

跨河桥梁影响内河航道通过能力的 分析方法研究与应用

俞红

(上海中交水运设计研究有限公司, 上海 200092)

摘要: 跨河桥梁的达标改建是航道整治工程的重要组成部分, 桥梁改建投资高、社会影响大, 在航道整治项目中需对现有桥梁进行通航条件影响初步评价。苏申内港线航道沿线跨河桥梁众多, 在评价过程中对于净空尺度不能满足规范要求而改造难度较大的桥梁, 可采取计算桥区航道通过能力的方法, 定量分析该桥梁的碍航程度。航道通过能力计算可采用理论分析的方法, 对于闸外潮汐航段在常规航道通过能力计算方法的基础上, 利用潮位累积频率曲线推断出各水位的通航保证率, 以通航保证率作为修正系数, 进而计算出桥区的航道通过能力。通过航道通过能力计算值与规划设计货运量的对比, 可初步判断桥梁改建的必要性和紧迫性。

关键词: 跨河桥梁; 内河航道; 通过能力; 航道规划设计; 通航保证率

中图分类号: U612.32

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0074-05

doi: 10.7640/zggwjs202410013

Research and application of analysis methods for the impact of river-crossing bridges on the capacity of inland waterway passage

YU Hong

(Shanghai China Communications Water Transportation Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The standard reconstruction of river-crossing bridges is an important component of waterway regulation projects, which has high investment and significant social impact. In waterway regulation projects, it is necessary to conduct a preliminary evaluation of the impact of navigation conditions on existing bridges. There are numerous river-crossing bridges along the Sushen Inner Port Line waterway, in the evaluation process, for bridges with significant difficulty in renovation due to insufficient clearance dimensions, the method of calculating the navigation capacity of the bridge area waterway is adopted to quantitatively analyze the degree of obstruction to navigation of the bridge. Theoretical analysis can be used to calculate the navigation capacity of the bridge area waterway. On the basis of the conventional channel capacity calculation method for the tidal section outside the gate, the navigation guarantee rate of each water level can be inferred using the cumulative frequency curve of tide level. The navigation guarantee rate is used as a correction coefficient to calculate the navigation capacity of the bridge area waterway. By comparing the calculated capacity of the waterway with the planned and designed freight volume, the necessity and urgency of bridge reconstruction can be preliminarily judged.

Key words: river-crossing bridge; inland waterway; navigation capacity; waterway planning and design; navigation guarantee rate

0 引言

随着经济建设的发展, 船舶日益大型化, 对航道等级提升的需求不断增加。跨航道桥梁作为

连通航道两岸陆域的重要设施, 在市政交通上发挥着重要作用, 但很多航道上架设的桥梁净空尺度偏小, 成为航道上的堵点, 降低了航道的通过

收稿日期: 2024-02-29 修回日期: 2024-04-01

作者简介: 俞红 (1978—), 女, 上海市人, 高级工程师, 港口航道专业。E-mail: 86972724@qq.com

能力, 量化桥梁对航道通过能力影响, 有利于航道的规划设计和管理工作开展。

目前, 我国对航道通过能力的计算方法已经较为成熟, 对桥区航道通过能力的研究成果, 多是从船型、交通流、航速等角度提出了通过能力修正系数或计算公式^[1]。但上述研究尚难以量化桥梁尺度对航道限制作用, 在水位变化较大航段, 高潮位时桥梁净高较小, 进而影响桥区通过能力。

本文将结合苏申内港线航道闸外开敞段的桥区航道通过能力计算情况, 对内河受潮汐影响的桥区航道通过能力计算方法进行研究。

1 航道及桥梁概况

苏申内港线航道西起吴淞江上海市和江苏省界, 东至蕰藻浜入黄浦江口, 全长 47.37 km, 是长三角高等级内河航道网的重要组成部分。该航道规划等级为Ⅲ级, 本次研究桥区位于蕰东枢纽至黄浦江航段, 为开敞航道, 选择规划等级对应的船型作为代表船型, 并结合其所在区域位置、航道通航情况及发展趋势, 设计代表船型主要为 90 TEU 内河集装箱船、1 200 t 干散货船、1 000 t 油船等。航道设计最高通航水位为 5.70 m, 设计最低通航水位为 0.6 m。航道设计底宽 60 m、面宽 85 m、设计水深 4 m。

本文以苏申内港线航道上的现状轨道交通跨河桥梁为例进行桥区通过能力分析。该跨河桥梁为水中设墩结构, 主跨跨径为 70 m、桥墩净距为 60.8 m, 梁底为拱形。

2 计算方法分析

航道通过能力计算公式众多, 典型的公式有德国公式、长江公式、苏南运河公式、闵朝斌公式等^[2]。本次选取 DG/TJ 08-2116—2020 J 12229—2021《内河航道工程设计标准》^[3]中航道通过能力计算公式, 在该公式计算结果的基础上选取合理的修正系数对桥区通过能力进行估算。

桥区修正系数主要受水文条件影响, 同时也存在人工环境、气象条件等影响因素^[4]。人工环境是人为因素为主导的, 可根据不同的人工干预情况来判断, 存在特殊性, 不在本次研究范围; 气象条件可在航道通过能力计算公式的“全年通航时间 t ”参数中考虑, t 值扣除由于气象因素导致的封航时间。因此, 本文修正系数研究主要考虑水文条件影响因素。

跨河桥梁主要考虑其通航净空尺度对航道的

影响。净空宽度至少需满足单孔单向通航净宽的基础上才能进行桥区通航保证率的计算, 并通过航道通过能力计算公式中“航道线数 S ”参数进行调整; 净空高度不满足规范要求时, 水文条件的影响因素较大, 本次研究考虑推算出不同船型在桥区的通航保证率, 采用通航保证率作为修正系数, 从而推算出桥区的通过能力。

由于该桥区对应水深较深, 满足全年通航要求, 在分析该桥梁通航保证率时仅考虑通航净空尺度的影响; 经测算该桥梁净宽满足最大设计代表船型单向通航要求, 因此在桥区单向通航的基础上, 仅针对通航净高不满足要求的情况推算桥梁通航保证率。该保证率主要与水文条件相关, 当水位高于某水位特定值时, 通航净高不能满足规范要求, 将水位高于该特定值的工况视作不能通航, 基于上述假定条件, 对应不同的桥梁通航净宽尺度提出不同的水位特定值, 根据潮位累积频率曲线可以查出低于不同的水位特定值的概率, 将该值作为各设计代表船型对应的通航保证率。

3 桥区航道通过能力分析

3.1 通航净宽分析

根据规范要求计算可得, 该桥梁所需单孔双向通航孔净宽为 75 m^[3]。由于现状桥梁桥墩净距仅为 60.8 m, 不能满足单孔双向通航净宽要求, 因此桥下仅可单向通航, 根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[5]计算航道设计代表船型单孔单向通航孔净宽如表 1 所示。

表 1 设计代表船型单孔单向通航孔净宽

Table 1 Net width of single hole one-way navigation hole for design representative ship type

| 船型 | 单孔单向通航孔净宽 B_m/m |
|--------------------------|-------------------|
| 90TEU 内河集装箱船 | 42.3 |
| 1 200 t 干散货船 | 37.5 |
| 1 000 t 油船 | 35.9 |
| 一顶一列式顶推(1 000 t+1 000 t) | 54.2 |
| 1 000 t LNG 动力船舶 | 36.8 |

3.2 通航净高分析

根据相关文件要求及《内河航道工程设计标准》^[3]的要求, 长三角高等级航道水上过河建筑物通航净宽范围内通航净高不应小于 7 m, 且由于该桥梁属于轨道交通桥, 通航净高在 7 m 的基础上应增加 0.5 m, 因此该桥通航净高不应小于 7.5 m。

3.3 桥梁通航保证率分析

3.3.1 分析方法

桥梁净高满足规范要求的桥梁通航保证率近似为 100%，当净高不满足规范要求时，可以利用通航孔净宽对应的最小梁底标高减去规范要求净高，从而反算出满足通航净高要求的特定水位，再通过潮位累积频率曲线可以查出各对应特定水位的保证率，作为通航水位的保证率，即可作为该桥梁对应的通航保证率。

3.3.2 潮位累积频率曲线

根据收集的多年的水文资料，绘制出潮位累积频率曲线图^[6]，如图 1 所示，根据该曲线可查得高于某个水位时的保证率 P 。针对本次研究的净高 >7.5 m 的情况，需得出水位低于某个水位值时的保证率，即 $1-P$ 。

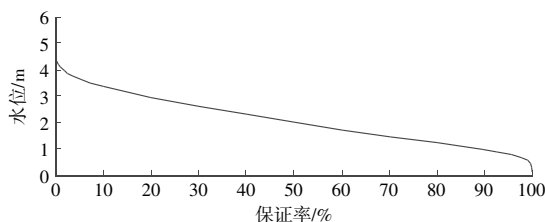


图 1 潮位累积频率曲线图

Fig. 1 Tidal level cumulative frequency curve

3.3.3 通航保证率推算

由于桥梁底部为拱形，不同的通航净宽对应的梁底标高最低值也不同，若要保证桥梁单孔单向通航净宽对应的净空高度满足 7.5 m 要求，则通航水位加 7.5 m 所得的标高不得高于通航净宽对应的梁底标高最低值，由此可推算出满足该桥梁通航净高要求的最高特定水位，当水位低于特定水位时通航安全。不同设计船型所需单孔单向通航孔净宽对应的梁底标高最低值、满足该桥梁通航净高要求的最高特定水位及各设计船型对应通航保证率如表 2 所示。

通过以上数据可以看出，除了顶推船队外，其余船舶的通航保证率均在 80% 以上。通过对航

表 2 设计代表船型对应通航保证率

Table 2 Navigation guarantee rates corresponding to design representative ship type

| 船型 | 单孔单向通航孔净宽 B_m /m | 对应梁底标高最低值 A /m | 满足规范要求最高水位 B /m | 通航保证率/% |
|---------------------------|--------------------|------------------|-------------------|---------|
| 90TEU 内河集装箱船 | 42.3 | 10.77 | 3.27 | 84.45 |
| 1 200 t 干散货船 | 37.5 | 11.00 | 3.50 | 89.44 |
| 1 000 t 油船 | 35.9 | 11.06 | 3.56 | 91.09 |
| 一顶一列式顶推 (1 000 t+1 000 t) | 54.2 | 10.08 | 2.58 | 66.31 |
| 1 000 t LNG 动力船舶 | 36.8 | 11.05 | 3.55 | 90.99 |

道运量预测的分析，散杂货单船货运量占比约为 67%，其通航保证率基本接近 90%；集装箱船货运量约为 20%，其通航保证率基本接近 85%。

3.4 航道通过能力计算

3.4.1 计算方法

参照《内河航道工程设计标准》^[3]，航道通过能力可通过以下公式计算：

$$W = \frac{1\,000 W_c V t S K}{L_c}$$

式中： W 为航道的船舶通过能力，t/a； W_c 为代表船型的载重吨，t； V 为航道的设计航速，km/h； L_c 为代表船型的船长，m； t 为全年通航时间，h，按年通航天数、设计通航保证率、日工作系数和 24 h 的乘积取值，日工作系数，可夜航的航道取 0.67~0.85，不夜航的航道取 0.5； S 为航道线数； K 为综合系数，取 0.078~0.088，开敞航道取低值，闸控航道取高值。该公式不考虑跨河桥梁影响的情况下可计算出该航道的通过能力。

3.4.2 航道通过能力

依据该航道航行条件对公式中的参数取值进行分析，内河船舶航速一般为 6~15 km/h，由于所处航段为设有水中墩的桥区范围，船速应适当降低取 8 km/h^[3]；全年通航时间考虑可夜航的航道日工作系数取 0.67；该航道为开敞航道，综合系数取 0.078。根据上述取值分析，分别计算出各设计代表船型对应的航道通过能力，如表 3 所示。

表 3 设计代表船型航道通过能力

Table 3 Navigation capacity of design representative ship types

| 船型 | W_c /t | V /(km·h ⁻¹) | t /h | S /线 | K | L_c /m | W /(万 t·a ⁻¹) |
|---------------------------|----------|----------------------------|--------|--------|-------|----------|-----------------------------|
| 90TEU 内河集装箱船 | 1 000 | 8 | 5 869 | 1 | 0.078 | 72.7 | 5 038 |
| 1 200 t 干散货船 | 1 200 | 8 | 5 869 | 1 | 0.078 | 64.0 | 6 867 |
| 1 000 t 油船 | 1 000 | 8 | 5 869 | 1 | 0.078 | 68.0 | 5 386 |
| 一顶一列式顶推 (1 000 t+1 000 t) | 2 000 | 8 | 5 869 | 1 | 0.078 | 161.0 | 4 549 |
| 1 000 t LNG 动力船舶 | 1 000 | 8 | 5 869 | 1 | 0.078 | 57.0 | 6 425 |

当航道的代表船型较多、尺度差异较大、船舶平均装载系数差异较大时，可分别计算不同代表船型的船舶通过能力，按不同代表船型的比例加权平均得到航道的通过能力^[3]。根据运量预测分析所得出的各设计代表船型在航道内的占比情况计算航道通过能力，如表 4 所示。

表 4 航道通过能力计算表
Table 4 Calculation of waterway navigation capacity

| 船型 | W/ (万 t·a ⁻¹) | 占比/ % | 各船型通过能力/(万 t·a ⁻¹) | 航道通过能力/(万 t·a ⁻¹) |
|------------------------------|------------------------------|----------|--------------------------------|-------------------------------|
| 90TEU 内河集装箱船 | 5 038 | 20 | 1 008 | 6 335 |
| 1 200 t 干散货船 | 6 867 | 67 | 4 601 | |
| 1 000 t 油船 | 5 386 | 5 | 269 | |
| 一顶一列式顶推 (1 000 t+1 000 t) | 4 549 | 3 | 136 | |
| 1 000 t LNG 动力船舶 | 6 425 | 5 | 321 | |

由表 4 可以看出，若不考虑跨河桥梁影响因素，该航道通过能力为 6 335 万 t/a。

3.5 桥区航道通过能力

由于该桥梁未达标建设，其净高不满足规范要求，改变了通航环境从而改变了船舶的通航行为，在一定程度上限制了航道的通过能力，可使用修正系数来体现对其影响^[4]。当水位高于满足该桥梁通航净高要求的最高特定水位时，船舶需要赶低潮过桥。因此，可采用不同船型在桥区的通航保证率近似作为修正系数，从而推断出桥区航道的通过能力，其计算如表 5 所示。

表 5 桥区航道通过能力计算表
Table 5 Calculation table of navigation capacity in bridge area waterway

| 船型 | 各船型通过能力/ (万 t·a ⁻¹) | 通航保证率/% | 桥区通过能力/ (万 t·a ⁻¹) | 桥区航道通过能力/ (万 t·a ⁻¹) |
|------------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 90TEU 内河集装箱船 | 1 008 | 84.45 | 851 | 5 593 |
| 1 200 t 干散货船 | 4 601 | 89.44 | 4 115 | |
| 1 000 t 油船 | 269 | 91.09 | 245 | |
| 一顶一列式顶推 (1 000 t+1 000 t) | 136 | 66.31 | 90 | |
| 1 000 t LNG 动力船舶 | 321 | 90.99 | 292 | |

通过表 5 可以看出，受该桥梁的影响桥区航道通过能力为 5 593 万 t/a，较航道通过能力减少了约 12%，该跨河桥梁对苏申内港线航道的通过能力产生了一定的削弱。

4 计算方法影响因素

4.1 其他影响因素

1) 上述计算方法仅计算了 1 座跨河桥梁对航道的通过能力影响，若航道上有多座桥梁未能达标建设，其通过能力影响判断将比较复杂，不能简单叠加，需结合潮汐情况、桥梁位置及限制因素等综合判断。当桥梁位置相近且限制因素类似时，可选取最不利桥梁进行分析，且安全措施可以一并考虑；当桥梁相距较远时，尚需在单桥区通航保证率的基础上扣除桥梁间的船舶航行时间成本。

2) 上述计算方法默认低水位情况下水深满足设计船型的通航要求，若存在水深限制情况，则需叠加水深限制条件，即船舶经过该桥的水位范围为特定低水位(满足船舶航行水深要求的最低水位)—特定高水位(满足桥梁净空要求的最高水位)；在计算通航保证率时根据可通航水位范围进行计算，即低于特定高水位的保证率扣除低于特定低水位的保证率，所得值即为该桥区的通航保证率。

3) 采用该方法计算时，通航净高按照规范要求取值，实际上每艘船舶的水线以上高度均不同，对应的通航净高要求也不同，散货船相对较低，集装箱船相对较高。即使是同一种类型船舶的水线以上高度也差别较大，该方法尚难以按照不同船型进行分类。目前规范所要求的净空高度值考虑了集装箱船的通航要求，散货船水面以上高度一般小于集装箱船，所以散货船的通过能力计算值偏小。

4.2 计算方法通用性分析

本文以苏申内港线航道闸外段的桥区航道为研究对象进行了通过能力计算方法的研究，该方法可用于内河航道开敞航段，水位受潮汐影响较明显，对于水位变化不大的内河闸控航段本方法不适用。且桥梁至少需满足单孔单向通航净宽的基础上，若不能满足此项要求，从理论上来讲规划设计船型无法通过。

5 计算方法的应用

在航道整治工程中桥梁的达标改建是工程的重要组成部分，但跨航道桥梁建设具有投资大、工期长的特点。同时跨河桥梁改建还会存在以下问题：1) 桥梁建成时间不长，由于规范调整等原因导致净空尺度虽不达标，但与标准差距较小，

拆除重建投资较大;2) 轨交、铁路、市政等跨河通道桥梁的改建将产生较大的社会影响, 改建难度大, 短时间内难以实施;3) 航道整治工程由于动拆迁、资金等原因, 部分桥梁改建时间与总体工程进度不匹配, 需要采取分期实施措施。

在规划及设计前期工作中需对跨河桥梁改建必要性做初步分析, 为项目决策提供依据。可通过桥区通过能力计算, 初步判定现有桥梁对航道通过能力的影响; 当桥区通过能力计算值大于航道规划货运量时, 可以初步判断现状桥梁的设置对该航道通过能力虽产生一定影响, 但仍能满足规划货运量要求, 可以通过增加管理措施以减小通航安全风险的方法保留该桥梁, 必要时可采取近远期实施方案解决; 反之, 则影响较大, 需对跨河桥梁进行达标改建。通过对桥区通航保证率的分析也能为航道管理工作提供技术支撑, 如待泊码头规模的确定、船舶交通组织管理等。

6 结语

1) 本文结合苏申内港线开敞段桥区航道通过能力研究成果, 提出了采用通航保证率作为修正系数计算桥区航道通过能力的计算方法。

2) 该方法能将跨河桥梁对航道的限制作用进行初步定量分析, 可用于航道规划、设计等前期

研究阶段及管理工作中。

3) 该方法适用于受潮汐影响的内河桥区航段, 且桥梁需至少满足单孔单向通航净宽要求。

参考文献:

- [1] 陈恺, 韩非非, 李俊星, 等. 桥区限制性航道通过能力研究[J]. 水道港口, 2010(5): 533-536.
CHEN Kai, HAN Fei-fei, LI Jun-xing, et al. Research on navigation capacity of restricted channel near a bridge[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2010(5): 533-536.
- [2] 董宇, 姜晔, 何良德. 内河航道通过能力计算方法研究[J]. 水运工程, 2007(1): 59-65.
DONG Yu, JIANG Ye, HE Liang-de. Calculation method of inland waterway's throughput capacity[J]. Port & Waterway Engineering, 2007(1): 59-65.
- [3] DG/TJ 08-2116—2020, 内河航道工程设计标准[S].
DG/TJ 08-2116—2020, Standard for design of inland waterway engineering[S].
- [4] 刘明俊, 万长征. 航道通过能力影响因素的分析[J]. 船海工程, 2008(5): 116-118.
LIU Ming-jun, WAN Chang-zheng. Analysis of the factors affecting traffic capacity of navigation channel[J]. Ship & Ocean Engineering, 2008(5): 116-118.
- [5] GB 50139—2014, 内河通航标准[S].
GB 50139—2014, Navigation standard of inland waterway[S].
- [6] JTS 145—2015(2022 版), 港口与航道水文规范[S].
JTS 145—2015(2022 edition), Code of hydrology for harbor and waterway[S].
- [7] GRIGORIEVA V G, BADULIN S I, GULEV S K. Global validation of SWIM/CFOSAT wind waves against voluntary observing ship data[J]. Earth and Space Science, 2022, 9(3): e2021EA002008.
- [8] JIANG H, MIRONOV A, REN L, et al. Validation of wave spectral partitions from SWIM instrument on-board CFOSAT against in situ data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-13.
- [9] TANG S, CHU X, JIA Y, et al. An appraisal of CFOSAT wave spectrometer products in the South China Sea[J]. Earth and Space Science, 2022, 9(2): e2021EA002055.
- [10] LI B, LI J, TANG S, et al. Evaluation of CFOSAT wave height data with in situ observations in the South China Sea[J]. Remote Sensing, 2023, 15(4): 898.
- [11] XU J, WU H, XU Y, et al. Validation of Nadir SWH and its variance characteristics from CFOSAT in China's offshore waters[J]. Remote Sensing, 2023, 15(4): 1005.
- [12] WANG J, LIU J, WANG Y, et al. Spatiotemporal variations and extreme value analysis of significant wave height in the South China Sea based on 71-year long ERA5 wave reanalysis[J]. Applied Ocean Research, 2021, 113: 102750.
- [13] WANG J, WANG Y. Evaluation of the ERA5 significant wave height against NDBC buoy data from 1979 to 2019[J]. Marine Geodesy, 2022, 45(2): 151-165.
- [14] 刘威, 王广生, 时健. 基于 ERA5 的几内亚湾及邻近海域波浪能空间分布和变化趋势[J]. 海岸工程, 2023, 42(3): 253-262.
LIU Wei, WANG Guang-sheng, SHI Jian. Spatial distribution and changing trends of wave energy in the Gulf of Guinea based on ERA5[J]. Coastal Engineering, 2023, 42(3): 253-262.
- [15] MONALDO F. Expected differences between buoy and radar altimeter estimates of wind speed and significant wave height and their implications on buoy-altimeter comparisons[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1988, 93(C3): 2285-2302.
- [16] QUEFFEULOU P. Long-term validation of wave height measurements from altimeters[J]. Marine Geodesy, 2004, 27(3-4): 495-510.

(上接第 5 页)