

引用格式: 周强, 王青山, 钟锐. 阻振结构在甲板结构低频隔振中的应用研究 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(5): 176–182.
ZHOU Q, WANG Q S, ZHONG R. Application research of vibration isolation structure in low-frequency vibration isolation of deck structure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(5): 176–182.

阻振结构在甲板结构低频隔振中的应用研究



扫码阅读全文

周强, 王青山*, 钟锐

中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083

摘要: [目的] 研究采用阻振结构环路降低甲板结构平均振级、阻隔甲板结构低频振动向外传递的可行性。[方法] 采用数值预报方法, 分析阻振结构环路形式及截面参数对甲板及其邻近舱壁结构低频振动传递的影响。通过对比得出阻振效果较佳的阻振结构环路形式。在此基础上, 开展阻振环路截面参数化研究, 提出较优的甲板结构低频减振设计方案。[结果] 研究表明: 当阻振结构增重不超过主机舱总质量的5%时, 同等质量的矩形多级阻振结构环路相对于其他环路形式具有更好的阻振效果; 针对宽度不小于50 mm的阻振结构, 当高度选择500 mm这一相对较优值时, 选择宽度相对较小的阻振空心方钢, 对降低甲板及邻近的舱壁结构平均振级的效果更好。[结论] 研究结果为海洋平台甲板结构低频隔振设计提供了新思路。

关键词: 甲板; 海洋平台; 低频振动; 阻振结构环路

中图分类号: U661.44

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01671

Application research of vibration isolation structure in low-frequency vibration isolation of deck structure

ZHOU Qiang, WANG Qingshan*, ZHONG Rui

College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: [Objectives] This paper studies the feasibility of the vibration isolation structure loop which is used to reduce the average vibration level of deck structures and to block the transmission of low-frequency vibration of deck structures. [Methods] The influence of forms and section parameters of vibration isolation structure loop on the low-frequency vibration transmission of deck and its adjacent bulkhead structure is explored by using numerical prediction method. By comparison, the form of vibration isolation structure loop with better vibration isolation effect is obtained. On this basis, the section parameterization of vibration isolation structure loop is carried out, and a better design scheme of deck structure with low-frequency vibration isolation is proposed. [Results] The results show that when the vibration isolation structure increases the total weight of the main engine room by no more than 5%, a rectangular multi-stage vibration isolation structure loop with the same mass has a better vibration isolation effect than other vibration isolation structure loops. For vibration isolation structures with a width of not less than 50 mm, when 500 mm is selected as a relatively optimum height and the relatively narrow hollow square steel is selected, the effect of reducing the average vibration level of deck and adjacent bulkhead structure is improved. [Conclusions] This research provides new insight relating to the design of low-frequency vibration isolation of the deck structures on offshore platforms.

Key words: deck; offshore platform; low-frequency vibration; vibration isolation structure loop

0 引言

甲板设备运转时会引起振动, 产生较大辐射

噪声。在甲板表面敷设阻尼材料, 虽然可以起到减振降噪的作用, 但也会带来诸如材料易老化、不易更换、易引发火灾等问题^[1]。阻振结构作为

收稿日期: 2019-07-08 修回日期: 2020-02-17 网络首发时间: 2020-09-15 16:44

作者简介: 周强, 男, 1994年生, 硕士生。研究方向: 结构振动噪声。E-mail: zhouqiang@csu.edu.cn

王青山, 男, 1989年生, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 数字孪生, 主动控制, 转子动力学, 结构声学, 计算力学, 结构动力学。E-mail: qingshanwang@csu.edu.cn

钟锐, 男, 1993年生, 硕士生。研究方向: 海洋平台结构动力学, 复合材料计算力学。E-mail: zhongrui@csu.edu.cn

*通信作者: 王青山

减振降噪的替代措施,具有结构简单、功能兼顾、安全可靠的优点。阻振结构通常采用加强筋的形式,在支撑其他构件的同时,还可以隔离激振源产生的振动,避免其向外传播。阻振结构一般布置于振动传递的路径上。

国内外学者对阻振结构的隔振机理、设计方法、减振效果及性能影响因素等开展了广泛的研究。Cremer等^[1]最先对阻振结构的隔振机理进行了论述,但未深入研究阻振结构参数的变化对其阻振性能的影响。车驰东和陈端石^[2]基于波分析方法,研究了经任意角度连接的2块平板转角处的阻振结构对振动波传递的影响。姚熊亮等^[3]基于波动理论并结合模型实验,探究了偏心阻振结构阻抑振动波传递的特性。梁德利等^[4]将阻振结构应用到复合托板结构声学设计中,采用数值分析方法研究了阻振结构的几何参数和布置位置对托板阻振效果的影响。缪旭弘等^[5]采用数值分析探究了环形阻振结构的阻振效果,并将其应用到船舶动力舱段中,为实船减振降噪提供了新思路。温华兵等^[6]通过数值分析与实验验证,对空心 and 实心阻振结构的阻振性能进行了比较研究,发现在中、高频范围内空心阻振结构的阻振性能更优。蒋士亮等^[8]从能量法的角度计算分析了矩形阻振结构在不同布置形式、不同几何参数下的阻振性能,但未针对不同阻振环路形式的阻振特性展开研究。王祖华等^[9]对典型的舰船舱壁结构进行了阻振优化设计研究,结果表明,在舱壁上布置阻振结构环路时,其减振降噪效果略低于阻振结构锯齿。温华兵等^[10]对薄板-刚性阻振结构的振动传递特性进行了分析,通过实验验证了同等质量的空心阻振结构比实心阻振结构的阻振损失更大,其有效阻振频率向低频移动。李朋洲等^[11]建立了点激励下附加阻振结构的有限平板理论分析模型,分析了阻振结构对激励板的振动能量向接受板传递的阻振规律,结果表明,在附加条形阻振结构块时,阻振结构对低频段的振动能量有较好的抑制效果。夏齐强和陈志坚^[12]将转角含阻振结构的L型连接结构引入到船舱壳体阻振设计中,有效降低了动力舱段结构的振动,减少了振动波向邻近舱室的传递,并验证了合理布置变截面的阻振结构可显著提高总体减振降噪效果,但未深入探究阻振结构截面参数对减振的影响趋势。

本文以某型深水半潜式支持平台的主机舱甲板及舱壁结构为研究对象,拟通过在平台主机舱甲板上布置阻振结构来隔离柴油机运行产生的振动。为此,将采用有限元法建立具有不同阻振方

案的平台机舱甲板及舱壁结构有限元模型,通过数值模拟给出甲板及舱壁结构上考核点的振动响应,通过对比不同阻振方案考核点的响应结果,研究阻振结构的隔振性能和优化规律。

与前人的研究相比,本文的创新点在于:一是将实现低频范围(1~80 Hz)的阻振特性作为目标,而前人在此领域的研究分析多集中于中、高频段,针对低频段的阻振特性研究相对较少。鉴于柴油机的激励特征多集中于中、低频段,可见低频阻振具有工程应用价值。二是采用空心方钢作为阻振结构的结构形式,并设计阻振环路来实现振动的有效隔离。一般而言,阻振结构会带来结构增重过大的问题,而本文采用空心方钢作为阻振结构来减轻质量,同时环路形式的阻振结构布置可避免空心方钢带来的阻振效果弱化的问题,从而加强空心方钢阻振结构在低频段的阻振性能。三是开展阻振结构截面参数化研究,通过比较不同截面参数的空心方钢对阻振效果的影响规律,来寻求阻振效果的最大化。

1 振动波入射空心刚性阻振结构的透射系数

假设将某个无限长的空心方钢阻振结构(以下称质量块)布置在无限大的板上,板厚为 h ,空心方钢边长为 $2l$ 。设有单位幅值的平面弯曲波(以下称弯曲波)以角度 φ 入射该阻振结构,其中,弯曲波频率为 ω ,波长为 k_p 。图1所示为该刚性阻振结构-板结构示意图。

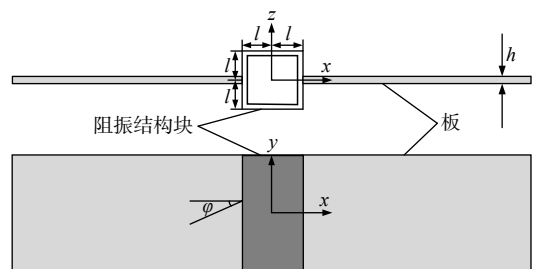


图1 刚性阻振结构-板结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of rigid vibration isolation structure-plate

入射板使阻振结构产生 z 方向的弯曲振动和 y 方向的扭转振动。忽略阻振结构的回转运动,根据板和阻振结构的耦合边界条件求解得到透射系数:

$$|T(\varphi)|^2 = \frac{4\beta[\alpha_b'\lambda^2 + 2\alpha\beta\lambda - \alpha_1'\alpha^2]}{[4\alpha^4 + (2\alpha + \alpha_b')^2][-2\beta\lambda + 2\beta\lambda\gamma_2 + \alpha_1']^2} \quad (1)$$

其中,

$$\lambda=1+\gamma_1, \beta=1+\alpha^2, \alpha=\frac{\cos\varphi}{\sqrt{1+\sin^2\varphi}}$$

$$\gamma_1=\frac{k_p l}{\sqrt{1+\sin^2\varphi}}, \gamma_2=k_p l \cos\varphi$$

$$\alpha_b'=\frac{\alpha_b}{\cos^3\varphi}\left(1-\frac{k_p^4 \sin^4\varphi}{k_{bm}^4}\right)$$

$$\alpha_t'=\frac{\alpha_t}{\cos\varphi}\left(1-\frac{k_p^2 \sin^2\varphi}{k_{tm}^2}\right), \alpha_b=\frac{\rho_m k_p}{\rho_p};$$

$$\alpha_t=\frac{\rho_m \gamma_m^2 k_p^2}{\rho_p}, r_m=\sqrt{I/A}, I=\frac{1}{12}[16l^4-(2l-2d)^4]$$

式中： γ_m 为相对其旋转中心的质量块横截面的惯性半径； k_{bm} 为质量块弯曲振动波数； k_{tm} 为质量块扭转振动波数； ρ_m 为质量块单位面积的质量； ρ_p 为板单位面积的质量； I 为质量块绕计算轴的惯性矩； A 为阻振质量的横截面积； d 为质量块壁厚厚度。当弯曲波法向入射时， $\varphi=0^\circ$ ，质量块中对振动波起到隔离作用的主要参数是：质量块与板结构单位面积的质量比 ρ_m/ρ_p 、质量块质量惯性矩 I 和板中振动波的波长 k_p 。而阻振结构质量块的绝对质量与振动波的隔离无关。

隔声量为

$$B_H=10\lg\left(\frac{W_1}{W_2}\right)=10\lg\left(\frac{1}{\tau}\right)=20\lg\left(\frac{1}{\tau}\right) \quad (2)$$

式中： $\tau=|T|^2$ ，为能量透射系数； W_1 和 W_2 分别为入射波和反射波的能量。

2 阻振结构环路隔振性能数值预报方案

2.1 有限元模型

以某型深水半潜支持海洋平台主机舱甲板及舱壁结构为研究对象，建立有限元模型。如图2所示，甲板为14 m×13 m×0.014 m的矩形钢板，结构材料同为长方形钢板的舱壁高6.6 m，厚0.014 m，由平板结构与骨材组成。钢板材料密度为7 800 kg/m³，泊松比为0.3，弹性模量为2.1×10¹¹ Pa。该平台甲板产生振动的主要激励源为柴油机，柴油机位于甲板上接近中间的位置，基座位置如图2(a)所示。

在基座上选取4个质量点加载激励来模拟柴油机的实际激励情况。阻振结构环路布置在甲板沿结构振动传播的途径上及设备外围，考虑到节约材料成本、避免主机舱增重过大，主机舱的增重被控制在总体质量的5%以内。通过降低设备振动波沿甲板向外传播，达到降低阻振结构外侧甲板及邻近舱壁振动的目标。本文采用ABAQUS有限元软件进行谐响应分析，在阻振结构外侧甲板及邻近舱壁上选取20个考核点，获取各考核点处的振动加速度级，作为评价阻振结构隔振效果的依据。考核点在甲板与主机舱壁的布置位置及编号如图2(b)所示。

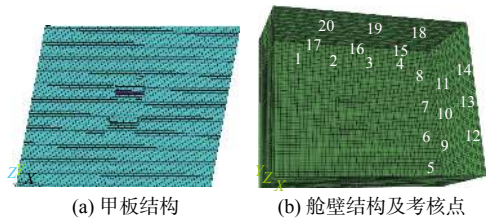


图2 甲板和舱壁结构有限元模型及考核点

Fig. 2 FE models of deck and bulkhead structure and inspection points

阻振结构选择的空心方钢尺寸为400 mm×100 mm×10 mm，横截面积为9 600 mm²，以矩形为基本形状，探究等质量的矩形方钢和矩形多形式叠加对甲板及舱壁振动抑制的影响，设计的阻振结构环路形式如图3所示。为保证布置阻振空心方钢后结构增重不超过主机舱总质量的5%，阻振结构实际布置长度均为42 m，方钢质量为3 144 kg，主机舱增重2.94%。本文将阻振结构环路布置在偏离甲板结构加强筋位置，以避免加强筋对阻振环路隔振造成干扰。

2.2 柴油机振动激励特性

柴油机是海洋平台的主要振动源。为研究柴油机激励作用下阻振结构对甲板及邻近舱壁的阻隔振效果，本文以某型柴油机为激励源，通过试验获取其振动激励特性。对于实际的海洋平台大型设备，虽然无法满足设备台架试验所要求的“自由速度”测试条件，但可以测量额定转速下柴

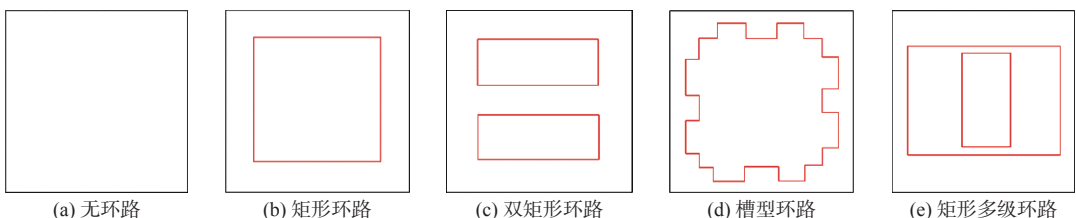


图3 阻振结构环路形式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loop forms for vibration isolation structures

油机基座面板的振动加速度。基于力边界与运动边界的一致性理论^[9], 本文利用已测得的甲板基座振动加速度, 将其转化为甲板基座振动加速度级, 并作为设备对船体的激励载荷, 具体转化公式如式(3)所示, 得到的柴油机基座在 1~80 Hz 频段内各考核点的振动加速度级如图 4 所示。

$$L_{ai} = 20\lg(a/a_0) \quad (3)$$

式中: L_{ai} 为各频点的甲板基座振动加速度级; a 为甲板基座加速度响应值; a_0 为加速度参考值, 本文取 $a_0=1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

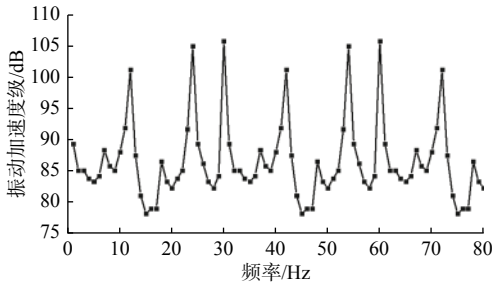


图 4 柴油机激励载荷

Fig. 4 Excitation loads of diesel engine

3 阻振结构环路的谐响应对比

本文采用 ABAQUS 软件对整个主机舱结构进行谐响应计算及数值分析, 得出甲板及邻近舱壁上各考核点在每个频点的振动加速度。计算频率范围 1~80 Hz, 步长 1 Hz。首先, 利用式(4)将各频点的振动加速度响应值转化为其振动加速度

级 L_{pi} , 然后由式(5)计算考核点所有频点的振动加速度总级 $L_{p\text{总}}$:

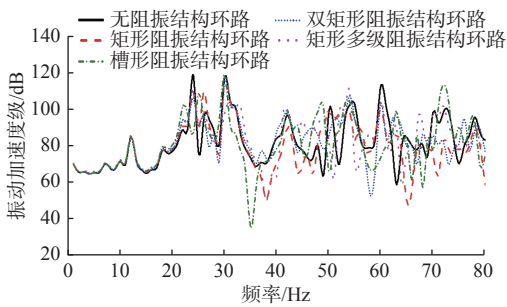
$$L_{pi} = 20\lg(a/a_0) \quad (4)$$

$$L_{p\text{总}} = 10\lg\left(\sum_{i=1}^{20} 10^{\frac{L_{pi}}{10}}\right) \quad (5)$$

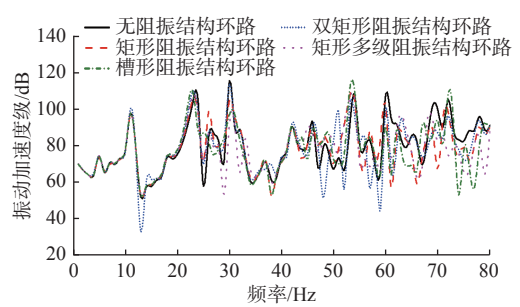
本文通过对比布置阻振结构前、后各测点的振动加速度总级, 来评价阻振结构对弯曲波传递的抑制作用。选取 4, 9, 14 和 17 号考核点, 绘制在不同工况下各考核点的振动响应曲线, 如图 5 所示。由图可见, 各考核点在 1~25 Hz 低频段的振动响应趋势一致, 几乎无阻振效果; 而在 26~80 Hz 的中、高频段, 各曲线走向存在差异化, 除部分频点外, 布置有不同形式阻振结构环路的考核点的振动加速度级峰值均低于无阻振结构环路的峰值, 原因是阻振结构环路主要对中、高阶模态产生影响。可见, 在上述中、高频段的隔振效果较明显, 且对振动波的反射或抑制效果更强。

图 6 所示为在不同工况下各考核点的振动加速度总级对比, 表 1 为不同形式的阻振结构环路的平均隔振效果。

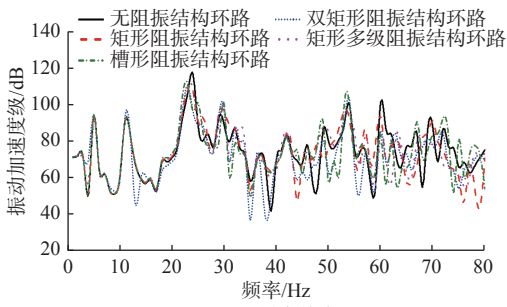
由图 6 和表 1 可见, 在柴油机激励载荷作用下, 与无阻振结构环路相比, 布置不同形式的阻振结构环路都不同程度地降低了甲板及邻近舱壁的平均振级。在能量方面, 阻振结构通过反射弯曲波损耗了部分能量, 导致传递到阻振结构环路外侧的振动能量减小, 这表明矩形多级和槽形阻



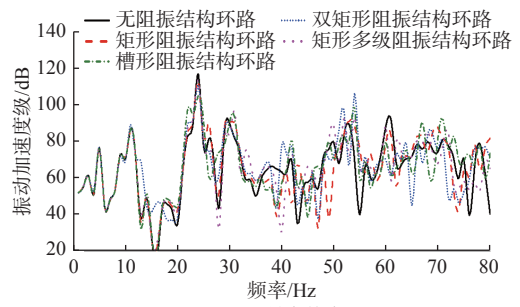
(a) 4号考核点



(b) 9号考核点



(c) 14号考核点



(d) 17号考核点

图 5 考核点在不同工况下的振动响应

Fig. 5 Vibration response of the inspection points under different working conditions

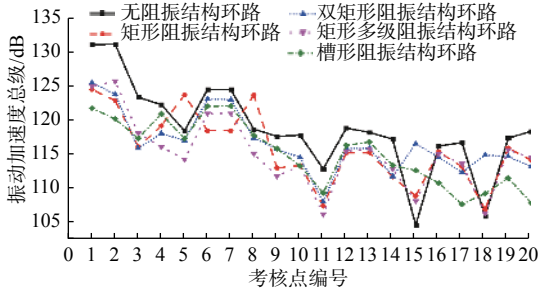


图6 各考核点在不同工况下的振动加速度总级对比

Fig. 6 Comparison of total vibration acceleration levels at each inspection points under different working conditions

表1 不同阻振结构环路的平均隔振效果

Table 1 Average vibration isolation effect of different vibration isolation structure loops

工况	平均隔振效果/dB
无阻振结构环路	-
矩形阻振结构环路	-2.912
双矩形阻振结构环路	-2.189
矩形多级阻振结构环路	-3.539
槽形阻振结构环路	-3.571

振结构环路的隔振效果要优于矩形及双矩形阻振结构环路。在结构形式方面,矩形、双矩形阻振环路均为简单的单级阻振结构,而槽型阻振结构环路为复杂的单级结构,且矩形多级阻振环路为多级阻振结构;在主机舱质量相等的条件下,多级阻振结构的隔振效果优于简单的单级回路,与复杂的单级阻振结构隔振效果相近,原因是复杂单级阻振结构与多级阻振结构在经过多个壁面的反射与透射以后,大幅度消耗了弯曲波的振动能量。对比矩形多级与槽形阻振结构环路在各考核点的振动加速度总级结果可知,矩形多级阻振结构环路的隔振效果较平缓,数值未出现较大突变,优于槽形阻振结构环路的隔振效果。

4 阻振结构截面参数化研究

以矩形多级阻振结构环路为研究对象,对其截面进行参数化研究,分析阻振结构高度及宽度的改变对隔振效果的影响,并探索阻振结构截面高度与宽度的优化设计。本研究中,厚度设定为10 mm,以避免阻振结构质量过大导致主机舱质量过度增加。

4.1 阻振结构高度参数优化设计

为探究改变矩形多级阻振结构的高度参数对振动的影响,对该参数进行了优化,工况如表2所示。

根据式(5)计算得到各考核点在5种工况下的振动加速度总级,图7所示为各考核点在不同

方钢截面尺寸下与无阻振结构环路的振动加速度总级的对比,表3列出了不同工况的平均隔振效果。

表2 矩形多级阻振结构高度参数工况设计

Table 2 Height parameter design of rectangular multi-stage vibration isolation structure for different working conditions

工况	方钢截面尺寸(高×宽×壁厚)/mm	实际布置长度/m	方钢质量/kg	主机舱质量/kg	增重率/%
工况1	350×100×10	42	2 817	109 753	2.63
工况2	400×100×10	42	3 145	110 081	2.94
工况3	450×100×10	42	3 473	110 409	3.24
工况4	500×100×10	42	3 800	110 736	3.55
工况5	550×100×10	42	4 128	111 064	3.86

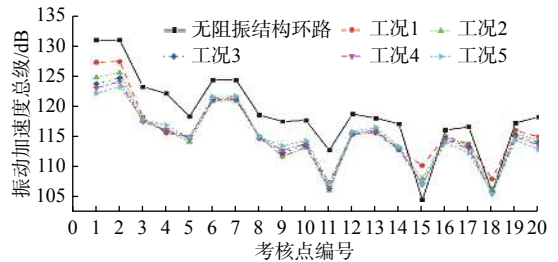


图7 各考核点在不同方钢高度下的振动加速度总级对比

Fig. 7 Comparison of total vibration acceleration levels at each inspection point with different heights of square steel

表3 不同高度方钢的平均隔振效果

Table 3 Average vibration isolation effects of square steel with different heights

工况	平均隔振效果/dB
工况1	-2.927 5
工况2	-3.539
工况3	-3.647
工况4	-3.678
工况5	-3.644

由图7和表3可见,布置的阻振方钢增重不超过总质量的5%时,不同高度的方钢均有较好的抑制弯曲波向甲板及邻近舱壁传播的效果;除15, 18号测点外,其他测点的振动响应明显低于无阻振结构环路。这是因为15, 18号测点所处位置靠近甲板与两舱壁结合处,刚度突变产生的阻抗失配使振动波产生反射,导致振动响应增大。研究结果还表明,阻振方钢的高度参数并非越大越好,阻振方钢高度为500 mm时(工况4)的隔振效果相对较优。

4.2 阻振结构宽度参数优化设计

基于上节的分析结果,选取高度为500 mm及不同宽度(不小于50 mm)的阻振结构,探讨宽

度参数对隔振效果的影响。截面参数等如表4所示。

表4 不同工况下矩形多级阻振结构宽度参数设计

Table 4 Width parameter design of rectangular multi-stage vibration isolation structure for different working conditions

工况	方钢截面尺寸 (高×宽×壁厚)/mm	实际布置 长度/m	方钢 质量/kg	主机舱甲板 质量/kg	增重率 /%
工况①	500×50×10	42	3 473	110 409	3.25
工况②	500×100×10	42	3 800	110 736	3.55
工况③	500×150×10	42	4 128	111 064	3.86

各考核点的振动加速度总级对比分析结果如图8所示,表5为各工况下的平均阻振效果。

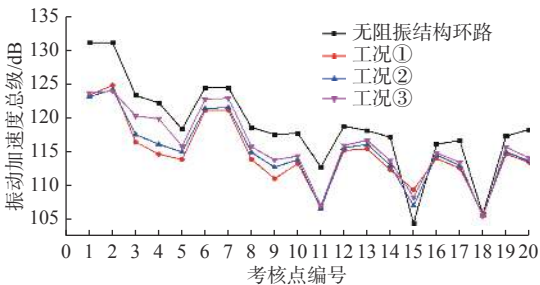


图8 各考核点在不同方钢宽度下的振动加速度总级对比
Fig. 8 Comparison of total vibration acceleration levels at inspection points with different widths of square steel

表5 不同宽度方钢的平均隔振效果

Table 5 Average vibration isolation effect of square steel with different widths

工况	平均隔振效果/dB
工况①	-4.026
工况②	-3.677
工况③	-2.778

由图8和表5可见,改变宽度参数也会明显降低振动加速度幅值,当宽度不小于50 mm时,选择宽度较窄的阻振结构,隔振效果更优。且在15号考核点出现布置阻振结构环路的响应反向增大的现象,同样说明了该测点因处于甲板与2个相邻舱壁的连接处,刚度突变产生的阻抗失配,导致该考核点的振动响应不降反增。

分析表3和表5可得,当以阻振结构方钢截面参数500 mm×100 mm×10 mm为基准,阻振结构方钢截面的高度由500 mm增加到550 mm或降低至450 mm时,隔振效果均比高度参数为500 mm时低0.3 dB;而宽度由100 mm增加到150 mm时,隔振效果比宽度参数为100 mm时低约0.9 dB;宽度由100 mm降低到50 mm时,隔振效果比宽度参数为100 mm时高了约0.35 dB,说明方钢的隔振效果对宽度的变化更敏感。

5 结论

本文研究了阻振结构的不同环路形式对甲板及邻近舱壁结构振动传递的影响,以此为基础开展了阻振环路截面参数化的研究,分析了方钢截面高度及宽度参数对振动抑制的作用效果,获得了较优的截面设计尺寸。得出的主要结论如下:

1) 在1~80 Hz频率范围内,阻振结构对中、高频段(26~80 Hz)的振动波能量的反射或抑制作用更强,其可有效降低中、高频段的振动响应,而对低频段(1~25 Hz)无明显隔振效果。

2) 阻振结构在甲板和舱壁上的大部分考核点的隔振效果良好,但是因部分考核点位于甲板与舱壁的接合处,其刚度突变产生的阻抗失配,使得振动波发生反射,振动响应反向增大。

3) 相比其他的环路形式,矩形多级阻振结构环路的隔振效果最优。参数化研究表明:当阻振方钢增加的质量不超过主机舱总质量的5%时,阻振结构的高度并非越大越好,而是存在最优值;当阻振结构的方钢截面宽度不小于50 mm时,宽度相对较小的阻振结构的隔振效果较优;在同比增重条件下,隔振效果对宽度的变化更敏感。最后,确定了500 mm×50 mm×10 mm的矩形多级阻振结构环路的隔振效果相对较优。

参考文献:

- [1] 石勇,朱锡,刘润泉.方钢隔振结构对结构噪声隔离作用的理论分析与试验[J].中国造船,2004,45(2):36-42.
SHI Y, ZHU X, LIU R Q. Analysis and experimental research on the role of quadrate steel beam in isolating vibration wave[J]. Shipbuilding of China, 2004, 45(2): 36-42 (in Chinese).
- [2] CREMER L, HECKL M, UNGAR E E. Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies[M]. 2nd ed. New York: Springer, 1988.
- [3] 车驰东,陈端石.成任意角度连接的两块平板转角处阻振质量对平面弯曲波传递的影响分析[J].声学学报,2007,32(3):282-288.
CHE C D, CHEN D S. Analysis of the effect of blocking mass at corner interface of two plates at arbitrary angles on transmission of plane bending waves[J]. Acta Acustica, 2007, 32(3): 282-288 (in Chinese).
- [4] 姚熊亮,计方,钱德进,等.偏心阻振质量阻抑振动波传递特性研究[J].振动与冲击,2010,29(1):48-52.
YAO X L, JI F, QIAN D J, et al. Characteristics of eccentric blocking masses attenuating vibration wave propagation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 48-52 (in Chinese).

- [5] 梁德利, 计方, 叶曦. 阻振质量复合托板减振效果试验研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(14): 107-111.
LIANG D L, JI F, YE X. Experiments on vibration reduction of blocking mass composite brace[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(14): 107-111 (in Chinese).
- [6] 缪旭弘, 钱德进, 贾地. 环形阻振质量隔振降噪的实船应用研究[J]. *船舶工程*, 2011, 33(1): 33-37.
MIAO X H, QIAN D J, JIA D. Application of ring vibration isolation mass in noise reduction of actual ships[J]. *Ship Engineering*, 2011, 33(1): 33-37 (in Chinese).
- [7] 温华兵, 彭子龙, 刘林波. 基于FE-SEA混合法的空心阻振质量阻振性能研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(5): 174-178, 185.
WEN H B, PENG Z L, LIU L B. Vibration-isolating performance of hollow-square-steel blocking mass based on hybrid FE-SEA method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(5): 174-178, 185 (in Chinese).
- [8] 蒋士亮, 杨铁军, 李文龙, 等. 矩形截面阻振质量隔振效果分析[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(15): 6-11, 18.
JIANG S L, YANG T J, LI W L, et al. Analysis on vibration isolation performance of isolation mass with rectangular cross section[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(15): 6-11, 18 (in Chinese).
- [9] 王祖华, 周海波, 计方. 典型舰船舱壁结构隔振优化设计[J]. *船舶*, 2011, 22(1): 26-33.
WANG Z H, ZHOU H B, JI F. Vibration isolation design of typical hull bulkhead structures[J]. *Ship & Boat*, 2011, 22(1): 26-33 (in Chinese).
- [10] 温华兵, 彭子龙, 夏兆旺, 等. 新型空心结构阻振质量的阻振性能实验[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(2): 335-339.
WEN H B, PENG Z L, XIA Z W, et al. Experimental study on the vibration-isolating performance of novel hollow structural blocking mass[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(2): 335-339 (in Chinese).
- [11] 李朋洲, 卢军, 孙磊. 阻振质量对有限平板振动传递影响分析[J]. *核动力工程*, 2014, 35(1): 78-81, 86.
LI P Z, LU J, SUN L. Effect analysis of vibration transmission of finite plate with blocking mass[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2014, 35(1): 78-81, 86 (in Chinese).
- [12] 夏齐强, 陈志坚. 含阻振质量的L型结构在舱段壳体隔振中的应用[J]. *中国舰船研究*, 2013, 8(5): 64-70.
XIA Q Q, CHEN Z J. Application of L-shaped plates with blocking mass to the vibration isolation of cabin shells[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(5): 64-70 (in Chinese).
- [13] 庞福振. 船舶结构噪声截断模型数值预报方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
PANG F Z. Numerical research on truncated model method of ship structural borne noise prediction[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012 (in Chinese).



(上接第175页)

- [13] 孟晓宇, 肖国林, 陈虹. 国外潜艇声隐身技术现状与发展综述[J]. *舰船科学技术*, 2011, 33(11): 135-139.
MENG X Y, XIAO G L, CHEN H. Review of the present situation and development of acoustic stealth technology for submarines abroad[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(11): 135-139 (in Chinese).
- [14] 陶猛, 卓琳凯. 组合腔型吸声覆盖层的声学特性分析[J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(3): 408-412.
TAO M, ZHUO L K. Acoustic performance of sound absorption coating containing composite cavities[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2013, 47(3): 408-412 (in Chinese).
- [15] 陈文炯, 刘书田. 周期性吸声多孔材料微结构优化设计[J]. *计算力学学报*, 2013, 30(1): 45-50.
CHEN W J, LIU S T. Optimizing design of micro-structural configurations of periodic porous sound-absorbing materials[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2013, 30(1): 45-50 (in Chinese).
- [16] MENG T. Simplified model for predicting acoustic performance of an underwater sound absorption coating[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2014, 20(3): 339-354.
- [17] HLADKY-HENNION A C, DECARPIGNY J N. Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a doubly periodic structure using the finite element method: application to Alberich anechoic coatings[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1991, 90(6): 3356-3367.
- [18] 何祚镛, 王曼. 水下均匀材料复合层吸声特性研究[J]. *应用声学*, 1996, 15(5): 6-11.
HE Z Y, WANG M. Investigation of the sound absorption of homogeneous composite multiple-layer structures in water[J]. *Applied Acoustics*, 1996, 15(5): 6-11 (in Chinese).