

# 基于 CFD 方法的 7800PCTC 艏部结构波浪砰击预报

周恩鑫<sup>1</sup>, 张吉萍<sup>1</sup>, 杨阳<sup>2</sup>, 夏小浩<sup>3</sup>

(1. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022; 2. 舟山技师学院, 浙江 舟山 316012;  
3. 扬帆集团股份有限公司, 浙江 舟山 316100)

**摘要:** 伴随着舰船大型化、高速化的发展趋势以及高性能舰船的广泛应用, 传统的砰击理论和规范已无法很好地应用于工程实践, 而 CFD 技术的发展则给这类问题带来了新的解决方案。本文选取了一艘具有实船图纸与运营情况的大型汽车运输船进行数值建模, 制定了两组波浪工况, 使用计算流体力学软件 STAR-CCM+, 对 7800 车汽车运输船在不同波浪参数的波浪作用下的砰击情况进行了数值模拟并预报砰击压力, 根据仿真结果系统研究了各种波浪参数(波浪周期、波高等)、以及船艏部结构位置对波浪砰击压力的影响, 为强化船体应对实际波浪砰击提供指导意义。

**关键词:** 波浪砰击; 计算流体力学; 汽车运输船; STAR-CCM+

**中图分类号:** U663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 12—0106—03

砰击现象是船舶在航行过程中常见的现象, 这种局部的强度问题要给予重视<sup>[1]</sup>。王珂<sup>[2]</sup>利用有限元软件对一艘 LNG 船的艏部结构进行入水砰击研究, 分析了这艘船的纵向、横向曲率以及入水速度对砰击压力值的影响; 张智<sup>[3]</sup>利用 Fluent 软件, 模拟不同高度自由下落的三维楔形体, 得到其加速度、位移以及压力分布随时间的变化, 并提出一种预报方法; 陈震<sup>[4]</sup>基于有限体积法, 通过改善球鼻艏的曲率分析影响砰击压力的因素; Meyerhoff<sup>[5]</sup>提出三维结构物在研究砰击压力时, 需要根据其长宽比参数减小砰击压力, 原因是三维特征的砰击压力具有衰减特性; Scolan<sup>[6]</sup>在他人研究基础之上, 基

于扰动法, 分析了轴对称物体的砰击, 并在三维物体砰击问题中应用。

## 1 砰击压力理论公式

冲量砰击原理<sup>[7]</sup>中砰击压力受时间和位置影响, 其计算公式如下:

$$P(x) = \frac{1}{2} \rho V^2 \left[ \frac{\pi}{\beta(1 - \frac{x^2}{L^2})^{\frac{1}{2}}} - \frac{\frac{x^2}{L^2}}{1 - \frac{x^2}{L^2}} + \frac{2Z}{V^2} (L^2 - x^2)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

式中:  $\rho$ —水的密度;  $V$ —砰击速度;  $\beta$ —砰击角度;  $L$ —作用长度;  $Z$ —作用高度。

发展趋势 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36(11): 1-7.

[7] 施平安. 船用波浪补偿技术研究 [C]. 第四届广东海事高级论坛论文集, 2012: 43-46.

[8] 汪耀源. 波浪补偿并联机构的动力学建模与控制研究 [D]. 大连理工大学, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.000142.

[9] 贺子奇, 曹旭阳, 董航, 高顺德. 深海作业起重机升沉补偿系统的研究现状 [J]. 工程机械与维修, 2015(09): 56-58+60.

[10] U Korde. Active heave compensation on drill-ships in irregular waves [J]. Ocean Engineering, 1998, 25(7): 541-561.

[11] S Kuchler, T Mahl, J Neupert, et al. Active control for an offshore crane using prediction of the vessels motion [C]. IEEE/ASME Trans Mechatron. 2011, 16(2): 297-309.

[12] K Do, J Pan. Nonlinear control of an active heave compensation system [J]. Ocean Engineering, 2008, 35: 558-571.

[13] 孙鲁闽, 顾炳, 余德全. 基于波浪补偿技术的新型海上换乘装置研究 [J]. 机电设备, 2009, 26(03): 8-11+26.

[14] 苏长青, 郑文彬, 曾悠兵, 丁德甫. 一种用于登乘栈桥的主动波浪补偿方法 [J]. 船舶与海洋工程, 2017, 33(04): 22-25. DOI: 10.14056/j.cnki.naoe.2017.04.005.

[15] 卢道华, 李春林, 王佳, 曹志远. 主动补偿平台系统的仿真与实验 [J]. 机床与液压, 2018, 46(02): 17-20.

[16] 李春林, 卢道华, 曹志远, 王佳. 主动补偿平台单通道控制系统研究 [J]. 机床与液压, 2018, 46(11): 194-198.

[17] 唐刚, 李庆中, 杨志启, 胡雄. 基于 MATLAB 的波浪补偿平台动力学分析 [J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(02): 81-85. DOI: 10.13340/j.jsmu.2018.02.015.

[18] 杨文林, 周小琦, 吕浩亮, 张弓, 侯至丞, 王卫军. 六自由度主动波浪补偿装置测控系统设计与仿真 [J]. 集成技术, 2021, 10(02): 50-62.

对公式求导可得极值点，即砰击发生的最大值和位置：

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho V^2 \left(1 + \frac{\pi^2}{4\beta}\right) \quad (2)$$

$$x = L \left(1 - \frac{4\beta^2}{\pi^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

## 2 建立模型

### 2.1 船体外壳

7800 汽车运输船尺度见表 1，利用 STAR-CCM+ 强大的前处理模块导入全船湿表面模型。模型如图 1 所示。

表 1 7800PCTC 主尺度

parameter	value	parameter	value
$L_{OA}$	199.9m	$L_{PP}$	187.25m
$B$	36.45m	$D$	34.275m
$T$	8m	$T_S$	9.5m
$C_B$	0.5324	$V_o$	20.2kn

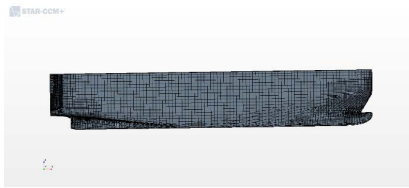


图 1 7800PCTC 整船模型

### 2.2 造波水池

三维数值水池的网格划分采用自动网格。网格划分如图 2 所示，船体采用 DBFI 六自由度刚体运动模型建立，另外自由液面处也进行加密，加密高度约为一倍规则波波高<sup>[8]</sup>。

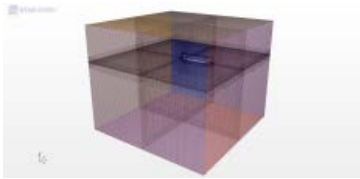


图 2 水池网格划分示意图

### 2.3 布置压力监测点

为了更好地监测船舶外表面各部位的波浪砰击压力，以及具体分析压力分布与波浪参数等因素的关系，本文选取了 15 个代表性较强的监测点。

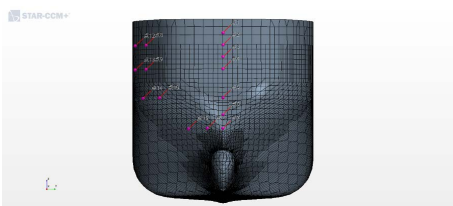


图 3 监测点布置图

## 3 波浪统计参数工况

在方钟圣<sup>[9]</sup>编写的西北太平洋波浪统计集中对南海的区域划分比较详细且数据全面，是对中国南海海域的海浪资料最权威的统计。因此，本文选用西北太平洋波浪统计集来计算南海海域的海况，但同时由于缺乏极限海况下的波浪基本参数，因此，采用波陡近似原则，通过已知的南海百年一遇短期海况<sup>[10]</sup>，求出南海的随机波波陡：

$$S_s = 2\pi H_s / (gT_z^2) \quad (3)$$

式中： $S_s$ —随机波波陡，即波高比波长； $H_s$ —有义波高； $T_z$ —平均跨零周期。根据已知的南海风暴短期海况  $H_s=13.3m$ ， $T_z=11s$ ，代入式 (3) 得南海波陡  $=0.07$ 。

规则波波高  $H_{MAX}$  与有义波高  $H_S$  的关系如下：

$$H_{MAX} \approx 1.86H_S \quad (4)$$

根据以上公式可以求得极限工况下百年一遇规则波波高 24.7m，波浪周期 11s，波陡 0.07。

具体工况参数见下表 2。

表 2 波浪工况表

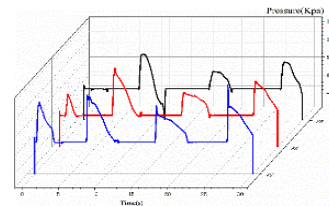
LC.	Dir.	$H_s/m$	$H/m$	$T_z/s$	$T/s$	$V/kn$
low	head	7.5	7.5	9	9	20.2
high	head	13.3	24.7	11	11	20.2

## 4 波浪砰击结果模拟

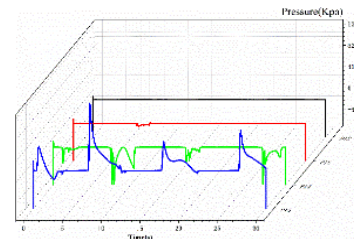
### 4.1 砰击压力时历曲线

#### 4.1.1 低海况

图 4 所示为  $T=9s$ 、 $H=7.5m$  时 FR222 以及船最首端下部监测点压力时历曲线。从图中可以看出，越接近水面的结构位置处，其砰击压力越大，砰击压力大小与垂向高度紧密联系，同时注意到 P5、P10 和 P14 出现了明显的负压现象。



(a) 船首端下部压力曲线



(b) FR222 站位压力曲线

图 4  $T=9s$ 、 $H=7.5m$  时各站位监测点压力时历曲线

#### 4.1.2 高海况

图5所示为极限海况时FR222以及船最首端下部监测点压力时历曲线。

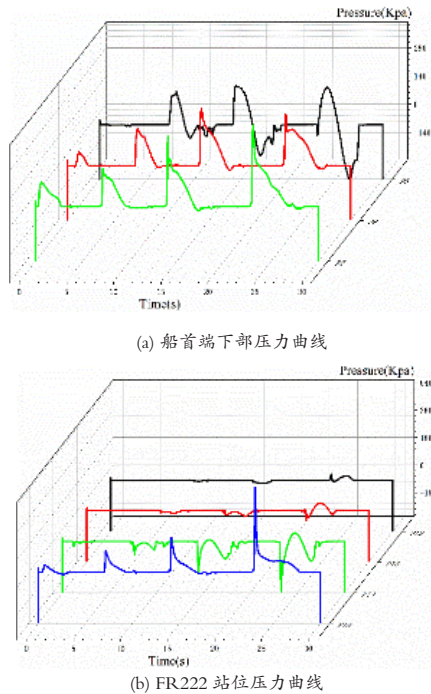


图5 T=11s、H=24.7m时各站位监测点压力时历曲线

在高海况下，各个站位测得的压力峰值大小都高于低海况，砰击压力时历曲线更为陡峭，此时，垂向砰击压力对总压力大小的贡献比例远高于横向砰击压力。船艏柱表现出明显的砰击周期现象，在30s的监测时间中，出现三次周期峰值，与此时的波浪周期较为贴合，即每个周期出现一次砰击。

#### 5 总结

通过采用STAR-CCM+软件模拟7800PCTC在南海海域中航行时将要承受的波浪砰击压力，得出以下结论。

(1) 在各海况下，对于同一高度的监测点，随着监测点距离船首的增加，监测点砰击压力均出现减小的趋势；在同一站位的监测点，随着监测点高度的降低，波浪砰击压力不断增加；在高海况下，波浪垂向砰击压力作用对砰击压力总大小的贡献占比要高于横向砰击压力；在各海况下，都出现明显的负压效应，CFD技术为准确预测结构上的负压位置，提供了强有力的帮助，能够为防止负压破坏结构提供依据。

(2) CFD数值仿真技术预报波浪作用于船首结构的砰击压力，避免了理论研究无法准确描述负压情况出现时间和空间方面的缺点，还可以得到详细的流场数据

如压力场等；可视化程度高，能够方便对砰击压力的产生机理和船体结构减损进行深入细致地分析。

#### 参考文献：

- [1] 李远鹤. 艏外飘型船舶波浪砰击载荷预报[D]. 江苏科技大学, 2020.
- [2] 王珂, 王志东, 米旭峰. LNG船三维首部结构如水砰击载荷数值研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, (03): 218-221.
- [3] 张智. 基于CFD技术的三维楔形体入水砰击实验与数值预报研究[D]. 天津大学, 2014.
- [4] 陈震, 肖熙. 三维球鼻艏入水砰击研究[J]. 船舶工程, 2007, (04): 61-64.
- [5] Meyerhoff W K. Added masses of thin rectangular plates calculated from potential theory[J]. Journal of Ship Research, 1970, June: 100-111.
- [6] Korobkin A A. Scolan Y M. Three-dimensional theory of water impact. Part 2, Linearized Wagner problem[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 549: 343-373.
- [7] Wagner H. Landing of seaplanes[R]. USA: NACA, 1931.
- [8] 张德良. 计算流体力学[M]. 高等教育出版社, 2010.
- [9] 方钟圣. 西北太平洋波浪统计集[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [10] 张朝阳. 深水半潜平台总体强度分析中波浪载荷计算与简化建模方法研究[D]. 上海交通大学, 2012.

基金项目：舟山市科技计划项目“动应力对汽车运输船结构性能的影响研究”（2021C31039）

