



基于 ANSYS/LS-DYNA 模块的 船-闸撞击力分析

迟朝娜¹, 徐宗美²

(1. 日照职业技术学院 建筑工程学院, 山东 日照 276826;

2. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271000)

摘要: 进行闸门设计或增加防撞设施时, 船舶撞击力的取值非常重要。以谏壁三角船闸为例, 运用 ANSYS 有限元计算软件分析得出 5 种撞击速度、5 种船舶排水量共 25 种工况的撞击力时程曲线, 与国内常用规范进行对比分析。结果表明: 撞击时间随着撞击速度的增加而缩短, 随着船舶吨位的增加而增大; 《船闸水工建筑物设计规范》《船闸闸阀门设计规范》采用的船舶撞击力没有综合考虑船舶吨位和撞击速度两者的影响, 取值偏低; 《水利水电工程钢闸门设计规范》的船舶撞击力取值约为有限元分析的撞击力平均值的 0.7 倍。

关键词: 船舶撞击力; 有限元; 三角闸门; 模型

中图分类号: U 661.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0129-05

Analysis of ship-gate impact force based on ANSYS / LS-DYNA modular

CHI Zhao-na¹, XU Zong-mei²

(1.College of Architectural Engineering, Rizhao Polytechnic, Rizhao 276826, China;

2.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: The value of ship impact force is very important when designing lock gates or adding anti-collision facilities. Taking Jianbi triangular lock as an example, we use ANSYS finite element calculation software to analyze the time-history curves of the impact force of 25 working conditions under 5 kinds of impact velocity and 5 kinds of ship displacement, and compare the results with the common domestic codes. The results show that the impact time decreases with the increase of impact velocity and increases with the increase of ship tonnage. The impact forces adopted in *Code for Design of Hydraulic Structures of Shiplocks and Code for Design of Lock Gates and Valves of Shiplocks* do not comprehensively consider the influence of ship tonnage and impact velocity, and the values are too low. The value of ship impact force in *Design Specification for Steel Gates of Water and Hydropower Projects* is about 0.7 times as the average value of the impact force in finite element analysis.

Keywords: ship impact force; finite element; triangle lock gate; model

闸门是水利枢纽中最常见的一种金属结构, 随着水运事业的大力发展、船舶大型化和通过率增加直接导致闸门运行频率以及其受船舶擦碰、撞击的概率逐年增加。船舶撞击船闸已成为一个不容忽视的问题, 其中船舶撞击力是设计计算的

一个重要参数。对于船舶撞击力的计算方法主要有理论公式法、试验法以及有限元模拟仿真法。我国对船-闸撞击力的计算, 《船闸水工建筑物设计规范》《水利水电工程钢闸门设计规范》《船闸闸阀门设计规范》^[1-3] 均有明确规定, 但是相同工况

收稿日期: 2020-11-22

作者简介: 迟朝娜(1981—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为钢结构。

的计算结果却不尽相同。本文以谏壁船闸为例，应用 ANSYS 有限元软件对船闸进行有限元仿真模拟，模拟 25 种工况下的船舶撞击力，分析船舶撞击力的影响因素，并与国内 3 个规范结果进行对比，给出合理化建议。

1 船舶撞击力研究现状

对于船舶碰撞力的分析可以追溯到 1975 年米诺斯基的船-船碰撞理论，米诺斯基碰撞理论被验证以后逐渐应用于船-桥碰撞中，船-桥碰撞以著名的沃辛碰撞理论以及汉斯-德鲁彻理论为代表。沃辛选取 1:75 和 1:12 两种比例的 24 只船舶模型进行试验，试验结果得出平均撞击力在碰撞试验中基本为一常数，而且约为最大撞击力的一半^[4]。

除了理论计算，试验也是船舶撞击研究的主要方法，但是碰撞试验耗时长、费用高。随着非线性有限元分析技术^[5]的发展，船舶碰撞问题的计算有了新的发展。在有限元分析中，通过建构船舶和被撞物的信息，可以得到精确的结果。对于船-桥^[6]及船-船^[7]的动力碰撞过程，已有很多学者运用不同的软件成功模拟，而对于船-闸间的碰撞模拟还处于刚刚起步阶段。

2 国内规范相关规定

2.1 《船闸水工建筑物设计规范》

《船闸水工建筑物设计规范》(简称规范 1)的船舶撞击力公式主要引用苏联的经验公式：

$$P_c = 0.9k\sqrt[3]{W^2} \quad (1)$$

式中： P_c 为船舶撞击力(kN)； W 为船队(船只)排水量(t)； k 为系数，闸室 k 取 1，引航道中导航建筑物的直线段 k 取 1.67、曲线段 k 取 2.0。

2.2 《水利水电工程钢闸门设计规范》

《水利水电工程钢闸门设计规范》(简称规范 2)的漂浮物撞击力计算公式：

$$P_z = \frac{W_p v_w}{gt} \quad (2)$$

式中： P_z 为漂浮物撞击力(kN)； W_p 为漂浮物的重力(kN)； v_w 为水流速度(m/s)； t 为撞击时间(s)，应根据实际情况估算。

2.3 《船闸闸阀门设计规范》

《船闸闸阀门设计规范》(简称规范 3)对船舶撞击力的规定如下：1) I、II 级船闸，船舶撞击力可取 300 kN；2) III~VII 级船闸，可不考虑船舶撞击力；3) 设置防撞设备的船闸可不考虑船舶撞击力。规范 3 对船闸等级规定见表 1。

表 1 船闸等级

闸门封闭空口面积 A/m^2	$A > 400$	$140 < A \leq 400$	$40 < A \leq 140$	$A \leq 40$
船闸级别	I	II、III	IV、V	VI、VII

3 基于 ANSYS/LS-DYNA 谏壁船闸有限元分析

3.1 分析模型的建立

谏壁船闸下游的三角闸门单扇门页面板展开后中心角为 70°，半径 10.620 m，弧长 12.974 m，闸门高 11.900 mm。闸门面板厚 10 mm，面板兼作横纵梁的上翼缘板。最大水位差为 5.35 m。

建立合理的有限元模型在采用有限元分析碰撞问题时非常关键，如果模型完全依照实际结构建立，结构的烦琐必然会导致工作量加大，计算规模也会超出计算机的内存限制，最终可能导致有限元仿真计算无法进行。在建构模型时，根据

实际情况对计算模型进行以下方面的简化：1) 在碰撞过程中，相比闸门的主体结构，防撞板受撞区域附近的变形和应力比较大，因此模型建立时主要对闸门防撞板使用合理的约束条件模拟；2) 合理选择材料的本构关系，闸门采用 Q235 钢材，将闸门定义为线弹性模型，撞击船简化为刚性板，船舶吨位由改变船体的密度实现；3) 模型的单元类型包括壳(shell 63)、梁(beam 4)、杆(link 8)3 种，其中壳单元模拟闸门的面板、横纵梁的翼缘和腹板等杆件，梁单元模拟支臂，杆单元模拟闸门的水平、竖向桁架的腹杆；4) 壳与梁

之间按刚接处理, 杆与梁和壳之间按铰接处理;
 5) 建立模型时, 采用控制单元边长的方法控制网格的大小, 将最小特征长度控制在 0.2 m 左右。
 速壁三角闸门有限元简化模型见图 1。

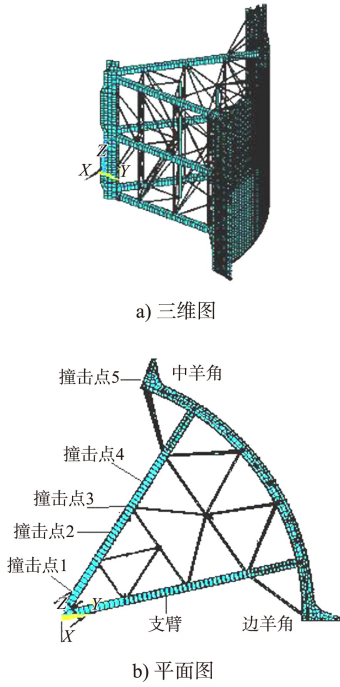
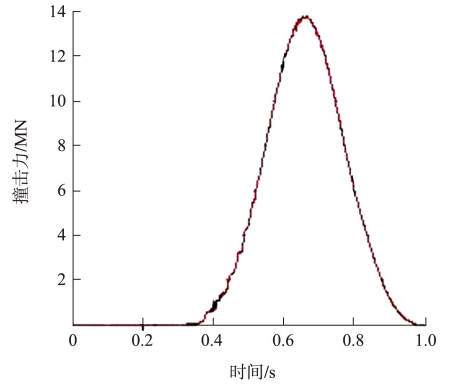
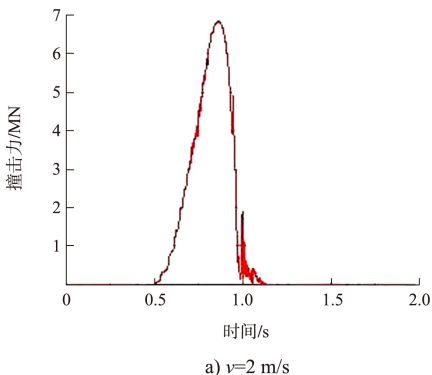


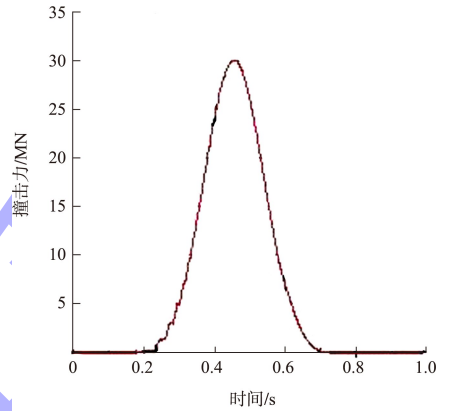
图 1 速壁三角闸门有限元简化模型

3.2 撞击力时程曲线

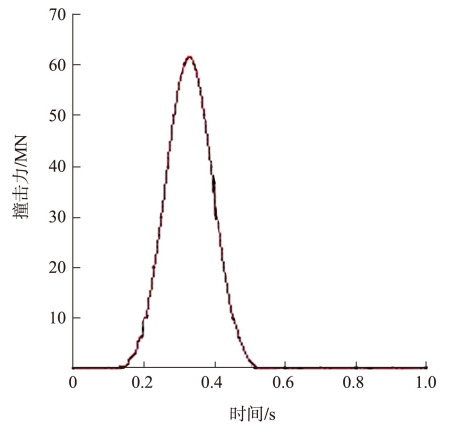
船舶吨位与撞击速度是影响船舶撞击力的主要因素。为了对比分析, 船舶吨位分别取 1 000、2 000、3 000、4 000、5 000 t 等 5 种, 撞击速度分别取 2、3、5、8、10 m/s 等 5 种进行组合, 共计 25 种工况, 有限元模拟分析所有工况下的撞击力时程曲线。为了方便对比撞击力与船舶吨位和撞击速度的关系, 选取船舶吨位为 1 000 t, 5 种不同撞击速度的时程曲线见图 2; 撞击速度为 2 m/s, 5 种不同船舶吨位时的撞击力曲线见图 3。



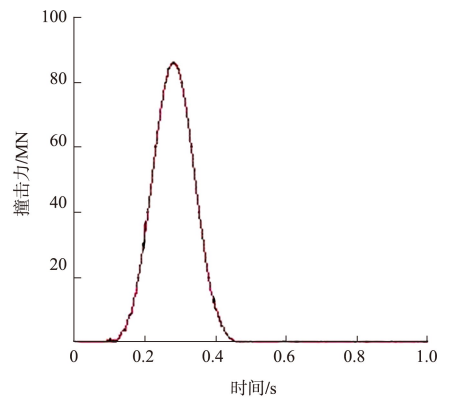
b) $v=3$ m/s



c) $v=5$ m/s



d) $v=8$ m/s



e) $v=10$ m/s

图 2 船舶吨位为 1 000 t 不同速度 v 对应的撞击力时程曲线

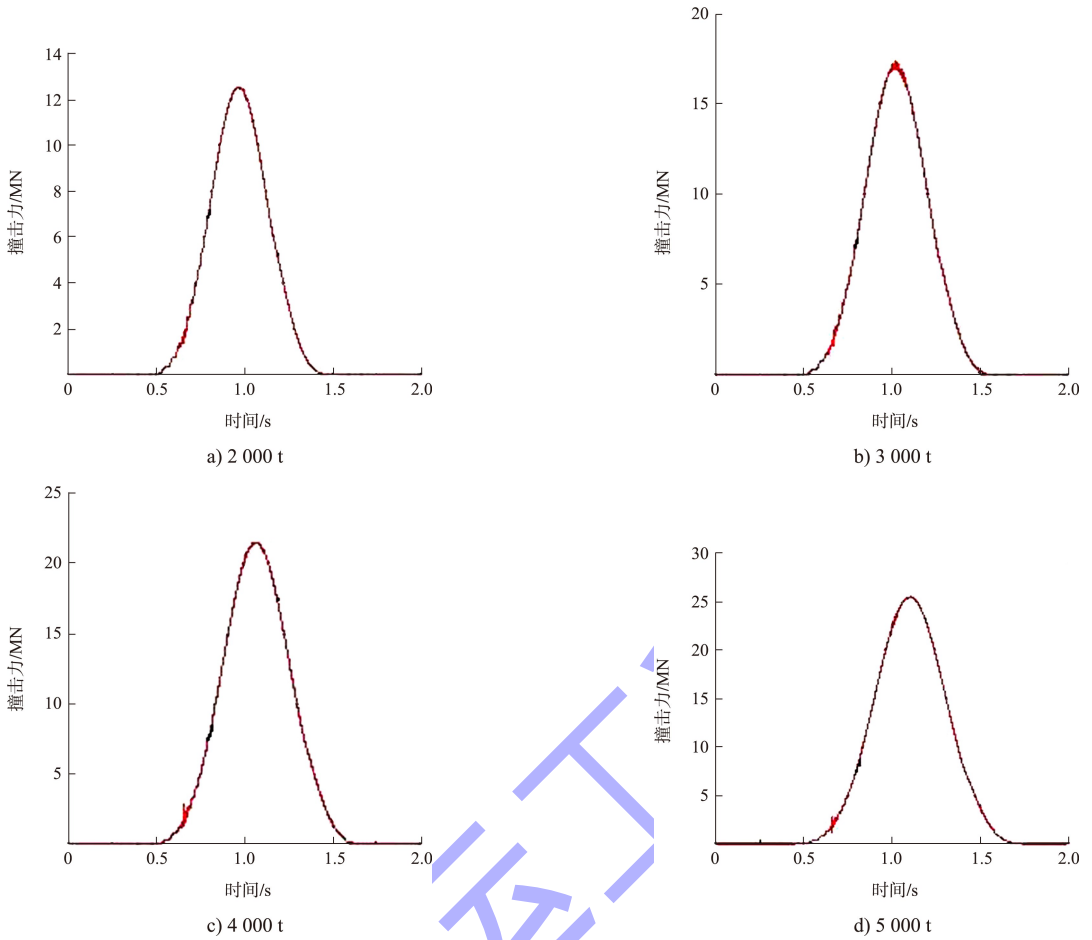


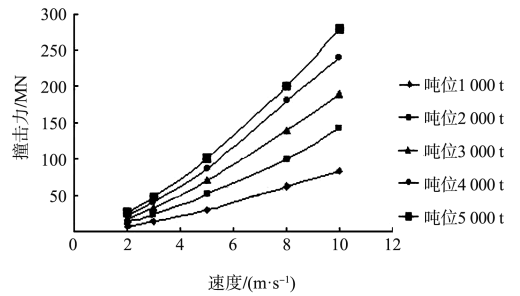
图3 撞击速度 $v=2\text{ m/s}$ 不同船舶吨位对应的撞击力历程曲线

3.3 最大撞击力与船舶吨位、撞击速度的关系

25种情况的最大撞击力见表2。船舶最大撞击力与船舶吨位、撞击速度的关系曲线见图4。

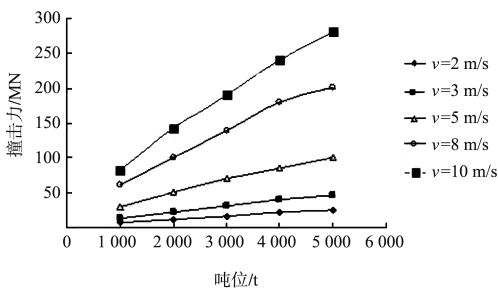
表2 船舶吨位、撞击速度不同时最大正面撞击力

撞击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	撞击力/MN				
	1 000 t	2 000 t	3 000 t	4 000 t	5 000 t
2	6.8	12.5	16.0	22.0	26.0
3	13.8	23.0	32.0	40.0	47.0
5	30.0	51.0	70.0	86.0	101.0
8	62.0	100.0	140.0	180.0	201.0
10	83.0	142.0	190.0	240.0	280.0



b) 最大撞击力-撞击速度

图4 船舶最大撞击力与船舶吨位、撞击速度的关系曲线



a) 最大撞击力-船舶吨位

3.4 基于 ANSYS/LS-DYNA 的计算结果与规范公式对比分析

规范 1、2、3 与有限元的计算结果进行对比, 见表 3、4, 其中, 按照沃辛碰撞理论, 撞击力平均值为最大撞击力的一半进行计算。

表 3 船舶吨位为 1 000 t 不同速度撞击船闸时最大撞击力对比

撞击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	撞击时间/ s	规范公式计算或取值结果/MN			有限元计算结果/MN		规范 2 计算结果与 平均撞击力之比
		规范 1	规范 2	规范 3	最大撞击力	平均撞击力	
2	0.81	0.100	2.469	0.300	6.800	3.400	0.73
3	0.68	0.100	4.412	0.300	13.800	6.900	0.64
5	0.52	0.100	9.615	0.300	30.000	15.000	0.64
8	0.37	0.100	21.621	0.300	62.000	31.000	0.70
10	0.33	0.100	30.303	0.300	83.000	41.500	0.73

表 4 撞击速度 $v=2$ m/s 不同船舶吨位最大撞击力对比

船舶吨位/t	撞击时间/s	规范公式计算或取值结果/MN			有限元计算结果/MN		规范 2 计算结果与 平均撞击力之比
		规范 1	规范 2	规范 3	最大撞击力	平均撞击力	
1 000	0.81	0.100	2.469	0.300	6.800	3.400	0.73
2 000	0.91	0.158	4.395	0.300	12.500	7.250	0.61
3 000	1.04	0.208	5.769	0.300	16.000	8.000	0.72
4 000	1.11	0.251	7.207	0.300	22.000	11.000	0.66
5 000	1.18	0.292	8.474	0.300	26.000	13.000	0.65

4 结论

1) 有限元计算结果表明撞击力随着撞击速度、船舶吨位的增加而增大, 与《水利水电工程钢闸门设计规范》规定是一致的, 但并不是正比关系, 随着撞击速度、船舶吨位的提高增速明显变大。

2) 《船闸水工建筑物设计规范》的公式只考虑了与船舶吨位的影响, 《船闸闸阀门设计规范》中只考虑船闸级别, 均没有综合考虑船舶速度和船舶吨位的影响, 考虑的是闸门结构整体承受的撞击力大小, 通过计算发现其取值远小于最大撞击力数值, 计算公式还需要进一步完善。

3) 《水利水电工程钢闸门设计规范》中综合考虑了船舶撞击速度、船舶吨位的影响, 但对于撞击时间的取值, 在没有实测资料时一般经验估算为 1 s, 通过撞击力时程曲线发现撞击时间不是一个定值, 它随船舶速度的增加而降低, 随船舶吨位的增加而增加, 在船舶吨位为 2 500 t 左右、撞击速度为 2 m/s 时约为 1 s; 建议在计算实际问题时可以根据撞击速度和船舶吨位与撞击时间的关系获得更为准确的取值。

4) 若将时程曲线中的撞击时间代入《水利水电工程钢闸门设计规范》中, 计算的撞击力与时程曲线的平均撞击力比值在 0.61~0.73, 如果进一步考虑撞击角度等因素影响, 规范 2 给出的公式安

全可靠。但需要注意撞击时间应按实际计算, 不能估算为 1 s。

5) 本文所得结果为船舶撞击力的理论计算结果, 后阶段将在此基础上施加自身重力、水压力、撞击力等载荷进行分析, 得出闸门各构件的应力-应变图, 从而进行强度、刚度、稳定性和挠度验算, 也可以采用试验等方法(如在现场埋设应力、应变片读取实测值)进行数据对比。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院. 船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. 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.
- [3] 四川省交通厅内河勘察规划设计院. 船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 迟朝娜. 船闸三角闸门结构的有限元分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [5] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [6] 王颖丰. 船舶正撞桥墩数值模拟分析[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(5): 42-44, 109.
- [7] 江华涛, 顾永宁. 整船碰撞非线性有限元仿真[J]. 上海造船, 2002, 10(2): 16-21, 2.