



# 航道疏浚对复杂桥群河段通航水流条件影响的试验研究

陈婷婷, 胡 阳, 周玉洁, 何 熙, 谢玉杰

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川成都 610017)

**摘要:** 成达万高铁涪江大桥处于复杂桥群河段, 左岸紧临面积较大的湿地公园, 侵入新达成铁路桥左岸 80 m 通航孔内, 占用部分通航净宽, 恶化了桥区水流条件, 使桥区无法满足 V 级航道标准。采用二维水流数学模型和船舶操纵模拟试验对 4 个不同疏浚方案的整治效果进行分析。结果表明: 选用方案 4, 在左岸湿地公园实施大范围疏浚, 且对上游老达成铁路进行拆除后, 桥区最大流速减少 0.46 m/s, 减少幅度为 21.88%; 最大横向流速减少 0.33 m/s 至 0.65 m/s, 减少幅度为 33.67%, 有效改善了桥区航道的通航水流条件, 保证了过桥船舶的通航安全。

**关键词:** 桥群河段; 通航条件; 数学模型; 船舶操纵模拟试验; 疏浚

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0099-07

## Research on influence of channel dredging on navigable flow conditions in complex bridge-group reach

CHEN Ting-ting, HU Yang, ZHOU Yu-jie, HE Xi, XIE Yu-jie

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

**Abstract:** The Fujiang Bridge of Chengdu-Dazhou-Wanzhou High-Speed Railway is in the complex bridge-group reach. The left bank of the bridge is adjacent to a large wetland park, which intrudes into the navigable hole of 80 m on the left bank of the bridge for the new Dazhou-Chengdu Railway and occupies part of the navigable net width. This worsens the flow conditions in the bridge area, and the bridge area cannot meet the Class V channel standard. This study analyzes the regulation effects of four different dredging schemes by using two-dimensional mathematical flow models and ship maneuvering simulation tests. The results indicate that when Scheme 4 is employed for the large-range dredging of the wetland park on the left bank, and the old Dazhou-Chengdu Railway in the upstream is demolished, the maximum flow velocity in the bridge area is reduced by 0.46 m/s, a reduction of 21.88%, and the maximum lateral flow velocity is reduced by 0.33-0.65 m/s, a reduction of 33.67%. The optimal dredging scheme can effectively improve the navigable flow conditions of the channel in the bridge area and thus ensure navigation safety.

**Keywords:** bridge-group reach; navigation conditions; mathematical model; ship maneuvering simulation test; dredging

现代陆路交通网络的发展使桥梁建设进入高峰期, 在沟通陆上交通的同时, 受河道条件、桥梁跨江路线、岸线资源、拆迁以及资金的影响, 桥梁跨度及墩台布设等往往会对河道船舶通航产

生一定影响。

陈明栋等<sup>[1]</sup>首次给出了桥群的基本定义, 即指同一河段上建有 2 座或以上、且其间距不满足《内河通航标准》<sup>[2]</sup>要求的多座小间距桥梁。桥群

不仅危及到船舶的通航安全和桥梁自身结构安全,且严重制约航道升级改造及水运交通的远期发展。彭钜新<sup>[3-4]</sup>针对跨河桥群引发的通航标准问题开展了初步的研究,提出了限制桥洞纵深长度的建议和调整桥群净宽的计算方法。陈明<sup>[5]</sup>根据重庆石板坡长江大桥—储奇门河段的河势条件以及通航环境,把该桥群河段半概化为山区河流典型的顺直微弯河道,通过采用二维水流数值模拟和小尺度船舶物理模型试验相结合的方法,得出了在山区河流典型的顺直微弯桥群河段上的桥跨与桥间距的合理组合。林巧<sup>[6]</sup>通过菜园坝桥群河段,对形成的桥群桥梁选址及桥跨布置方法进行了细化研究,提出试验河段在已有桥梁的约束下修建新桥合适的桥间距和桥跨布设方案。张有林等<sup>[7]</sup>以四川沱江邓家坝桥群河段为例,结合船舶下行通过桥群河段的操纵参数,研究不同桥梁净跨及间距情况下建桥对通航的影响,从而拟定出桥群河段上的桥间距与桥梁净跨间的内在关系。杨韵等<sup>[8]</sup>将船舶操纵运动数学模型应用于桥梁通航孔布设选取中,模拟预测船舶通过桥区通航孔时的航行姿态和航行参数,可为相关设计研究和决策

提供依据。

本文以拟建成达万高铁涪江桥为例,在通航条件较为复杂的桥群河段,针对不同疏浚工程方案,采用二维水流数学模型和船舶操纵模拟试验,对大桥通航条件进行对比研究,给出最优的疏浚工程方案,保障船舶通航安全与效率,为国内类似项目提供借鉴。

## 1 工程概况

拟建成达万高铁涪江桥跨越涪江干流,位于在建唐家渡枢纽下游约3.9 km。大桥位于桥群河段,在推荐桥位上游有已建老达成铁路桥和在建涪江六桥,下游紧邻已建新达成铁路桥,属于典型的桥群河段,桥位方案通航环境见图1。桥位下游河道为S形连续弯道,河面较宽,约1.2~1.3 km;在弯道处有一长约1 700 m、宽约650 m的较大江心洲,将河道分为左右两汊,其中左汊为主汊和通航汊道,右汊进口段零星心洲较多,水流条件较差,不具备通航条件。桥位上下游已建和拟建桥梁通航技术参数见表1。

表1 桥位上下游已建和拟建桥梁通航技术参数

名称	结构形式	与本工程位置关系 (推荐桥位)/km	设计最低 通航水位/m	设计最高 通航水位/m	设计通航 孔桥跨布置/m	航道等级
老达成铁路桥	梁桥	上游约1.54	-	-	4×64	-
涪江六桥	独塔 斜拉桥	上游约0.24	275.30	279.25	60+60+70+320+40	IV
新达成铁路桥	梁桥	下游约0.10	275.30	279.88	2×80	V
通德大桥	-	下游2.50	-	-	-	-

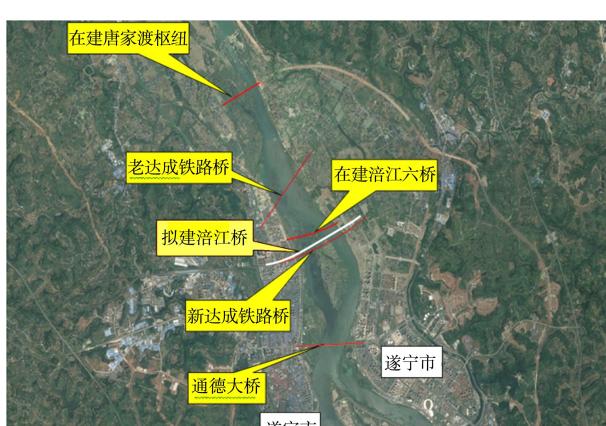


图1 桥位方案通航环境

## 2 疏浚工程方案

拟建大桥上段左岸边修建有面积较大的湿地公园,侵入新达成铁路桥左岸80 m通航孔内,占用了部分通航净宽,并恶化了桥区水流条件,使桥区河段无法满足立项批复的V级航道标准。根据《内河通航标准》规定,III-(3)级航道按照2排1列船队双向取值,需满足10 m通航净高时的要求,即最小双向通航净宽110 m,上底宽96 m,侧高6 m。根据数值模拟计算成果,拟建大桥上游3倍船长范围内的横向流速大于0.8 m/s,无法满足桥梁通航净宽尺度的要求。

在大桥选址确定的情况下, 拟对湿地公园进行疏浚, 使其退回至涪江六桥批复时的岸线位置, 并最大程度改善下游已建新达成铁路桥的通航条

件。拟定的4种疏浚方案见表2, 疏浚方案平面布置见图2。根据数模计算结果, 推荐方案4为最优疏浚方案。

表2 桥区疏浚工程方案对比

方案编号	方案布置	整治效果
方案1	在袁家坝江心洲滩头位置实施疏浚, 上段疏浚至底高程275.0 m, 下段疏浚至276.0 m	桥区河段最大横向流速较工程前有所改善, 但仍然大于0.8 m/s
方案2	进一步加大袁家坝滩头位置疏浚面积, 疏浚至底高程274.0 m	最大横向流速较方案1有所改善, 但仍然大于0.8 m/s
方案3	切除左岸湿地公园, 疏浚范围在建唐家渡枢纽下游约1.4~4.2 km。上游疏浚范围布置时, 主要考虑唐家渡枢纽船舶与下游涪江六桥、拟建成达万高铁涪江桥和新达成铁路桥组成的桥区河段的平顺衔接和通航安全; 下游疏浚范围布置时, 疏浚边线采用涪江六桥左岸51#墩、拟建成达万高铁涪江桥左岸90#墩和新达成铁路桥左岸96#墩靠河侧附近的连线确定	桥区河段最大流速减少0.46 m/s, 最大横向流速减少0.33 m/s
方案4	与方案3基本相同, 对已建新达成铁路桥至拟建成达万高铁涪江桥之间的疏浚边线进行了优化	最大程度改善了下游已建新达成铁路桥的通航条件

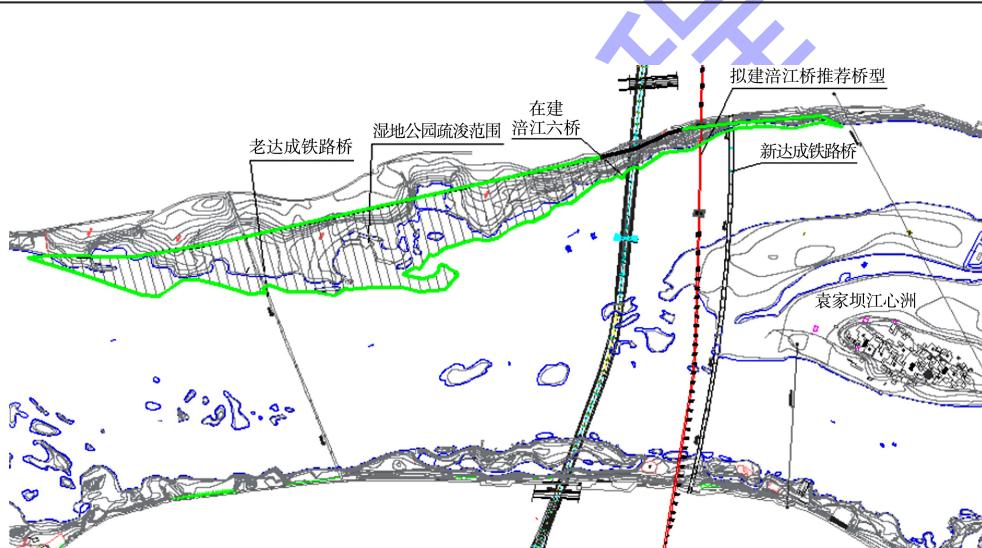


图2 工程河段疏浚区平面布置

### 3 数学模型试验

#### 3.1 通航标准

拟建涪江桥航道等级为Ⅲ级, 根据《内河通航标准》要求, 满足单孔双向的基础净宽为110 m、上底宽96 m、侧高6 m。疏浚工程实施后, 能达到以下标准: 1) 拟建大桥能满足Ⅲ级航道通航条件, 且最大程度控制工程造价; 2) 下游已建新达成铁路桥在各种工况下均可以满足批复时的Ⅴ级航道通航条件; 3) 在下游过军渡电站敞泄工况下, 下游已建新达成铁路桥净宽要求值(75.9 m)小于通航孔跨度(80 m), 新达成铁路桥满足Ⅳ级航道通航条件; 4) 在下游过军渡电站敞泄前, 其净宽

要求值(73.2 m)小于通航孔跨度(80 m), 新达成铁路桥满足Ⅲ级航道通航条件。

#### 3.2 试验工况

过军渡电站正常运行后, 工程河段位于过军渡水库常年回水区。根据《内河通航标准》的规定, 最高通航水位应采用水库正常蓄水位与洪水频率10%入库洪水( $Q=15\ 500\ m^3/s$ )所形成库水位中较高者, 并计入河床可能淤积引起的水位抬高值, 而桥位处最低通航水位亦受过军渡死水位控制。根据过军渡电站的运行方式, 结合桥区河段的具体情况, 选择4级典型工况进行试验, 数模计算工况及边界条件见表3。

表 3 数模计算工况及边界条件

流量工况	上游来流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	出口水位/m
敞泄流量	2 000	275.02
中洪水流量	5 000	276.54
3 a 一遇	9 240	278.50
10 a 一遇	15 500	280.40

### 3.3 试验结果及分析

在本方案中,除跨涪江桥的成达万高铁外,左岸实施大范围疏浚且对上游老达成铁路进行拆除,工程实施后,河段内水流条件改变较为明显,见图3。

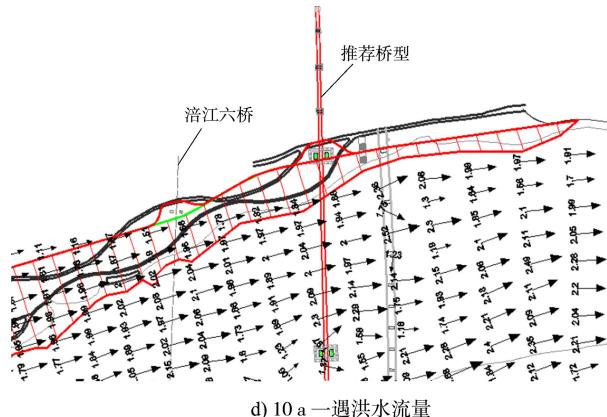
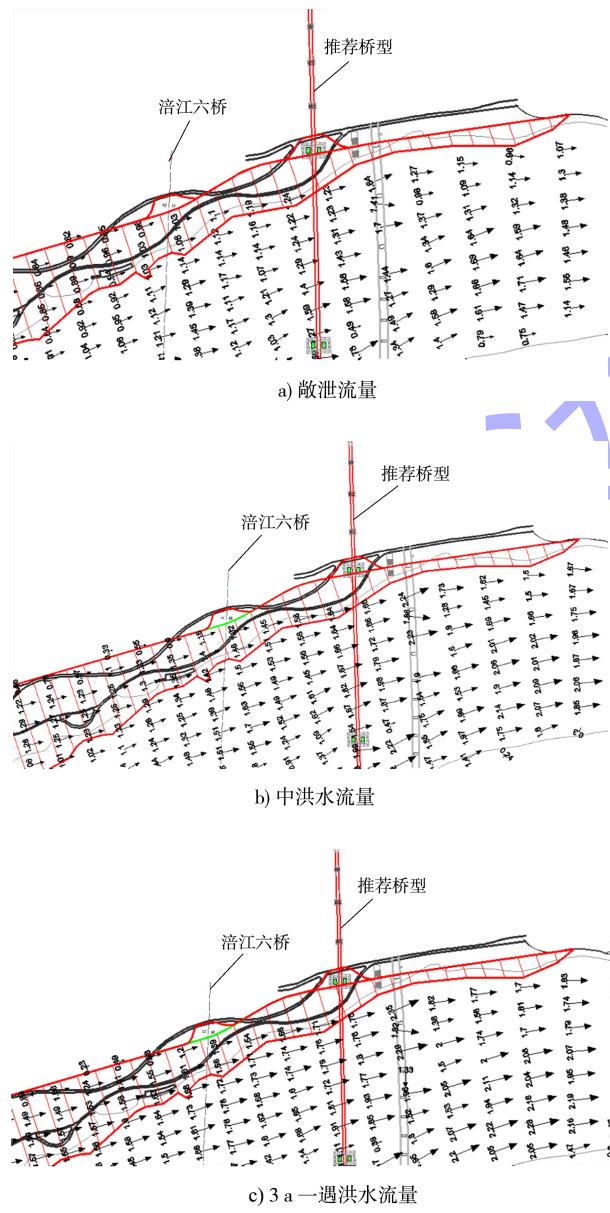


图 3 工程实施后流速流向 (单位: m/s)

1) 敞泄流量时,两侧主通航孔桥墩位于水边线以下,桥区河段范围内流速有增有减,其变化范围在  $0 \sim 0.69 \text{ m/s}$ ,最大增加值为  $0.33 \text{ m/s}$ ,最大减小值为  $0.69 \text{ m/s}$ 。

2) 中洪水流量时,两侧主通航孔桥墩位于水边线以下,桥区河段范围内流速有增有减,其变化范围在  $0 \sim 0.50 \text{ m/s}$ ,最大增加值为  $0.05 \text{ m/s}$ ,最大减小值为  $0.50 \text{ m/s}$ 。

3) 3a 一遇洪水时,两侧主通航孔桥墩位于水边线以下,桥区河段范围内流速有增有减,其变化范围在  $0 \sim 0.38 \text{ m/s}$ ,最大增加值为  $0.06 \text{ m/s}$ ,最大减小值为  $0.38 \text{ m/s}$ 。

4) 10 a 一遇洪水时,两侧主通航孔桥墩位于水边线以下,桥区河段范围内流速有增有减,其变化范围在  $0 \sim 0.37 \text{ m/s}$ ,最大增加值为  $0.09 \text{ m/s}$ ,最大减小值为  $0.37 \text{ m/s}$ 。

工程前后代表工况下,涪江大桥轴线上游3倍代表船型长度范围内最大横向流速值见表4。

在湿地公园疏浚后,桥区河段最大流速减少  $0.46 \text{ m/s}$ ,减少幅度为  $21.88\%$ ;桥区河段最大横向流速减少  $0.33 \text{ m/s}$ ,减少幅度为  $33.67\%$ ,桥区河段最大横向流速降低为  $0.65 \text{ m/s}$ ,航道条件得到改善。

表4 不同流量下桥区河段水流条件特征值(推荐桥型)

时段	流量工况	流速/(m·s <sup>-1</sup> )	水流与桥轴线法向夹角/(°)	相对横向流速(m·s <sup>-1</sup> )
工程前	敞泄流量	0~1.92	0.75~46.24	0~0.57
	中洪水流量	0~2.35	0~21.80	0~0.68
	3 a一遇洪水流量	0~2.44	0.89~30.62	0~0.72
	10 a一遇洪水流量	0.21~2.88	0.82~29.13	0~0.98
工程后	敞泄流量	0~1.50	1.04~33.85	0.01~0.41
	中洪水流量	0~1.89	0.06~17.83	0~0.46
	3 a一遇洪水流量	0~2.34	0.66~29.35	0~0.56
	10 a一遇洪水流量	0.25~2.68	1.70~20.36	0.05~0.65

## 4 船舶操纵模拟试验

### 4.1 船舶操纵模拟试验

拟建桥梁与上游涪江六桥、下游新达成铁路桥较近, 且处于弯道水域, 通航环境复杂, 因此, 有必要开展大桥船舶操纵模拟试验研究, 利用船舶操纵模拟器分析桥梁方案能否满足设计船型航道安全航行的要求, 评价方案合理性, 分析船舶通过桥区水域的航行风险。在考虑疏浚工程推荐

方案的条件下, 选择的试验船型为1 000吨级货船(长85.0 m×宽10.8 m×吃水2.0 m)、1顶2船队(长160.0 m×宽10.8 m×吃水2.0 m)。根据模拟试验最不利原则, 选择敞泄流量、中洪水流量、3 a一遇流量和10 a一遇流量。选择该地区的主导风向和对船舶影响最大的风向为试验条件, 分别为N、S、W和E风, 风力选择为5~7级。各工况下双线航行轨迹见图4。

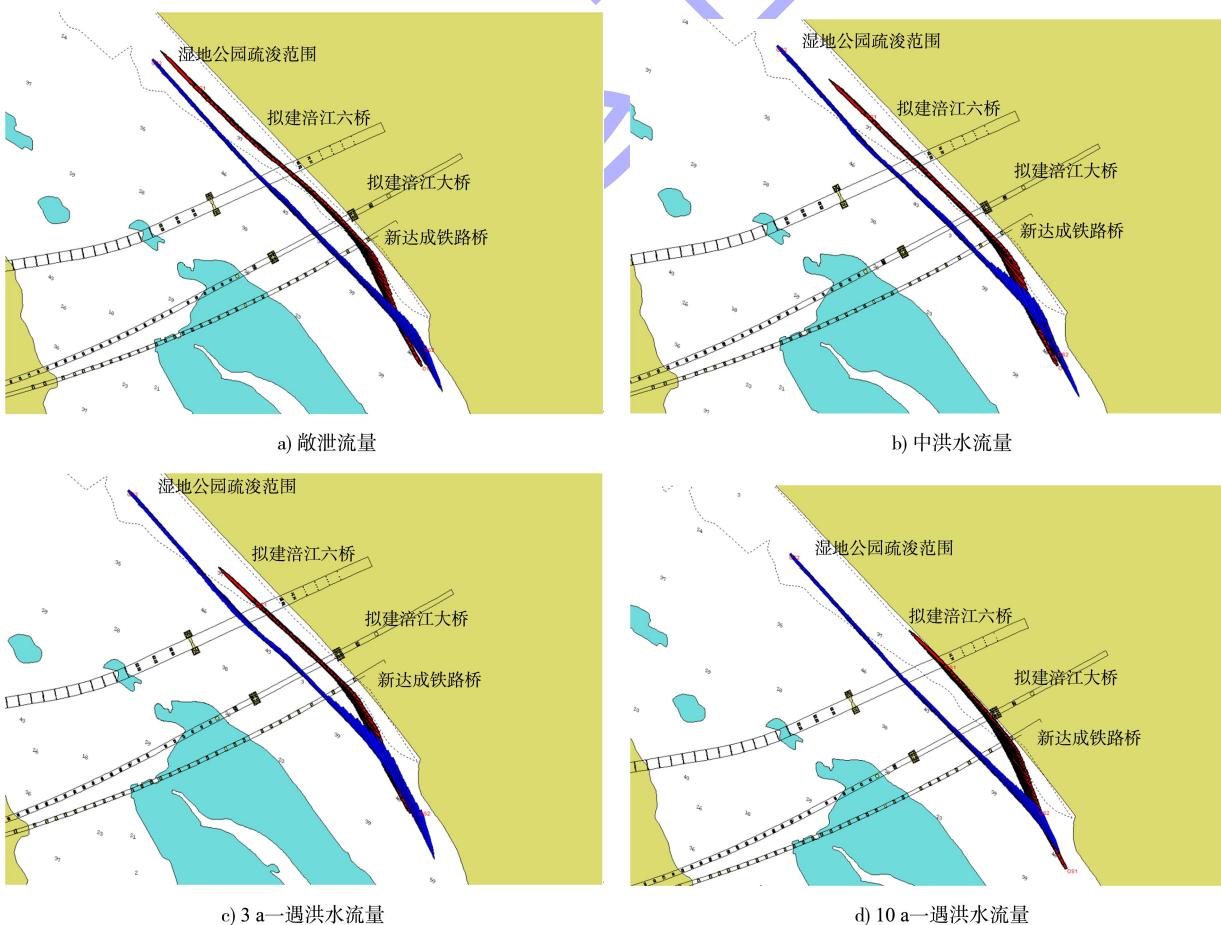


图4 不同流量工况下双向航行轨迹

根据船舶操纵模拟试验, 得到以下结论:

1) 1 000 吨级货船模拟试验中, 上行时桥址处航迹带宽度为 34.7 m, 下行时为 76.0 m, 双向航行时上下行船舶各自靠右, 轨迹均在通航水域内, 航迹带与拟建涪江桥主桥墩存在较大安全富余量; 但下行航迹带距离新达成铁路桥的富余量最小为 1.8 m, 从操纵风险分析, 在 6、7 级风况条件下, 1 000 吨级货船可通过桥区水域。

2) 1 顶 2 船队模拟试验中, 5 级及以下风力情况下, 船队可顺利通过新达成铁路桥、涪江桥、涪江六桥组成的桥群水域; 当出现 6 级风时, 上行船队存在触碰左侧岸线的风险, 下行船队存在触碰新达成铁路桥主桥墩的风险。

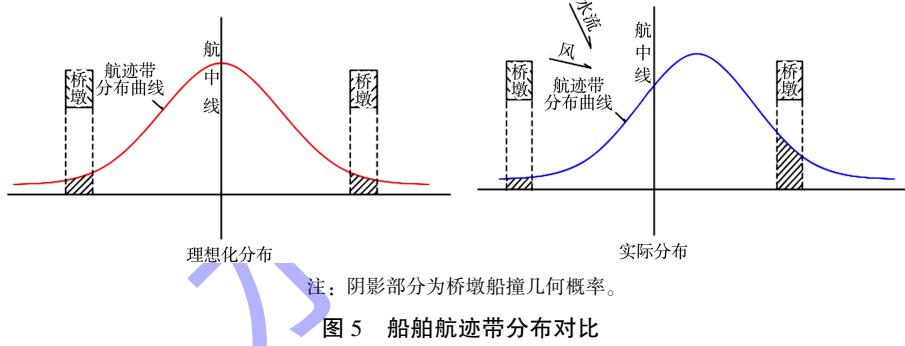
3) 1 000 吨级货船在桥区水域下行失控时, 除在偏 E 强风时存在触碰右主墩的风险外, 其它工况均可顺利通过涪江桥; 1 顶 2 船队在无风情况下

可顺利通过涪江桥, 当出现横风时, 虽可通过涪江桥, 但触碰新达成铁路桥的风险较高。

#### 4.2 桥梁抗船风险分析

现有的船桥碰撞概率计算模型均存在各自优缺点, 本文结合 AASHTO 和 KUNZI 模型的优点, 以 AASHTO 模型为基础, 针对其不足之处进行以下 2 点改进:

1) 对几何概率分布曲线的改进。AASHTO 模型在计算几何概率时, 其航迹分布曲线是以航道中心线为正态分布中心、船舶长度为标准差的理想化分布, 而忽略了风、流、人为因素等的影响, 本研究建立的船舶数学模型加入了风、流、地形及人为操作的影响, 在船舶模拟器上得到船舶航迹带分布, 见图 5。在风、流及人为因素等影响下, 航迹带正态分布中心并不位于航道中心线上, 因此, 对各个桥墩船撞几何概率影响也相差较大。



2) 引入停船概率函数。当船舶发生偏航驶入几何碰撞区, 如船舶能在碰到桥墩之前停住, 则即使偏航也不会发生碰撞事故; 船舶在碰到桥墩前不能停下, 则必定发生碰撞事件。因此, 引入 KUNZI 模型停船概率函数  $F_s$ , 该函数综合考虑了船舶机械性能、吨位、平均航速、外形尺寸、驾驶者平均素质、桥位处水流特性以及桥墩外形尺寸等诸多因素, 是一个考虑比较全面的分布函数。

$$F_s = \int_0^D f(s) ds$$

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-\frac{(s-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}} \quad (1)$$

式中:  $f(s)$  为停船距离分布函数;  $D$  为沿横向方向距离桥轴线的距离; 均值  $\mu_s$  和方差  $\sigma_s$  的取值可通过船舶数学模型得到。

改进后的 AASHTO 模型中船桥发生碰撞的概率计算公式如下:

$$P = NP_A P_G P_S' \quad (2)$$

式中:  $P$  为船桥发生碰撞的概率;  $N$  为根据船舶类型、大小和装载情况分类的船舶年度数量;  $P_A$  为船舶的偏航概率;  $P_G$  为碰撞的几何概率;  $P_S$  为船舶未能停船概率,  $P_S = 1 - F_s$ 。

采用改进后的 AASHTO 经典碰撞模型对 1 000 吨级货船的碰撞概率进行了计算, 涪江六桥的船桥碰撞概率最大为  $2.8 \times 10^{-7}$  次/a, 拟建桥梁的船桥碰撞概率最大为  $5.13 \times 10^{-9}$  次/a, 新达成铁路桥的最大碰撞概率  $2.29 \times 10^{-3}$  次/a。拟建涪江桥的碰撞概率小于《公路桥梁抗撞设计规范》中  $1 \times 10^{-3}$  次/a 的风险标准, 铁路桥的碰撞概率大于《公路桥梁抗

撞设计规范》中  $1 \times 10^{-3}$  次/年的风险标准。

### 4.3 布置方案适应性分析

根据涪江特大桥船舶操纵模拟试验, 在各级工况下, 拟建涪江桥右侧主桥墩的最大碰撞年频率为  $5.13 \times 10^{-9}$  次/a。因此, 右侧主桥墩的碰撞年频率极低, 可以认为右墩跨过了通航水域; 左侧主桥墩位于通航水域边线以外且位于设计最高通航水位时(10 a一遇)的水面线以上; 拟建大桥推荐方案通航孔主跨 305 m, 跨过了桥区河段通航水域(宽 253 m), 满足规范要求。

## 5 工程建成后桥梁通航净空尺度

1)根据数模计算成果, 湿地公园疏浚后, 当

横向流速为 0.65 m/s 时, III-(3) 级航道单向通航净宽增加值为 65 m, 双向增加值为 130 m。拟建大桥单孔双向最小通航净宽为 240 m。大桥通航孔宽度为 305 m, 扣除紊流宽度 13 m, 桥墩宽度 10 m, 通航净宽计算值为 282 m, 大于最小通航净宽 240 m, 满足规范要求。

2)左岸通航水域边线结合上下游桥梁通航孔左墩、扣除桥墩紊流宽度后连线确定; 由于下游已建新达成铁路桥不会拆除, 右岸通航水域综合考虑上下游桥梁通航孔右墩连线, 并根据数值模拟计算流场图, 从上游涪江六桥主通航孔右墩处紊流宽度外, 沿着水流流向, 下沿至桥位处的直线拟定为右岸的通航水域边线。

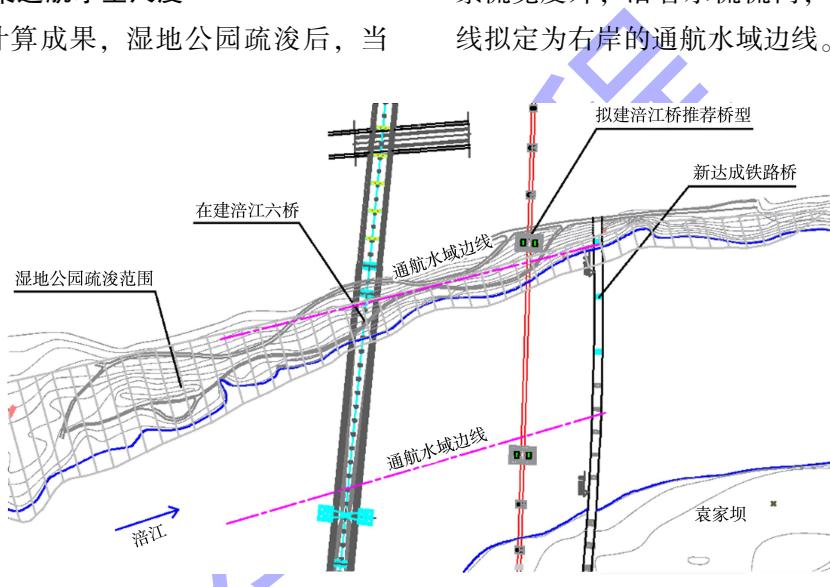


图 6 推荐桥型通航水域

推荐方案通航孔跨度 305 m, 其左侧桥墩位于通航水域以外; 右侧桥墩与上下游桥梁的通航孔对应布置, 扣除紊流宽度后跨过了右岸通航水域, 因此推荐方案通航净宽满足要求。经界定, 推荐方案的通航水域宽 253 m。

根据水流流向与航线夹角确定通航净宽: 拟建大桥轴线处可通航水域宽度为 253 m(远期), 投影至航线法线方向为 236 m, 本桥与上、下游桥梁采取对孔布置, 通航孔跨度 305 m, 设计净跨 287 m, 大桥一孔跨过通航水域, 能够满足要求。

## 6 结语

1)根据拟建涪江特大桥船舶操纵模拟试验, 在各级工况下, 航迹带与拟建大桥通航孔 2 侧桥

墩存在较大安全富余量, 通航孔右侧桥墩的碰撞年频率极低, 左侧桥墩位于设计最高通航水位时(10 a一遇)的水面线以上。因此, 经船舶操纵模拟试验研究验证, 拟建大桥桥墩布置方案可行;

2)大桥采用单孔双向通航, 一孔跨过通航水域, 大桥通航净空尺度满足通航要求, 对工程河段的航道及航标配布无影响;

3)拟建大桥推荐方案主跨 305 m 一孔跨过通航水域, 大桥的通航孔能够满足通航船舶的安全通航要求, 且在满足通航标准的条件下, 最大程度减小跨度, 节约投资; 本项目建成后将拆除上游老达成铁路桥, 届时航路将大为缩短且更为顺畅, 因此拟建大桥对通航安全影响较小。