

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0068

# 水下爆炸载荷下柔性支撑板架结构 防护效能快速预报与优化方法\*

郭桐桐<sup>1,2</sup>, 郭煜<sup>1,2</sup>, 余俊<sup>1,2</sup>, 陈娟<sup>3</sup>, 王海坤<sup>1,2</sup>, 张伦平<sup>1,2</sup>

- (1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214000;
2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214000;
3. 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 为实现柔性支撑板架结构在水下爆炸下防护效能的快速评估和设计优化, 基于高置信度仿真, 建立了水下爆炸作用下柔性支撑板架防护效能的评估方法并开展试验验证。采用验证后的高置信度仿真方法生成样本工况数据, 并通过径向基神经网络模型构建能快速评估柔性支撑板架结构防护效能的代理模型。结合多岛遗传算法对建立的代理模型进行防护结构高防护效能和轻量化的多目标优化并获取最优结构参数。建立的快速预报与优化方法可以为相关的结构设计优化提供重要的技术支持。

**关键词:** 水下爆炸; 柔性支撑板架; 防护效能; 抽样方法; 神经网络; 多目标优化

中图分类号: O383.1 国标学科代码: 130.35 文献标志码: A

## Rapid prediction and optimization method for protective effectiveness of flexible support plate structure under underwater explosion load

GUO Tongtong<sup>1,2</sup>, GUO Yu<sup>1,2</sup>, YU Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Juan<sup>3</sup>, WANG Haikun<sup>1,2</sup>, ZHANG Lunping<sup>1,2</sup>

- (1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214000, Jiangsu, China;
2. Taihu Laboratory of Deep Sea Technology Science, Wuxi 214000, Jiangsu, China;
3. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430000, Hubei, China)

**Abstract:** In order to assess the rapid assessment and design optimization of the protective performance of flexible support plate structure subjected to underwater explosion, a high-confidence simulation method was first established for the protective performance of flexible support plate structure subjected to underwater explosion. Subsequently, underwater explosion tests were conducted on the flexible support plate structure to validate the computational accuracy of the developed high-confidence simulation method by comparing the deformation between the simulation results and the experimental results. The thickness of the blast-facing panel, the thickness of the flexible supports, and the thickness of the stiffened web were identified as the three key characteristic parameters that influence the protective performance of the flexible support plate. Utilizing optimized Latin-hypercube sampling method, 15 sample conditions were extracted from the sample space. The validated high-confidence simulation method was then used to generate protective performance data for these 15 sample conditions, which was subsequently employed to construct a proxy model for rapid assessment of the protective performance of the flexible support plates by using a radial basis function (RBF) neural network. The accuracy of the proxy model was assessed using 5 randomly selected conditions, and the results showed that the prediction error was within 7%, indicating a high level of prediction

\* 收稿日期: 2024-03-11; 修回日期: 2024-08-21

第一作者: 郭桐桐(1995—), 男, 硕士, 工程师, [guotongtong2013z@163.com](mailto:guotongtong2013z@163.com)

通信作者: 张伦平(1983—), 男, 硕士, 研究员, [applezeryx@126.com](mailto:applezeryx@126.com)

accuracy. The multi-island genetic algorithm (MIGA) was applied to the proxy model to perform multi-objective optimization and obtain a pareto set of solutions. The condition with the maximum specific ultimate energy absorption per unit mass was selected as the optimal structural parameters for the flexible support plate, achieving the goals of enhancing the ultimate protective performance and reducing the total structural mass. The rapid prediction and optimization method developed in this study provides significant technical support for the design and optimization of flexible support plate, ensuring both effective protection and weight savings.

**Keywords:** underwater explosion; flexible support plate; protective effectiveness; sampling method; neural network; multi objective optimization

大型舰船防雷舱结构是提升舰船抗爆性能、维持战时生命力的重要保证。对于传统防雷舱结构在水下接触爆炸下的防护效能,国内学者已经开展了系列研究。朱锡等<sup>[1]</sup>通过开展一系列模型水下接触爆炸试验,研究了舷侧加筋板架结构对破口大小的影响,证明了多层防雷舱结构能显著提升大型舰船的防护能力。侯海量等<sup>[2]</sup>基于动力学和能量方法提出了防雷舱结构防护效能评估的基本思路和方法,从能量角度给出了液舱壁破坏判据,并对典型防雷舱结构液舱的防护效能进行计算评估,评估结果与模型试验结果吻合良好。吴林杰等<sup>[3]</sup>通过 LS-DYNA 开展了 3 种防雷舱结构在水下接触爆炸下的仿真,比较了不同空舱内部结构形式对爆轰产物膨胀过程的影响,结果表明,采用“开孔竖隔板+平台”结构不仅利于泄爆降压,而且具有足够高的静强度。

然而,传统的防雷舱结构在冲击载荷下可能在液舱壁后的上下接头处发生破坏。目前,一种有效的解决办法是在液舱壁后设置弧形板和加筋的柔性支撑板架结构来提升结构的整体防护效能。对于这种新型柔性支撑板架结构的防护能力,张弩等<sup>[4]</sup>通过 LS-DYNA 的 ALE(arbitrary Lagrange-Euler)方法开展数值仿真,研究了平板支撑与弧形板支撑防护结构在防护能力上的差异,得到了柔性支撑防护结构的防护原理,结果表明,弧形板支撑结构能显著提升防护能力,降低在上下接头处发生破坏的风险。柴崧淋等<sup>[5]</sup>开展了 4 种带有不同形式支撑的防雷舱结构的水下爆炸试验,结果表明,柔性支撑相较于其余支撑形式具有更好的防护效能,在弧形板中间添加泡沫铝对提升抗爆性能无明显作用。显然,当前评估柔性支撑板架结构防护效能的方法主要是仿真和试验,存在缺乏定量结果、耗时长、成本高、占用大量计算资源等问题。针对以上问题,本文中,首次将数据驱动方法引入柔性支撑板架结构的防护效能评估与优化中,不仅可以实现新结构防护效能的快速预报,还可以在此基础上优化结构参数。

近年来,随着机器学习尤其是深度学习技术的飞速发展,数据驱动方法在船舶性能快速预报与优化方面已经有了一些应用。姚凤翔等<sup>[6]</sup>基于可调螺旋桨船舶的历史航行数据,采用 ELM(extreme learning machine)算法开展了船舶油耗预测模型研究,并以船舶燃油消耗量最小为目标,采用改进粒子群法获得了螺距最优的设计方案,经测算,优化后船舶单航程的燃油消耗量减少约 3%。张晓东等<sup>[7]</sup>采用径向基(radial basis function, RBF)神经网络和 Kriging 代理模型方法,分别对水下垂直发射航行器的空泡压力进行预报,并开展试验验证了代理模型的预报精度。强以铭等<sup>[8]</sup>针对船舶螺旋桨性能预报问题,采用随机森林方法建立了螺旋桨敞水性能预报代理模型,预报结果与试验吻合得很好。王卓等<sup>[9]</sup>基于遗传算法研究了邮轮舷侧开口结构的补强技术,详细分析了补强加筋间距、高度和厚度等参数对结构加强效果的影响,获得了增强效果最好的同时结构增重最小的 Pareto 前沿解以及最优个体,并根据优化结果给出了建议设计方案。

本文中,基于高置信度仿真,建立水下爆炸作用下柔性支撑板架结构防护效能评估方法,并开展试验验证。采用试验验证后的计算方法,在关键构件参数的样本空间内结合最优拉丁超立方方法开展大量仿真以生成样本数据;在样本空间内,采用 RBF 神经网络构建快速评估柔性支撑板架结构的代理模型,并检验该模型。以提升极限防护效能并降低板架结构质量为目标,采用多岛遗传算法(the multi-island genetic algorithm, MIGA)对基于 RBF 神经网络的快速预报模型进行多目标优化,获得最优结构参数,以期为大型舰船防雷舱柔性支撑板架结构的设计和 optimization 提供重要的技术支持。

# 1 柔性支撑板架结构防护效能高置信度的仿真模型

柔性支撑板架结构在水下爆炸冲击载荷下主要通过变形吸能来对板架后的结构进行防护。定义柔性支撑板架结构的迎爆面面板即将发生破坏而未破坏(临界状态)时的结构整体极限吸能为其防护效能。通过建立高置信度仿真模型来计算柔性支撑板架在水下爆炸下的防护效能,是最为快速、高效的方法。

## 1.1 有限元模型建立

柔性支撑板架结构自外向内分别为迎爆面面板、弧形支撑板和背爆面面板,上部为甲板接头,下部为双层底结构,如图 1 所示。在迎爆面面板后,布有若干弧形板、T 型筋等结构。迎爆面面板后的水平弧形板和纵向 T 型筋的布置如图 2 所示。柔性支撑板架结构中,板架长度为  $L$ ,板架高度为  $H$ ,迎爆面面板厚度和弧形板肘板厚度为  $t_b$ ,背爆面面板厚度为  $t_{bb}$ ,弧形板厚度为  $t_h$ ,弧形板曲率半径为  $R$ ,T 型筋面板厚度为 12 mm,宽度为 120 mm,T 型筋腹板厚度为 10 mm,高度为 160 mm,弧形板的分布间距为  $D_h$ ,T 型筋的分布间距为  $D_l$ ,迎爆面面板和背爆面面板的间距为  $D$ 。

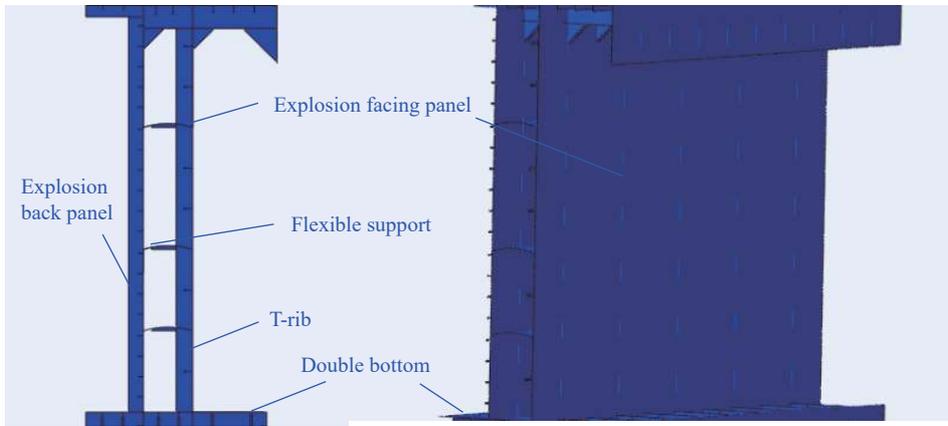


图 1 柔性支撑板架结构的简化模型

Fig. 1 Simplified model of flexible support plate structure

在 ABAQUS 中建立如图 2 所示的三维模型,并进行网格划分。网格单元类型为 S4R,网格尺寸为 40 mm,网格数量为 697 614,在计算机上采用 32 核并行计算,计算时长约为 385 min。

## 1.2 材料参数

柔性支撑板架结构的主要材料为船用钢材,在 ABAQUS 中选用 J-C(Johnson-Cook)本构模型和 J-C 失效模型。

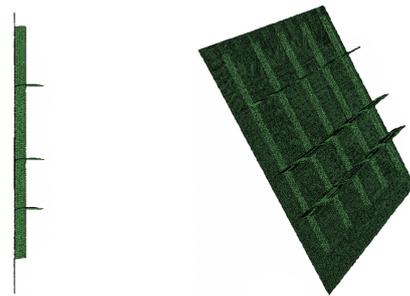
J-C 本构模型可表示为:

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_m}{T_r - T_m} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $\bar{\sigma}$  为材料的流动应力,  $A$  为静态屈服应力,  $B$  为硬化参数,  $n$  为硬化指数,  $C$  为应变率参数,  $T$  为温度,  $T_r$  为室温,  $T_m$  为熔化温度,  $m$  为温度软化指数,  $\bar{\epsilon}$  为等效塑性应变,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  为等效塑性应变率,  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率。

J-C 失效模型可同时考虑应力三轴度、温度效应和应变率效应对断裂应变的影响,可表示为:

$$\bar{\epsilon} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left( 1 + D_5 \frac{T - T_m}{T_r - T_m} \right) \quad (2)$$



(a) Flexible support plate (b) T-shaped reinforcement

图 2 迎爆面面板后弧形支撑板与 T 型筋分布

Fig. 2 Distribution of the flexible support plate and T-shaped reinforcement behind the explosion facing panel

式中:  $D_1 \sim D_5$  为 J-C 失效模型参数,  $\eta$  为应力三轴度。

船用钢材的本构参数和失效参数如表 1<sup>[10]</sup> 所示。

表 1 钢材的 J-C 本构参数和失效参数设置<sup>[10]</sup>

Table 1 J-C constitutive and failure parameter settings for steel material<sup>[10]</sup>

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$m$	$C$	破坏位移/ $\mu\text{m}$
706	648	0.58	0	0.01	1
$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$\dot{\epsilon}_0/\text{s}^{-1}$
0.272	-0.073	-0.65	-0.003	0	1

### 1.3 载荷与边界

水下爆轰产生作用在迎爆面面板上的能量可以用等效速度场来模拟<sup>[11]</sup>, 速度场分布与距离呈线性关系:

$$v(x, y) = v_{\max} \frac{L_b}{\sqrt{x^2 + y^2 + L_b^2}} \quad (3)$$

式中: 坐标原点为爆源在迎爆面面板上的投影点,  $x$ 、 $y$  分别为迎爆面上长度和高度方向的坐标;  $v_{\max}$  为坐标原点处的等效速度;  $L_b$  为爆距, 即爆点与迎爆面面板的直线距离。模型及网格划分如图 3 所示。设置模型的边界为四周刚性固定, 如图 4 所示。

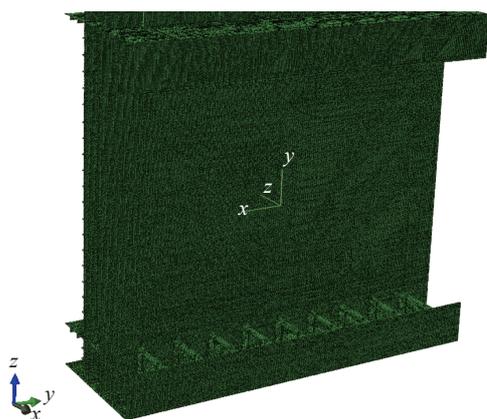


图 3 网格划分

Fig. 3 Grid partitioning

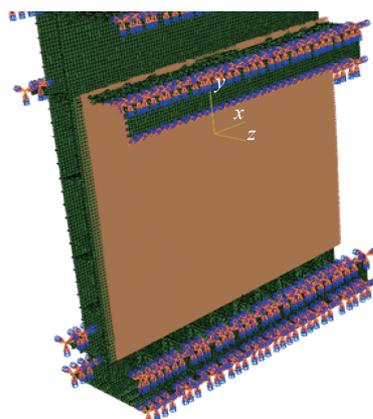


图 4 边界设置

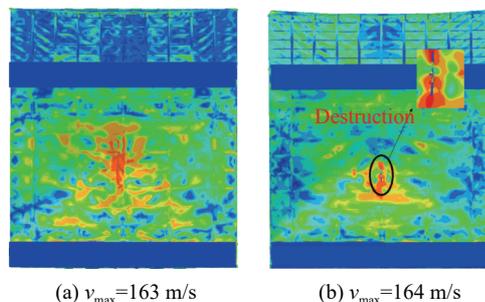
Fig. 4 Boundary settings

定义切向为罚函数摩擦, 法向为“硬接触”, 输出柔性支撑板架结构各部分的吸能, 计算时间为 0.025 s, 在分析步中输出柔性支撑板架结构的总吸能及各部分的吸能。

### 1.4 柔性支撑板架结构防护效能计算结果分析

#### 1.4.1 破坏判定与临界速度

一般而言, 以柔性支撑板架的迎爆面面板是否发生破坏作为结构功能失效的判据。通过不断调整最大速度  $v_{\max}$ , 开展多次仿真计算。结果表明, 速度达到临界时, 平板与垂向 T 型筋的连接处发生破坏, 如图 5(b) 所示。多次计算后, 得到该工况下迎爆面面板发生破坏的最大临界速



(a)  $v_{\max} = 163 \text{ m/s}$

(b)  $v_{\max} = 164 \text{ m/s}$

图 5 破坏判定与临界速度

Fig. 5 Destruction determination and critical speed

度  $v_{\max}$  为 163 m/s, 极限变形情况如图 5(a) 所示。

#### 1.4.2 极限吸能分析

在破坏临界 ( $v_{\max}=163$  m/s) 工况下输出柔性支撑板架结构各主要部分的极限吸能, 如表 2 所示。显然, 迎爆面面板、水平弧形板和迎爆面 T 型筋腹板的吸能占比最大, 三者之和占比约为 76.2%。定义迎爆面面板、弧形板、迎爆面 T 型筋腹板的极限吸能之和  $E_m$  在柔性支撑板架结构总极限吸能  $E_t$  (即柔性支撑板架防护效能) 中的占比为  $C_e$ :

$$C_e = \frac{E_m}{E_t} \quad (4)$$

在该工况下,  $C_e=0.762$ 。

显然, 迎爆面面板厚度、水平弧形板厚度和 T 型筋腹板厚度是影响柔性支撑板架结构极限吸能的主要特征参数。在后续代理模型构建中, 这 3 个参数是主要影响参数。

## 2 柔性支撑板架结构防护效能计算方法的试验验证

采用将水下爆炸载荷等效为速度场的方法结合仿真建立柔性支撑板架结构防护效能的仿真方法。仿真模型中, 等效载荷施加方式、网格尺寸是影响有限元计算精度的重要因素。为了验证柔性支撑板架防护效能仿真模型的计算精度, 开展柔性支撑板架结构水下爆炸试验, 重点验证等效速度场加载方式和网格尺寸对计算结果的影响。

### 2.1 柔性支撑板架结构水下爆炸试验

结合原型设计柔性支撑板架结构的小尺度试验模型, 模型材料为 Q355B 钢, 板架前后边界模拟实际情况, 模型结构如图 6 所示。

水下爆炸采用药量为 2 kg 的 TNT, 爆距为 0.8 m, 爆深为 3 m, 药包位置正对迎爆面面板中心。试验前, 在试验模型迎爆面面板上画好坐标标记, 柔性支撑板架模型通过浮筒吊放至指定水深, 试验在中国船舶科学研究中心的爆炸水池中开展。

### 2.2 基于速度场等效的高置信度仿真计算结果

郭桐桐等<sup>[11]</sup>的研究表明, 水下爆炸冲击波载荷可转化为等效速度场加载,  $v_{\max}$  与药量及爆距的关系满足:

$$v_{\max} = \frac{403.5}{L_b} \sqrt{\frac{W}{\rho t}} \quad (5)$$

式中:  $v_{\max}$  的单位为 m/s;  $W$  为药量, kg;  $\rho$  为平板的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $t$  为厚度, m。结合式 (3), 可得试验模型的等效速度场:

$$v(x, y) = 88.9 \frac{0.8}{\sqrt{x^2 + y^2 + 0.8^2}} \quad (6)$$

式中: 速度场  $v(x, y)$  的单位为 m/s。

在 ABAQUS 中建立柔性支撑板架试验模型, 材料参数选用 Q355B 的 J-C 本构模型和失效模型, 网格尺寸为 20 mm, 网格数量为 80 094, 材料参数如表 3 所示<sup>[12]</sup>。将速度场(式 (6))加载到迎爆面面板上,

表 2 柔性支撑板架结构各主要部分的极限吸能

Table 2 The ultimate energy absorption of the main parts of the flexible support plate structure on the ship's side

柔性支撑板架结构主要部分	极限吸能/MJ	吸能占总能量比例/%
柔性支撑板架结构	112.21	100
迎爆面面板	52.85	47.1
水平弧形板	22.17	19.8
水平弧形板肘板	1.05	0.9
迎爆面 T 型筋腹板	10.40	9.3
迎爆面 T 型筋面板	2.75	2.5
背爆面面板	2.84	2.5

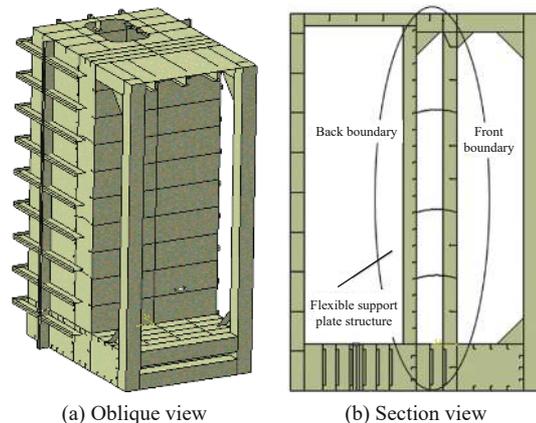


图 6 柔性支撑板架结构试验模型

Fig. 6 Test model for flexible support plate structure

如图 7 所示。

### 2.3 高置信度仿真计算结果与试验结果对比

为得到柔性支撑板架结构的极限防护效能, 开展大量仿真计算是容易的, 但通过大量试验获得结构临界吸能状态的成本过高, 难以实现。因此, 本文中, 通过比较仿真和试验的迎爆面面板变形情况, 间接验证建立的仿真方法。试验中, 迎爆面面板的变形模式为内凹的锅底式, 最大挠度为 0.233 m, 如图 8 所示。

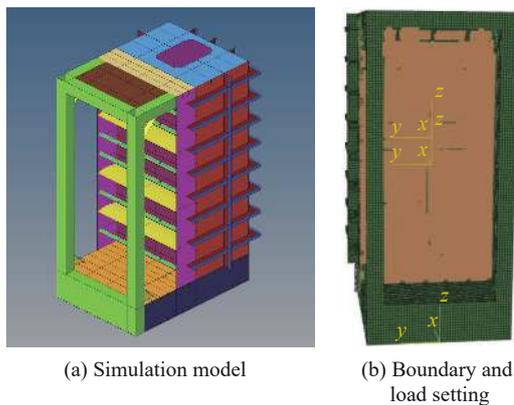


图 7 柔性支撑板架结构试验模型的仿真计算

Fig. 7 Simulation calculation of test model for flexible support plate structure

图 9 为仿真的迎爆面面板在面板法向的位移( $\Delta U$ )云图。由图 9 可知, 迎爆面面板的变形模式为内凹的锅底式, 最大挠度为 0.241 m。对比试验结果和仿真结果, 柔性支撑板架结构的变形模式基本一致。表 4 比较了变形情况, 最大挠度的误差仅为 3.4%, 因此, 基于等效速度场的柔性支撑板架结构防护效能仿真方法具有较高的计算精度。

### 2.4 高置信度仿真计算方法网格灵敏度分析

除了等效速度场的加载方式, 网格尺寸也会对计算结果产生影响。对于图 7 中的几何模型, 分别采用 30 和 40 mm 的网格尺寸进行网格划分, 其余模型参数保持不变, 计算迎爆面面板的最大挠度和结构整体吸能, 如表 5 所示。结果表明, 网格尺寸为 20 mm 时, 仿真结果更接近试验结果。当网格尺寸从 20 mm 增至 40 mm 时, 网格数量减少了 53.4%, 结构总吸能仅增加 6.7%, 最大挠度增加 2.1%, 在提高计算效率的同时对仿真结果的影响不大。因此, 在第 2 节中采用 40 mm 的网格尺寸是合理的。

表 3 Q355B 钢的 J-C 本构参数与失效参数设置<sup>[12]</sup>

Table 3 J-C constitutive and failure parameter settings for Q355B steel<sup>[12]</sup>

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$m$	$C$	破坏位移/ $\mu\text{m}$
360	300	0.547	0	0.046	1
$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$\dot{\epsilon}_0/s^{-1}$
-0.091	1.532	-0.091	0	0	1



图 8 试验模型的水下爆炸变形

Fig. 8 Underwater explosion deformation of experimental model

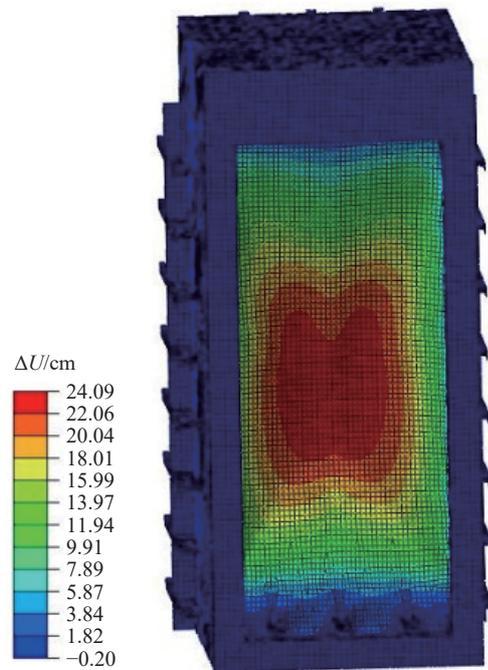


图 9 仿真得到的迎爆面面板变形

Fig. 9 Deformation of the explosion facing panel in simulation

表 4 试验结果与高精度仿真结果比较

Table 4 Comparison between experimental results and high-precision simulation results

最大挠度			横向变形长度			垂向变形长度		
仿真/m	实验/m	误差/%	仿真/m	实验/m	误差/%	仿真/m	实验/m	误差/%
0.241	0.233	3.4	1.358	1.342	1.2	2.565	2.546	0.7

表 5 网格尺寸对于计算结果的影响

Table 5 The influence of grid size on calculation results

网格尺寸/mm	网格数量	结构总吸能/kJ	最大挠度		
			仿真/m	实验/m	误差/%
20	80094	1130	0.241	0.233	3.4
30	54459	1179	0.245	0.233	5.2
40	37334	1206	0.246	0.233	5.5

### 3 冲击载荷下柔性支撑板架结构防护效能快速预报与优化

在 1.4 节中, 迎爆面面板厚度 ( $t_b$ )、水平弧形板厚度 ( $t_h$ ) 和迎爆面 T 型加筋腹板厚度 ( $t_{nb}$ ) 对柔性支撑板架结构的整体防护效能影响最大, 三者的吸能之和接近板架总吸能的 80%。对于结构设计而言, 在三者厚度配比不同的情况下, 通过上述仿真得到柔性支撑板架结构的防护效能需要消耗大量的时间成本和计算资源。因而, 本节中, 采用最优拉丁超立方抽样方法和 RBF 神经网络建立冲击载荷下柔性支撑板架结构的防护效能代理模型, 以期快速预报结构防护效能, 并为结构优化设计奠定基础。

#### 3.1 代理模型构建总体思路

首先, 在迎爆面面板厚度 ( $t_b$ )、水平弧形板厚度 ( $t_h$ ) 和迎爆面 T 型加筋腹板厚度 ( $t_{nb}$ ) 的取值区间内, 通过最优拉丁超立方抽样方法生成 15 组样本点。然后, 基于第 1 节中的高置信度仿真方法得到不同样本工况下的防护效能。接着, 采用 RBF 神经网络构建柔性支撑板架结构防护效能关于  $t_b$ 、 $t_h$ 、 $t_{nb}$  3 个结构参数的代理模型。

表 6 样本点及计算结果

Table 6 Sample points and calculation results

#### 3.2 样本点生成及板架结构防护效能计算

##### 3.2.1 输入与输出

代理模型的输入物理量为  $t_b$ 、 $t_h$  和  $t_{nb}$ , 单位均为 mm; 输出物理量为板架结构的防护效能 ( $E_t$ ) 和总质量 ( $m_t$ ), 单位分别为 MJ 和 t。

##### 3.2.2 设计变数的取值

$t_b$ 、 $t_h$  和  $t_{nb}$  的取值范围分别为 22~30 mm、4~12 mm 和 4~12 mm。为保证样本点的离散程度, 在代理模型的构建阶段不考虑实际的板厚, 在取值空间内各板厚度允许出现 2 位小数。

##### 3.2.3 样本点生成

采用最优拉丁超立方抽样方法产生 15 个样本点, 通过第 1 节中的高置信度仿真方法获得板架结构的防护效能, 并通过已知的结构尺寸和密度计算所有样本点的质量, 如表 6 所示。

抽样工况	$t_b$ /mm	$t_h$ /mm	$t_{nb}$ /mm	$E_t$ /MJ	$m_t$ /t
1-1	26.57	9.71	4.00	199.2	79.6
1-2	23.71	6.29	12.00	151.2	72.7
1-3	24.86	5.71	4.57	189.9	72.3
1-4	22.57	8.57	5.14	162.2	69.5
1-5	27.71	4.57	6.86	207.5	78.9
1-6	26.00	8.00	8.57	180.3	78.4
1-7	24.29	12.00	6.29	164.1	77.0
1-8	23.14	5.14	8.00	163.4	68.9
1-9	29.43	6.86	9.71	208.1	85.9
1-10	30.00	7.43	5.71	226.8	86.3
1-11	28.29	10.86	7.43	198.5	85.8
1-12	27.14	4.00	10.86	189.1	78.4
1-13	28.86	10.29	11.43	189.5	88.1
1-14	25.43	11.43	10.29	160.2	80.6
1-15	22.00	9.14	9.14	140.0	70.1

### 3.3 柔性支撑板架结构代理模型的构建与验证

基于表 6 中的样本数据, 采用 RBF 神经网络构建出防护效能预报的代理模型。为检验代理模型的精度, 在设计取值区间内选取 5 个工况作为检测样本点, 分别采用代理模型和高置信度有限元仿真对检测工况的响应值进行预报。采用相对误差( $r_e$ )

作为评估代理模型精度的指标:

$$r_e = \frac{E_{t,d} - E_{t,f}}{E_{t,f}} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $E_{t,d}$  和  $E_{t,f}$  分别为代理模型预报的板架结构防护效能和高置信度有限元仿真的板架结构防护效能。计算结果如表 7 所示, 代理模型的预报误差在 7% 以内, 具有较高的精度, 表明该模型可作为冲击载荷下柔性支撑板架结构防护效能的快速预报方法。

### 3.4 基于代理模型的柔性支撑板架结构多目标优化

柔性支撑板架结构的优化要考虑两个目标: 一是保证板架结构具有较高的防护效能, 二是结构轻量化。由于这两个目标有一定的矛盾性, 不适用于采用加权平均法进行优化, 因此, 本研究采用多岛遗传算法进行优化计算。

考虑实际的约束情况, 需要保证柔性支撑板架结构的防护效能( $E_t$ )大于 140 MJ, 而总质量( $m_t$ )不超过 80 t。在代理模型的基础上, 采用多岛遗传算法优化得到 Pareto 解集, 如表 8 所示。定义柔性支撑板架结构的防护效能与总质量之比为比极限吸能  $\gamma$ , 基于代理模型, 则有:

$$\gamma = \frac{E_{t,d}}{m_t} \quad (8)$$

式中:  $\gamma$  的单位为 MJ/t。

表 8 优化得到的 Pareto 前沿解集

Table 8 Optimized Pareto frontier solution set

Pareto解集工况	$t_v$ /mm	$t_h$ /mm	$t_{fb}$ /mm	$E_{t,d}$ /MJ	$m_t$ /t	$\gamma$ /(MJ·t <sup>-1</sup> )
3-1	27.76	4.01	5.32	214.7	78.00	2.75
3-2	24.66	4.33	4.51	191.0	70.63	2.70
3-3	28.45	5.31	4.04	220.9	79.58	2.78
3-4	26.62	5.57	4.06	207.2	76.19	2.72
3-5	25.50	5.96	4.99	193.3	74.19	2.61

显然, Pareto 解集中, 工况 3-3 的比极限吸能最大, 可作为最终的优化结果。在实际应用中, 依据优化结果并按就近原则选取最接近的板厚即可, 即  $t_b=28$  mm,  $t_h=5$  mm,  $t_{fb}=4$  mm。

## 4 结 论

针对柔性支撑板架结构在水下爆炸载荷下的防护效能快速预报及优化问题, 建立了基于等效速度场方法的高置信度仿真方法, 并开展了试验验证; 在特征参数样本空间内, 采用最优超拉丁抽样方法获得合理的仿真工况, 并采用高置信度仿真方法获取样本工况的防护效能; 基于 RBF 神经网络模型, 构建了柔性支撑板架结构防护效能的代理模型; 结合代理模型和多岛遗传算法, 开展了防护结构高防护效能和轻量化的多目标优化, 并获得了比极限吸能最高的结构参数配置, 得到的主要结论如下:

(1) 基于等效速度场方法的水下爆炸高置信度仿真方法具有较高的计算精度, 可作为柔性支撑板架

结构防护效能的重要评估方法, 可为代理模型产生所需的样本数据;

(2) 柔性支撑板架结构在冲击载荷下的总极限吸能可作为其防护效能, 极限状态下迎爆面面板、水平弧形板和迎爆面纵筋腹板是结构抗爆炸冲击的主要吸能构件, 三者吸能之和占总吸能约 80%, 其厚度是代理模型的主要参数;

(3) 代理模型预报的板架结构防护效能与高置信度仿真的板架结构防护效能之间的相对误差较小, 在 7% 以内, 因此代理模型可实现柔性支撑板架结构防护效能的快速预报。

建立的快速预报与优化方法可为带柔性支撑板架的新型防雷舱的结构设计与评估提供技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 朱锡, 张振华, 刘润泉, 等. 水面舰艇舷侧防雷舱结构模型抗爆试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(2): 133–139. DOI: 10.11883/1001-1455(2004)02-0133-7.  
ZHU X, ZHANG Z H, LIU R Q, et al. 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): 133–139. DOI: 10.11883/1001-1455(2004)02-0133-7.
- [2] 侯海量, 张成亮, 朱锡. 水下舷侧防雷舱结构防护效能评估方法研究 [J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(3): 22–26. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2013.03.005.  
HOU H L, ZHANG C L, ZHU X. Evaluation methods of the performance of multi-layered blast protection blisters subjected to underwater contact explosions [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(3): 22–26. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2013.03.005.
- [3] 吴林杰, 朱锡, 侯海量, 等. 舰船水下防护结构舷侧空舱内部结构优化 [J]. *海军工程大学学报*, 2017, 29(2): 17–21. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2017.02.004.  
WU L J, ZHU X, HOU H L, et al. Optimization research on broadside cabin inside structure of warship underwater defensive structure [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2017, 29(2): 17–21. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2017.02.004.
- [4] 张弩, 明付仁, 吴国民, 等. 舰船舷侧防御纵壁弧形支撑结构水下接触爆炸的防护效果研究 [J]. *船舶力学*, 2019, 23(10): 1257–1265. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2019.10.012.  
ZHANG N, MING F R, WU G M, et al. Study on the protection effects of arc-shaped structures on warship broadside subjected to underwater contact explosions [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2019, 23(10): 1257–1265. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2019.10.012.
- [5] 柴崧淋, 侯海量, 金键, 等. 水下接触爆炸下舷侧防雷舱吸能结构形式试验研究 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(6): 1395–1406. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0328.  
CHAI S L, HOU H L, JIN J, et al. Experimental study on the energy-absorbing structure of broadside defense cabin subjected to underwater contact explosion [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(6): 1395–1406. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0328.
- [6] 姚凤翔, 王鸿东, 张海华, 等. 数据驱动的可调螺旋桨船舶油耗模型及航速优化 [J]. *中国造船*, 2023, 64(2): 226–239. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2023.02.020.  
YAO F X, WANG H D, ZHANG H H, et al. Data-driven fuel consumption model and speed optimization of ships with controllable pitch propeller [J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(2): 226–239. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2023.02.020.
- [7] 张晓东, 权晓波, 王占莹. 代理模型在水下航行体空泡压力预示的应用研究 [J]. *船舶力学*, 2018, 22(1): 12–21. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2018.01.002.  
ZHANG X D, QUAN X B, WANG Z Y. Research on the prediction method of unsteady cavity pressure development of underwater vehicle based on surrogate model [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(1): 12–21. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2018.01.002.
- [8] 强以铭, 陈诗楠, 陈奕宏, 等. 基于机器学习的船舶螺旋桨敞水性能预报代理模型 [J]. *中国造船*, 2022, 63(5): 181–188. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2022.05.017.  
QIANG Y M, CHEN S N, CHEN Y H, et al. Prediction of open-water characteristics of ship propellers based on machine learning surrogate model [J]. *Shipbuilding of China*, 2022, 63(5): 181–188. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2022.05.017.
- [9] 王卓, 孔祥韶, 吴卫国. 基于遗传算法的邮轮舷侧开口结构补强技术研究 [J]. *中国造船*, 2023, 64(6): 86–100. DOI: 10.

3969/j.issn.1000-4882.2023.06.008.

WANG Z, KONG X S, WU W G. Research on reinforcement technique for side shell with openings on cruise ships based on genetic algorithm [J]. *Shipbuilding of China*, 2023, 64(6): 86–100. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2023.06.008.

- [10] 孟利平. 应变率和应力三轴度对船用钢变形和断裂的影响研究 [D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2016: 83–89.

MENG L P. Influence of strain rate and stress triaxiality on the deformation and fracture behavior of ship hull steel [D]. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2016: 83–89.

- [11] 郭桐桐, 张伦平, 伍星星, 等. 平板和板架结构在水下非接触爆炸下冲击波载荷与速度场等效关系研究 [J]. *振动与冲击*, 2024, 43(16): 146–151.

GUO T T, ZHANG L P, WU X X, et al. Study on the equivalent relationship between shock wave load and velocity field load of plate and plate frame structure under underwater non-contact explosion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(16): 146–151.

- [12] 伍星星, 刘建湖, 陈嘉伟, 等. 冲击载荷作用下 Q345 钢失效应变与单元尺寸关系研究 [J]. *船舶力学*, 2023, 27(2): 260–271. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2023.02.010.

WU X X, LIU J H, CHEN J W, et al. Influence of element size on failure strain of Q345B steel under intensive loading [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(2): 260–271. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2023.02.010.

(责任编辑 王晓双)