

引用格式: 徐明成, 肖邵予, 王汝奔, 等. 基于 RBF-PSO 算法的浮筏隔振系统性能优化及轻量化设计 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(4): 185–193.

XU M C, XIAO S Y, WANG R H, et al. Performance optimization and lightweight design of floating raft vibration isolation system based on RBF-PSO algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(4): 185–193 (in Chinese).

基于 RBF-PSO 算法的浮筏隔振系统 性能优化及轻量化设计



扫码阅读全文

徐明成¹, 肖邵予², 王汝奔², 张冠军^{1*}

1 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: [目的] 为了解决工程中浮筏隔振系统轻量化设计过程工作量大、迭代周期长的问题, 提出一种基于 RBF-PSO 多目标优化算法的轻量化设计方法。[方法] 以板架式浮筏隔振系统为研究对象, 基于 ANSYS APDL 建立有限元模型并分析其隔振性能和抗冲击性能。通过试验测试浮筏的隔振性能, 并与数值仿真结果进行对比, 验证数值仿真结果的准确性; 采用完全有限差分法, 对浮筏隔振系统进行参数灵敏度分析, 通过灵敏度分析结果选择设计变量, 并基于 RBF-PSO 多目标优化算法对浮筏进行轻量化设计。[结果] 研究表明: 轻量化设计后, 筏架质量为 63.03 kg, 相较原筏架减重 31.92%。与此同时, 浮筏隔振系统的隔振性能提升了 2.48 dB, 设备的抗冲击性能也有所提升。RBF-PSO 多目标优化算法优化值与数值仿真计算值误差小于 1%。[结论] RBF-PSO 多目标优化算法可有效应用于浮筏隔振系统的轻量化设计中。

关键词: 浮筏隔振系统; 隔振; 灵敏度分析; RBF 神经网络; 粒子群算法; 轻量化设计

中图分类号: U661.44; TB535

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03687

0 引言

随着舰船综合作战能力的不断提升, 现代舰船在设计时愈发重视隐身性能和抗冲击性能。采用浮筏隔振系统能够起到隔振抗冲的作用, 但同时也带来系统整体重量增加的问题。因此, 在工程设计中在保证浮筏隔振系统性能的同时, 还需实现其轻量化。

针对浮筏隔振系统轻量化及优化设计这一问题, 学者们做了大量研究。黎上达等^[1]在筏架质量不变的情况下改变筏架的几何参数, 找到了对浮筏隔振系统性能影响程度最大的参数; 王峰等^[2]采用拓扑优化技术实现浮筏隔振系统的减重设计, 通过将动态载荷等效为静态载荷, 实现动态响应下的拓扑优化; 王修成等^[3]基于 Isight 优化平台对浮筏隔振系统进行参数优化, 尽管优化对象为隔振器的参数, 但是能够对浮筏的轻量化设计提供方法与思路; 李永胜等^[4]利用复合材料“高刚低密”的特点实现浮筏隔振系统的轻量化, 并且

浮筏隔振系统的隔振性能也得到提升; Lu 等^[5]基于 NSGA 全局寻优算法和 MMFD 局部寻优算法相结合, 对浮筏隔振系统进行多参数多目标优化, 并基于 Pareto 原理选择最优解, 解决了多目标优化中全局最优解的选择问题。

综上所述, 浮筏隔振系统轻量化设计不仅要考虑变量的选择问题, 也应当重视设计方法的选择。优化算法已开始应用于浮筏隔振的轻量化设计中, 但是考虑到声学性能的复杂性、非线性等问题, 算法的选择尤为重要。径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络的非线性映射关系具有高效率、高精度的优点, 并且能够与粒子群优化算法 (PSO) 的随机性、全局性等特性形成优势互补^[6], 因此本文拟采用 RBF-PSO 多目标优化算法对浮筏隔振系统进行优化设计。

本文将典型板架式浮筏隔振系统为研究对象。首先建立有限元模型, 并验证模型和数值仿真计算结果的准确性; 然后采用完全有限差分法对浮筏隔振系统进行参数灵敏度分析, 通过分析

收稿日期: 2023-12-14 修回日期: 2024-01-23 网络首发时间: 2024-06-05 18:39

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52241102, 51909201); 船舶振动噪声重点实验室基金资助项目 (6142204210208)

作者简介: 徐明成, 男, 1997 年生, 硕士生。研究方向: 振动与噪声控制。E-mail: 1159068922@qq.com

张冠军, 男, 1989 年生, 博士, 副教授。研究方向: 船舶及设备振动噪声控制。E-mail: gjzhang@whut.edu.cn

*通信作者: 张冠军

结果选择优化参数;最后基于 RBF-PSO 多目标优化算法,以浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差^[7]、设备质心平均最大位移及设备质心最大平均剩余加速度为目标,对浮筏隔振系统进行优化,实现浮筏隔振系统的轻量化设计。

1 浮筏隔振系统模型设计及数值仿真输入

1.1 浮筏隔振系统几何模型

本文研究的浮筏隔振系统的几何模型如图 1 所示。设备为 2 台振动电机,单台质量 71 kg,如图 1(a)所示。为方便上层隔振器的安装,每台设备配置电机安装有机架,单个机架质量 30 kg,如图 1(b)所示。筏架采用典型板架式筏架,质量 92.59 kg,如图 1(c)所示。为标明后续研究变量在筏架中的位置,给出筏架部件图,如图 1(d)所示。图中的筏架模型参数含义及数值如表 1 所示。

2 台振动电机分别安装在电机安装机架上,每个安装机架通过 4 个上层隔振器连接到筏架上,筏架与基座经 4 个下层隔振器连接。隔振器布置图如图 2 所示。浮筏隔振系统整体模型如图 3 所示。

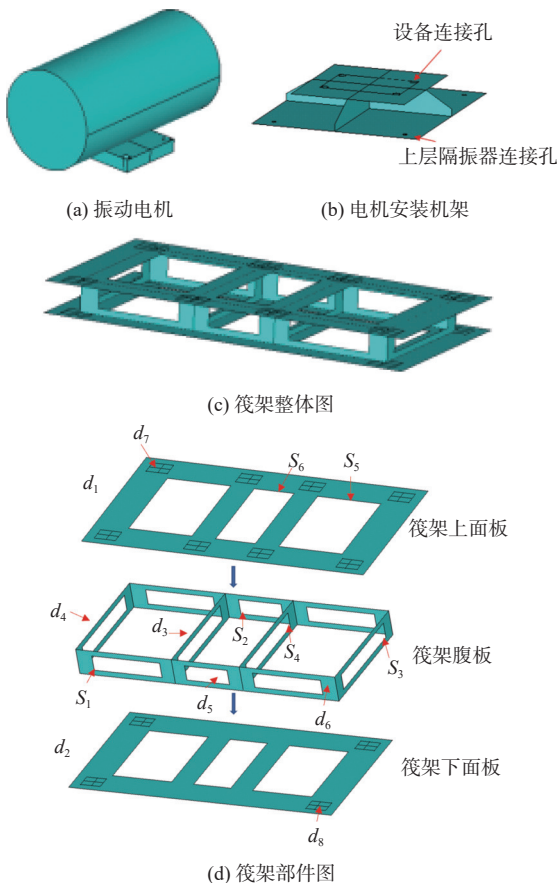


图 1 浮筏隔振系统各部件几何模型

Fig. 1 Geometric model of floating raft isolation system

表 1 筏架各部分尺寸参数

Table 1 Dimensions of various parts of raft frame

结构变量	初始值
筏架长度 L/mm	1 200
筏架宽度 W/mm	600
筏架高度 H/mm	100
上面板厚度 d_1/mm	10
下面板厚度 d_2/mm	10
横向中间腹板厚度 d_3/mm	10
横向两侧腹板厚度 d_4/mm	10
前后中间腹板厚度 d_5/mm	10
前后两侧腹板厚度 d_6/mm	10
上层隔振器垫片厚度 d_7/mm	15
下层隔振器垫片厚度 d_8/mm	15
横向外侧腹板开孔高度 s_1/mm	60
横向内侧腹板开孔高度 s_2/mm	60
纵向外部腹板开孔高度 s_3/mm	60
纵向内部腹板开孔高度 s_4/mm	60
上下外部面板开孔宽度 s_5/mm	270
上下内部面板开孔宽度 s_6/mm	170

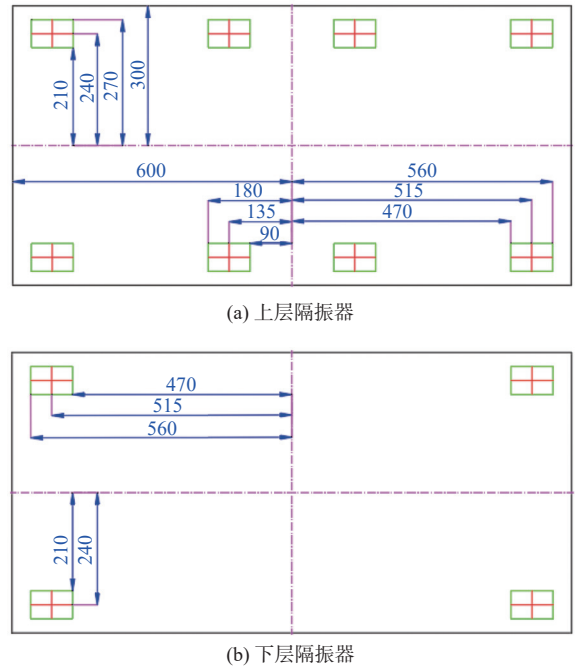


图 2 隔振器布置图(单位: mm)

Fig. 2 Layout of vibration isolator (Unit: mm)

浮筏隔振系统方案中,上层隔振器选用 BE-40 隔振器,下层隔振器选用 BE-120 隔振器,其具体性能参数如表 2 所示。

1.2 隔振和冲击计算的输入及边界条件

本文采用 ANSYS APDL 软件对浮筏隔振系统的性能进行数值仿真计算。通过谐响应分析计

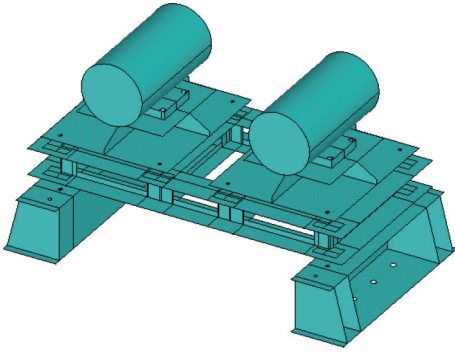


图 3 浮筏隔振系统整体模型

Fig. 3 Geometric model of floating raft vibration isolation system

表 2 隔振器性能参数

Table 2 Performance parameters of vibration isolator

隔振器	型号	动刚度/(N·mm ⁻¹)			冲击刚度/(N·mm ⁻¹)			阻尼比
		x	y	z	x	y	z	
上层	BE-40	148	387	161	296	774	322	0.1
下层	BE-120	445	1280	483	890	2560	966	0.1

算浮筏隔振系统的隔振性能。在设备质心处施加 1 N 单位力, 在基座底部的螺栓孔处施加简支约束。谐响应分析方法采用完全法, 计算频率范围为 10~1 000 Hz, 激励力的步长为 1 Hz。通过瞬态分析计算浮筏隔振系统的抗冲击性能。冲击输入参考 HJB715-2016 的规范要求, 计算正负三角冲击波(图 4)。采用大质量法施加冲击载荷, 通过刚性域连接下层隔振器下节点, 约束大质量点的 x 向自由度、y 向自由度及绕 3 个坐标轴的转动自由度, 在 z 向上施加冲击载荷。瞬态分析方法采用完全法, 计算时长为 1 s, 迭代步数为 500 步。

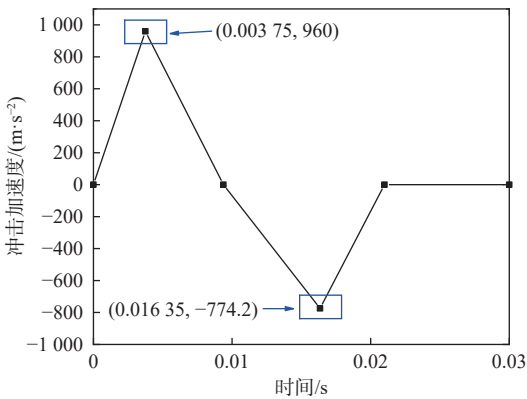


图 4 冲击载荷时域曲线

Fig. 4 Time domain curve of impact load

1.3 有限元模型及数值仿真结果

对浮筏隔振系统有限元计算结果进行网格无关性验证, 对比 50, 40, 30, 20, 15 及 10 mm 不同网格尺寸下的响应情况。结果表明, 15 和 10 mm 网格尺寸下的响应最大误差为 1.64%。统筹考虑结果的准确性及计算速度与消耗的资源, 选择网格

尺寸为 15 mm, 此时有限元网格数量为 110 711。浮筏隔振系统有限元模型如图 5 所示。

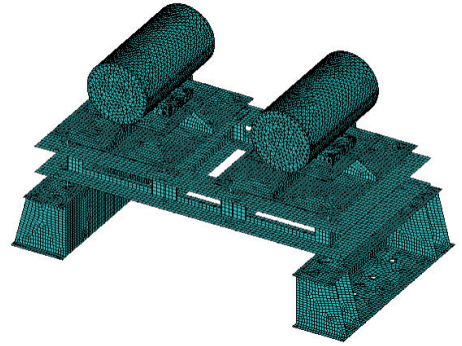


图 5 浮筏隔振系统有限元模型

Fig. 5 FE model of floating raft vibration isolation system

对上述浮筏隔振系统原始方案的隔振性能和抗冲击性能进行数值仿真计算。在 10~1 000 Hz 频段内, 隔振性能指标为加速度合成级振级落差 \bar{L}_{d1} , 抗冲击性能指标为 2 台设备的质心最大平均剩余加速度 \bar{A}_{equ1} 以及设备质心最大平均位移 \bar{U}_{equ1} 。数值仿真计算结果如表 3 所示。

表 3 原始方案数值仿真结果

Table 3 Numerical simulation results of the original scheme

	\bar{L}_{d1} /dB	\bar{A}_{equ1} /g	\bar{U}_{equ1} /mm
仿真结果	45.27	19.42	41.25

1.4 数值仿真结果试验验证

对原始方案尺寸下的模型进行试验并与数值计算结果对比, 验证数值计算结果的准确性。测试系统为东华 DH5922D 动态信号采集系统, 加速度传感器为东华 1A116E 通用压电式加速度传感器。试验台架如图 6 所示。



图 6 浮筏隔振系统试验台架

Fig. 6 Test bench of floating raft vibration isolation system

在 10~1 000 Hz 频段内, 原始方案结果与试验结果的加速度振级落差的频域曲线对比如图 7 所示, 加速度合成级振级落差对比如表 4 所示。

对比原始方案的试验结果和数值仿真计算结果表明, 加速度合成级振级落差相差不超过 3 dB,

误差为 3.45%。因此,可以证明数值仿真计算结果的准确性。

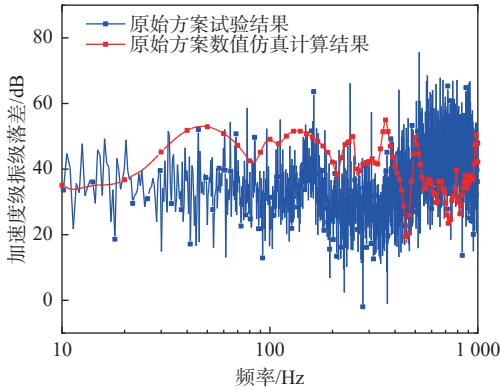


图7 试验与数值计算结果频域曲线对比

Fig. 7 Comparison of frequency domain curves between experimental results and numerical calculations

表4 试验与数值计算结果加速度合成级振级落差对比表

Table 4 Comparison table of vibration level between experiment and simulation

加速度合成级振级落差/dB		误差/%
原始方案试验结果	原始方案数值仿真计算结果	
45.27	43.76	3.45

2 隔振性能及冲击响应参数灵敏度分析

通过灵敏度分析,可以得到系统隔振性能及抗冲击性能对筏架几何参数的敏感度,便于选择变量,对系统进行轻量化设计。为便于将不同设计变量的灵敏度进行对比分析,采用相对灵敏度^[8]作为评价标准,其表达式为^[8]

$$s = \frac{\nabla \lambda_n / \lambda_n}{\nabla \varepsilon_n / \varepsilon_n} \quad (1)$$

式中: $\nabla \lambda_n$ 为响应值变化值; λ_n 为响应值原始值; $\nabla \varepsilon_n$ 为设计变量的扰动值; ε_n 为设计变量的原始值; 扰动量 $\nabla \varepsilon_n / \varepsilon_n = 1\%$ 。

在灵敏度分析中,以表1的筏架几何参数为设计变量,取扰动量为1%。

通过式(1)计算浮筏隔振系统各性能指标相对于筏架不同几何参数的相对灵敏度。图8为10~1 000 Hz频段加速度合成级振级落差相对灵敏度图,图9为浮筏隔振系统抗冲击性能参数的相对灵敏度图。

从图8可以看出,加速度合成级振级落差对变量 $d_1, d_2, d_3, d_4, d_7, d_8, s_1$ 的灵敏度较小,对变量 $d_5, d_6, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ 的灵敏度较大。从图9可以看出,设备质心最大平均位移对变量 d_1, d_2, s_3, s_6 的灵敏度较大,对其他变量的灵敏度较小;设备质

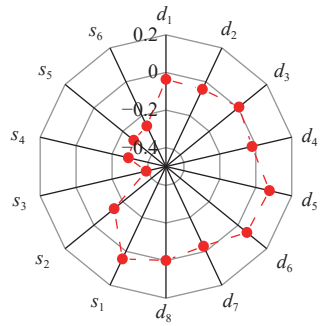
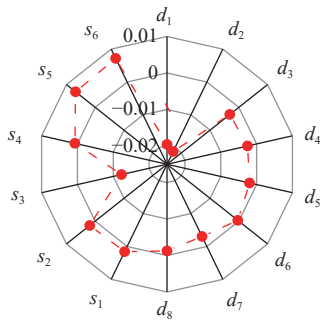
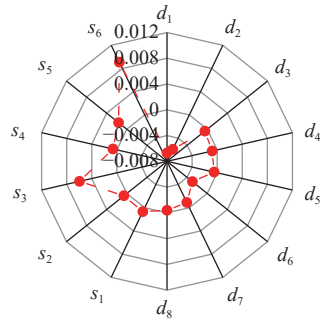


图8 加速度合成级振级落差相对灵敏度

Fig. 8 Relative sensitivity of vibration level drop of acceleration synthesis level



(a) 设备质心最大平均位移



(b) 设备质心最大平均剩余加速度

图9 冲击性能参数的相对灵敏度

Fig. 9 Relative sensitivity of impact performance parameters

心最大平均剩余加速度对变量 d_1, d_2, s_3, s_5, s_6 的灵敏度较大,对其他变量的灵敏度较小。

3 基于 RBF-PSO 优化算法的浮筏结构多目标优化

综合考量灵敏度分析结果,选择相对灵敏度较低的参数为设计变量,对浮筏隔振系统进行优化。选择筏架的上面板厚度 d_1 、下面板厚度 d_2 、横向中间腹板厚度 d_3 、横向两侧腹板厚度 d_4 、前后两侧腹板厚度 d_6 、上层隔振器垫片厚度 d_7 和下层隔振器垫片厚度 d_8 为设计变量,以浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差、设备质心最大平均位移及设备质心最大平均剩余加速度为设计目标,基于 RBF-PSO 多目标优化算法对浮筏结构进行多目标优化。

3.1 RBF-PSO 优化算法的基本原理

首先, 选择合适的样本建立代理模型, 通过 RBF 神经网络^[9], 建立样本点与加速度合成级振级落差、设备质心最大平均位移及设备质心最大平均剩余加速度之间的映射关系, 并进行神经网络训练; 然后设置合适的参数并调用 PSO 算法进行全局寻优。通过 RBF-PSO 多目标优化算法进行优化的流程如图 10 所示。

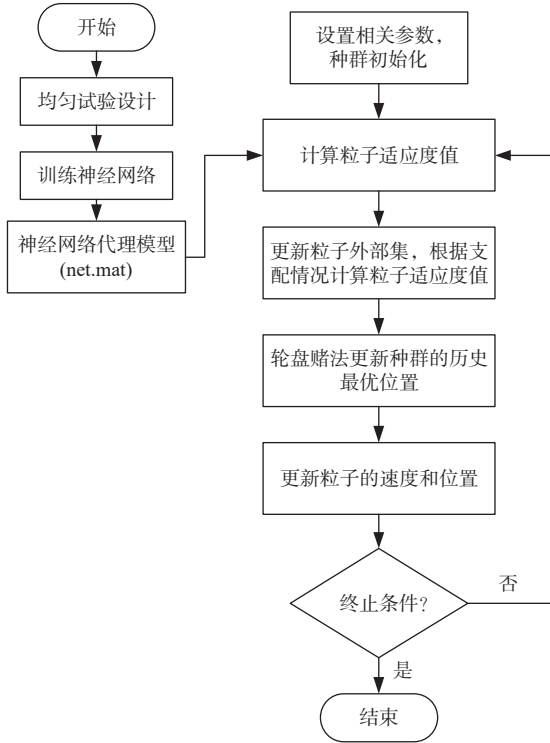


图 10 RBF-PSO 多目标优化算法流程图

Fig. 10 Flow chart of RBF-PSO multi-objective optimization algorithm

PSO 算法能够通过群体中粒子之间的协作共享信息来寻找全局最优解。在该算法中, 粒子的位置和速度是主要信息。在 m 维搜索空间, 初始

化一群数目为 N 且随机移动的粒子, 经过过 $k+1$ 次迭代时, 粒子 $i(i=1,2,\dots,N)$ 的速度和位置的更新公式为

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_1 (P_{besti}^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g_{best}^k - x_i^k) \quad (2)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^k \quad (3)$$

式中: v_i^{k+1} 为粒子在 $k+1$ 次迭代时的速度; x_i^{k+1} 为粒子在 $k+1$ 次迭代时的位置; P_{besti}^k 为到第 k 次迭代时粒子 i 的历史最优位置; g_{best}^k 为到第 k 次迭代时全部粒子历史最优位置; ω 为惯性权重, 用以调整粒子的全局寻优能力和局部寻优能力; c_1, c_2 为学习因子, 用以控制粒子的寻优速度; r_1, r_2 是在 $[0, 1]$ 区间分布的随机数, 避免粒子陷入局部最优。

标准粒子群算法针对单一目标寻优, 当需要对多个目标进行寻优时, 很难实现多个目标同时达到最优解。本文通过对不同目标设置权重, 将多目标问题转化成单目标问题, 能够有效解决这一问题。

3.2 代理模型的选择

在构造代理模型时, 需要选择合适的样本点, 这很大程度上决定了代理模型的精度。通常样本数越多, 代理模型的精度越高。然而, 在基于 RBF-PSO 优化算法的浮筏隔振系统优化中, 样本点越多, 意味着需要进行更多的有限元数值计算, 会耗费大量的时间成本。为了保证代理模型精度的同时能够缩减时间成本, 采用均匀试验设计进行样本点构造。依据设计变量个数和取值范围, 使用 $U_{12}^*(12^{10})$ 均匀设计表^[10]进行试验设计。根据 $U_{12}^*(12^{10})$ 均匀设计表和使用表计算出的各组样本的 \bar{L}_d, \bar{U}_{equ} 和 \bar{A}_{equ} , 各训练样本点及响应结果构成的试验设计方案部分结果如表 5 所示。

表 5 训练样本试验设计方案

Table 5 Training sample test design scheme

试验号	d_1	d_2	d_3	d_4	d_6	d_7	d_8	\bar{L}_d	\bar{U}_{equ}	\bar{A}_{equ}
1	5	6	10	12	13	16	18	47.43	40.82	19.24
2	6	8	16	7	9	13	17	47.21	41.16	19.40
3	7	10	9	15	5	10	16	45.64	41.46	19.43
4	8	12	15	10	14	7	15	47.11	41.56	19.45
5	9	14	8	5	10	17	14	47.09	41.72	19.47
6	10	16	14	13	6	14	13	47.03	42.05	19.40
7	11	5	7	8	15	11	12	47.21	41.09	19.42
8	12	7	13	16	11	8	11	47.08	41.47	19.42
9	13	9	6	11	7	18	10	46.92	41.65	19.47
10	14	11	12	6	16	15	9	46.50	41.91	19.44
11	15	13	5	14	12	12	7	46.28	42.07	19.39
12	16	15	11	9	8	9	8	46.47	42.26	19.28

3.3 数学模型的建立

以浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差、设备质心最大平均位移及设备质心最大平均剩余加速度为优化设计目标, 目标函数表达式为

$$\begin{cases} \bar{L}_d(x) = \max \bar{L}_{d_i}(x) \\ \bar{U}_{equ}(x) = \min \bar{U}_{equ_i}(x) \\ \bar{A}_{equ}(x) = \min \bar{A}_{equ_i}(x) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{L}_d(x)$ 为浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差代理模型; $\bar{U}_{equ}(x)$ 为浮筏隔振系统的设备质心最大平均位移代理模型; $\bar{A}_{equ}(x)$ 为浮筏隔振系统的设备质心最大平均剩余加速度代理模型; i 为寻优迭代次数。

考虑不同目标的权重后, 可将式(4)转化成式(5):

$$\min \eta = w_1(-\bar{L}_d(x)) + w_2\bar{U}_{equ}(x) + w_3\bar{A}_{equ}(x) \quad (5)$$

式中: η 为考虑权重后的目标函数值; w_1 , w_2 和 w_3 分别为加速度合成级振级落差、设备质心最大平均位移和设备质心最大平均剩余加速度在寻优过程中的权重系数。

根据优化参数变化范围确定优化模型的约束条件:

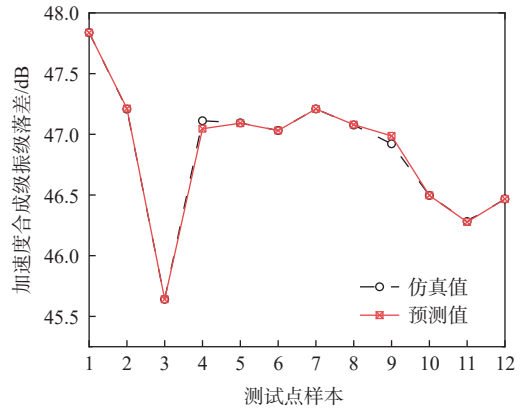
$$\begin{cases} x_{ia} \leq x_i \leq x_{ib}, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \\ \bar{L}_d(x) \geq \bar{L}_{d,1} \\ \bar{U}_{equ}(x) \leq \bar{U}_{equ,1} \\ \bar{A}_{equ}(x) \leq \bar{A}_{equ,1} \\ M \leq M_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_{ia} 和 x_{ib} 分别为设计参数 i 的上下限; $\bar{L}_{d,1}$, $\bar{U}_{equ,1}$ 和 $\bar{A}_{equ,1}$ 分别为优化前浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差、设备质心最大平均位移及设备质心最大平均剩余加速度; M 为优化后的筏架质量; M_0 为优化前的质量。

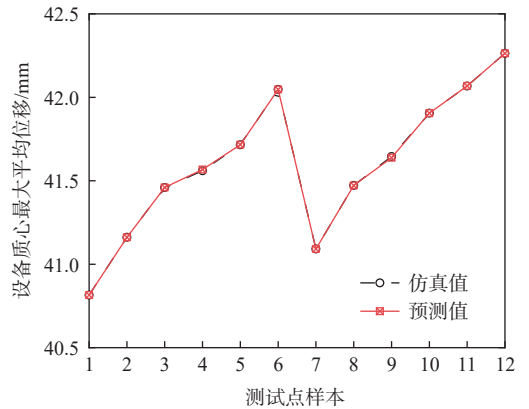
3.4 优化结果分析

将所选7个设计变量作为输入层的输入信号, 该层神经元个数为7。隐含层神经元个数从0开始训练, 在建立神经网络过程中自动添加神经元个数, 直至误差满足要求。输出层选择浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差、设备质心最大平均位移及设备质心最大平均剩余加速度为输出信号, 因此输出层神经元个数为3。使用均匀试验设计得到的训练样本数据来训练RBF神经网络。该训练基于Matlab软件实现, 预测曲线如图11所示。

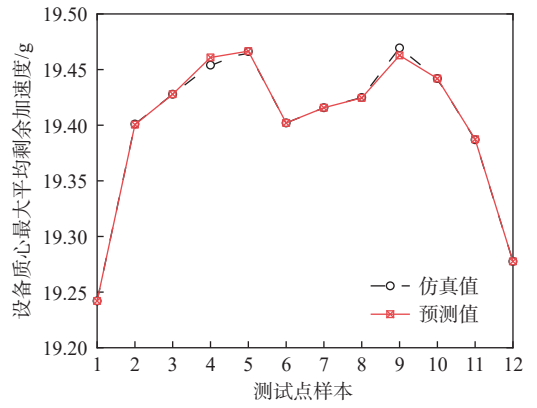
为保证RBF代理模型能够代替有限元模型



(a) 加速度合成级振级落差



(b) 设备质心最大平均位移



(c) 设备质心最大平均剩余加速度

图 11 RBF 神经网络预测曲线

Fig. 11 RBF neural network prediction curve

进行优化运算, 需要对代理模型进行进度检验。代理模型精度的决定系数和均方根误差^[11]如表6所示。

表 6 各性能指标的决定系数和均方根误差表
Table 6 Determination coefficient and root mean square error table for each performance indicator

	决定系数	均方根误差
加速度合成级振级落差	0.973 3	0.021 4
设备质心最大平均位移	0.982 8	0.019 3
设备质心最大平均剩余加速度	0.974 6	0.024 9

构造的代理模型对于浮筏隔振系统各性能指标的决定系数都十分接近1, 且均方根误差趋近

于 0, 表明上述构造的代理模型精度良好, 可将 RBF 代理模型近似看作有限元模型。后续优化计算可直接调用 RBF 代理模型。

针对多目标多参数的优化问题, 将前文训练的 RBF 神经网络预测模型作为适应度函数, 使用多目标粒子群算法求解多目标优化数学模型。多目标粒子群算法的参数设置为: 种群规模为 50; 算法最大迭代次数为 100; 学习因子 c_1 和 c_2 取值为 1.4995; 惯性权重最大值 ω_{max} 取 0.9; 惯性权重最小值 ω_{min} 取 0.2。寻优时, 对 3 个目标设置不同权重。由于浮筏隔振系统主要起隔振抗冲的作用, 隔振参数加速度合成级振级落差的权重系数 w_1 取 0.5, 抗冲参数设备质心最大平均剩余加速度和设备质心最大平均位移的权重系数 w_2 和 w_3 各取 0.25, 算法求解得到的 Pareto 前沿如图 12 所示。

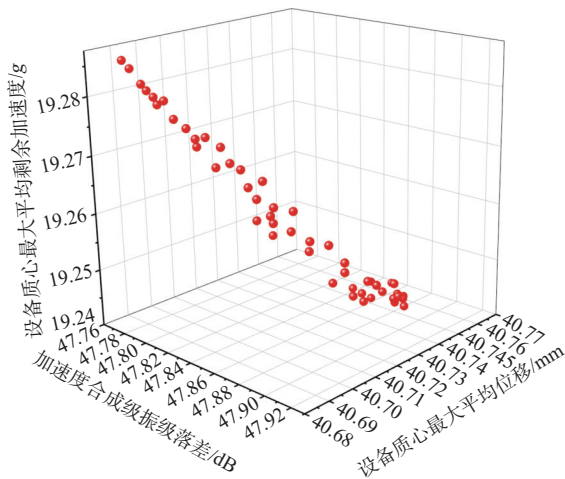


图 12 多目标粒子群算法-Pareto 前沿

Fig. 12 Multi-objective optimization algorithm – Pareto frontier

考虑到工程实际的板材厚度, 对优化后的参数进行取整, 设计参数的算法优化值与取整后的优化值如表 7 所示。

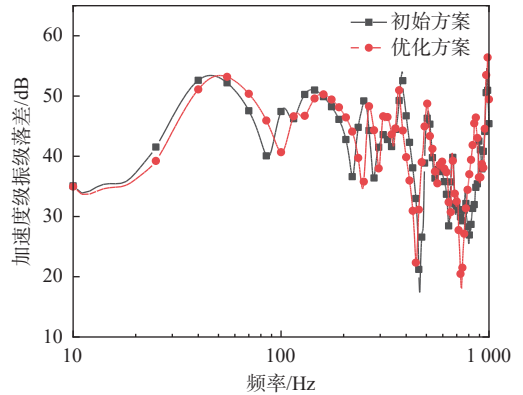
表 7 优化后设计参数

Table 7 Optimized design parameters

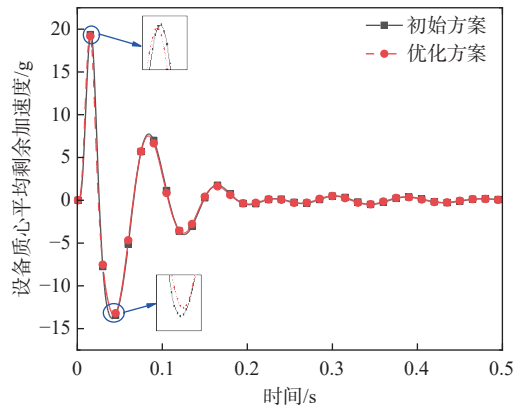
设计参数	初始值	优化值	取整后优化值
上面板厚度 d_1 /mm	10	5.00	5
下面板厚度 d_2 /mm	10	5.06	5
横向中间腹板厚度 d_3 /mm	10	10.27	10
横向两侧腹板厚度 d_4 /mm	10	12.38	12
前后两侧腹板厚度 d_6 /mm	10	14.36	14
上层隔振器垫片厚度 d_7 /mm	15	16.27	16
下层隔振器垫片厚度 d_8 /mm	15	17.93	18

筏架模型优化前重量为 92.59 kg, 优化后浮筏模型重 63.03 kg, 减重 29.56 kg, 质量降低 31.92%。基于优化后参数建立浮筏隔振系统模型, 分析优化后的浮筏隔振系统模型的隔振和抗冲击性能,

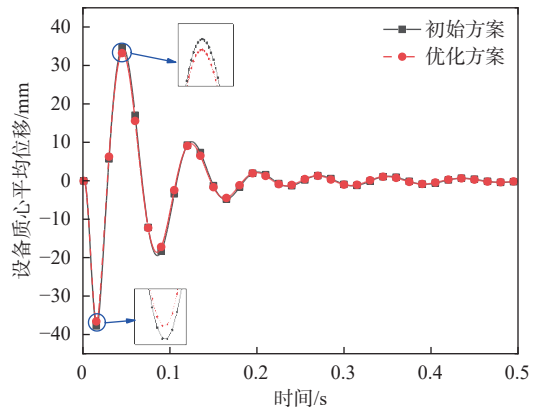
求解模型的加速度振级落差频域曲线、设备质心平均剩余加速度时域曲线及设备质心平均位移时域曲线, 如图 13 所示。



(a) 加速度级振级落差频域曲线



(b) 设备质心平均剩余加速度时域曲线



(c) 设备质心平均位移时域曲线

图 13 优化前后频域、时域曲线对比

Fig. 13 Comparison of domain curves before and after optimization

从图 13 可以看出, 在浮筏隔振系统加速度级振级落差曲线中, 10~400 Hz 频段优化前后的加速度级振级落差水平相差不大, 主要表现为谷值整体往高频偏移。这是由于结构的改变使系统刚度发生改变, 导致系统固有频率发生变化, 引起频域分析时谷值发生偏移。在 400 Hz 以上, 除了个别频率点外, 优化后的浮筏隔振系统的加速度级振级落差水平都略高于优化前, 因此优化后浮筏隔振系统的隔振性能在中高频提升较为明显。

加速度级振级落差的峰值对加速度合成级振级落差影响较大。从图中还可以看出,优化前的最大峰值低于优化后的最大峰值,因此优化后的加速度合成级振级落差增大。

在浮筏隔振系统的设备质心平均剩余加速度和设备质心平均位移曲线中,优化后设备质心平均剩余加速度和设备质心平均位移的曲线,在正向第1个峰和负向第1个峰的峰值绝对值均小于优化前,因此优化后的抗冲击性能有所提升,但是提升效果较小。

将上述计算的不同性能指标的原始方案结果、RBF-PSO算法优化值和优化后模型数值仿真值进行对比,如表8所示。

表8 优化前后结果对比

Table 8 Comparison of results before and after optimization

方案	加速度合成级振级落差/dB	设备质心最大平均位移/mm	设备质心最大平均剩余加速度/g
原始方案	45.27	41.25	19.42
RBF-PSO算法优化	47.91	40.74	19.25
优化后模型数值计算	47.75	40.70	19.17

由表8可知,优化后浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差提升了2.48 dB,设备质心最大平均位移降低了0.55 mm,设备质心最大平均剩余加速度降低了0.25g。RBF-PSO算法优化值与优化后模型数值仿真计算值相比,加速度合成级振级落差相对误差为0.003%,设备质心最大平均位移相对误差为0.001%,设备质心最大平均剩余加速度相对误差为0.05%。由于优化后对板材厚度参数进行了取整,误差在可接受范围。

4 结论

本文以板架式浮筏隔振系统为研究对象,基于完全有限差分法对浮筏隔振系统隔振和抗冲击性能进行参数灵敏度分析,根据灵敏度分析结果选择合适的优化设计变量,通过RBF-PSO多目标优化算法对浮筏隔振系统进行轻量化优化设计,最终得到以下结论:

1) 对浮筏隔振系统进行多目标优化设计,浮筏隔振系统的加速度合成级振级落差提升了2.48 dB,同时冲击工况下的设备质心最大平均位移和设备质心最大平均剩余加速度有所降低。

2) RBF-PSO多目标优化算法优化值与优化后模型数值仿真计算值之间的误差不超过1%,优化后筏架模型相较于优化前的筏架模型质量降低29.56 kg,减重31.92%。RBF-PSO多目标优化算法可有效应用于浮筏隔振系统性能优化及轻量

化设计。

参考文献:

- 黎上达,刘彦.筏架几何参数对隔振系统性能的影响分析[J].中国舰船研究,2017,12(6):108-113,119.
LI S D, LIU Y. Effect analysis of geometric parameters of floating raft on isolation performance[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(6): 108-113,119 (in Chinese).
- 王锋,邵海征,崔洪宇.浮筏隔振系统拓扑优化减重研究[J].舰船科学技术,2019,41(4):66-70.
WANG F, SHAO H Z, CUI H Y. Topology optimization weight loss research of the floating raft isolation system[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(4): 66-70 (in Chinese).
- 王修成,崔洪宇,孙继彬.基于Isight优化平台的浮筏隔振系统参数集成优化[C]//第十八届船舶水下噪声学术讨论会论文集.无锡:《船舶力学》编辑部,2021,9.
WANG X C, CUI H Y, SUN J B. Parameter integration optimization of floating raft vibration isolation system based on Isight optimization platform[C]//Proceedings of the 18th Academic Symposium on Underwater Noise from Ships. Wuxi: Journal of Ship Mechanics, 2021, 9 (in Chinese).
- 李永胜,王纬波,张彤彤,等.复合结构浮筏设计及隔振性能研究[C]//第十八届船舶水下噪声学术讨论会论文集.无锡:《船舶力学》编辑部,2021,10.
LI Y S, WANG W B, ZHANG T T, et al. Research on design and vibration isolation of compound floating raft [C]//Proceedings of the 18th Academic Symposium on Underwater Noise from Ships. Wuxi: Journal of Ship Mechanics, 2021, 10 (in Chinese).
- LU W, SHENG C Z. Parameters optimization of vibration isolation and mitigation system optimal design based on neighborhood cultivation genetic algorithm combined with modified method of feasible directions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 143: 980-983.
- BUZZI C, GRIPPO L, SCIANDRONE M. Convergent decomposition techniques for training RBF neural networks[J]. Neural Computation, 2001, 13(8): 1891-1920.
- 刘林炜.浮筏隔振系统静动态响应直接计算法研究[D].武汉:华中科技大学,2018.
LIU L W. Research on direct analysis approach for static and dynamic response of a floating raft isolation system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- 张辉.船舶浮筏隔振系统的性能分析及参数优化匹配研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
ZHANG H. Research on performance and parameters optimization matching for a ship floating raft system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).

- [9] 郭雨, 袁昱超, 唐文勇. 基于强度分析的耐内压方形舱优化设计 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(6): 151–158.
GUO Y, YUAN Y C, TANG W Y. Optimal design of internal pressure resistant square cabin based on strength analysis[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(6): 151–158 (in both Chinese and English).
- [10] 孙先仿, 范跃祖, 宁文如. U 均匀设计的均匀性研究 [J]. *应用概率统计*, 2001, 17(4): 341–345.
SUN X F, FAN Y Z, NING W R. On the uniformity of U^* uniform designs[J]. *Chinese Journal of Applied Probability and Statistics*, 2001, 17(4): 341–345 (in Chinese).
- [11] 周陈龙, 盛誉, 路昕. 基于试验数据的复杂系统性能代理模型及应用 [J]. *科技通报*, 2022, 38(3): 7–13,41.
ZHOU S L, SHENG Y, LU X. Application of surrogate model based on experimental data in complex system performance design[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2022, 38(3): 7–13,41 (in Chinese).

Performance optimization and lightweight design of floating raft vibration isolation system based on RBF-PSO algorithm

XU Mingcheng¹, XIAO Shaoyu², WANG Ruhang², ZHANG Guanjun^{*1}

1 School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: [**Objective**] To address the challenges of heavy workload and long iterative cycles in the lightweight design of floating raft vibration isolation system in engineering applications, this study proposes a lightweight design method based on RBF-PSO multi-objective optimization algorithm. [**Method**] Taking the plate-frame floating raft vibration isolation system as the research object, a finite element model was established using ANSYS APDL. The vibration isolation performance and impact resistance were evaluated through numerical simulation. Experimental tests were conducted to assess the vibration isolation performance of the floating raft. The accuracy of the numerical simulation was validated by comparing it with the experimental results. A full finite difference method was employed to analyze the parameter sensitivity of the floating raft vibration isolation system. Appropriate design variables were selected based on the sensitivity analysis. The lightweight design of the floating raft vibration isolation system was carried out using the RBF-PSO multi-objective optimization algorithm. [**Results**] The results show that after optimization, the mass of the raft is 63.03 kg. Compared with the original design, the weight of the lightweight raft is reduced by 31.92%. The vibration isolation performance of the floating raft system improves by 2.48 dB. The impact resistance of the equipment is also improved. The discrepancy between the optimized result obtained by the RBF-PSO algorithm and the numerical simulation calculation is less than 1%. [**Conclusion**] Therefore, the RBF-PSO multi-objective optimization algorithm can be effectively applied to the lightweight design of the floating raft vibration isolation system.

Key words: floating raft vibration isolation system; vibration isolation; sensitivity analysis; RBF neural network; particle swarm optimization algorithm; lightweight design

相关论文

- [1] 雷智洋, 吴崇建, 刘彦, 等. 基于广义变分原理的浮筏-舱段耦合系统声振特性分析 [J]. *中国舰船研究*. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673%E2%88%923185.04249>
- [2] 雷智洋, 杜堃, 吴崇建, 等. 液舱一体化浮筏隔振系统声学性能理论分析 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 220–227. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02574>
- [3] 侯磊, 董一洋, 耿黎明. 高强度钢舱段浮筏基座结构声学设计 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(3): 152–156. <https://www.ship-research.com/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02139>