

内河航运船舶与船闸水工建筑物的碰撞事故难以避免。船闸的抗撞和防撞设计对于保障其正常运行至关重要。目前我国船闸的船舶撞击力主要依据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》^[1]的公式进行计算。然而实际调查结果表明,国内很多船闸的靠船墩、闸室墙和闸门等结构在船舶撞击作用下发生了不同程度的损伤,甚至被撞毁,严重影响了正常通航。陈明辉^[2]对苏北运河沿线船闸靠船墩的撞击力大小、方向、作用位置进行了计算分析,发现船舶吨位和撞击角度均会影响撞击力的大小;陈晓峰等^[3]通过现场试验对过闸船舶的撞击力开展研究,结果表明根据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式得到的船舶撞击力,远小于船舶对闸墙碰撞过程产生的动力峰值;杨辉^[4]分别采用规范方法和数值模拟方法对京杭运河苏北段靠船墩船撞力进行分析研究,发现根据 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式计算的船撞力取值偏小,国内外其他规范计算公式和有限元分析结果均显著大于该规范取值。通过对 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式的溯源分析^[5-6],业内普遍认为现行规范中的船舶撞击力计算方法存在一定的局限性。

船舶与结构物的碰撞是一种非常复杂的非线性

动力过程,难以用精确的数学方程描述。目前关于船撞问题的研究多采用经验公式、模型试验及数值模拟等手段。由于船舶撞击力受到船体构造、船舶质量、撞击速度、角度以及被撞体几何构型和刚度等多种因素影响,不同应用背景下撞击力大小不尽相同。因此,对于船闸碰撞问题,如何合理地计算船舶撞击力对于船闸结构安全设计至关重要。本文通过对规范公式、试验数据和数值模拟结果的综合对比分析,指出现有船舶撞击力计算方法的不足之处并提出改进建议。

1 船舶撞击力计算方法

国内外常用的船舶撞击力参考规范和代表性计算公式见表1。其中 F 为船舶撞击力; M 、 Δ_{\max} 为船舶排水量; T_{DW} 为船舶载质量; W 为船舶重力; v 为船舶速度; T 为撞击时间; α 为角度; K 、 γ 、 C_1 、 C_2 、 α' 、 η 、 C_M 为系数; F_0 为参考撞击荷载; \bar{E}_{imp} 为 $E_{\text{imp}}/1\ 425$, 其中 E_{imp} 为塑性变形吸收的能量; \bar{L} 为 $L/275$, 其中 L 为船舶长度; F_m 、 F_l 、 F_g 分别为船舶撞击力峰值、局部均值、全局均值; AASHTO 为美国国家公路与运输协会 (American Association of State Highway and Transportation Officials)。

表1 船舶撞击力相关规范及经验公式

Tab. 1 Codes and empirical formulas related to ship impact force

| 规范/文献 | 公式 | 荷载取值 | 质量 | 速度/(m·s ⁻¹) | 角度/(°) |
|---|---|----------|-----------|-------------------------|----------|
| JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》 | $F=0.9KW^{2/3}$ | 平均值的1.8倍 | 排水量,2/3次方 | 1 | 3~4 |
| JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》 ^[7] | $F=\frac{Wv}{gT}$ | 平均值 | 排水量 | 自变量,线性关系 | - |
| TB 10002—2017《铁路桥涵设计规范》 ^[8] | $F=\gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1+C_2}}$ | 平均值 | 排水量,0.5次方 | 自变量,线性关系 | 自变量,正弦关系 |

续表1

| 规范/文献 | 公式 | 荷载取值 | 质量 | 速度/(m·s ⁻¹) | 角度/(°) |
|---|--|-------------------------------|---------------------|-------------------------|---|
| JTG/T 3360-02—2020 《公路桥梁抗撞设计规范》 ^[9] | 轮船: $F = \alpha' \gamma \gamma v [(1+C_M)M]^{0.62}$ 驳船: $F = 0.0115M^{0.7} v$ | 以 95% 的相关系数对峰值进行参数拟合 | 排水量, 0.62 ~ 0.70 次方 | 自变量, 线性关系 | 自变量, 角度系数 $\gamma = 1 - a_0 \left(\frac{1}{M}\right)^{b_0} \cdot (1 - \cos\theta)$, 其中 θ 为船轴线与墙法线的夹角 |
| AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》 ^[10] | $F = 0.12v \sqrt{T_{DW}}$ | 等效静态船舶冲击力, 对应冲击力分布图上的 70% 分位值 | 吨级, 0.5 次方 | 自变量, 线性关系 | 90 |
| 欧洲统一规范 ^[11] | $F = v \sqrt{KM}$ | - | 排水量, 0.5 次方 | 自变量, 线性关系 | 90 |
| Pedersen 公式 ^[12] | $F = \begin{cases} F_0 \bar{L} [\bar{E}_{imp} + (5 - \bar{L}) \bar{L}^{1.6}]^{0.5} & (\bar{E}_{imp} \geq \bar{L}^{2.6}) \\ 2.24 F_0 (\bar{E}_{imp} \bar{L})^{0.5} & (\bar{E}_{imp} < \bar{L}^{2.6}) \end{cases}$ | 最大值 | 排水量, 0.5 次方 | 自变量, 线性关系 | 90 |
| 敏诺斯基-捷勒-沃易荪公式 ^[13] | $F = 0.024 (v \Delta_{max})^{2/3}$ | - | 排水量, 2/3 次方 | 自变量, 2/3 次方关系 | - |
| 修正的 Woisin 公式 ^[14] | $P_{max} = 0.88 \sqrt{T_{DW}} \left(\frac{v}{8}\right)^{2/3}$ | 最大值 | 吨级, 0.5 次方 | 自变量, 2/3 次方关系 | 90 |
| 挪威公共道路局公式 ^[15] | $F = 3.5 (T_{DW})^{1/3}$ | - | 吨级, 1/3 次方 | - | - |
| 王君杰等 ^[16] | $P_m = 0.017M^{0.70} v$ $P_l = 0.0188M^{0.66} v$ $P_g = 0.0112M^{0.66} v$ | 峰值; 局部均值; 全局均值 | 排水量, 0.66 ~ 0.70 次方 | 自变量, 线性关系 | 90 |

注: 除特别说明外, 表中角度为船舶中纵轴线与墙面夹角。

由表 1 可以看出, 各计算公式的形式虽不一样, 但大都与船舶速度和排水量这两个因素有关。这些公式的来源有: 1) 依据能量交换原理和冲量原理推导而来, 可以较好地描述完全弹性的系统, 但对于复杂体系的弹塑性碰撞问题难以给出比较准确的定量结果; 2) 基于原型和模型的试验资料以及大量碰撞数值计算结果的统计而来, 往往是针对某一专门问题提出来的计算公式。在使用这些公式时需要注意它们的适用范围, 每个公式并不是对任何一种情况都适用。

2 船舶撞击力结果对比

2.1 各公式计算结果对比

首先依托船舶碰撞闸墙的两个代表性案例, 比较 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》和

其他常用公式的计算结果。

2.1.1 案例 1

目前很多学者对 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式存在的误解是认为其没有考虑撞击速度和角度, 经考证其来源为文献[5], 该公式对应的条件为船速 1 m/s、角度 3°~4°, 将这个条件代入各常用公式进行比较, 参数取值和计算结果见表 2 和 3。JTG/T 3360-02—2020《公路桥梁抗撞设计规范》给出了船舶质量 M (即排水量) 与船舶载质量 (T_{DW}) 之间的换算关系, 对于散货船: $T_{DW} = (0.75 \sim 0.85)M$, 本文取 $0.75M$ 。

由表 3 可知, 各公式计算结果差异很大, 部分原因是适用条件不同, 荷载取值方法也不尽相同, 有的是均值, 有的是峰值, 还有的是基于数理统计得到的概率值。总体上看, TB 10002—2017

《铁路桥涵设计规范》公式计算值最小, 可能原因在于弹性变形系数取值偏大; JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》、JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》和王君杰全局均值公式结果较为接近; 欧洲统一规范、王君杰峰值公式和 AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》公式分别约为 JTJ 307—

2001《船闸水工建筑物设计规范》公式计算值的 1.5 倍、1.7 倍和 2.2 倍; 再大一些的是 Pedersen 公式、敏诺斯基-捷勒-沃易荪公式和修正的 Woisin 公式计算结果; 挪威公共道路局公式的计算结果最大, 远超 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式的计算结果。

表 2 案例 1 各公式中的参数取值
Tab. 2 Parameter values in various formulas for Case 1

| 规范或文献公式 | 参数取值 |
|---------------------------|---|
| JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》 | $K = 1.0$ |
| JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》 | $v = 1.0 \times \sin 4^\circ = 0.0697 \text{ m/s}, T = 1 \text{ s}, 0.75M = T_{Dw}$ |
| TB 10002—2017《铁路桥涵设计规范》 | $v = 1.0 \times \sin 4^\circ = 0.0697 \text{ m/s}, \alpha = 4^\circ, \gamma = 0.2 \text{ s/m}^{1/2}, C_1 + C_2 = 0.0005 \text{ m/kN}, 0.75M = T_{Dw}$ |
| AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》 | $v = 0.0697 \text{ m/s}$ |
| 欧洲统一规范 | $v = 0.0697 \text{ m/s}, K = 5 \text{ MN/m}$ |
| Pedersen 公式 | $v = 0.0697 \text{ m/s}$ |
| 敏诺斯基-捷勒-沃易荪公式 | $v = 0.0697 \text{ m/s}, 0.75\Delta_{\max} = T_{Dw}$ |
| 修正 Woisin 公式 | $v = 0.0697 \text{ m/s}$ |
| 挪威公共道路局公式 | $v = 0.0697 \text{ m/s}$ |
| 王君杰峰值公式 | $v = 0.0697 \text{ m/s}, 0.75M = T_{Dw}$ |
| 王君杰局部均值公式 | $v = 0.0697 \text{ m/s}, 0.75M = T_{Dw}$ |
| 王君杰全局均值公式 | $v = 0.0697 \text{ m/s}, 0.75M = T_{Dw}$ |

表 3 案例 1 各规范公式计算结果比较
Tab. 3 Comparison of calculation results from various specification formulas for Case 1

| 规范或文献公式 | 船舶撞击力/kN | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 500 DWT | 1 000 DWT | 2 000 DWT | 3 000 DWT | 5 000 DWT |
| JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》 | 68.68 | 109.03 | 173.07 | 226.78 | 318.80 |
| JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》 | 46.50 | 93.00 | 186.01 | 279.03 | 464.67 |
| TB 10002—2017《铁路桥涵设计规范》 | 50.43 | 71.32 | 100.86 | 123.53 | 160.97 |
| AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》 | 187.18 | 264.71 | 374.35 | 458.49 | 591.42 |
| 欧洲统一规范 | 127.36 | 180.11 | 254.71 | 311.96 | 402.42 |
| Pedersen 公式 | 248.44 | 394.27 | 573.74 | 721.94 | 898.17 |
| 敏诺斯基-捷勒-沃易荪公式 | 310.37 | 492.68 | 782.07 | 1 024.81 | 1 439.86 |
| 修正 Woisin 公式 | 833.60 | 1 178.90 | 1 667.20 | 2 041.90 | 2 634.69 |
| 挪威公共道路局公式 | 27 773.76 | 34 991.94 | 44 086.07 | 50 465.27 | 59 849.16 |
| 王君杰峰值公式 | 57.05 | 90.14 | 142.42 | 186.13 | 260.76 |
| 王君杰局部均值公式 | 95.76 | 151.30 | 239.07 | 312.43 | 437.71 |
| 王君杰全局均值公式 | 112.31 | 182.45 | 296.39 | 393.66 | 562.90 |

2.1.2 案例2

根据 JTS 305—2025《船闸总体设计规范》^[17]条文说明第 4.2 节,对于三级及以上的高等级航道,目前新建船闸基本有两种闸室宽度:23 和 34 m,过闸船舶的最大船宽基本在 16.3 m 以内,可见船闸在宽度方向有较大的富余。按 JTS 305—2025

《船闸总体设计规范》表 7.1.5 规定,船舶进闸平均速度为:曲线进闸 0.7~0.9 m/s,直线进闸 0.8~1.0 m/s;出闸平均速度为:曲线出闸 0.8~1.0 m/s,直线出闸 1.1~1.3 m/s。在案例 2 中,假设闸室宽度 34 m,船舶速度 1.3 m/s,撞击角度为 9°,各常用公式计算结果见表 4。

表 4 案例 2 各常用公式计算结果比较

Tab. 4 Comparison of calculation results from various specification formulas for Case 2

| 规范或文献公式 | 船舶撞击力/kN | | | | |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 500 DWT | 1 000 DWT | 2 000 DWT | 3 000 DWT | 5 000 DWT |
| JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》 | 68.68 | 109.03 | 173.07 | 226.78 | 318.80 |
| JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》 | 135.58 | 271.15 | 542.31 | 813.46 | 1 355.83 |
| TB 10002—2017《铁路桥涵设计规范》 | 147.02 | 207.92 | 294.05 | 360.13 | 469.66 |
| AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》 | 545.69 | 771.72 | 1 091.37 | 1 336.65 | 1 725.61 |
| 欧洲统一规范 | 371.29 | 525.09 | 742.59 | 909.48 | 1 174.16 |
| Pedersen 公式 | 723.57 | 1 148.30 | 1 671.01 | 2 102.65 | 2 735.33 |
| 敏诺斯基-捷勒-沃易荪公式 | 633.49 | 1 005.63 | 1 596.37 | 2 091.86 | 2 940.08 |
| 修正 Woisin 公式 | 1 701.21 | 2 045.88 | 3 402.43 | 4 161.11 | 5 379.71 |
| 挪威公共道路局公式 | 27 773.76 | 34 991.94 | 44 086.07 | 50 465.27 | 59 849.16 |
| 王君杰峰值公式 | 11 180.34 | 15 811.39 | 22 360.28 | 27 386.13 | 35 355.34 |
| 王君杰局部均值公式 | 166.15 | 262.53 | 414.81 | 542.09 | 760.83 |
| 王君杰全局均值公式 | 278.89 | 440.67 | 696.30 | 909.94 | 1 277.10 |
| JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》 | 327.10 | 531.38 | 863.22 | 1 146.53 | 1 642.39 |

现有 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式的主要缺陷是船舶撞击力不能随撞击速度和角度变化,在案例 2 中计算结果最小,约为 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》和王君杰全局均值公式结果的一半甚至更小;欧洲统一规范、王君杰峰值公式和 AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》公式结果分别为 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》计算值的 4.4、5.0 和 6.5 倍左右。由此可知, JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》在实际应用条件下确实偏小,根据其他各公式得到的船舶撞击力也无法获得相对一致的结论,这给船闸的防撞设计及日常维护带来不便。

2.2 各公式计算结果与船-闸碰撞试验结果对比

目前很少有船舶碰撞船闸试验的公开报道。

文献[3]以及于剑^[18]通过自行设计研制碰撞力测量系统,开展船舶碰撞力的现场测试,得到不同工况下过闸船舶对闸室墙(注:经考证,实际为靠船墩)的撞击力。代表性试验工况和结果见表 5。

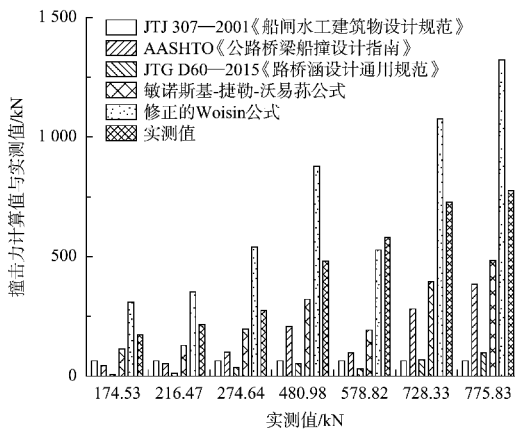
根据碰撞力的实测值,开展各常用公式计算结果的对比分析,见图 1。碰撞力峰值实测值与 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式计算值差别很大,两者比值范围为 2.73~12.12。对于有护舷的工况,在很小的撞击速度下($v=1.7$ 、 2.07 cm/s),试验值与 AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》公式计算值的比值为 4.03~4.11,当速度超过 3.93 cm/s 后,比值为 2.02~2.74;相比之下,试验值与敏诺斯基-捷勒-沃易荪公式和修正的 Woisin 公式结果的比值始终稳定在 1.6、0.6 附

近; 在船舶低速撞击且无护舷缓冲情况下, 修正的 Woisin 公式计算的船舶撞击力接近实测值。值得说明的是, 现有研究成果普遍证实船舶撞击力峰值为平均值的 2 倍左右; 然而, 文献 [18] 试验

的实测峰值至少在平均值(按 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》公式计算)的 7 倍以上, 最高甚至达 27 倍。结合动量守恒理论及试验碰撞力时程曲线的分析, 可合理推断该试验值偏大。

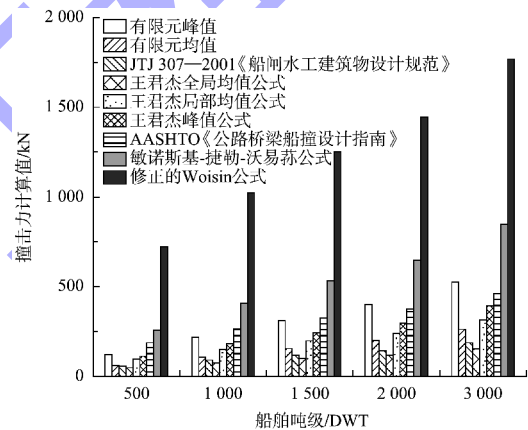
表 5 代表性试验工况和结果
Tab. 5 Representative test conditions and results

| 工况 | 船舶质量/t | 撞击角度/(°) | 法向撞击速度/(cm·s ⁻¹) | 是否采用护舷 | 碰撞历时/s | 法向撞击力峰值/kN |
|----|--------|----------|------------------------------|--------|--------|------------|
| 1 | 600 | 90 | 8.15 | 是 | 0.982 | 480.98 |
| 2 | 600 | 90 | 1.70 | 是 | 1.606 | 174.53 |
| 3 | 600 | 90 | 3.80 | 否 | 0.758 | 578.82 |
| 4 | 600 | 90 | 15.09 | 是 | 0.946 | 775.83 |
| 5 | 600 | 90 | 11.07 | 是 | 1.014 | 728.33 |
| 6 | 600 | 30 | 2.07 | 是 | 1.130 | 216.47 |
| 7 | 600 | 15 | 3.93 | 是 | 0.677 | 274.64 |



注: 实测值 578.82 kN 为无护舷撞击, 其余为有护舷撞击结果。

图 1 各公式计算结果与船舶碰撞试验结果对比
Fig. 1 Comparison between calculation results from common formulas and ship collision test results



注: 撞击工况为无护舷, 斜向 10° 撞击。

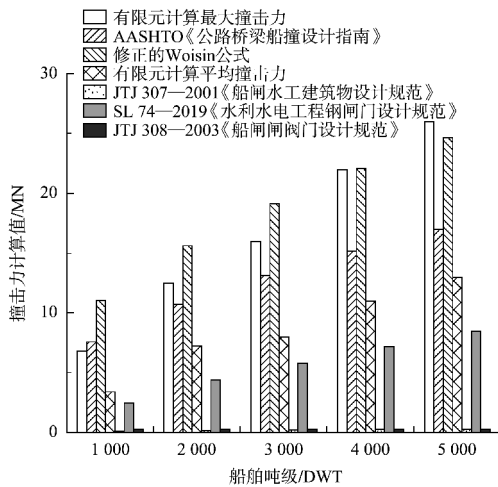
图 2 陈驰数值模拟的法向撞击力与各公式结果对比
Fig. 2 Comparison of normal ship impact force of Chen Chi's numerical model and various formulas

2.3 各公式计算结果与船-闸碰撞数值模拟结果对比

陈驰^[19]采用有限元方法模拟 500~3 000 吨级船舶与整体式和分离式船闸的碰撞, 得到的船舶法向撞击力与各公式计算结果对比见图 2。可见, 撞击力均值的有限元结果稍大于 JTG 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》公式计算值。与修正的 Woisin 公式相比, 有限元计算的撞击力峰值明显偏小, 但与王君杰峰值公式及 AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》结果相差不大。

迟朝娜等^[20]以谏壁三角船闸为例, 采用有限元方法模拟不同吨级船舶与闸门的碰撞, 与常用公式结果对比见图 3。可以看出, JTG 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》、JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》^[21]取值明显偏低; SL 74—2019《水利水电工程钢闸门设计规范》^[22]若按实际撞击时间取值, 得到的船舶撞击力约为有限元撞击力平均值的 70%; AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》计算值则介于有限元撞击力平均值和峰值之

间；与修正的 Woisin 公式相比，有限元计算的最大冲击力与公式计算值的比值范围在 0.62~1.00。



注：SL 74—2019《水利水电工程钢闸门设计规范》公式中的撞击时间取数值模拟得到的时间；前 3 种计算方式得到的冲击力为最大值，后 4 种计算方式得到的冲击力为均值；1 000~5 000 DWT 船舶对应的撞击时间分别为 0.81、0.91、1.04、1.11、1.18 s；撞击工况为无护舷，正向撞击，速度 $v=2$ m/s。

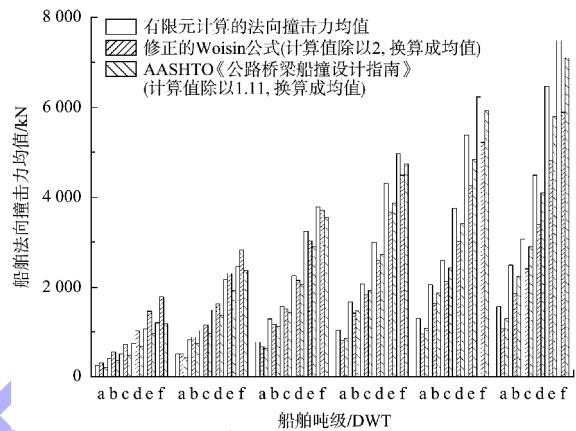
图 3 迟朝娜等数值模拟得到的船舶冲击力与
各公式结果对比

Fig. 3 Comparison of ship impact force calculated by Chi Zhaona et al's numerical model and various formulas

李亮亮等^[23]以江苏某船闸靠船墩为例，建立船舶、靠船墩及地基土的三维有限元模型，在与文献[18]的试验结果验证基础上，得到了船舶冲击力的变化规律。结果表明，数值模拟得到的冲击力与船舶质量的 0.5 次方成正比，与速度的 1 次方成正比，这与 AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》公式反映的物理量关系一致，两者的冲击力均值大小也相近，比值范围为 1.02~1.20。在修正的 Woisin 公式中，冲击力与船舶质量的 0.5 次方成正比，与速度的 2/3 次方成正比，数值模拟均值结果与修正的 Woisin 公式计算值（均值）比值在 0.68~1.45。对比结果见图 4。

鄢亚军等^[24]依托江苏某重力式船闸闸室结构，建立船舶-闸室-土体三维有限元模型，通过船舶撞击闸室瞬态动力分析，得到不同工况下的冲击力时程曲线。结果表明：船舶撞击闸室的法向平均冲击力与船舶排水量的 1/2 次方、撞击速度的 1 次

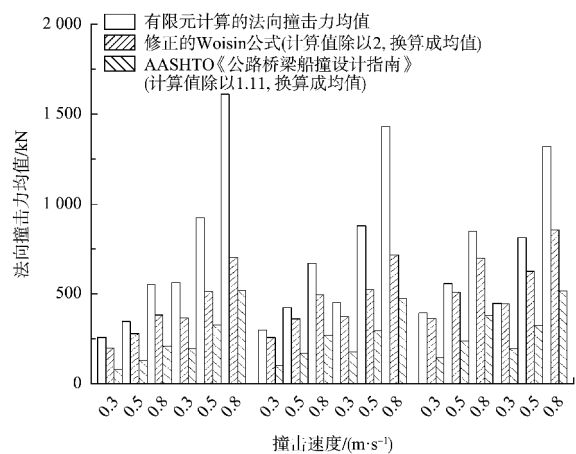
方、撞击角度的 1 次方成线性关系。将数值模拟得到的船舶法向冲击力均值与 AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》、修正的 Woisin 公式计算结果（均值）进行对比，见图 5。数值结果与 AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》结果比值范围为 2.23~3.26，而与修正的 Woisin 公式结果比值在 1.01~2.30。



注：a~f 分别表示船舶吨级分别为 100、300、500、1 000、2 000、3 000 DWT；从左到右每组的船舶速度分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 m/s；AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》计算的等效静态船撞力比均值大 11%；撞击工况为无护舷，正向撞击。

图 4 李亮亮等数值模拟与各公式得到的船舶法向
冲击力均值数据对比

Fig. 4 Comparison of mean normal ship impact force calculated by Li Liangliang et al's numerical model and various formulas



注：从左到右每三个速度为一组，撞击角度分别为 8°、20.25°、8°、14.13°、8°、10.88°；船舶吨级分别为 300、300、500、500、1 000、1 000 DWT；撞击工况为无护舷，斜向撞击。

图 5 鄢亚军等数值模拟的船舶法向冲击力平均值与
各公式结果对比

Fig. 5 Comparison of mean normal ship impact force calculated by Yan Yajun et al's numerical model and various specification formulas

各文献数值模拟研究典型工况结果对比见表 6。其中, 1 000 吨级船舶在速度 0.3 m/s 时产生的撞击力是按力与速度 1 次方成正比的关系得到, 以使各文献的结果具有可比性。可以看出, 因现有

数值研究中构建的船舶模型过于简化, 关键动力参数的设置不够合理, 所得结果应存在一定失真, 彼此之间差异也比较大。

表 6 各文献船闸船舶撞击力数值模拟结果对比(1 000 吨级船舶)

Tab. 6 Comparison of numerical results of ship impact force on locks from literature(1,000 DWT ship)

| 来源 | 船舶法向速度/(m·s ⁻¹) | 撞击力均值/kN | 船舶建模方法评论 |
|--------|-----------------------------|----------|---|
| 文献[19] | 0.07 | 108.3 | 仅建外壳;不同吨级船舶未考虑船型、尺寸和内部构造对刚度的影响;误将水体作用以负质量形式加到船体总质量中 |
| | 0.30 | 464.1 | |
| 文献[20] | 2.00 | 3 400.0 | 简化为刚性板;船舶吨位由改变刚性板材料密度实现 |
| | 0.30 | 510.0 | |
| 文献[23] | 0.20 | 739.8 | 未交代建模细节 |
| | 0.30 | 1 109.7 | |
| 文献[24] | 0.15 | 1 320.3 | 简化为钢壳;钢壳厚度取值过大(壁厚取 0.038 m) |
| | 0.30 | 2 640.6 | |

3 护舷对船舶撞击力的缓冲效果讨论

内河中行驶的船舶常沿船舷四周间隔布置一些废旧轮胎作为护舷, 在进入闸室前, 把这些轮胎放下, 以保护船舶, 减少碰擦造成的损害。

文献[18]的试验结果表明, 无护舷船舶撞击力峰值是有护舷船舶撞击力峰值的 2.01 倍左右。鄢亚军^[25]建立船舶、护舷、闸室结构及周边土体三维动力有限元模型, 考虑船侧橡胶护舷作用, 对船舶撞击闸室进行瞬态动力分析, 得到了撞击力受护舷影响的规律, 见图 6。

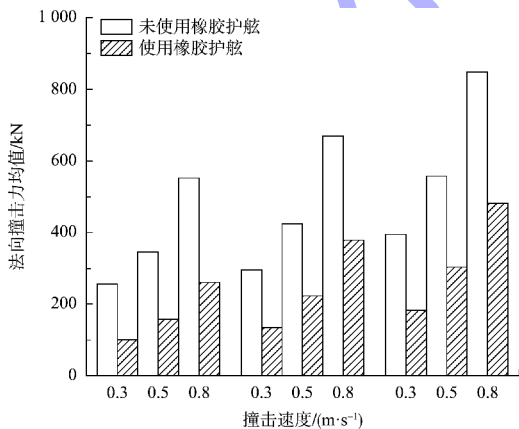
数值模拟结果表明, 不同吨级船舶使用护舷前后的平均撞击力比值范围为 1.76:1~2.52:1。可见, 橡胶护舷对低速船舶撞击船闸起到了很好的缓冲作用下, 对船舶撞击力的削减可达 50%左右。

4 船-闸碰撞数值模拟标准化建议

碰撞数值模拟方法经过数十年来的验证、优化、迭代和效率提升, 已为汽车、船舶和航空等行业多个规范、标准的制定提供了科学、高效的技术手段。如在交通领域, JTG/T 3360-02—2020《公路桥梁抗撞设计规范》中很多公式便是基于大量的高保真船舶碰撞数值模拟结果统计而来。然而, 在现有的船-闸碰撞研究中, 数值建模标准不一, 结果差异很大。因此, 借鉴船桥碰撞领域相关成果^[26-28], 提出以下数值模拟方法建议以供参考。

4.1 有限元模型构建

船舶模型按不同吨级的通航代表性船舶的实际构造建立, 可根据不同部分的重要性而区分模型详细程度, 对结构受力的主要部位进行加密处理; 采用质量元对船舶模型进行配重^[29], 使整船质量和重心位置与实船相符; 水-船舶的相互作用可等效为附连水质量^[30]赋予船舶; 土体网格划分按照距离船闸闸室越近划分越密的渐变方法, 采用从上至下、从中间向两侧渐变稀疏的网格。



注: 撞击角度为 8°; 从左到右每三个速度为一组, 每组船舶吨级分别为 300、500、1 000 DWT。

图 6 鄢亚军数值模拟船舶使用护舷前后的法向平均撞击力对比

Fig. 6 Comparison of mean normal ship impact force of before and after using fenders in Yan Yajun's numerical model

4.2 单元定义

船首外板、各层甲板、舱壁板和肋板等可采用壳单元模拟,纵、横向加强骨架等可采用梁单元模拟,船中和船尾可按船体外壳建模,采用壳单元模拟,护舷、闸室、靠船墩、土体等可采用实体单元模拟。

4.3 材料本构

船首和闸门等钢结构宜采用随动硬化塑性模型,护舷等橡胶制品宜采用非线性弹性模型,闸室墙、靠船墩等混凝土结构可采用混凝土损伤模型或连续面盖帽模型,地基土体可采用弹塑性模型,常用的屈服准则为 Mohr-Coulomb 准则和 Drucker-Prager 准则。材料本构中的输入参数应根据相关规范、试验或工程实践验证确定。

4.4 接触约束定义

船首与闸室(或靠船墩)、护舷与闸室、闸室和地基土、闸室和回填土之间应设定面-面接触,设置主从面接触对,选择刚度大的为主面。主从面接触对设置切向行为和法向属性,切向行为采用罚函数法,摩擦系数可根据材料特性或实际试验数据确定。法向属性设置为硬接触。接触和约束算法中的控制参数应根据必要的试验数据或工程实践验证确定。

4.5 初始条件定义

船舶撞击速度和角度应根据 JTS 305—2025《船闸总体设计规范》或现场实际情况确定。船舶与闸门、闸室、靠船墩等相互作用着力点的高度应根据船舶满载吃水、闸室水位确定。

4.6 数值方程求解

非线性冲击动力学有限元方程的求解宜采用显式中心差分法,显式动力分析中的单元计算宜采用单点高斯积分。求解过程中,需对沙漏效应、体积黏性及能量进行控制。计算终止时间应设置在船撞力完全衰减至零之后,以确保响应的完整性。计算时间步长应根据最小的单元特征长度和声速确定,必要时可采用质量缩放以平衡计算效率与精度。

4.7 数据处理

为确保计算结果的可靠性,建议采用粗、中、细三套网格对数值模型进行网格独立性分析。在计算结果分析时,可绘制撞击力-时间曲线或撞击力-撞深曲线,采用使用护舷后船撞力峰值与不使用护舷时船撞力峰值作为船撞力削减率评价指标,船舶撞击力的等效静力可参考文献[14]采用的方法;绘制能量转换-时间曲线,统计船舶与船闸及各构件的吸能比,以明确各部分的防撞贡献与损伤模式;绘制典型时刻或最终状态下,船舶、闸室、靠船墩和闸门的应力、变形和损伤等物理量云图,揭示结构的受力机理、变形模式及可能的损伤集中区域,为评估船闸抗撞性能提供科学依据。

5 结论

1) 目前船闸中的船舶撞击力通常采用 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》中的公式进行计算,在特定工况(船速 1 m/s、角度 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$)下,该规范公式计算值与 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》和王君杰全局均值公式结果大致相当,但在设计工况(船速 1.3 m/s、角度 9°)下则明显偏小。

2) 现有文献研究成果对比表明,修正的 Woisin 公式计算值与目前仅有的船舶碰撞船闸试验值最接近,AASHTO《公路桥梁船撞设计指南》公式计算结果则与部分数值模拟结果相近、物理量关系一致。通过研判分析,现有的试验测量值应比实际情况偏大,而现有数值模拟因模型构造过于简化、参数设置不合理等问题,也会使计算结果存在一定失真。

3) 橡胶护舷对低速船舶撞击船闸可以起到很好的缓冲作用,对船舶撞击力的削减可达 50%左右,建议继续进行试验、数模论证之后,在船舶撞击力计算公式引入削减系数,以估算船舶-护舷-船闸的作用力。

4) 碰撞数值模拟方法已为多个规范、标准的

制定提供了有力的技术支持。借鉴船桥碰撞领域相关成果,本文提出船-闸碰撞数值模拟的标准化方案,从建模方法、单元类型、材料本构、接触算法和条件设置等方面给出了详细说明,可供相关研究参考。

参考文献:

- [1] 船闸水工建筑物设计规范: JTG 307—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Code for design of hydraulic structures of shiplocks: JTG 307-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [2] 陈明辉. 船闸靠船墩损坏现状及船舶撞击力计算分析[J]. 中国水运, 2008, 8(9): 3-4.
CHEN M H. Damage status of berthing dolphins in ship locks and analysis of ship impact force calculation [J]. China water transport, 2008, 8(9): 3-4.
- [3] 陈晓峰, 陈达, 廖迎娣. 过闸船舶撞击力研究[J]. 水运工程, 2010(9): 48-50.
CHEN X F, CHEN D, LIAO Y D. Study on the ship impact force to lock wall [J]. Port & waterway engineering, 2010(9): 48-50.
- [4] 杨辉. 苏北运河船闸靠船墩船撞力的计算研究[J]. 中国水运, 2009, 9(8): 34-35, 50.
YANG H. Study on the calculation of ship impact force on berthing dolphins in the Northern Jiangsu Canal [J]. China water transport, 2009, 9(8): 34-35, 50.
- [5] 米哈依洛夫. 船闸[M]. 华东水利学院, 天津大学, 大连工学院水道及海港教研组, 译. 上海: 科学技术出版社, 1957.
MIKHAILOV A B. Ship locks [M]. East China Water Conservancy University, Tianjin University, Waterways and Port Teaching Group of Dalian Institute of Technology, translate. Shanghai: Science and Technology Press, 1957.
- [6] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
WANG Z G. Design of ship locks [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1992.
- [7] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60-2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [8] 铁路桥涵设计规范: TB 10002—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002-2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [9] 公路桥梁抗撞设计规范: JTG/T 3360-02—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
Specifications for Collision Design of Highway Bridges: JTG/T 3360-02-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [10] AASHTO. Guide specifications and commentary for vessel collision design of highway bridges[S]. 2nd ed. Washington: AASHTO, 2009.
- [11] VROUWENVELDER A C W M. Design for ship impact according to Eurocode 1[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1998.
- [12] PEDERSEN P T, VALSGAARD S, OLSEN D, et al. Ship impacts-bow collisions[J]. International journal of impact engineering, 1993, 13(2): 163-197.
- [13] 罗林阁, 曹映泓, 陈国虞, 等. 船舶撞击桥梁的撞击力计算方法探讨[J]. 中外公路, 2006, 26(5): 78-81.
LUO L G, CAO Y H, CHEN G Y, et al. Discussion on calculation methods for ship impact force on bridges[J]. Journal of China & foreign highway, 2006(5): 78-81.
- [14] LARSEN O D. Ship collision with bridges: the interaction between vessel traffic and bridge structures [M]. Zurich: IABSE, 1993.
- [15] GLUVER H, OLSEN D. Ship collision analysis [M]. Rotterdam: A A Balkema, 1998.
- [16] 王君杰, 陈诚, 汪宏, 等. 基于碰撞数值模拟的桥梁等效静力船撞力-基本公式[J]. 公路交通技术, 2009(2): 66-70.
WANG J J, CHEN C, WANG H, et al. Equivalent static force of ship impact to bridge based on impact numeric simulation—fundamental formula[J]. Technology of highway and transport, 2009(2): 66-70.
- [17] 船闸总体设计规范: JTS 305—2025 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.

- Code for overall design of navigation locks: JTS 305-2025[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.
- [18] 于剑. 过闸船舶对船闸碰撞力试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- YU J. Experimental research on collision force to ship lock brought by passing vessels [D]. Nanjing: Hohai University, 2008.
- [19] 陈驰. 船舶与船闸闸室结构撞击力分布的有限元仿真分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- CHEN C. Finite element simulation analysis of the collision force distribution of the ship and the lock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [20] 迟朝娜, 徐宗美. 基于 ANSYS/LS-DYNA 模块的船-闸撞击力分析[J]. 水运工程, 2021(8): 129-133.
- CHI Z N, XU Z M. Analysis of ship-gate impact force based on ANSYS/LS-DYNA modular[J]. Port & waterway engineering, 2021(8): 129-133.
- [21] 船闸闸阀门设计规范: J/TJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- Code for design of lock gates and valves of shiplocks: J/TJ 308-2003[S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [22] 水利水电工程钢闸门设计规范: SL 74—2019[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- Design specification for steel gates of water and hydropower projects: SL74-2019 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.
- [23] 李亮亮, 高羽末. 靠船墩船舶撞击力计算方法及影响因素研究[J]. 中国水运, 2015(13): 40-41.
- LI L L, GAO Y M. Research on calculation methods and influencing factors of ship impact force on berthing dolphins[J]. China water transport, 2015(13): 40-41.
- [24] 鄢亚军, 陶桂兰. 船闸闸室结构的船-墙碰撞三维有限元分析[J]. 水运工程, 2017(1): 131-135, 142.
- YAN Y J, TAO G L. Three dimensional finite element analysis of lock chamber wall in collision with ship[J]. Port & waterway engineering, 2017(1): 131-135, 142.
- [25] 鄢亚军. 船闸船舶撞击力计算方法研究[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 308-312, 32.
- YAN Y J. Study on calculation methods for ship impact force on ship locks [J]. Urban roads bridges & flood control, 2018(8): 308-312, 32.
- [26] 李军, 王君杰, 欧碧峰. 船桥碰撞数值模拟方法研究[J]. 公路, 2010(10): 14-19.
- LI J, WANG J J, OU B F. Research on numerical simulation of ship-bridge collision[J]. Highway, 2010(10): 14-19.
- [27] 王君杰, 陈传景, 宋彦臣, 等. 驳船斜撞刚性墙动力时程概率模型[J]. 振动与冲击, 2016, 35(15): 23-28, 57.
- WANG J J, CHEN C J, SONG Y C, et al. Probabilistic model for dynamic time history of a barge-rigid wall oblique collision [J]. Journal of vibration and shock, 2016, 35(15): 23-28, 57.
- [28] 陈涛, 王建国. 船桥碰撞撞击力的有限元数值模拟与分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 82-87.
- CHEN T, WANG J G. Finite element numerical simulation and analysis of impact force of ship-bridge collision[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2018, 41(1): 82-87.
- [29] 陈国虞, 王礼立, 杨黎明, 等. 桥梁防撞理论和防撞装置设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- CHEN G Y, WANG L L, YANG L M, et al. The protection theory for ship-bridge collisions and the design of crashworthy devices [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [30] 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.
- FAN W, ZHONG Z W, WANG J J, et al. Vessel-bridge collisions: accidents, analysis, and protection [J]. China journal of highway and transport, 2024, 37(5): 38-66.

(本文编辑 王璵)