

文章编号: 1001-1455(2011)04-0367-06

# 冲击波和气泡作用下舰船结构动态响应的数值模拟\*

王诗平, 孙士丽, 张阿漫, 陈海龙

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对水下爆炸载荷、瞬态流固耦合效应在舰船水下爆炸数值模拟中的困难, 在现有水下爆炸载荷计算模型(Geers and Hunter)的基础上, 结合边界元法, 修正水下爆炸气泡载荷计算方法。针对用二阶双渐近法(the second-order doubly-asymptotic approximation, DAA<sub>2</sub>)在处理低频大幅运动流固耦合问题时的局限性, 提出非线性双渐近法(nonlinear doubly-asymptotic approximation, NDAA), 计入了舰船大幅低频运动、自由面效应等非线性因素, 并与结构有限元程序相结合, 形成一套适合于工程应用研究的舰船水下爆炸数值模拟程序。数值模拟结果与实验结果的平均误差在 16.8% 左右, 说明 NDAA 方法可为冲击波和气泡对舰船结构毁伤数值模拟提供参考。

**关键词:** 爆炸力学; 非线性双渐近法; 边界元法; 舰船; 水下爆炸; 冲击波; 气泡

**中图分类号:** O382.1

**国标学科代码:** 130·3520

**文献标志码:** A

水下爆炸主要包括冲击波和气泡<sup>[1-13]</sup>, 通常冲击波对舰船结构造成严重的局部毁伤, 气泡对舰船造成总体和局部双重毁伤。水下爆炸对舰船毁伤的数值模拟主要涉及载荷和瞬态流固耦合问题。对水下爆炸载荷已进行了大量的研究, 有代表性的是 Geers and Hunter 模型<sup>[2]</sup>, 对水下爆炸冲击波及气泡载荷均有较好的描述, 但是在计算非球状气泡、近边界气泡载荷时存在一定的局限性<sup>[12-13]</sup>。

流固耦合效应一直是舰船水下爆炸研究中的重点和难点, 在该问题上已取得了一系列研究成果<sup>[3-8]</sup>, 如任意的拉格朗日欧拉算法(arbitrary Lagrangian-Eulerian method, ALE)<sup>[10]</sup>、DAA<sub>2</sub>法<sup>[5,11]</sup>。用 ALE 算法在模拟远场水下爆炸时存在载荷衰减过快的缺点, 用 DAA<sub>2</sub>方法在考虑大幅运动、边界效应时存在局限性。本文中, 针对舰船水下爆炸载荷以及流固耦合效应, 提出一些改进的方法, 以期对舰船水下爆炸相关研究提供参考。

## 1 瞬态流固耦合计算方法

传统 DAA<sub>2</sub>方法<sup>[5,11]</sup>的表达式为

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{p}}_s + \rho c \mathbf{A}_f \dot{\mathbf{p}}_s + \rho c \boldsymbol{\Omega}_f \mathbf{A}_f \mathbf{p}_s = \rho c (\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{U}} + \boldsymbol{\Omega}_f \mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{U}}) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}_f$  为流体质量矩阵,  $\mathbf{p}_s$  为流体中的散射压力,  $\rho$  为流体密度,  $c$  为波速,  $\boldsymbol{\Omega}_f$  为流体频率矩阵,  $\mathbf{A}_f$  为流体单元的面积矩阵,  $\mathbf{U}$  为流体单元中心的位移。

在传统 DAA<sub>2</sub>方法理论推导过程中, 针对水下爆炸冲击波高频载荷作用下产生结构的小扰动问题, T. L. Geers 等<sup>[2]</sup>忽略了速度势的空间导数的平方项, 引入了线性假设, 即

$$p = -\rho \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

式中:  $p = p_s + p_i$ ,  $p_i$  为入射波压力,  $p$  为流场总动压力,  $\Phi$  为流场速度势。

但舰船等结构物做大幅运动时, 速度势的空间导数对水动力值影响较显著, 不能忽略此非线性效应。为此, 在 DAA<sub>2</sub>方法的基础上进行改进, 计入船体大幅运动, 形成 NDAA 方法

\* 收稿日期: 2010-10-26; 修回日期: 2011-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51009035, 50939002); 博士学科点专项科研基金项目(20102304120025); 黑龙江省自然科学基金项目(A200901, E201047)

作者简介: 王诗平(1983—), 男, 博士研究生。

$$p_d = -\rho \left( \frac{d\Phi}{dt} - \frac{1}{2} \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi \right) \quad (3)$$

由于舰船在水面上运动,应该考虑自由面兴波效应对舰船运动的影响。计入自由面效应的边界积分方程可以表示为

$$2\pi\Phi(\mathbf{r}_p) + \iint_{S_b(t)} \left[ \Phi(\mathbf{r}_q, t) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) - \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \frac{\partial\Phi}{\partial n}(\mathbf{r}_q, t) \right] dS_q = \int_0^t \left[ \iint_{S_b(\tau)} \left( \tilde{G} \frac{\partial\Phi}{\partial n} - \Phi \frac{\partial\tilde{G}}{\partial n} \right) dS_q + \frac{1}{g} \int_{\omega l(\tau)} \left( \tilde{G} \frac{\partial\Phi}{\partial\tau} - \Phi \frac{\partial\tilde{G}}{\partial\tau} \right) v_n dl_q \right] d\tau \quad (4)$$

式中:  $\tilde{G}$  表示时域格林函数的兴波部分,  $\tilde{G} = 2H(t - \tau) \int_0^\infty \sqrt{gk} e^{k(z+\zeta)} J_0(kR) \sin[\sqrt{gk}(t - \tau)] dk$ ,  $S_b(t)$  表示  $t$  时刻的湿表面,  $\omega l(t)$  表示  $t$  时刻的水线,  $p$  为控制点,  $q$  为积分点,  $q'$  表示  $q$  点关于静水面的镜像点,  $r = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_q|$ ,  $r' = |\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_{q'}|$ ,  $\mathbf{n}$  表示结点的单位法向量,  $v_n$  表示水线  $\omega l(t)$  上的法向速度。将方程(3)代入方程(4)并且定义  $1/R = 1/r - 1/r'$ , 得

$$p_s = \frac{1}{2\pi} \iint_{S_b(t)} \left( \frac{p_s}{R^2} \frac{\partial R}{\partial n_q} - \frac{\rho \ddot{U}_n}{R} \right) dS_q + \int_0^t \left[ \iint_{S_b(\tau)} \left( -\rho \tilde{G} \dot{U}_n - p_s \frac{\partial \tilde{G}}{\partial n_q} \right) dS_q + \frac{1}{g} \int_{\omega l(\tau)} \left( \tilde{G} \frac{\partial p_s}{\partial \tau} - p_s \frac{\partial \tilde{G}}{\partial \tau} \right) v_n dl_q \right] d\tau \quad (5)$$

将方程(5)代入方程(1),得到了考虑了自由面的记忆效应的 DAA<sub>2</sub> 方程

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{p}}_s + \rho c \mathbf{A}_i \dot{\mathbf{p}}_s + \rho c \boldsymbol{\Omega}_i \mathbf{A}_i \mathbf{p}_s = \rho c (\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{U}} + \boldsymbol{\Omega}_i \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{U}} + \boldsymbol{\Omega}_i \mathbf{C}^{-1} \tilde{\mathbf{F}}) \quad (6)$$

式中

$$C_{ij} = -2\pi\delta_{ij} + \iint_{S_j} \frac{1}{R_{ij}^2} \frac{\partial R_{ij}}{\partial n_j} dS_j$$

$$\tilde{\mathbf{F}}_i = \int_0^t \left[ \iint_{S_j} \left( -\rho \tilde{G}_{ij} \dot{U}_{nj} - p_{sj} \frac{\partial \tilde{G}_{ij}}{\partial n_{qj}} \right) dS_j + \frac{1}{g} \int_{\omega l_j} \left( \tilde{G}_{ij} \frac{\partial p_{sj}}{\partial \tau} - p_{sj} \frac{\partial \tilde{G}_{ij}}{\partial \tau} \right) v_{nj} dl_j \right] d\tau$$

在结构边界上,通过 NDAA 程序对载荷进行计算,得到载荷后通过有限元程序 ABAQUS 计算结构的响应位移、速度和加速度,然后返回流场中,通过 NDAA 方法计算流场载荷,实现了大规模工程计算,形成适用于工程应用的水下爆炸冲击波与气泡对舰船结构毁伤数值模拟方法。

## 2 NDAA 方法有效性的验证

为了验证本文中提出的 NDAA 方法的正确性,选取 H. Huang<sup>[14]</sup> 的算例,考虑水中半径为 1 m、厚度为 0.02 m 的球壳遭受一量级为 1.4 MPa 的平面波的作用,将用 NDAA 方法和 DAA<sub>2</sub> 方法计算的结果进行对比,如图 1 所示。图中 2 种方法均选取迎波面顶点的计算结果,实线表示用 NDAA 法计算的水动压力  $p_{\text{NDAA}}$ ,虚线则表示 2 种方法的相对差值  $(p_{\text{NDAA}} - p_{\text{DAA}_2})/p_{\text{NDAA}}$ 。该算例符合线性小扰动假设,采用 NDAA 法的计算结果与采用 DAA<sub>2</sub> 法的计算结果相差不大。

在线性小扰动情况下,2 种方法的数值计算结果相差很小,验证了在用 NDAA 法计算高频、小扰动流固耦合问题时的正确性。但是当分析物体大幅运动情况下的流固耦合问题时,由于 DAA<sub>2</sub> 方法在理论上的缺陷,就会产生不合理的结果。选取算例为给球壳赋以 30 m/s 的水平初速度,研究该球壳在平面波作用下的流场动压力以及结构动响应,此时该流固耦合问题已不属于线性小扰动的范畴,用不同方法得到的球壳顶部压力历时曲线如图 2 所示。从图中可以看出,球壳响应早期,球壳顶部压力产生了较大的振荡,随着时间的推移逐渐趋于稳态。球壳响应后期,用 DAA<sub>2</sub> 方法计算的球壳动压力趋于零,这是不合理的,按照势流理论,球壳在水中做匀速运动,球壳顶部理论压力为  $\rho v^2/2$ ,其中  $v$  为球壳运动速度,球壳顶点稳定后速度为约 16 m/s,理论压力为约 128 kPa,用 NDAA 方法计算得到的球壳稳定后压

力为约 130 kPa,很好地解决了用 DAA<sub>2</sub>方法处理低频、大扰动问题的局限。

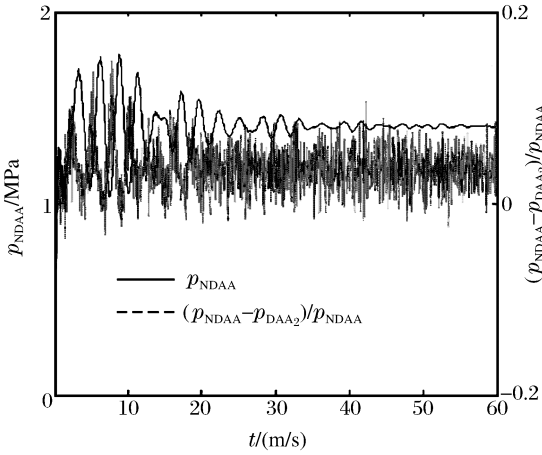


图 1 球壳顶部结点压力时历曲线及误差

Fig. 1 Pressure and relative error on the top of the shell

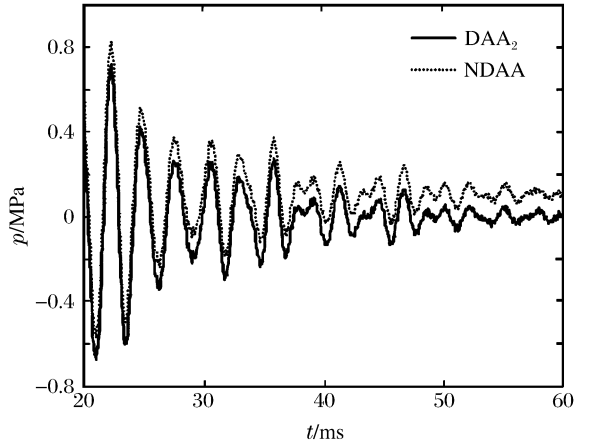


图 2 球壳在 30 m/s 初速度条件下球壳顶部压力时历曲线

Fig. 2 Pressure history on the top of the shell with the initial velocity of 30 m/s

### 3 冲击波对舰船结构的毁伤

以某舰船为研究对象,船长为  $L'$ ,宽为  $B'$ ,吃水为  $T'$ 。坐标系统为:中纵剖面、中横剖面、基平面交点为坐标原点, $x$  轴向船首为正, $y$  轴向左舷为正, $z$  轴铅直向上为正。爆心位置  $x = 0.66L'$ ,  $y = 0.029L'$ ,  $z = -0.49L'$ 。

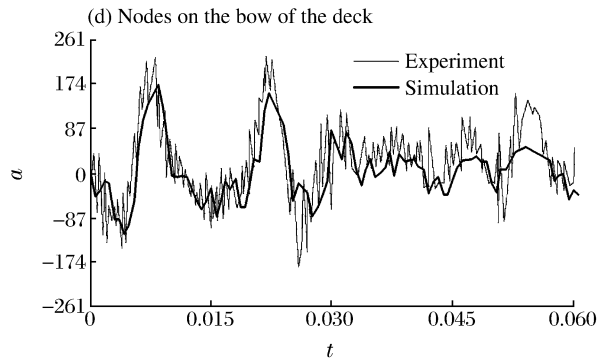
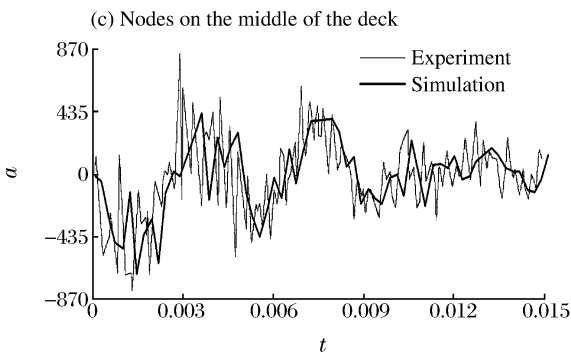
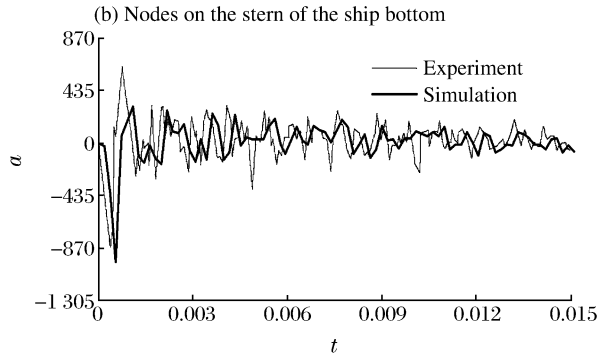
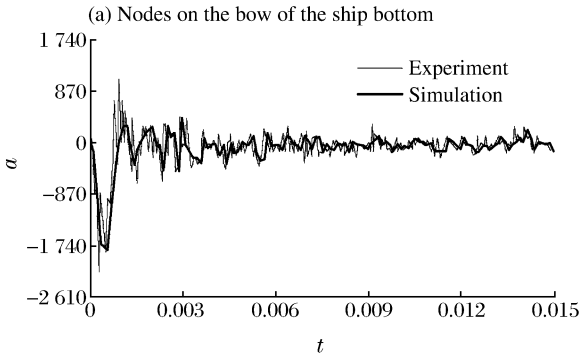


图 3 船体节点垂向加速度响应实验值与数值结果对比时历曲线

Fig. 3 Comparison of experimental and numerical vertical acceleration histories of partial nodes on the ship

舰船在水下爆炸载荷作用下的主响应为垂向的<sup>[15]</sup>,因此本文将舰船的垂向加速度响应的实验值和数值结果进行对比分析,舰船底部和甲板部分节点的垂向加速度时历曲线如图 3 所示,图中采用船长、流体密度、流场压力 3 个量对计算结果进行量纲一化。

从图 3(a)、(b)可以看出,船底响应很明显地反映了冲击波的直接作用,峰值大且波形陡。随着时间的增加,响应迅速减小,这是由于船底与水耦合导致舰船的振动能量散失很快所致。从图 3(c)中的甲板响应曲线可以看出,低频特性明显,与舰船板架的低阶频率吻合,同时耦合着大量高频成分,这是由于冲击载荷的性质所决定的。其中低频的成分可能是冲击载荷激起的局部板架振动的固有频率,高频成分可能是由于冲击波引起的结构内部前驱波所致。从比较图 3(c)和图 3(d)可以看出,虽然都是甲板上的结构,但是他们的振动曲线也不完全相同。综上所述,船体底部和甲板的响应截然不同,甚至甲板上不同节点之间的响应也不相同,这符合水下爆炸作用下船体结构的响应特点<sup>[15]</sup>。

为了验证本文方法的精度,将水下爆炸载荷作用下舰船结构的动响应与实验值对比分析,如表 1 所示, $v_e$  为垂向速度的实验值, $v_s$  为垂向速度的计算值, $\epsilon$  为二者的误差, $\bar{\epsilon}$  为平均误差。从表 1 可以看出,本文数值模拟的最大误差为 25.2%,最小误差为 9.0%,平均误差为 16.8%。计算值与实验值吻合较好,表明本文的数值模拟方法是可行的。

表 1 不同位置结点垂向速度计算结果与实验值的比较

Table 1 Comparison of numerical and experimental vertical velocities at different positions

| 测量点  | $v_e$ | $v_s$ | $\epsilon/\%$ | $\bar{\epsilon}/\%$ |
|------|-------|-------|---------------|---------------------|
| 船底首部 | 0.322 | 0.293 | 9.0           | 16.8                |
| 甲板尾部 | 0.179 | 0.214 | 19.6          |                     |
| 甲板中部 | 0.272 | 0.236 | 13.2          |                     |
| 甲板首部 | 0.234 | 0.175 | 25.2          |                     |

#### 4 冲击波和气泡对舰船的毁伤

通过本文的方法可以获得近边界附近非球状气泡载荷,并通过 NDAA 方法实现流固耦合分析,真正意义上实现气泡与船体结构耦合计算,如图 4 所示。以某舰船为例,船长为  $L$ 、船宽为  $B$ 、吃水为  $T$ 。该工况为尾部爆炸,炸药在船体尾部下方  $0.28L$  处爆炸,距中横剖面  $0.25L$ 。从图 6 可以看出,舰船在水下爆炸作用下被激起一阶和二阶总振动,各站  $n_s$  位移  $D$  随时间  $t$  的变化见图 5。

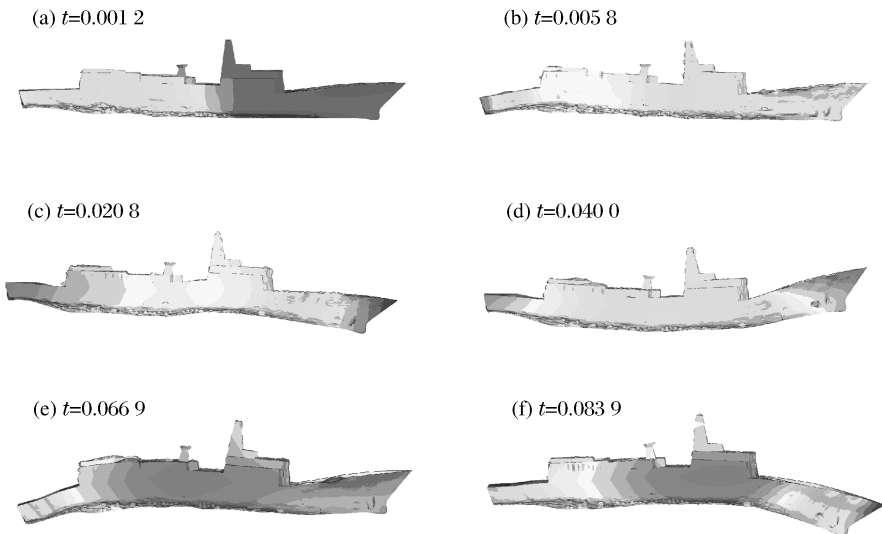


图 4 装药在舰船尾部爆炸

Fig. 4 Charge explosion at the ship buttock

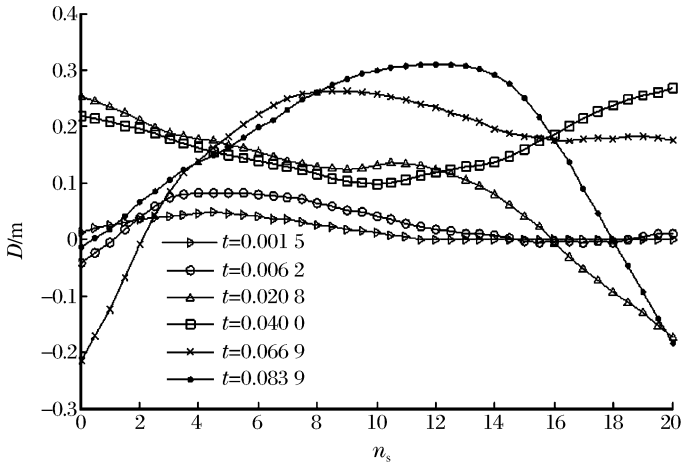


图5 舰船在爆炸载荷作用下的运动特征

Fig. 5 Movement feature of the ship under underwater explosion load

## 5 结论

在前人研究成果的基础上, 针对用 DAA<sub>2</sub> 方法在处理低频大幅运动流固耦合问题时产生不合理结论进行改进, 提出了 NDAA 方法, 该方法在继承了 DAA<sub>2</sub> 方法处理高频小扰动流固耦合问题的同时, 也很好解决了流场中低频大幅运动物体流固耦合问题。将本文中提出的 NDAA 方法应用在舰船的水下爆炸载荷方面, 将边界元法与 Geers and Hunters 模型相结合, 计入舰船的大幅运动及自由面效应等对气泡载荷的影响, 数值模拟与实验结果的平均误差为约 16.8%, 具有良好的精度, 拓展了 DAA 方法的适用范围。

## 参考文献:

- [1] Cole R H. Underwater explosion[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948:118-127.
- [2] Geers T L, Hunter K S. An integrated wave effects model for an underwater explosion bubble[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002,111(4):1584-1601.
- [3] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, et al. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005,537:387-413.
- [4] Liu M B, Liu G R, Lam K Y, et al. Meshfree particle simulation of the detonation process for high explosives in shaped charge unlined cavity configurations[J]. Shock Waves, 2003,12(6a):509-520.
- [5] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学理论与应用[D]. 无锡:中国船舶科学技术研究所,2002:31-42.
- [6] 宗智,何亮,孙龙泉. 水下爆炸气泡对水面舰船载荷的数值研究[J]. 船舶力学,2008,12(5):733-739. ZONG Zhi, HE Liang, SUN Long-quan. Numerical study of loading on the surface ship near an underwater explosion bubble[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008,12(5):733-739.
- [7] 朱锡,张振华. 水面舰船舷侧防雷舱结构模型抗爆实验研究[J]. 爆炸与冲击,2004,24(2):134-139. ZHU Xi, ZHANG Zhen-hua. Experimental study on the explosion resistance of cabin near shipboard of surface warship subjected to underwater contact explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):134-139.
- [8] 汪玉,华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005:206-252.
- [9] 张阿漫,姚熊亮. 近自由面水下爆炸气泡的运动规律研究[J]. 物理学报,2008,57(1):339-353. ZHANG A-man, YAO Xiong-liang. The law of the underwater explosion bubble motion near free surface[J]. Acta Physica Sinica, 2008,57(1):339-353.
- [10] Kim J H, Shin H C. Application of the ALE technique for underwater explosion analysis of a submarine liquefied oxygen tank[J]. Ocean Engineering, 2008,35(8/9):812-822.
- [11] Geers T L. Doubly asymptotic approximations for transient motions of submerged structures[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1978,64(5):1500-1508.
- [12] Wang C, Khoo B C. An indirect boundary element method for three-dimensional explosion bubbles[J]. Journal of Computational Physics, 2004,194(2):451-480.
- [13] Zhang Y L, Yeo K S, Khoo B C, et al. 3D jet impact and toroidal bubbles[J]. Journal of Computational Physics, 2001,166(2):336-360.
- [14] Huang H. Transient interaction of plane acoustic waves with a spherical elastic shell[J]. Journal of the Acoustical

Society of America, 1969, 45(3):661-670.

- [15] Vernon T A. Whipping response of ship hulls form underwater explosion bubble loading[R]. ADA178096, 1986: 126-143.

## Numerical simulation of dynamic response of warship structures subjected to underwater explosion shockwaves and bubbles\*

WANG Shi-ping, SUN Shi-li, ZHANG A-man, CHEN Hai-long  
(School of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University,  
Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Aimed at the difficulties of underwater explosion load and instantaneous fluid-structure interaction in the numerical simulation of dynamic response of warship structures, based on the Geers-Hunter model, a modified model for calculating the underwater explosion bubble load was proposed by combining with the boundary element method. To overcome the shortcoming of the second-order doubly-asymptotic approximation (DAA<sub>2</sub>) method in treating the fluid-structure interaction with low frequency and large amplitude motion, a nonlinear double asymptotic approximation (NDAA) method was presented by considering the nonlinear factors such as the violent low-frequency response of the warship and its free surface effect. And a code was developed by combining the presented NDAA method with the finite element code to numerically investigate the dynamic response of warship structures subjected to underwater explosion shockwaves and bubbles. The mean error between numerical and experimental vertical vibration velocities at the different positions is about 16.8%, and it displays that the presented NDAA method is feasible.

**Key words:** mechanics of explosion; NDAA method; boundary element method; warship; underwater explosion; shockwave; bubbles

---

\* Received 26 October 2010; Revised 14 April 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51009035, 50939002)

Corresponding author: WANG Shi-ping, shipingwang316@gmail.com

(责任编辑 张凌云)