

桥梁船舶通航安全风险分析研究

邱政男, 陈耀金

广州市番禺区地方公路管理总站, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ERA.2026090040

摘 要 : 采用基于概率的风险分析方法对拟建桥梁开展通航安全风险分析研究, 包括通航净空尺度、船撞桥风险概率等关键因素, 进而精准计算桥梁的船撞设防力。结果表明: 拟建桥梁通航净空净高、净宽均满足内河 II 级航道标准; 8#、9#、10# 桥墩设防船撞力分别为 23MN、27MN、23MN, 整体船撞年失效概率为 5.62×10^{-5} , 满足规范 L2 级的水准值, 抗船撞性能满足设计要求。研究成果可为大桥改扩建工程抗撞设计、航道安全运维提供技术支撑。

关 键 词 : 拟建桥梁; 船舶; 概率风险分析; 抗船撞

Study on the Analysis of Navigation Safety Risks for Bridges and Vessels

Qiu Zhengnan, Chen Yaojin

Panyu District Local Highway Management Station, Guangzhou, Guangdong 511400

Abstract : A probability-based risk analysis method was employed to conduct a navigational safety risk analysis of the proposed bridge, taking into account key factors such as navigational clearance dimensions and the probability of vessel-bridge collisions, thereby accurately calculating the bridge's design resistance to vessel collisions. The results indicate that both the vertical and horizontal navigational clearances of the proposed bridge meet the standards for Class II inland waterways; the design ship-impact resistance forces for Piers No. 8, No. 9, and No. 10 are 23 MN, 27 MN, and 23 MN, respectively, and the overall annual probability of failure due to ship impact is 5.62×10^{-5} , which meets the Level L2 threshold specified in the code; thus, the bridge's ship-impact resistance performance satisfies the design requirements. The research findings provide technical support for the collision-resistant design of the bridge's renovation and expansion project, as well as for the safe operation and maintenance of the waterway.

Keywords : proposed bridges; ships; probabilistic risk analysis; ship-impact resistance

引言

内河航运作为综合交通运输体系的重要组成部分, 具备运量大、成本低、能耗小的显著优势, 是流域经济协同发展的核心纽带^[1]。近年来, 我国珠江三角洲内河航运体系持续升级改造, 航道等级不断提升、通航船舶大型化趋势愈发明显, 内河通航的货运效率与通行规模持续扩大。但与此同时, 通航环境复杂化、船舶大型化、通航高密度化的发展特征, 使得跨河桥梁面临的船舶碰撞风险持续攀升^[2-4]。船舶碰撞已成为跨河桥梁最主要的突发性安全隐患, 轻则造成桥梁结构破损、通航中断, 重则引发桥梁坍塌、船舶损毁、人员伤亡及水域污染等重大安全事故, 严重威胁道路交通与内河航运的双重运营安全, 制约区域水陆联运体系的稳定发展^[5-6]。

航道原本是 III 级航道, 现提升为 II 级航道后, 通航净空缺口进一步加大。根据《内河通航标准》^[7], II 和 III 级航道分别对应 2000 吨级和 1000 吨级船舶, 航道升级后大幅提升区域航运通行能力。然而现状大桥通航净空不能满足 III 级航道通航要求, 考虑到桥梁本身病害近年呈显著的发展趋势, 加上需要额外设置独立的船撞设施, 本身费用较高, 因此建议拆除重建。为了保障拟建桥梁的通航安全, 必须对该拟建桥梁进行船舶通航安全风险分析。

在早期规范中, 传统船舶抗撞评估多采用确定性分析方法, 将撞击动力作用等效为水平静力, 忽略了撞击过程中的冲击效应, 使计算所得船撞力低于实际值; 除此之外, 还未考虑船舶偏航、桥区水位变化、停船距离等多变因素, 仅要求桥梁抗力满足对应航道标准规定的撞击作用^[8]。本研究依照规范《公路桥梁抗撞设计规范》^[9]中基于概率的船撞分析方法, 对拟建桥梁开展船撞概率风险分析, 以期得到桥梁结构的设防撞击力, 为拟建桥梁的防船撞工作提供指导与建议。

一、工程概况

（一）桥梁基本情况

大桥改扩建工程路线全长约 1.54km，桥梁总长 850.6m，起止桩号为 K68+894.5~K68+745.1，为特大桥工程。如图 1 与图 2 所示，拟建主桥采用独塔斜拉桥结构，桥面净宽 37.5m，设计荷载等级为公路 I 级，跨径组合为 4×30+4×31.5+(160+160)+68+3×30+5×25m。拟建桥梁桥轴线法线方向与水流方向夹角为 0°，近似正交，设为双孔单向通航孔，大桥通航孔 8# 桥墩承台顶面标高为 1.73m，大桥通航孔 9# 桥墩承台顶面标高为 -7.5m，大桥通航孔 10# 桥墩承台顶面标高为 -2.4m，最高通航水位为 7.08m，最低通航水位为 0.03m。

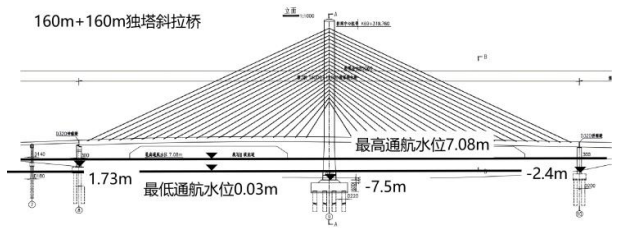


图1 拟建桥梁主桥立面图

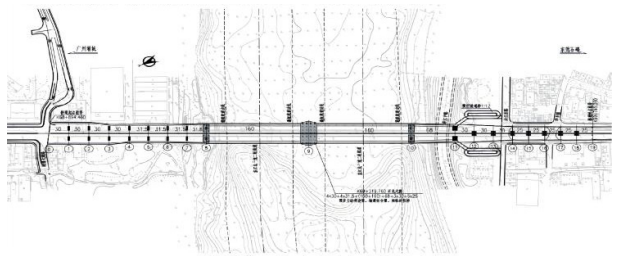


图2 拟建桥梁主桥平面图

（二）航道基本情况

研究河段为属亚热带季风气候，雨量充沛、水文季节差异显著，4月~9月为丰水期，3月、10月、11月为中水期、12月~翌年2月为枯水期。拟建桥梁全长约 816.6m，主桥跨径大于 150m，根据《公路工程技术标准》的规定，属特大桥，采用 1/300 的洪水频率。现状大桥通航净空不能满足 III 级航道通航要求，提升为 II 级航道后，通航净空缺口进一步加大。根据《广东省航道发展规划（2020-2035 年）》，规划航道由现状 III 级航道提升为 II 级航道，跨河桥梁通航净高按照 10m 控制。

（三）船舶基本情况

拟建桥梁规划为内河 II 级，桥梁通航净高按 10m 控制，规划通航 2000 吨级船舶，根据有关标准、资料，工程河段代表船型的主尺度如表 1 所示。

表1 代表船型尺度（m）

序号	船型	总长	型宽	吃水	备注
1	2000 吨级货船	90.0	14.8	2.6	《内河通航标准》
2	2000 吨级干货船	66.0	15.6	3.5~3.6	
3	2000 吨级干货船	78.0	12.8	3.5~3.6	《珠江干线下 游货运船舶船 型主尺度系 列》
4	2000 吨级多用途集 装箱船	71.0	15.8	3.2~3.4	
5	2000 吨级自卸沙船	69.0	15.0	3.8~4.2	

如图 3 所示，桥区河段现状通行船舶的类型主要有干货船、散货船、多用途船、公务船、集装箱船、拖船等。其中散货船占比最大，干货船和多用途船次之。如图 4 所示，小于 1000 吨级船舶占比为 6.5%，1000 吨级（1000t~1500t）船舶占比为 23.1%，2000 吨级（1501t~2500t）船舶占比为 54.8%，3000 吨级（2500t~4500t）船舶占比为 15.7%。

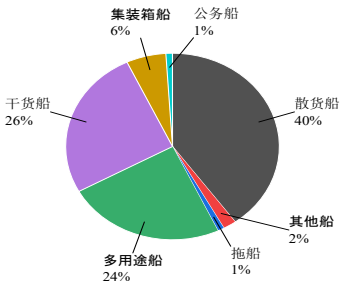


图3 东江北干流水道船舶类型占比

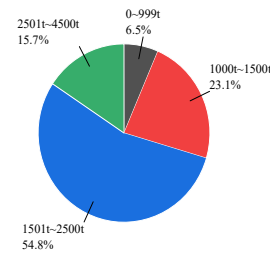


图4 东江北干流水道船舶载重吨占比

二、正常通航安全分析

（一）通航净高复核

结合区段通航代表船型、现状船舶及规划船型，本报告拟建桥梁代表船型选取 2000 吨级内河船。根据《内河通航标准》（GB50139-2014），天然和渠化河流水上过河建筑物内河 II 级航道净高为 10m，拟建桥梁最高通航水位时通航孔净高为 12m，满足规划 II 级航道通航净高不小于 10m 要求。

（二）通航净宽复核

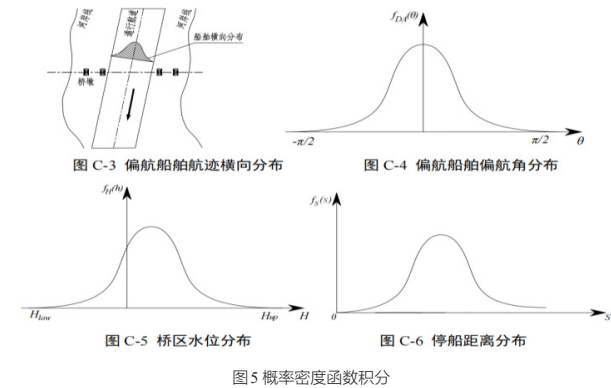
根据《内河通航标准》（GB50139 - 2014）净宽计算方法得到净宽计算结果最大值为 58.73m。另外，内河 II 级航道双孔单向通航孔的净空宽度不应小于 75m。综合考虑净宽计算结果、强制性标准规定的规定，大桥双孔单向通航孔净宽不应小于 75m。经计算，增城侧通航孔净宽为 103.2m，扣除紊流宽度后实际通航孔有效净距为 92.2m，东莞侧通航孔净宽为 105.1m，扣除紊流宽度后实际通航孔有效净距为 94.1m，均大于 75m，满足要求。

三、船撞概率风险分析

（一）计算方法简介

船 - 桥撞击是典型的随机事件，我国《公路桥梁抗撞设计规

范》提出了一种基于概率的风险评估方法，其中失效概率 = 碰撞几何概率 * 满足条件的船舶数，碰撞几何概率根据四个概率密度函数积分后相乘得到（图5）。满足条件的船舶数根据实际撞击力与设防力对比得到。



（二）几何信息简化

在船舶可达区域范围内，8#（过渡墩）、10#（过渡墩）、9#（主墩）桥墩存在发生船撞事故的风险。水流向与桥梁纵向夹角为 0° ，桥墩碰撞尺寸如表2所示，撞击首着力点均在桥墩，因此以桥墩尺寸作为碰撞尺寸。

表2 计算桥墩碰撞几何信息

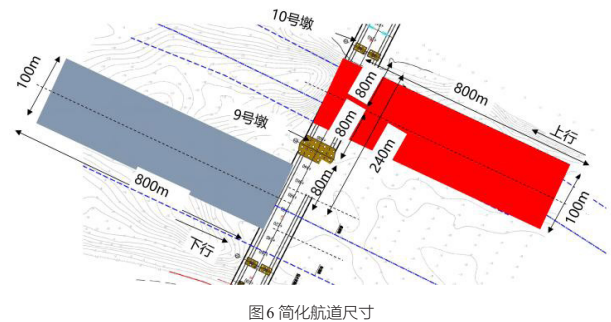
桥墩号	类型	碰撞尺寸 (m)	
		长度 (B)	宽度 (C)
8#	过渡墩	25.5	3
10#	过渡墩	25.5	3
9#	主墩	45.5	8.5

计算船舶信息如表3所示。这里取轮船不取驳船也是一个偏保守的做法。相同质量和速度的船，轮船撞击力要远大于驳船。

表3 计算船舶信息

计算船舶吨位 (DWT)	类型	船舶尺寸 (m)		
		长度	宽度	满载吃水深度
1000	轮船	59.8	11.2	3.1
2000	轮船	78	15.6	3.6
3000	轮船	93	14.1	5.1

拟建桥梁航道规划为Ⅱ级航道，采用双孔单向通航设计方案，航道宽度根据实际的航迹线取值，经过测量取100m。图6为简化后的航道，用直线便可描述其特征。上、下行航道宽100m，长度取800m（此积分长度已足够精确）。



（三）几何概率计算

通过自编计算程序计算得到各墩的几何碰撞概率，如表4所

示。9号主墩的几何碰撞概率为 1.24×10^{-4} ，8号过渡墩的几何碰撞概率为 1.64×10^{-5} ，10号过渡墩的几何碰撞概率为 3.28×10^{-5} 。

表4 各桥墩几何概率

航道	水位	船舶吨位	8# 墩碰撞 概率	9# 墩碰撞 概率	10# 碰撞 概率	
上行	洪水位	1000t	5.44×10^{-11}	6.31×10^{-6}	3.66×10^{-6}	
		2000t	6.88×10^{-11}	7.38×10^{-6}	4.45×10^{-6}	
		3000t	0	7.00×10^{-6}	4.22×10^{-6}	
	中水位	1000t	5.44×10^{-11}	6.31×10^{-6}	3.66×10^{-6}	
		2000t	6.88×10^{-11}	7.38×10^{-6}	4.45×10^{-6}	
		3000t	0	7.00×10^{-6}	4.22×10^{-6}	
	枯水位	1000t	0	6.31×10^{-6}	3.66×10^{-6}	
		2000t	0	7.38×10^{-6}	4.45×10^{-6}	
		3000t	0	7.00×10^{-6}	0	
	下行	洪水位	1000t	3.66×10^{-6}	6.31×10^{-6}	5.44×10^{-11}
			2000t	4.52×10^{-6}	7.38×10^{-6}	6.88×10^{-11}
			3000t	0	7.00×10^{-6}	6.36×10^{-11}
中水位		1000t	3.66×10^{-6}	6.31×10^{-6}	5.44×10^{-11}	
		2000t	4.52×10^{-6}	7.38×10^{-6}	6.88×10^{-11}	
		3000t	0	7.00×10^{-6}	6.36×10^{-11}	
枯水位	1000t	0	6.31×10^{-6}	5.44×10^{-11}		
	2000t	0	7.38×10^{-6}	6.88×10^{-11}		
	3000t	0	7.43×10^{-6}	0		
合计			1.64×10^{-5}	1.24×10^{-4}	3.28×10^{-5}	

（四）假设设防力

考虑到桥梁结构中不同桥墩的功能和受力特点，9号墩作为主墩，承担着桥梁主体结构的关键支撑作用，因此需要更高的设防能力以应对潜在的船舶撞击风险。基于上述分析，我们初步设定9号墩的设防力为27MN，8号墩和10号墩的设防力为24MN。这里取轮船不取驳船计算船撞力也是一个偏保守的做法。相同质量和速度的船，轮船撞击力要远大于驳船。

（五）失效概率计算

经计算，8号过渡墩失效概率为0，9号主墩失效概率为 7.00×10^{-6} ，10号过渡墩失效概率为 2.11×10^{-5} ，总的失效概率合计为 2.81×10^{-5} ，小于其失效概率L2的水准值（ 1×10^{-4} ），满足设计要求。

（六）设防迭代力计算

若利用初步假设的设防力反算代表船型，虽然能满足要求，但是会导致设防力过于保守，设防代表船型过大，造成浪费。所以重新进行设防力迭代计算。为得到实际设计时的设防代表船型，我们需按设计的思路来考虑，不断调整各墩设防船撞力，保证失效概率接近且小于设计水准值（ 1×10^{-4} ），然后得到各墩概率设防船型。

表5 桥墩设防船撞力

墩号	年失效概率	设防船撞力
9# 主墩	7.00×10^{-5}	27MN
10# 过渡墩	7.18×10^{-5}	23MN
8# 过渡墩	0	23MN

（七）设防代表船型

通过对桥区船舶航行速度的分析，确定在正常环境条件下航道内典型船只的航速为4.37m/s，典型水流速度为1.73m/s。通过

速度内插公式反算得到各墩撞击速度，船舶撞击速度分布如图7所示，撞击速度沿航道中心线向两侧递减，3倍船长来源于美国的船撞设计指南。

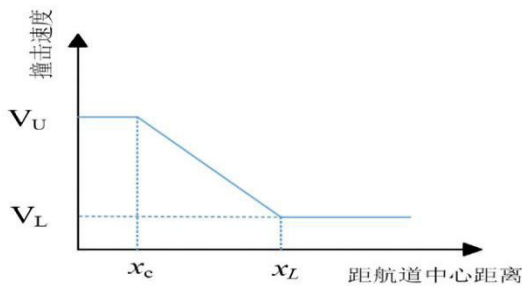


图7 船舶撞击速度曲线

以速度不利为原则，取最大撞击速度。根据《海港总体设计规范》(JTS 165-2013)，1000吨级船舶吨级范围为1000t-1500t，2000吨级船舶吨级范围为1501t-2500t，3000吨级船舶吨级范围为2501t-4500t，得到各桥墩设防船型如表6所示。

表4 各桥墩设防代表船型

墩号	设防船撞力	撞击速度	设防载重吨位 DWT	设防船型
9#	27MN	4.38m/s	2945.2t	3000吨级轮船
10#	23MN	4.38m/s	2339.2t	2000吨级轮船
8#	23MN	3.71m/s	2969.3t	3000吨级轮船

四、结论

基于《公路桥梁抗撞设计规范》中船撞桥概率风险分析方法，对于拟建的大桥进行了详细的概率分析计算，主要结论如下：

- (1) 拟建桥梁最高通航水位时通航孔净高为10m，满足规划Ⅱ级航道通航净高不小于10m 要求。
- (2) 拟建桥梁通航孔净距为150.25m，上行通航孔有效净宽为119.1m，下行通航孔有效净宽为111.2m，均大于最小单向通航净宽75m，满足要求。
- (3) 8号过渡墩、9号主墩、10号过渡墩的最终设防船撞力分别为23MN、27MN、23MN，小于其失效概率 L2的水准值 (1×10^{-4})，满足设计要求。
- (4) 8号过渡墩、9号主墩、10号过渡墩的设防代表船型分别为：3000吨级轮船、3000吨级轮船、2000吨级轮船。

参考文献

[1] 李红卫. 融合战略背景下云浮市内河航运高质量发展策略研究 [J]. 珠江水运, 2023(24):39-41.

[2] 阮云龙, 张恒. 某连续刚构桥防船撞设计方案研究 [J]. 公路与汽运, 2023(5):107-110.

[3] 陈明, 陈明栋, 杨斌, 等. 桥群河段通航条件及通航安全研究综述 [J]. 水利水电工程学报, 2012(4):5..

[4] 樊伟, 钟正午, 王君杰, 等. 桥梁船撞研究进展综述：事故，分析与防护 [J]. 中国公路学报, 2024, 37(5):38-66.

[5] 贺晓川. 既有桥梁桥墩船撞能力评估及防撞方案研究 [J]. 四川建材, 2016, 42(8):3.

[6] 田书冰, 舒小红. 融合桥梁防撞主动预警及航道卡口一体化系统设计 [J]. 交通企业管理, 2024(4).

[7] GB 50139-2004, 内河通航标准 [S].

[8] 中交公路规划设计院. 公路桥涵设计通用规范 :JTGD602004[S]. 北京：人民交通出版社，2004.

[9] 公路桥梁抗撞设计规范 [S]. 中华人民共和国交通运输部，2020.