540 m	1990	-	2×64 m	未做航评
涪江六桥	上游 240 m	在建	IV 级	320 m	2018 年航评批复
新达成铁路桥	下游 100 m	2008	V 级	2×80 m	2004 年航评批复

按照《内河通航标准》第 5.1.7 条：靠近布置 的水上过河建筑物的数量不宜超过 2 座。在 2 座 相邻布置的水上过河建筑物近侧建设第 3 座水上 过河建筑物时，其通航孔应加大并对应布置，或 采用一孔跨过通航水域。但这 3 座桥梁的通航技

术标准不一致，给成达万高铁涪江桥的通航研究 带来极大的难题。为此，本文利用平面二维水流 数学模型提供的桥群河段水动力边界开展船舶操 控仿真模拟试验研究^[7]，以确定桥群河段的通航 水域。

2 航道水流条件分析

由于拟建大桥所处河段上游微弯, 下游较为顺直, 本文根据《水运工程模拟试验技术规范》^[8]的要求, 综合考虑拟建大桥所在河段的河势及水文资料因素, 模型的范围选择为推荐桥型桥轴线

上游 2.7 km 至推荐桥型下游 1.4 km。为详细反映河道形态, 对不同水位边界情况下将计算区域剖分网格, 网格尺度纵向约 10 m、横向约 10 m, 并对局部区域进行加密处理。工程河段数学模型模拟范围见图 2。

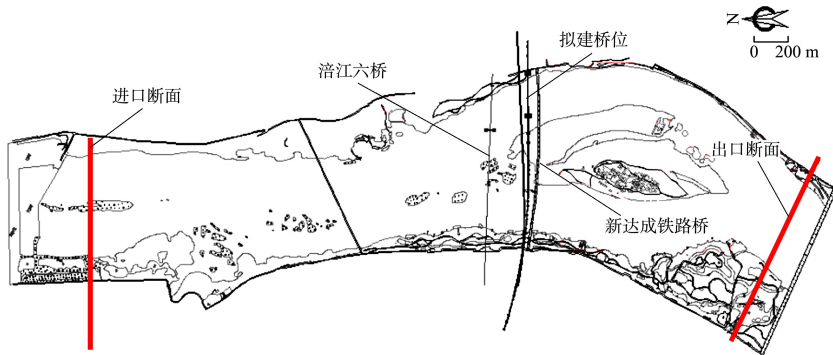


图 2 工程河段数学模型模拟范围

模型采用 2020-08-01 的实测水位进行验证和中水流量工况下分汊河段开展分流比验证, 采用平面二维水动力模型求解法得到的流速计算结果与相应实测系列较为吻合, 流速计算值沿断面分布趋势与实测值基本一致, 上述验证表明所建数学模型具有足够的计算精度, 且满足《水运工程模拟试验技术规范》的技术要求, 能够较为准确地模拟该河段水流的运动特性。

本文是计算定场流的情况, 所以在确定上下游边界条件时不需流量和水位过程, 只需要上游来水流量和下游水位即可。3 座桥梁的通航技术标准不一致, 根据《内河通航标准》6.2.1 节规定, 对于高于设计最高通航水位历时很短的山区性河流, III 级航道设计最高通航水位可采用 10 a 一遇洪水水位, IV、V 级航道设计最高通航水位可采用 3 a 一遇洪水水位。桥群河段下游 14.0 km 的过军渡枢纽运行方式如下: 1) 枯期在正常蓄水位 275.50 m 与消落水位 275.30 m 之间运行; 2) 汛期为了泄洪排沙, 减少水库泥沙淤积, 当入库流量小于 2 000 m³/s, 维持正常蓄水位运行; 当天然来流量大于等于 2 000 m³/s, 电站停机, 全闸打开拉沙泄洪。

为进一步分析桥群河段的通航水流条件, 找到最不利工况, 本文结合桥群河段下游 14.0 km 过军渡枢纽运行进行 4 种工况的计算, 计算工况见表 2。

表 2 数学模型计算工况及边界条件

工况	上游来流量/(m ³ ·s ⁻¹)	出口水位/m
敞泄流量	2 000	275.02
中水流量	5 000	276.54
3 a 一遇	9 240	278.50
10 a 一遇	15 500	280.40

由于桥群河段左岸湿地公园侵占部分通航水域, 恶化了桥区水流条件。因此, 拟对湿地公园进行疏浚, 并最大程度改善下游已建新达成铁路桥的通航条件。根据数学模型计算结果, 在湿地公园疏浚后, 桥区河段最大流速减少 0.10~0.46 m/s, 桥区河段最大横向流速减少 0.16~0.33 m/s, 减少幅度为 22.22%~33.67%, 航道条件得到改善。

3 桥群河段通航水域研究

涪江六桥和新达成铁路桥航评批复通航等级分别为 IV 和 V 级航道标准, 能否满足 III 级航道通航净空尺度的要求, 首先需要结合平面二维水流数学模型计算结果, 对桥群河段的桥梁的通航净

空尺度进行复核。

根据数学模型计算成果，上游在建涪江六桥桥区河段最大横向流速 0.70 m/s。根据《内河通航标准》表 C.0.3，当横向流速为 0.70 m/s 时，Ⅲ-(3)级航道单向通航净宽增加值为 50 m，双向增加值为 100 m。因此拟建大桥单孔双向最小通航净宽为 210 m。涪江六桥通航孔跨度 320 m，扣除紊流宽度、桥墩宽度后为 284.6 m，大于最小通航净宽 210 m，满足净宽计算要求；通航孔净空高度为 13.95 m，满足《内河通航标准》规定的Ⅲ-(3)级航道上过河建筑物净高不小于 10 m 的要求。因此，根据复核，涪江六桥通航净空尺度可以满足Ⅲ级航道通航要求。而下游已建新达成铁路桥由于航评批复时等级较低，通航净宽、净高均较小，其通航净空尺度难以满足Ⅲ级航道通航要求。

因此，桥群河段通航水域仅能以涪江六桥为基础进行划定。根据数值模拟计算流场图，从上游涪江六桥主通航孔左、右墩扣除紊流宽度后，沿着流场水流流向，下沿至成达万涪江桥桥位处的直线为拟定的通航水域边线。通航水域界定见图 3。

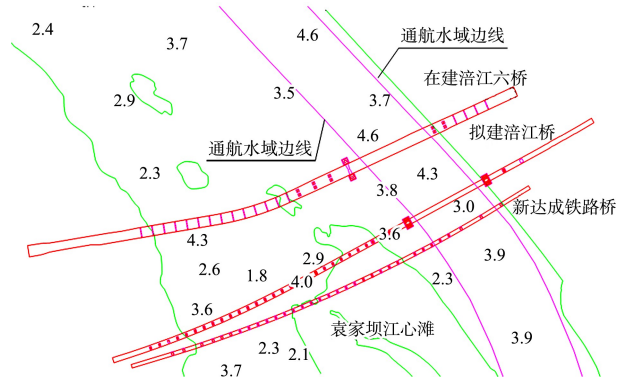


图 3 通航水域界定 (水深: m)

拟建的成达万高铁涪江桥原通航孔跨度采用 410 m，经优化后可采用 305 m，其左、右墩扣除紊流宽度后跨过了划定的通航水域，满足通航要求。

4 船舶操控仿真模拟试验研究

为进一步确定桥群河段通航水域划定的合理性，本文通过船舶操纵模拟试验，利用船舶操纵模拟器分析桥梁方案能否满足设计船型在航道安全航行的要求，采取改进后的 AASHTO 模型对船舶碰撞概率进行计算，试验工况见表 3。

表 3 模拟试验方案

试验船舶类型	航行方式	风		流场	试验组次
		风向	风力等级		
1 000 吨级货船	上行	N/S	6 级/7 级	2 000~15 500 m ³ /s 5 级流量	20
	下行	N/S	6 级/7 级	2 000~15 500 m ³ /s 5 级流量	20
	双向航行	N/S	6 级/7 级	2 000~15 500 m ³ /s 5 级流量	20
1 顶 2 船队	上行	N/S	6 级/7 级	2 000~15 500 m ³ /s 5 级流量	20
	下行	N/S	6 级/7 级	2 000~15 500 m ³ /s 5 级流量	20
	双向航行	N/S	6 级/7 级	2 000~15 500 m ³ /s 5 级流量	20

根据试验结果，1 000 吨级货船上行时桥址处航迹带宽度为 42.7 m，下行时航迹带宽度为 80.8 m，双向航行时上下行船舶各自靠右，从操纵风险分析，无论上行、下行还是双向航行，1 顶 2 船队上行试验，船队可以通过涪江六桥及涪江大桥；同时，船桥碰撞概率表明，拟建涪江六桥 51#、52# 桥墩受 1 000 吨级货船碰撞频率分别为

2.24×10^{-4} 、 2.8×10^{-7} 次/a；拟建涪江桥 91#、92# 桥墩的碰撞频率分别为 9.36×10^{-4} 、 5.13×10^{-9} 次/a。在各级工况下，涪江六桥及成达万高铁桥桥墩的碰撞年频率均为极低。因此，经过船舶操控仿真模拟试验研究验证，桥群河段确定的通航水域是合理的。桥群河段设计代表船型上、下行航迹线见图 4。

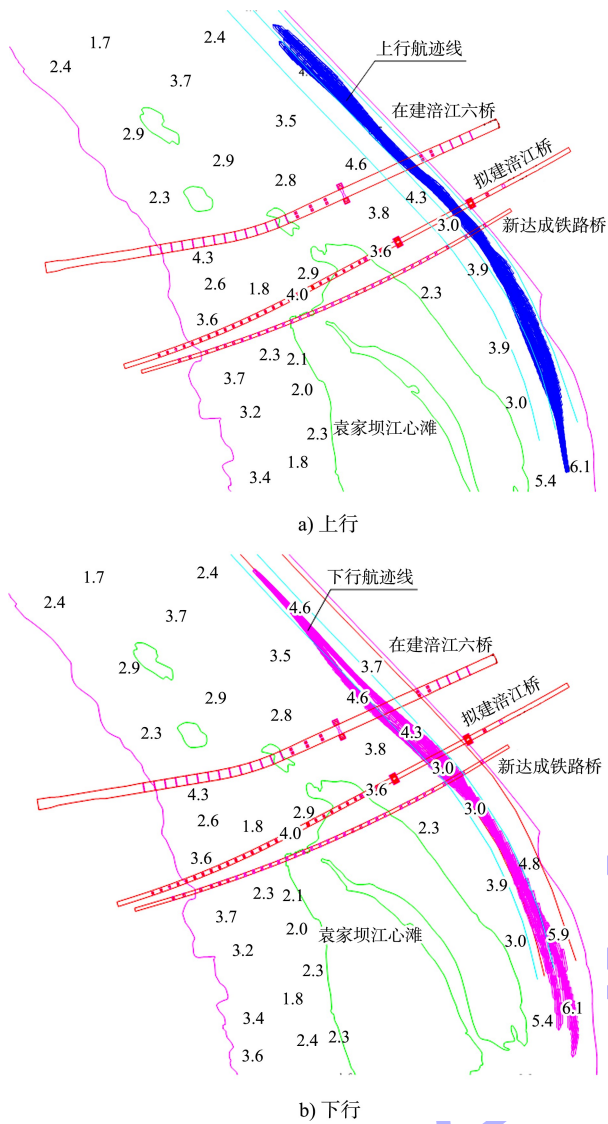


图 4 1 000 吨级货船航迹线 (水深: m)

5 结语

1) 为改善拟建桥梁桥区河段水流条件, 对大桥上游已建湿地公园深入河心部分实施拆除, 减小其挤压水流后产生的不利影响。

2) 结合拟建大桥上游涪江六桥桥墩位置的布

置情况, 通过上下游节点工程, 合理分析桥区河段的通航水域, 对于拟建大桥采用一孔跨过通航水域的方法减小其对航道的影响。

3) 结合船舶操纵模拟试验进一步探究拟建大桥修建后船舶撞桥风险, 研究表明拟建大桥以及涪江六桥船撞概率极小, 满足标准要求。

参考文献:

[1] 刘佳仑. 基于二维流场数值模拟的桥群河段通航影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.

[2] 宋禹辰, 吴宇红, 梁一星. 二维数值模拟在多桥梁河段通航安全评价中的应用[J]. 水利水电快报, 2019, 40(5): 54-58.

[3] 王红兵. 桥群河段通航环境存在的风险研究[J]. 中国水运(下半月), 2010, 10(7): 62-63.

[4] 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.

[5] 四川省交通勘察设计研究院有限公司. 新建铁路成都—达州—万州高速铁路(四川段)跨通航河流桥梁航道通航条件影响评价报告[R]. 成都: 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 2021.

[6] 四川省交通勘察设计研究院有限公司. 四川省综合立体交通网规划纲要(2021—2035年)水运专项规划[R]. 成都: 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 2021.

[7] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 新建成都—达州—万州铁路(四川省境内)跨涪江特大桥船舶操纵模拟试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2021.

[8] 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 25 页)

[6] 杨洲. 三角高程测距导线垂直角测回数的思考[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(3): 213-216.

[7] 许国辉, 刘跃. 电子测距三角高程测量方法的精度分析与比较[J]. 测绘通报, 2003(3): 31-33.

[8] 范百兴, 夏治国. 全站仪实施跨河水准测量及其精度分析[J]. 测绘工程, 2004, 13(1): 41-43.

[9] 张恒, 胡波, 袁长征. 精密三角高程代替二等水准实现

跨河水准测量的研究与应用[J]. 测绘通报, 2019(11): 121-125.

[10] 杜文举, 张恒, 景淑媛. 精密三角高程代替二等水准测量的研究[J]. 铁道勘察, 2020, 46(4): 1-4.

[11] 吴迪军, 熊伟, 李剑坤. 精密三角高程跨河水准测量的改进方法[J]. 测绘通报, 2010(3): 4-6, 20.

(本文编辑 武亚庆)