

引用格式: 李磊鑫, 刘朝骏, 陈炉云. 船舶基座阻尼材料敷设优化及实验研究[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(6): 86-91.

LI L X, LIU C J, CHEN L Y. Ship mounting structure damping material optimization distribution and experimental study[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(6): 86-91.

船舶基座阻尼材料敷设优化及实验研究

李磊鑫^{1,2}, 刘朝骏¹, 陈炉云²

1 中国舰船设计研究中心, 湖北 武汉 430064

2 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

摘要: [目的] 船舶基座结构是船舶减振的重要设备, 为提高基座结构的减振效果, 在结构表面敷设阻尼材料是常用手段。[方法] 以基座结构的加速度振级落差为评价指标, 应用各向正交惩罚材料密度法(SIMP), 建立自由阻尼材料的拓扑优化数学模型。在优化模型中, 其约束条件是确保在阻尼材料总使用量一定的情况下实现阻尼材料在基座结构表面的最优分布。最后, 以某型船的主机基座为例, 在建立的有限元模型的基础上, 开展基座结构阻尼材料拓扑优化的数值计算, 并利用基座模型实验的方法对拓扑优化数值计算结果进行实验验证。[结果] 经验证, 获得了阻尼材料的最优敷设方案。[结论] 所得成果对船舶基座结构设计和复合材料的应用具有一定的参考价值。

关键词: 自由阻尼; 拓扑优化; 振级落差; 实验验证

中图分类号: U661.44

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.06.013

Ship mounting structure damping material optimization distribution and experimental study

LI Leixin^{1,2}, LIU Chaojun¹, CHEN Luyun²

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

2 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: [Objectives] The mounting structure of a ship is an important piece of equipment for vibration reduction. In order to improve the vibration reduction effect of the mounting structure, damping material is often pasted onto its surface. [Methods] The vibration level difference of the mounting structure's acceleration parameters is defined as the evaluation index. Based on the Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) model, a topological optimization model of free damping material distribution is established. In the optimization formulation, the constraints ensure the optimal distribution of damping material on the surface of the structure while the total volume of damping material is certain. Finally, based on the Finite Element Model (FEM) of the structure, the optimal damping materials for the laying scheme are ascertained. The results of topological optimization are tested and verified by the model test. [Results] The optimal free damping material distribution of amounting structure is obtained. [Conclusions] The research results have value as a reference for the design of the mounting structures of ships and the application of composite materials.

Key words: free damping; topological optimization; vibration level difference; experimental verification

收稿日期: 2017-05-17

网络出版时间: 2017-11-28 10:56

作者简介: 李磊鑫, 男, 1980年生, 硕士, 高级工程师。

陈炉云 (通信作者), 男, 1975年生, 博士, 助理研究员。研究方向: 船舶结构动力学分析与优化。E-mail: cluyun@sjtu.edu.cn



0 引言

随着人们对船舶居住舒适性及舰艇声隐身性要求的提高,设计者针对连接动力设备和船体的基座结构在谐激励力作用下的结构减振问题开展了系统的研究^[1-2]。为了提高基座的减振效果,包括复合材料在内的各种新型材料得到了广泛应用。蒋亚礼等^[3]基于模态应变能法及结构动力学优化理论,开展了船用阻尼材料材料选型优化研究。吕林华等^[4]基于功率流落差参数,验证了钢—复合材料组合基座具有比钢质基座更好的隔振效果。对基座结构减振效果的评价,主要包括功率流、加速度及其落差等参数^[5]。其中,振级落差是系统在弹性安装情况下弹性支承(基座结构)输入端、输出端的振动响应之比,振级落差参数由于易于测量而得到广泛应用^[6]。

阻尼材料是利用高分子材料的粘弹性将振动机械能转化为热能消耗掉,从而实现减振降噪目标的一种新型复合材料。阻尼材料可分为约束阻尼材料和自由阻尼材料2种,其敷设厚度、位置及敷设方式直接影响其减振效果。祝驰誉等^[7]将丁基橡胶阻尼材料敷设于基座结构上,对比了敷设部位和厚度对振动插入损失的影响。石慧荣等^[8]分析了局部敷设约束阻尼材料的圆柱壳结构的振动特性,并讨论了阻尼材料敷设分布形式对振动特性的影响。Saravanan等^[9]研究了敷设阻尼材料的加肋圆柱壳的声振特性问题,讨论了阻尼材料配置对振动响应的影响规律。

阻尼材料敷设问题是一个拓扑优化问题,其基本思想是将寻求结构最优拓扑问题转化为给定设计区域内寻求最优的材料分布问题。1988年,Bendsøe等^[10]开展了基于均匀化理论的结构拓扑优化研究,开创了连续结构拓扑优化新领域。Zheng等^[11]以结构振动能量最小化为目标,进行了阻尼材料的布局优化研究。Kang等^[12]以指定位置的振动特性为参考,采用拓扑优化理论对阻尼材料的分布进行了研究。Takezawa等^[13]以阻尼材料用量最小化为约束,以结构第1阶模态频率最大化为优化目标,采用状态空间下的复模态叠加法对阻尼材料进行了拓扑优化。Zheng等^[14]以振动能量最小化为目标,对局部敷设约束层阻尼材料的梁结构进行了优化。Yun等^[15]对受变激励力作用下含粘弹阻尼材料的结构进行拓扑优化,实现了在阻尼材料用量一定的条件下满足结构振动参数的最小化。

尽管人们在阻尼材料拓扑优化中取得了一些

成果,但大多数的研究成果都局限于理论计算和数值分析,在解决工程实际问题中还存在一定的局限性。基于此目的,文章将以阻尼材料在船舶基座上的敷设问题为研究对象,开展自由阻尼材料的拓扑优化研究,并用模型实验的方法对优化结果进行验证,以支撑数值计算的成果。

1 结构动力响应振级落差

1.1 结构动力响应方程

假设阻尼材料和弹性基体结构为理想连接,结构受外简谐激励力作用时,在结构域 Ω^S 内的动力响应微分方程可写成

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t) \quad (1)$$

式中: u 为节点位移向量; M 为质量矩阵,并有 $M = M_s + M_d$; K 为结构刚度矩阵,并有 $K = K_s + K_d$; C 为黏性阻尼矩阵,并有 $C = C_s + C_d$; $f(t)$ 为外激励力。其中: M_s 、 K_s 和 C_s 分别为弹性基体结构的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; M_d 、 K_d 和 C_d 分别为阻尼材料层的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵。若 M_d 、 K_d 和 C_d 均为0,则表明弹性基体结构单元上没有敷设阻尼材料。由于阻尼材料的损耗因子远大于弹性基体材料的损耗因子,此时式(1)中的阻尼矩阵 C 可写成 $C = C_d$ 。

1.2 振级落差

对于基座结构,通过计算基座结构的输入端/输出端参考点的加速度振级落差来评估其隔振效果。加速度振级落差(单位:dB)定义如下:

$$L_r = 10 \lg \frac{a_{up}}{a_{down}} \quad (2)$$

式中, a_{up} 和 a_{down} 分别为基座结构的输入端、输出端参考点在计算频段内的加速度值。

2 阻尼材料拓扑优化方程

2.1 阻尼材料概述

在应用阻尼材料实施结构减振时,通常将阻尼材料按照一定的厚度敷设于弹性基体结构的表面,图1所示为阻尼材料在弹性基体结构上的敷设示意图。

在阻尼材料的敷设拓扑优化中,定义弹性基体结构为非设计区域,阻尼材料层为可设计区域。由于弹性基体结构的刚度远大于阻尼材料层的刚度,在计算结构刚度特性时,可忽略因敷设阻

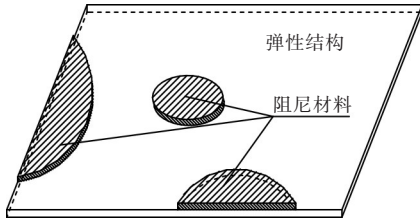


图1 阻尼材料敷设模型

Fig.1 Sketch of damping material distribution

尼材料层而引起的偏心影响,即假定敷设阻尼材料层后结构的中性面位置不发生变化。

2.2 基于振级落差的阻尼材料拓扑优化

如图1所示,阻尼材料敷设的拓扑优化问题是一个0-1离散变量的整数优化问题,若设计域敷设有阻尼材料,则表示为1;若没有敷设阻尼材料,则表示为0。针对阻尼材料的拓扑优化问题,常用的拓扑优化方法包括均匀化方法、变密度法、拓扑函数描述方法和变厚度法等。在变密度法中,基于各向正交惩罚材料密度法(Solid Isotropic Material with Penalization, SIMP)的应用比较广泛。本文基于SIMP法建立了阻尼材料敷设的拓扑优化数学模型。通过引入惩罚因子,使材料的弹性模量和单元相对密度之间有非线性的对应关系,当设计变量的密度值为 $[0, 1]$ 之间的中间值时,通过惩罚因子对其进行惩罚,使其向两端靠拢,从而使该模型能更好地逼近0-1离散变量的优化模型。

根据基座结构的设计目标,可建立以参考点的振级落差为优化目标的拓扑优化方程。将可设计区域上阻尼材料的相对密度定义为设计变量,在阻尼材料总用量一定的条件下,可获得最大化的加速度振级落差,即

$$\text{Max}(L_r) = 10 \lg \frac{a_{\text{up}}}{a_{\text{down}}}。$$

3 算例分析

以某型号船舶主机基座结构为例,开展阻尼材料分布的拓扑优化数值分析和试验验证。

3.1 模型描述

船舶主机基座结构设计参数如下:长0.68 m,宽0.64 m,高0.53 m。基座结构由面板、横肋板、纵肋板、底横肋板等部件组成。应用有限元法对基座结构进行有限元建模,基座结构有限元模型包括3 340个板单元和3 502个节点,如图2所示。

在基座结构中,基体结构的材料为钢。为提高基座结构的减振效果,在横肋板和纵肋板的外

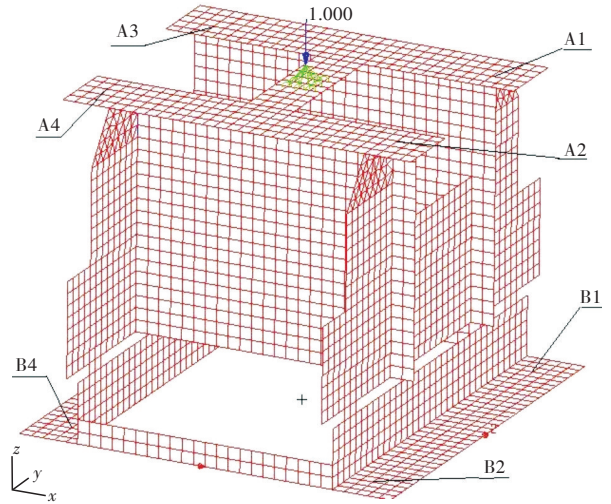


图2 基座结构有限元模型

Fig.2 Finite element model of the mounting structure

表面敷设有SA-3阻尼材料,其厚度为1.0 mm。钢材和阻尼材料的力学特性如表1所示。

表1 材料力学特性

Table 1 The mechanical properties of materials

| 材料 | 弹性模量 E / MPa | 泊松比 | 损耗因子 η | 密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
|------|----------------|------|-------------|--|
| 钢 | 210 000 | 0.30 | 0.001 | 7 800 |
| 阻尼材料 | 75 | 0.49 | 0.750 | 1 500 |

3.2 结构动力响应分析

在进行基座结构动力响应计算前,首先利用基座结构的低阶模态及其对应频率的测量数据,基于参数型模型修正法开展基座结构的模型修正,以提高基座结构有限元模型的精度。在基座结构的顶部施加谐外激励力,开展基座结构的动力响应数值计算。结合基座结构模型实验方案,分别定义参考点群A(点A1、点A2、点A3和点A4)和参考点群B(点B1、点B2、点B3和点B4)为输入端和输出端,如图2所示。

采用MSC.Patran/Nastran软件进行基座结构的动力响应分析,计算频率范围取1~500 Hz,计算步长取2 Hz。定义输入端参考点群和输出端参考点群的加速度振级落差为基座结构的减振评价指标。输入端参考点群A的加速度值为

$$a_A = \sqrt{\frac{(a_{A1})^2 + (a_{A2})^2 + (a_{A3})^2 + (a_{A4})^2}{4}},$$

输出端参考点群B的加速度值为

$$a_B = \sqrt{\frac{(a_{B1})^2 + (a_{B2})^2 + (a_{B3})^2 + (a_{B4})^2}{4}}。$$

图3所示为输入端、输出端参考点群的加速度值。图4所示为输入端、输出端参考点群间的加速度振级落差。

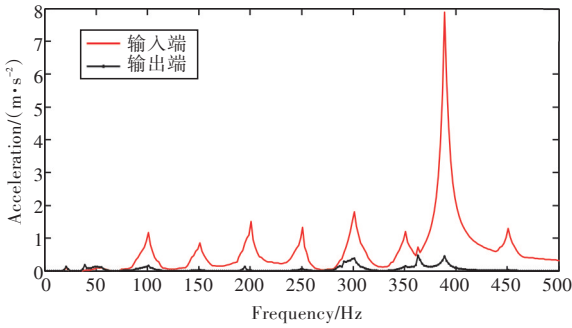


图3 评价点群的加速度幅值

Fig.3 Acceleration values of the evaluation points

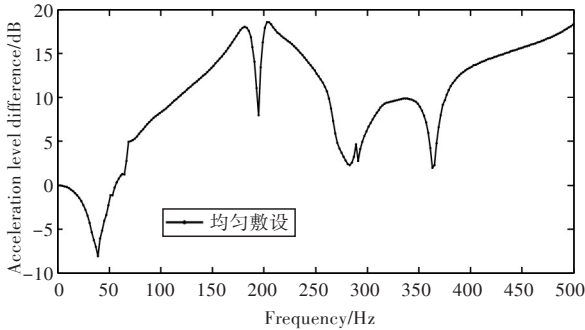


图4 评价点群的振级落差

Fig.4 Acceleration level difference of the evaluation points

由图3可知,在高频率段,输入端的加速度值远大于输出端;在低频段,输入端和输出端的加速度值相差不大。由图4可知,在高频率段,输入端的振动加速度幅值比较大,其振级落差值均较大,在大部分频段超过了10 dB,在部分频段甚至超过了15 dB;在低频段,部分频段的振级落差为负值,这表明在该频率段内,输出端的加速度值大于输入端的加速度值。图4表明在低频段,阻尼材料的减振效果还需改进。

4 基座阻尼材料优化

4.1 基座振级落差优化方程

由图3和图4可知,为提高基座结构的减振效果,需对典型参考点在1~500 Hz频域内的振级落差进行优化,以达到提高最大振级落差的目的,提高基座结构的减振效果。

在工程实际中,在横肋板、纵肋板的表面敷设阻尼材料,并将这2个区域定义为阻尼材料拓扑优化的设计区,共2240个单元。结合振级落差公式,定义阻尼材料的相对密度为设计变量,阻尼材料的用量为体积约束条件,则基座结构阻尼材料的拓扑优化方程可写成如下形式:

$$\text{Find } x = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}^T; i = 1, 2, \dots, 2240$$

$$\text{Max } L_r = 10 \lg \frac{a_{\text{up}}}{a_{\text{down}}}$$

$$\text{s.t. } M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t)$$

$$\sum_{i=1}^{2240} x_i V_i - V_0 \leq 0, V_0 = \zeta \sum_{i=0}^{2240} V_i$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1$$

$$g(x_i, v_i) \leq 0 \tag{3}$$

式中: x_i 为阻尼层第 i 单元的相对密度,即设计变量; x_{\min} 和 1 分别为设计变量 x_i 的上、下限约束,为防止惩罚过程中出现刚度矩阵奇异,设定 $x_{\min} = 0.001$; L_r 为基座系统输入端/输出端参考点群的加速度振级落差,即目标函数; V_0 为拓扑优化前阻尼材料的体积; V_i 为阻尼层第 i 单元的体积; ζ 为体积百分比; $g(x_i, v_i)$ 为其他约束条件,例如结构固有频率、结构变形和结构动应力等参数。结合 SA-3 材料的力学参数,初始设计中,阻尼材料的质量约为 1.5 kg。

为求解公式(3),建立基于 SIMP 模型的人工阻尼惩罚模型。应用该惩罚模型可以获得阻尼材料的中间密度,以便能获得更明确的阻尼材料拓扑结构。惩罚后的阻尼材料层单元的弹性模量矩阵、质量矩阵和刚度矩阵分别为:

$$E_i = x_i^p E_i^*, M_i = x_i^p M_i^*, K_i = x_i^p K_i^* \tag{4}$$

式中: E_i^* , M_i^* 和 K_i^* 分别为当 $x_i = 1$ 时,阻尼材料层第 i 个单元的弹性模量矩阵、质量矩阵和刚度矩阵; p 为惩罚因子, $p \geq 0$,在本文中取 $p = 3$ 。

同时,引入惩罚因子后,可对阻尼材料的中间密度进行惩罚,以使阻尼材料的相对密度尽可能趋近于 0 和 1 两端,则结构的总阻尼矩阵可写成如下形式:

$$C_d = \sum_{i=1}^{2240} (\gamma(x_i)^{p_1} M_i^* + \eta(x_i)^{p_2} K_i^*) \tag{5}$$

式中, γ 和 η 为阻尼材料的相对密度全部为 1 时的瑞利阻尼系数,其惩罚因子满足 $p_1 \geq 0, p_2 \geq 0$,在本文中,取 $p_1 = p_2 = 3$ 。

结合式(3)~式(5),即可开展基座结构阻尼材料分布的拓扑优化,获得阻尼材料在基座结构表面的最优分布。在优化过程中,通过在 iSIGHT 集成优化平台上进行二次开发,采用具有满足离散型变量问题和良好全局最优解搜索能力的遗传算法进行搜索求解,进行阻尼材料拓扑分布优化,实现基座结构的减振目标。

4.2 阻尼材料优化

在开展基座结构的阻尼材料拓扑优化中,为简化计算,假设优化后阻尼材料的敷设厚度是相等的,即等厚度优化。通过拓扑优化,获得阻尼材

料在基座结构上的分布形式,优化后的基座结构模型如图5所示。图5中,红色部分为阻尼材料敷设区域,优化后阻尼材料的分布面积为优化前的一半,优化后的阻尼材料厚度为2.0 mm。

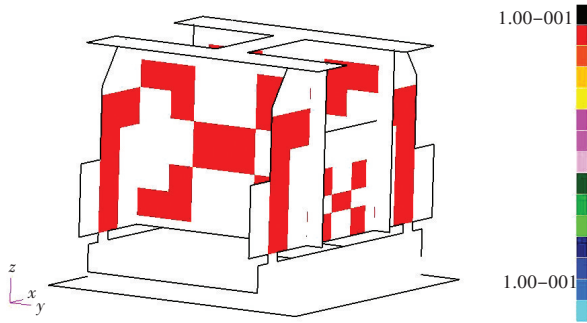


图5 阻尼材料分布

Fig.5 Distribution of damping materials on the mounting structure

图6所示为拓扑优化后输入端、输出端参考点群的加速度值。图7所示为拓扑优化后输入端、输出端参考点群间的加速度振级落差。

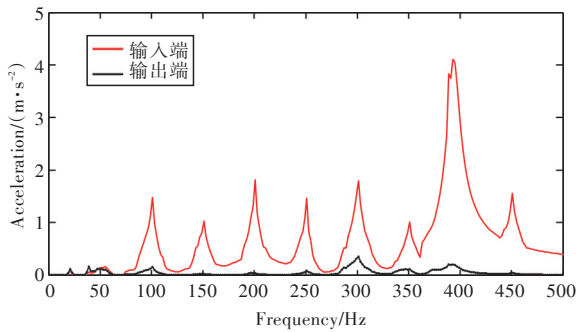


图6 优化后评价点群的加速度幅值

Fig.6 Acceleration value of evaluation points after optimization

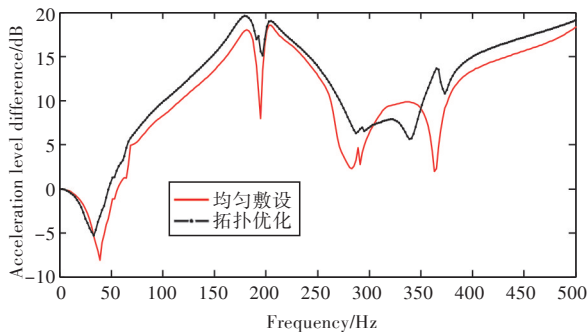


图7 优化后评价点群的振级落差

Fig.7 Acceleration level difference of evaluation points after optimization

对比图3和图6可知,通过阻尼材料拓扑优化,基座结构输出端加速度值的输出明显减少。同时,通过对比图4和图7可知,在阻尼材料拓扑优化以后,无论是高频段还是低频段,振级落差值都有一定程度的增加,这表明拓扑优化后基座结构的减振效果明显增加,优化是有成效的。

5 模型实验

5.1 实验模型

为验证基座结构阻尼材料的拓扑优化计算结果,开展了模型实验,阻尼材料的敷设位置是基于拓扑优化的结果。实验模型为全钢材料焊接制作而成,如图8所示。

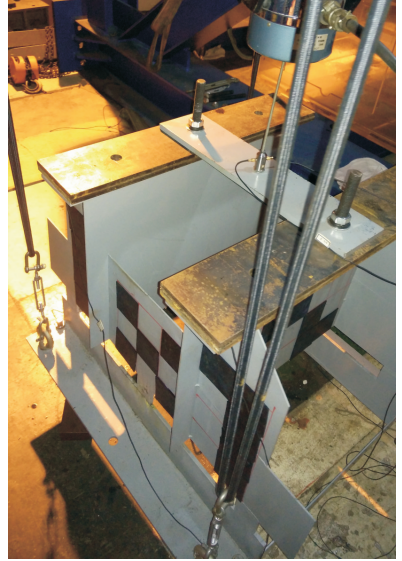


图8 基座阻尼拓扑优化实验

Fig.8 Damping materials distribution experiment

实验设备和仪器包括MTS结构动力加载系统、SCADSIH动态数据分析采集系统、多通道动态应变仪及PCB力传感器等。通过测量典型参考点的振动加速度,获得基座结构模型在典型频域内的减振效果。在模型实验中,测量点的位置参考有限元计算的位置。

5.2 实验结果对比

图9所示为实施阻尼材料拓扑优化和模型实验后在输入端、输出端参考点群间的加速度振级落差。

由图9可知,阻尼材料拓扑优化的数值计算

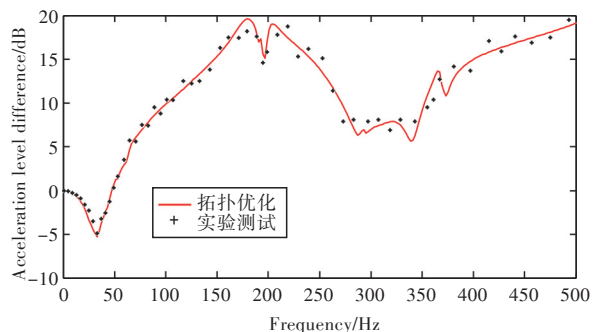


图9 振级落差对比

Fig.9 Comparison of acceleration level difference

结果与模型实验的振级落差值吻合较好,验证了数值计算的有效性。

6 结 论

本文以提高基座结构的减振效果为目标,建立了阻尼材料拓扑分布优化方程,开展数值分析并进行了实验验证,得到以下主要结论:

- 1) 通过开展阻尼材料的拓扑分布优化,提高了阻尼材料的利用效率。
- 2) 通过模型实验,验证了数值计算的有效性和优化的可行性。
- 3) 在实际工程应用中,如果将阻尼材料的拓扑优化与厚度优化进行集成,将会取得更好的减振效果。

参考文献:

- [1] RIBEIRO E A, PEREIRA J T, BAVASTRI C A. Passive vibration control in rotor dynamics: optimization of composed support using viscoelastic materials[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 351: 43-56.
- [2] 俞强, 王磊, 刘伟. 舰船推进轴系的螺旋桨激励力传递特性[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(6): 81-86, 94.
YU Q, WANG L, LIU W. Transmission characteristics of propeller excitation for naval marine propulsion shafting[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(6): 81-86, 94 (in Chinese).
- [3] 蒋亚礼, 吕林华, 杨德庆. 提高船用阻尼材料应用效果的优化设计方法[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(4): 48-53.
JIANG Y L, LV L H, YANG D Q. Design methods for damping materials applied to ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(4): 48-53 (in Chinese).
- [4] 吕林华, 杨德庆. 船舶钢-复合材料组合基座减振设计方法分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(8): 1196-1201.
LV L H, YANG D Q. Study on vibration reduction design of steel-composite materials hybrid mounting for ships [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(8): 1196-1202 (in Chinese).
- [5] 许树浩, 桂洪斌. 浮筏系统隔振性能的功率流评价指标[J]. 船舶力学, 2012, 16(5): 567-572.
XU S H, GUI H B. Power flow estimation of float raft isolation system[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(5): 567-572 (in Chinese).
- [6] 张梗林, 杨德庆, 朱金文. 船用新型蜂窝隔振器减振性能分析[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(4): 52-58.
ZHANG G L, YANG D Q, ZHU J W. Performance analysis of a novel marine honeycomb vibration isolator[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(4): 52-58 (in Chinese).
- [7] 祝驰誉, 温华兵. 丁基橡胶阻尼材料对基座减振的实验研究[J]. 造船技术, 2015(2): 50-53.
ZHU C Y, WEN H B. An experimental study on butyl rubber damping material applied to base structure[J]. Marine Technology, 2015(2): 50-53 (in Chinese).
- [8] 石慧荣, 高涛, 李宗刚, 等. 局部约束阻尼柱壳振动分析及优化设计[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 146-151, 173.
SHI H R, GAO P, LI Z G, et al. Vibration analysis and optimization design of a cylindrical shell treated with constrained layer damping[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 146-151, 173 (in Chinese).
- [9] SARAVANAN C, GANESAN N, RAMAMURTI V. Vibration and damping analysis of multilayered fluid filled cylindrical shells with constrained viscoelastic damping using modal strain energy method[J]. Computers & Structures, 2000, 75(4): 395-417.
- [10] BENDSØE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2): 197-224.
- [11] ZHENG H, PAU G S H, WANG Y Y. A comparative study on optimization of constrained layer damping treatment for structural vibration control [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(8): 886-896.
- [12] KANG Z, ZHANG X P, JIANG S G, et al. On topology optimization of damping layer in shell structures under harmonic excitations[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012, 46(1): 51-67.
- [13] TAKEZAWA A, DAIFUKU M, NAKANO Y, et al. Topology optimization of damping material for reducing resonance response based on complex dynamic compliance [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 365: 230-243.
- [14] ZHENG H, CAI C, TAN X M. Optimization of partial constrained layer damping treatment for vibrational energy minimization of vibrating beams [J]. Computers & Structures, 2004, 82(29/30): 2493-2507.
- [15] YUN K S, YOUN S K. Multi-material topology optimization of viscoelastically damped structures under time-dependent loading[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2017, 123: 9-18.