文章编号:1006-1355(2015)06-0110-05+180

水下爆炸冲击波作用下舰船总纵强度工程预报方法

崔 杰[1], 李 佳[2], 陈莹玉[3], 郭建廷[1]

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003;
2. 上海船舶设备研究所, 上海 200031;
3. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要:水中兵器战斗部在水面舰船和潜艇附近爆炸对船体的总纵强度毁伤是目前国际上研究的前沿和热点。基于Taylor平板理论,计及自由液面截断效应,对船底表面处的耦合压力进行修正,推导并建立船体梁爆炸冲击弯矩的理论与计算方法,提出一套用于水下爆炸作用下船体梁总纵强度估算方法。通过实验数据验证理论方法的正确性。结合理论方法开发相应的总纵强度预报软件,为舰船在冲击波载荷作用下的总纵强度工程化预报提供参考。

关键词:振动与波;舰船;水下爆炸;总体毁伤;冲击波

中图分类号:U66 **文献标识码**:A DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1335.2015.06.024

Engineering Forecast Method for the Longitudinal Strength of Ship Hulls Subjected to Underwater Explosion Shock Wave

CUI Jie[1], *LI Jia*[2], *CHEN Ying-yu*[3], *GUO Jian-ting*[1]

(1. School of Naval Architecture and Offshore Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu China;
2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China;
3. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The longitudinal strength of submerged structures subjected to noncontact underwater explosion is a hot topic in national defense. In this paper, employing the Taylor's theory of plates and considering the surface cutoff effect, the coupling pressure in the bottom surface of the ship structure was modified. Then, the theoretical and computational methods were deduced to study the impact bending moment of the simplified elastic ship-hull beam. Finally, the evaluation method of the longitudinal strength of the ship hull subjected to underwater explosion was proposed. The full-scale ship test results verify the correctness of the theoretical method. The corresponding forecast software was developed which provides a means for evaluation and prediction of the longitudinal strength of ship hulls.

Key words: vibration and wave ; naval ship ; underwater explosion ; longitudinal strength ; engineering forecast ; shock wave

舰船在战斗中不可避免的会遭到敌方武器的袭击。对于沉底水雷、深水炸弹等武器通常在离舰船数米至上百米的位置爆炸即所谓非接触水下爆炸。这种爆炸通常不会使船体产生严重的破损而导致舰船的沉没,但是可能引起船体剧烈的振动和较大塑性变形,导致船上各类重要设备广泛的冲击破坏及舰船总体结构的破损,使舰船失去战斗力[1-5]。因此,舰船非接触水下爆炸作用下的响应问题愈来愈引起人们的关注。

总纵强度是舰船强度校核的重要部分。当舰船在外载荷下发生总体弯曲变形时,纵向强力构件在剖面弯矩正应力的作用下发生失效,将可能使其整体折断,造成严重的后果[6-11]。Steller[12]在其工作中针对潜艇结构分析了水下爆炸气泡载荷下诱导的鞭状运动的阻尼因素,Hicks[13]分析了水下爆炸气泡载荷下水面舰船的鞭状运动现象。Kwon[14]针对圆柱壳结构在水下爆炸载荷下的鞭状运动响应,分析了

收稿日期:2015-07-16
基金项目:国家自然科学青年基金项目(51409129、51409128);江苏省自然科学青年基金项目(BK20140504)
作者简介:崔杰(1984-),男,黑龙江省齐齐哈尔市人,博士,讲师,研究方向:水下爆炸气泡动力学,海洋工程结构性能与安全性。
E-mail: cuijie2006@hotmail.com

不同的模型简化方法下，双渐近方法计算结果的差别。Zhang [15]采用线性自由面结合球形气泡脉动模型分析了舰船在气泡脉动载荷作用下鞭状运动中的刚体运动成分。Zhang [8,9]等利用边界元和有限元耦合算法对船体梁受到气泡载荷作用下的鞭状振动予以分析，并对气泡弯矩的影响进行了深入研究。

目前各国海军对舰船在极端情况下的强度要求越来越高，而通过实船实验需要花费大量的经费，所以如今开展舰船结构总强度的抗冲击评估方法研究，对于建立和完善我国舰船结构生命力评估体系，提升舰船结构生命力设计水平具有重要意义。本文提出适用于水下爆炸冲击波作用下舰船总纵强度校核的方法，并结合该方法开发相应的总纵强度预报软件，对舰船在冲击波载荷作用下的总纵强度做出工程化预报。

1　理论背景

1.1　物理模型及基本假设

水下爆炸冲击波作用下的水面舰船，不只会产生局部强度的破坏，总纵强度也可能发生破坏。为此需要对水下爆炸冲击波作用下水面舰船的总纵强度问题进行研究。水下爆炸冲击波主要激起水面舰船的刚体运动和1阶振动，各阶振动的大小根据动量定理确定，冲击波作用在船底表面处的耦合压力通过冲击波作用在无限平板处的耦合压力来代替，冲击波的作用时间由发生自由液面截断的时间来确定。考虑了水面舰船垂向振动附加质量和船体惯性矩沿船长的分布对等直梁振动频率所作的修正，得到了水面舰船垂向振动的固有频率，图1为冲击波载荷作用于船体示意图。

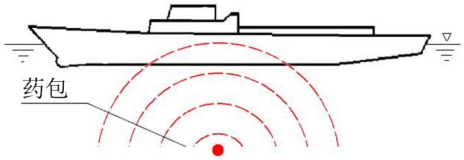

图1　冲击波载荷作用于船体示意图

计算时，将船体简化为完全自由梁，梁长取设计水线长。研究中主要基于以下假设：

（1）冲击波作用的时间很短，所以冲击波作用完毕时，船体梁还未发生变形，只具有速度；

（2）冲击波主要激起船体梁的刚体运动和1阶振动；

（3）忽略气泡对船体梁的影响。

船体梁模型如图2，图中 l_τ 为中纵剖面内载荷的作用宽度，l_p 为载荷据船中的距离。

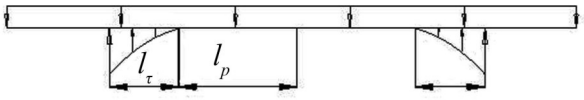

图2　冲击波载荷在船体梁中传递模型

1.2　水下爆炸载荷

1.2.1　自由场冲击波压力

根据舰船通用规范的国家军用标准，自由场中常规兵器水下爆炸冲击波压力可按式(1)计算，参数如式(2)和式(3)确定。

$$P_i = P_{\max} e^{-\frac{t}{\theta}} \tag{1}$$

$$P_{\max} = 52.3\left(\frac{m_c^{1/3}}{R}\right)^{1.13} \tag{2}$$

$$\theta = 0.105\, m_c^{1/3}\left(\frac{m_c^{1/3}}{R}\right)^{-0.256} \tag{3}$$

式中 $P_{\max}$ 为测点处的峰值压力，单位为MPa；t 为冲击波切过船体的时间；θ 为冲击波衰减常数，单位为s；m_c 为装药重量(以TNT当量计)，单位为kg；R 为测点与装药之间的距离，单位为m。

1.2.2　船底表面处的耦合压力

(1) 无限平板处的耦合压力

水下爆炸冲击波接触结构物表面发生反射，入射波和反射波叠加为结构流固耦合处的压力载荷。考虑水下冲击波的高频特性，当冲击波作用到舰船结构后，主要发生波的反射、透射，衍射现象不明显。忽略高频冲击波衍射的影响，将舰船结构在冲击波作用下的早期响应过程简化为一无限平板在平面波作用下的响应过程，平板两侧分别为水和空气介质。

冲击波以入射波 P_i 作用到平板上，形成反射波 P_r 和透射波 P_t。由连续性边界条件可知，平板两边的质点速度相等，即

$$(P_i - P_r)/\rho_f c_f = P_t/\rho_a c_a = v_p \tag{4}$$

式中 v_p 为平板的运动速度。

根据牛顿第二定律

$$P_i + P_r - P_t = m_p \frac{\mathrm{d}v_p}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中 m_p 为单位面积平板的质量。

初始条件

$$P_r(0) = P_i(0) = P_{\max} \tag{6}$$

联立式(4)—式(6)可得入射波垂直入射时的壁面压力

$$P_w = 2P_{\max}[e^{-\frac{t}{\theta}} - \frac{\rho_f c_f \theta}{(\eta\theta - 1)m_p}(e^{-\frac{t}{\theta}} - e^{-\eta t})] \quad (7)$$

式中 $P_{\max}$、θ 按式(2)、式(3)确定。

$$\eta = \frac{\rho_f c_f + \rho_a c_a}{m_p} \quad (8)$$

(2) 船体形状对耦合压力的修正

由于船体外形是一个三维曲面，且内部有很多板架，与无限平板模型有一定的差别，因此船底表面处的流固耦合压力与按无限平板理论推导的压力有一定的差别，为此引进系数 C_p 表示船体形状对耦合压力的修正，当爆炸载荷在船体底部时 C_p 可取1。

$$P = C_p P_w = 2C_p P_{\max}[e^{-\frac{t}{\theta}} - \frac{\rho_f c_f \theta}{(\eta\theta - 1)m_p}(e^{-\frac{t}{\theta}} - e^{-\eta t})] \quad (9)$$

船底表面流固耦合处的压力衰减的较快，由于水介质无法承受拉应力，忽略水的空化作用，假定船底表面处的压力衰减到0时，冲击波的作用过程结束。根据式(9)可得

$$\Delta t = \frac{\theta \ln(\alpha/(\alpha - 1))}{\eta\theta - 1} \quad (10)$$

假设冲击波接触爆点时 t =0，则传播了 t 时间后，中纵剖面内冲击波的纵向位置为

$$l_p = \sqrt{(R + c_0 \cdot t)^2 - R^2} \quad (11)$$

冲击波的纵向传播速度

$$V_p = \frac{\mathrm{d}l_p}{\mathrm{d}t} = \frac{c_0 \cdot (R + c_0 \cdot t)}{\sqrt{(R + c_0 \cdot t)^2 - R^2}} = \frac{c_0}{\sqrt{1 - (R/(R + c_0 \cdot t))^2}}$$

式中：c_0——入射波在水中的传播速度，m/s；

R——爆距，m；

由冲击波的纵向传播速度公式可以看出：初始时刻冲击波的纵向传播速度最大，然后逐渐减小，即冲击波沿船舶纵向的传播速度在船中处最大，向两端逐渐减小。

冲击波在 $t_0 \sim t_0 + \Delta t$ 时间段内的纵向传播距离即冲击波的作用距离 l_τ 为

$$l_\tau = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} V_p \mathrm{d}t = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \frac{c_0}{\sqrt{1 - (R/(R + c_0 \cdot t_0))^2}} \mathrm{d}t \quad (12)$$

冲击波作用的距离 l_τ 与 t_0 有关，在 Δt 相同的情况下，t_0 越小，l_τ 越大。

由于船体的横剖面是曲面，且冲击波的衰减时间很短，约为0.1 ms，忽略船体梁的横向效应会引起较大的误差。为了便于计算，采用梯形来模拟船中横剖面的形状，见图3，参数 β 根据中横剖面系数确定，由 $C_M = 1 - \frac{b \tan\beta}{4T}$ 得 $\tan\beta = (1 - C_M) \times 4T/b$。

由图示几何关系可知冲击波产生的垂向载荷

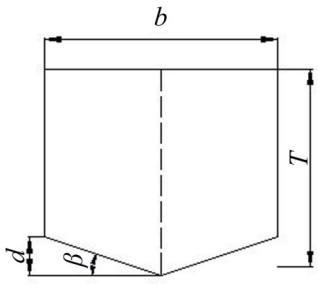

图3 中横剖面形状模拟图

$$F(t) = -\int_s P \cdot \vec{n}_z \mathrm{d}s = \int_s P\cos\beta \mathrm{d}s = \int_s P \mathrm{d}s_z = \int_s P/\tan\beta \mathrm{d}s_y \quad (13)$$

$\vec{n}$ 为船体的外法线方向，s_z 为船体在水线面的投影面积，s_y 为船体在中纵剖面的投影面积。

1.2.3 自由液面截断效应

对于水面舰船，当冲击波传到自由液面时会反射稀疏卸载波，当反射波与入射波相遇时，入射波压力将为0，即产生自由液面截断效应，见图4。为此需要计算考虑自由液面截断效应时载荷作用时间的最大值。$t_{\max}$ 为入射波传到自由液面又传回船底的时间与直接传到船底的时间差。c_0 为入射波传播速度。

对于图4所示工况，装药位于船体正下方时

$$t_{\max} = \frac{R' - R}{c_0} + \frac{\Delta T}{c_1}$$

式中 c_1 为反射卸载波传播速度。

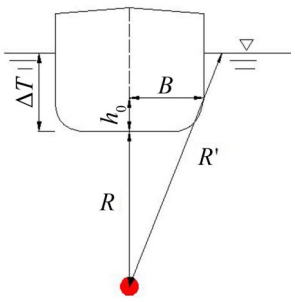

图4 自由液面截断效应示意图

根据几何关系可得

$$R' = \sqrt{1 + \left(\frac{B}{R + h_0}\right)^2}(R + \Delta T)$$

由冲击波动量原理可得稀疏反射波传播速度

$$C_1 = C_0\sqrt{1 + \frac{4\lambda P}{\rho c_0^2}}$$

式中 P 为船底处冲击波波头压力，λ 为冲击绝热线常数，ρ 为水的密度。

记 $M = \frac{4\lambda P}{\rho c_0^2}$，$A = \frac{B}{R + h_0}$ 则

$$t_{\max}=\frac{1}{c_0}\left[(R+\Delta T)\sqrt{1+A^2}-R+\frac{\Delta T}{\sqrt{1+M}}\right] \tag{14}$$

1.3 船体梁的运动响应

1.3.1 船体梁所受的合冲量及合冲量矩

由冲击波的性质可知冲击波同一波阵面上的冲击波压力相同，故单位时间内船体所受的合力为

$$F(t_1)=2\int_{t_1-\Delta t}^{t_1}P(t-t_1+\Delta t)l_1(t)c_0\mathrm{d}t/\tan\beta \tag{15}$$

$$l_1(t)=\begin{cases}\arccos(R/(R+c_0t))\times(R+c_0t), c_0t\leqslant d\\(\arccos(R/(R+c_0t))-\arccos\\((R+d)/(R+c_0t))\times(R+c_0t), c_0t\geqslant d\end{cases} \tag{16}$$

冲击波的合冲量及其对船中的冲量矩分别为

$$I=\int_0^{t_{\max}}F(t_1)\mathrm{d}t_1 \tag{17}$$

$$M=\int_0^{t_{\max}}F(t)x_0(t)\mathrm{d}t \tag{18}$$

$$x_0(t)=$$

$$\begin{cases}\sqrt{(R+c_0t)^2-R^2}/2, c_0t\leqslant d\\(\sqrt{(R+c_0t)^2-R^2}+\sqrt{(R+c_0t)^2-(R+d)^2})/2, c_0t\geqslant d\end{cases} \tag{19}$$

1.3.2 水面舰船垂向振动的1阶湿频率

采用等直梁模型计算水面舰船的1阶频率，并考虑舰船垂向振动附加质量的影响，1阶固有频率

$$\omega_1=(3\pi/2)^2\sqrt{EI/m_1l^3}\cdot K_1 \tag{20}$$

m_1 是包括船舶垂向1阶振动附加质量在内的船舶总质量，按下式计算

$$m_1=\Delta+\Delta_1=\Delta+\Delta(0.2+\frac{1}{3}\frac{B}{d})(C_b{}^2+0.15) \tag{21}$$

Δ：水面舰船的排水量，单位(吨)。

K_1是船体剖面惯性矩沿船长分布不同对固有频率影响的修正系数，根据大连理工大学赵德有对国内实船测试资料的统计归纳，对于1阶振动修正系数可如下计算

$$K_1=0.90+0.1C_b$$

1.3.3 船体梁的运动方程

冲击波作用下水面舰船的变形主要集中在刚体运动和1阶变形，忽略高阶振型，由对称性可知船体梁无转动。故船体梁的位移 w 可表示为

$$w(x,t)=at+(b\sin\omega_1t+c\cos\omega_1t)\phi_1(x) \tag{22}$$

式中 a 为船体梁的平动速度，ω_1 为船体梁的1阶圆频率，$\phi_1(x)$ 为船体梁的1阶振型。

由动量定理可知，船体梁的总动量等于船体梁所受的合冲量；船体梁对船中的动量矩等于冲击波对船中的冲量矩。另外由于冲击波作用时间很短，且冲击波是从船中传至两端，因此可以认为冲击波作用完的瞬间，船体梁端点的速度约为0。由以上三个条件可得三个方程

$$\int_0^{l.2}u\cdot\dot{w}(x,\ t)\mathrm{d}x=I \tag{23}$$

$$\int_0^{l/2}u\cdot\dot{w}(x,\ t)x\mathrm{d}x=M \tag{24}$$

$$w(x,\ 0)=0 \tag{25}$$

联立可得：$\begin{cases}a=I/m\\b=\dfrac{M-I}{A}\\c=0\end{cases}$，$A=\omega_1\int_0^{L/2}u\phi_1(x)x\mathrm{d}x$ (26)

式中 u 是单位船长的质量，m 为船体的总质量。

2 船舶总纵弯矩计算方法

2.1 船中弯矩的确定及最大弯矩

由梁的理论可知船体梁横剖面内弯矩

$$M(x,\ t)=EI\cdot w''=EIb\cos\omega_1t\phi_1''(x)$$

则船中弯矩

$$M(l/2,\ t)=EI\cdot w''=EIb\cos(\omega_1t)\phi_1''(l/2)$$

船中最大弯矩 M_{sk}

$$M_{sk}=EI\cdot b\cdot\phi_1''(l/2) \tag{27}$$

w' 表示 ω 对 x 进行求导。E 为船体梁的弹性模量，I 为船体梁的惯性矩。

2.2 极限弯矩的确定

根据船体结构规范中极限弯矩 M_u 的计算公式

$$M_u=\sigma_sW_{yh}\times10^{-1} \tag{28}$$

式中，M_u 为船中极限弯矩，kN·m；σ_s 为所校核剖面距中和轴最远点刚性构件材料的屈服强度，MPa；W_{yh} 为假定距中和轴最远点构件的应力等于材料屈服强度时的最小剖面模数，$cm^2\cdot m$，可用以下公式估算得到

$$W_{yh}=\alpha KLBd(C_b+1.2) \tag{29}$$

式中 L 为船长，B 为船宽，d 为吃水，α 为航区系数，C_b 为方形系数，K 为系数，$K=\dfrac{2.2}{L^{0.26}}$。根据以上理论，可估算得到不同类型舰船的极限弯矩。

α：A级航区取1；B级航区取0.85；C级航区取0.75

2.3 总纵强度校核

由于水面舰船受到波浪弯矩和冲击波弯矩联合作用的可能性很低，所以单独校核船舶所受的冲击波弯矩。采用极限弯矩来校核船体的总纵强度，定义安全系数

$$n=\frac{M_u}{M_{sk}} \tag{30}$$

根据安全系数的大小来判定冲击波作用下舰船总纵强度是否满足要求。所采用的总纵强度评估方法如图5所示。

3 工程预报结果分析

以水面舰艇为例，对该船型进行工程化预报。该船的主要参数如表1所示。

实船工况为炸药当量为1 000 kg，爆距为30 m，爆炸方位角为90度。针对该船型，结合总纵强度预报软件展开了相关计算，得到中拱最大弯矩为40 100 kN·m；船中极限弯矩为101 244 kN·m。根据式(30)可以得到安全系数为

$$n=\frac{M_u}{M_{sk}}=2.524\ 68$$

而该工况下测得的实验值为3.3，相对误差为－23.6 %，满足工程精度需求。

表1 某型舰船的主要参数

总长：80 m	中横剖面系数：0.8
型宽：11 m	中横剖面惯性矩：1.5 m^4
吃水：3 m	排水量：1 000 t
设计水线长：75 m	方形系数：0.46
设计水线宽：9 m	材料屈服应力350 MPa

表2列出了攻角90 °下不同爆距工况下船体的中拱最大弯矩和安全系数。通过比较表中的安全系数可知，若减小爆距，则爆炸冲击动弯矩作用将更加明显，呈线性增长。表3给出了爆距30 m时不同攻角下中拱最大弯矩和安全系数。表中数据表明，随着攻角的增加，安全系数呈倒数趋势较小。由此可见，爆炸冲击是舰船总纵强度毁伤的重要原因之一。

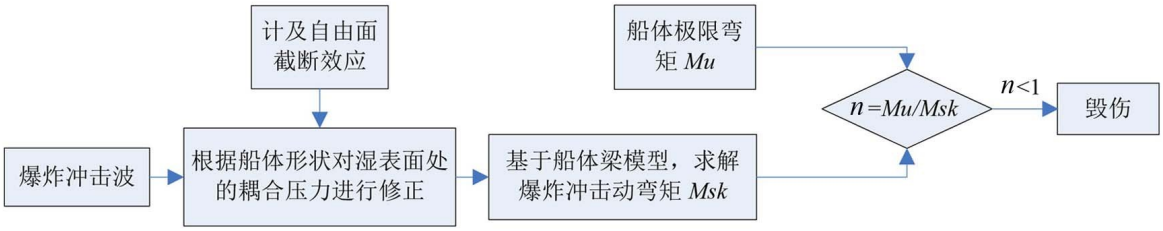

图5 总纵强度评估流程图

表2 攻角90°下不同爆距的总纵强度预报

爆距(m)	45	40	35	30	25	20	15
中拱最大弯矩(kN·m)	24 712.5	28 728.4	33 752	40 101.9	48 641.6	60 654.8	79 110.7
安全系数	4.1	3.5	2.9	2.5	2.0	1.6	1.27

表3 爆距30 m时不同攻角的总纵强度预报

攻角(°)	20	30	40	50	60	70	80	90
中拱最大弯矩(kN·m)	21 388	24 061	26 735	29 408	32 082	34 755	37 428	40 102
安全系数	4.7	4.2	3.8	3.4	3.2	2.9	2.7	2.5

4 结 语

本文基于Taylor平板理论，对船底处耦合压力进行修正，推导并建立船体梁爆炸冲击弯矩的理论与计算方法，结合理论方法开发相应的总纵强度预报软件。依据该预报软件，对不同工况下实船的总纵强度进行预报，得到以下结论：

(1) 相比于实船试验数据，应用本方法可得出与试验结果较符合的安全系数，该方法可用于舰船在冲击波载荷作用下的总纵强度工程化预报。

(2) 攻角一定时，若减小爆距，则爆炸冲击动弯矩作用将更加明显，呈线性增长。而在一定爆距下随着攻角的增加，安全系数呈倒数趋势较小。

参考文献：

[1] Cole R H. Underwater explosion. Princeton USA: Princeton University Press, 1946.

[2] Klaseboer E, Khoo B C, Hung K C. Dynamics of an oscillating bubble near a floating structure[J]. **Journal of Fluids and Structures,** 2005, 10(2): 1-10 P.

[3] 张阿漫. 水下爆炸气泡三维动态特性研究[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2006.

[4] 张阿漫，王诗平，汪玉，等. 水下爆炸对舰船结构损伤特征研究综述[J]. **中国舰船研究**，2011，03：1-7.

[5] 张阿漫，汪玉，闻雪友，等. 水下爆炸气泡动态特性研究综述[J]. **船舶力学**，2009，05：828-840.

[6] 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): 1564-1601.

(下转第180页)