新型双向压缩式钢丝绳隔振器的力学性能试验研究

张春辉¹, 卢凯田^{2*}, 张磊¹, 闫明³, 章艺²

1. 海军研究院, 北京 100161;

2. 上海船舶设备研究所, 上海 200031;

3. 沈阳工业大学机械工程学院, 沈阳 110870

*联系人, E-mail: roylu1993@126.com

收稿日期: 2020-11-03; 接受日期: 2021-02-22; 网络出版日期: 2021-06-21

摘要 钢丝绳隔振器被广泛运用在舰艇设备隔振抗冲击领域. 针对传统钢丝绳隔振器拉伸性能较差的缺点, 设计了新型双向压缩式钢丝绳隔振器, 采用振动和冲击试验方法对新型双向压缩式钢丝绳隔振器和球形钢丝绳隔振器的性能特征进行了对比研究. 通过进行对比试验研究了两者的性能差异特性. 扫频试验发现固有频率处球形钢丝绳隔振器的共振峰值更大; 定频试验发现在不同工况时新型与球形钢丝绳隔振器振动性能相差不大. 冲击试验结果表明新型双向压缩式钢丝绳隔振器的冲击隔离率在82.5%以上, 在各个工况时的冲击隔离率均大于球形钢丝绳隔振系统, 有效改善了球形钢丝绳隔振器的拉伸性能. 新型双向压缩式钢丝绳隔振器在保持球形钢丝绳隔振器原有隔振效果的基础上, 进一步提升了隔振器的抗冲击性能.

关键词 新型钢丝绳隔振器, 球形钢丝绳隔振器, 双向压缩, 冲击隔离

PACS: 05.45-a, 46.40.-r

1 引言

舰船设备在实际工作中难免会遭受振动和冲击作用, 由此引发的危害愈趋严重, 因此对于舰船设备必须进行有效的振动和冲击隔离^[1,2]. 常用的被动冲击隔离元件主要有金属弹簧隔振器、钢丝绳隔振器、橡胶隔离器、空气弹簧和各种类型的限位器等^[3]. 钢丝绳隔振器以其固有频率低、耐高温、耐腐蚀、可靠性高, 应对冲击时又有良好的软化特性而被广泛运用在舰船

设备的隔振缓冲中^[4,5]. 然而以往实船及浮动平台爆炸冲击试验中发现, 钢丝绳隔振器在冲击波和气泡脉动耦合的强冲击载荷作用下会出现如图1所示的拉伸断裂失效现象, 为有效保护舰船设备, 研究并改进提升钢丝绳隔振器的抗冲击性能具有重要的理论研究和显著的军事应用价值^[6].

李佳等人^[7]利用MTS跌落试验机对钢丝绳隔振器发生较大永久变形时的冲击性能进行了研究. 詹韧等人^[8]对HGGS-2000型钢丝绳隔振器进行冲击试验发现

引用格式: 张春辉, 卢凯田, 张磊, 等. 新型双向压缩式钢丝绳隔振器的力学性能试验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 124612
Zhang C H, Lu K T, Zhang L, et al. Experimental study on mechanical properties of new biaxial compression wire rope isolator (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 124612, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0380](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0380)

图 1 (网络版彩图)钢丝绳隔振器断裂实物图

Figure 1 (Color online) Picture of the broken wire rope isolator.

钢丝绳隔振器的冲击刚度远小于其动、静刚度. 刘盼盼^[9]研究发现钢丝绳隔振器的等效冲击刚度随着冲击加速度幅值的增加而逐渐减小. 杜建国等人^[10]对冲击载荷作用下YGG型钢丝绳隔振器的耗能特性进行了研究. 赵建华等人^[11]通过试验发现钢丝绳隔振器在冲击时拉伸阶段的加速度响应大于压缩阶段的加速度响应, 钢丝绳隔振器在压缩时的力学性能要优于拉伸性能.

上述研究主要对现有钢丝绳隔振器的冲击特性进行了大量理论与试验研究, 但对于改进提升钢丝绳隔振器抗冲击性能的研究较少. 本研究在总结传统钢丝绳隔振器阻尼、刚度等力学特性基础上, 提出了一种可实现双向压缩的新型钢丝绳隔振器(以下简称新型钢丝绳隔振器), 目的是在保持或提升原有隔振效果的基础上, 大幅提升钢丝绳隔振器的抗冲击性能. 通过对新型钢丝绳隔振器与球形钢丝绳隔振器进行振动和冲击试验研究, 对两者的性能差异进行了对比分析. 本研究可为隔振抗冲击元件的发展提供一种基础性的推动作用, 也可为提升舰艇设备抗冲击性能提供一种有效的技术手段.

2 钢丝绳隔振器力学建模及新型钢丝绳隔振器结构设计

2.1 钢丝绳静力学模型

钢丝绳以一根半径为 R_1 的芯丝为芯轴, 外围缠绕 m 根半径为 R_2 的侧丝, 如图2所示.

以往研究将侧丝可简化为螺旋角为 α 的螺旋弹簧^[12], 受到一个垂直于弹簧初始中心的弯曲力矩 m_s 的作用, 如图3所示.

图 2 承载钢丝绳结构简图

Figure 2 Structure diagram of load-bearing wire rope.

图 3 力偶作用下的螺旋弹簧的弯曲

Figure 3 Bending of helical spring under the action of force couple.

由于弯曲力矩 m_s 做的功等于应变能, 则

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(2 + v \cos^2 \alpha)}{2 \sin \alpha} \frac{4 m_s}{\pi R^4 E}, \quad (1)$$

其中, α 为弹簧的弯曲角, R 为钢丝绳半径, ρ 为曲率, v 是泊松比, E 为钢丝绳的弹性模量.

对于受到弯矩 M_b 作用的钢丝绳, 可以将该钢丝绳等效为若干股上述螺旋弹簧的组合, 力-变形数学模型为

$$M_b = \frac{\pi E}{4} \left[\frac{2 m_s \sin \alpha_2}{(2 + v \cos^2 \alpha_2)} R_2^4 + R_1^4 \right] \frac{1}{\rho} = \frac{A^*}{\rho}, \quad (2)$$

其中, M_b 是作用在钢丝绳上的扭转力矩; ρ 是钢丝绳的曲率半径; A^* 是弯曲刚度; α 是钢丝绳的螺旋角.

进一步推导, 可得钢丝绳的弯曲刚度 A^* 为

$$A^* = \frac{\pi E}{4} \left[\frac{2m_2 \sin \alpha_2}{(2 + \nu \cos^2 \alpha_2)} R_2^4 + R_1^4 \right] = EI_s, \quad (3)$$

可以看出, A^* 近似为钢丝绳中每股钢丝螺旋弹簧的弯曲刚度, I_s 为钢丝绳的等效截面惯性矩.

2.2 结构参数对球形钢丝绳隔振器力学性能的影响

进一步研究发现球形钢丝绳隔振器的绳圈数目、高宽比等几何参数对隔振器的力学性能影响较大^[13], 基于硕士论文的整理得到了结构参数对钢丝绳隔振器力学性能的影响规律.

(1) 绳圈数目对隔振器力学性能的影响

某球形钢丝绳隔振器有8根绳圈, 呈对称分布, 当多个钢丝绳圈并联在一起时, 隔振器力学特性会发生变化. 钢丝绳隔振器绳圈数目为6, 8, 10, 12时的准静态力学迟滞曲线如图4所示.

钢丝绳隔振器在循环加载试验中, 由于钢丝绳的丝与丝、股与股之间的摩擦阻尼力而造成能量损失, 能量损失率(ELR)是衡量钢丝绳隔振器能量损耗的主要指标之一, 其公式为

$$ELR = \frac{A_{\text{Loop}}}{\pi \frac{(F_{\text{max}} - F_{\text{min}})(X_{\text{max}} - X_{\text{min}})}{2}}, \quad (4)$$

其中, A_{Loop} 为滞回面积, F_{max} 和 F_{min} 分别为力的最大值和最小值, X_{max} 和 X_{min} 为力最大、最小时所对应的最大、最小位移. 能量损失率的值越高表明隔振器的阻尼特性越强, 即能量耗散特性越强. 经计算后得到随着绳圈数目的增加, 钢丝绳隔振器的能量损失率先增加后减小, 当绳圈数目为8时隔振器的能量损失率最大为21.32%, 线圈数目为12时能量损失率最小为19.14%, 因此绳圈数目为8时其力学性能较优.

(2) 高宽比对隔振器力学性能的影响

研究发现, 球形钢丝绳隔振器的高宽比对隔振器名义负载影响较大, 当钢丝绳隔振器的高宽比分别为0.45, 0.50, 0.59, 0.63时的准静态力学迟滞曲线如图5所示.

经计算, 高宽比为0.5时隔振器的能量损失率最大为19.25%, 高宽比为0.59时隔振器的能量损失率最小为10.74%, 隔振器的阻尼特性大大降低, 因此隔振器

图4 (网络版彩图)不同绳圈数目的隔振器拉压曲线

Figure 4 (Color online) Tensile and compression curves of vibration isolator with different number of rope loops.

图5 (网络版彩图)不同高宽比的隔振器拉压曲线

Figure 5 (Color online) Tensile and compression curves of isolator with different aspect ratios.

高宽比为0.5时隔振器的阻尼特性最优.

2.3 结构设计

球形钢丝绳隔振器结构简单且在横滚和剪切时力学性能一致, 因此选用球形钢丝绳隔振器作为新型钢丝绳隔振器中的弹性元件. 所选用的球形钢丝绳隔振器绳圈数目为8, 高宽比为0.5. 图6为新型钢丝绳隔振器的原理样机设计方案, 该结构主要由导向块上盖、导向圆柱、限位结构、球形钢丝绳隔振器、笼型套筒、导向杆和底座等结构组成. 其中导向杆为球形钢丝绳隔振器导向, 导向块上盖及底座上设有螺纹孔用于连接设备与基座.

图 6 (网络版彩图)新型钢丝绳隔振器结构及工作状态. (a) 向下压缩; (b) 平衡位置; (c) 向上压缩

Figure 6 (Color online) The structure and working condition of new wire rope isolator. (a) Compress down; (b) equilibrium state; (c) compress up.

结合图6, 该新型钢丝绳隔振器工作原理为: 假定向下为正方向, 当运动方向为正向时, 导向圆柱向下运动并压缩球形钢丝绳隔振器^[14], 如图6(a)所示. 一定压缩量后球形钢丝绳隔振器反弹, 使导向圆柱反向运动, 回到平衡位置(b)后继续带动导向圆柱沿反向运动, 当球形钢丝绳隔振器到达限位结构时, 球形钢丝绳隔振器上端停止运动, 导向杆底部挤压球形钢丝绳隔振器下端使其向上运动, 如图6(c)所示. 球形钢丝绳隔振器再次被压缩, 到达隔振器极限压缩量后, 弹性恢复力使导向杆向下运动, 同时带动导向圆柱一起运动. 周而复始, 对设备进行隔振隔冲. 在此过程中球形钢丝绳隔振器始终处于压缩状态, 可实现双向压缩的功能.

通过结构改进后新型钢丝绳隔振器可实现双向压缩的功能, 根据钢丝绳隔振器在压缩时刚度软化这一特点进一步将其压缩时的迟滞曲线定义为双线性模型^[15,16], 如图7所示, K_1 为隔振器在第一阶段的刚度, K_2 为钢丝绳在软化后的刚度. 通过数据拟合得到新型钢丝绳隔振器双线性模型的表达式为

$$\begin{cases} y_1 = 198.33x + 0.12, \\ y_2 = 21.98x + 36.87. \end{cases} \quad (5)$$

3 振动特性对比分析

3.1 试验方案

新型钢丝绳隔振器振动试验系统如图8所示. 系统主要由电磁振动台、2个新型钢丝绳隔振器、4个加速度传感器、1个位移传感器、26 kg的质量块等构成. 此次试验共设置两个加速度传感器测量组, 分别传输到控制端和数据采集仪. 通过位移传感器测量质量块的位移时域曲线. 试验开始时在计算机端输入激励信

图 7 (网络版彩图)双线性模型

Figure 7 (Color online) Bilinear model.

号, 由加速度传感器测量振动台面和质量块的加速度信号, 并传输至控制端和动态信号采集仪, 试验完成后对加速度信号进行处理分析.

为对比分析新型钢丝绳隔振器与球形钢丝绳隔振器的性能差异, 选用的球形钢丝绳隔振器的型号与新型钢丝绳隔振器中弹性元件型号一致, 设备质量均为 26 kg. 为避免设备在上下运动时发生偏移, 试验装置中设置了一根导向杆, 试验装置如图9所示, 试验方案与新型钢丝绳隔振器试验方案相同.

3.2 扫频试验

扫频试验共设定两个工况, 根据GJB150.18-86^[17]在5–20 Hz时采用位移信号加载, 在20–80 Hz采用加速度信号加载, 具体工况为2.5 mm 2g, 3 mm 1g. 探究不同输入对新型与球形钢丝绳隔振器固有频率、共振峰值等参数的影响, 分析隔离系统的频率响应特性.

图 8 (网络版彩图)新型钢丝绳隔振器振动试验系统

Figure 8 (Color online) Vibration test system of new wire rope isolator.

图 9 (网络版彩图)球形钢丝绳隔振器隔振系统实物图

Figure 9 (Color online) Picture of spherical wire rope isolator vibration isolation system.

常用振动传递率来评价隔振器的隔振性能^[18], 振动传递率如式(6)所示, a 为振动台面加速度, a_1 为质量块加速度:

$$\eta = \frac{a_1}{a}. \quad (6)$$

激励信号为位移幅值2.5 mm加速度幅值2g时, 隔振系统的振动传递率曲线如图10所示, 此工况新型钢丝绳隔振系统的固有频率为9.75 Hz, 共振峰值为1.72, 6.1–12.86 Hz频率区间为隔振系统的放大区域, 在频率为62.6 Hz时, 隔振器的传递率最小为11.7%; 球形钢丝

图 10 (网络版彩图)隔离器2.5 mm 2g扫频所得的传递函数曲线

Figure 10 (Color online) Transfer function curve obtained by isolator frequency sweep at 2.5 mm 2g.

绳隔振系统的固有频率为7.9 Hz, 共振峰值为6.1, 5–12.4 Hz频率区间内为隔振系统的放大区域. 当频率大于12.4 Hz时, 钢丝绳隔振系统的传递函数值随着频率的增加先减小再增加^[19,20], 增加到17.3 Hz后再逐渐减小, 在频率为80 Hz时, 隔振器的传递率最小为

11.9%. 对比分析此工况两种钢丝绳隔振器, 球形钢丝绳隔振器的固有频率更低, 但其共振峰值为新型钢丝绳隔振器的3.54倍, 两者的起始隔振频率大致相同.

激励信号为位移幅值3 mm加速度幅值1g时, 隔振系统的振动传递率曲线如图11所示, 此工况新型钢丝绳隔振系统的固有频率为7.89 Hz, 共振峰值为3.29, 5.46–13.24 Hz频率区间为隔振系统的放大区间, 在频率为80 Hz时, 隔振器的传递率最小为20.6%; 球形钢丝绳隔振系统的固有频率为7.9 Hz, 共振峰值为6.6, 5–12 Hz频率区间内为隔振系统的放大区域. 当频率大于12 Hz时, 钢丝绳隔振系统的传递函数值随着频率的增加先减小再增加, 增加到23 Hz后再逐渐减小, 在频率为80 Hz时, 隔振器的传递率最小为14.4%. 对比分析此工况两种钢丝绳隔振器, 两者固有频率相差不大, 但球形钢丝绳隔振器的共振峰值为新型钢丝绳隔振器的2倍, 新型钢丝绳隔振器的起始隔振频率比球形略高.

从上述两个工况可以看出不同输入信号对隔离器的振动特性有一定的影响, 5–20 Hz时采用位移信号加载时, 随着位移幅值的增加, 新型钢丝绳隔振器的固有频率由9.75 Hz降为7.89 Hz, 共振峰值由1.72升为3.29; 球形钢丝绳隔振器的固有频率保持不变为7.9 Hz, 共振峰值由6.1升为6.6. 20–80 Hz采用加速度信号加载时, 当激励信号由1g变为2g时, 新型与球形钢丝绳隔振器的传递率均降低, 从图10可以看出, 在17.6 Hz后, 两个钢丝绳隔振器的振动传递率曲线基本一致.

3.3 定频试验

定频试验是在给定的频率点上进行各种振动参数不同量级的试验, 试验装置与扫频振动试验装置相同. 试验时, 在5–20 Hz时用位移信号加载, 20–80 Hz时用加速度信号加载, 试验工况分别为5 Hz 2.5 mm, 10 Hz 2.5 mm, 20 Hz 2g, 60 Hz 2g, 通过加速度传感器测量振动台和质量块的加速度时域曲线. 不同工况时的加速度时域曲线如图12和13所示.

位移激励幅值为2.5 mm时新型钢丝绳隔振系统和球形钢丝绳隔振系统在5和10 Hz处的加速度响应如图12所示, 5 Hz处新型与球形隔振系统设备的振动传递率分别为1.35和1.18, 新型钢丝绳隔振系统在初始频率5 Hz时传递率比球形隔振系统略大. 10 Hz处新型与球形隔振系统设备的振动传递率分别为2.25和2.3, 此时隔振系统仍处于放大区间, 新型钢丝绳隔振系统的

图 11 (网络版彩图)隔离器3 mm 1g扫频所得的传递函数曲线

Figure 11 (Color online) Transfer function curve obtained by isolator frequency sweep at 3 mm 1g.

传递率比球形隔振系统略小.

加速度激励幅值为2g时新型钢丝绳隔振系统和球形钢丝绳隔振系统在20和60 Hz处的加速度响应如图13所示, 20 Hz处新型与球形隔振系统设备的振动传递率分别为0.59和0.42, 此时系统已开始隔振, 新型钢丝绳隔振系统的传递率比球形隔振系统大, 球形钢丝绳隔振系统性能较优. 60 Hz处新型与球形隔振系统设备的振动传递率分别为0.26和0.17, 此时隔振系统的传递率均在减小, 新型钢丝绳隔振系统的传递率比球形隔振系统相差不大.

新型与球形钢丝绳隔振器定频试验数据对比如表1所示.

分析扫频和定频试验结果可知, 新型钢丝绳隔振器在结构改进的基础上仍保持了较好的隔振性能.

4 冲击特性对比分析

4.1 试验方案

钢丝绳隔振器冲击试验系统原理如图14所示, 该系统主要包括跌落试验机、加速度传感器、位移传感器、东华数据采集仪等.

(1) 跌落试验机能够较真实地模拟舰船设备冲击环境, 根据不同的硬度和厚度组合得到各种不同的冲击脉冲宽度; 通过调整跌落台面高度来调整脉冲大

图 12 (网络版彩图)位移激励为2.5 mm时隔振系统加速度响应. (a) 5 Hz新型; (b) 5 Hz球形; (c) 10 Hz新型; (d) 10 Hz球形
Figure 12 (Color online) Acceleration response of isolation system when the displacement excitation is 2.5 mm. (a) 5 Hz, new type; (b) 5 Hz, spherical type; (c) 10 Hz, new type; (d) 10 Hz, spherical type.

小^[21].

(2) 本次冲击试验选用3个EA-YD-181压电式加速度传感器, 2个安装在冲击台面用来测量基础加速度信号, 分别输入到控制端和数据采集仪, 1个安装在质量块上, 用于测量设备加速度信号. 加速度传感器用胶水固定安装在冲击台和质量块上.

因跌落台尺寸较小, 两种隔离器无法同时安装在试验台, 因此分别对新型与球形钢丝绳隔振器进行冲击试验, 新型钢丝绳隔振器冲击试验如图15所示, 球形钢丝绳隔振器冲击试验安装如图16所示.

4.2 冲击试验

钢丝绳隔冲系统及相关测量仪器安装并调试之后进行冲击试验, 通过调整跌落台高度和波形发生器来改变半正弦波的脉冲和脉宽^[22]. 本次冲击试验共设定4个工况, 如表2所示. 为对比分析新型与球形钢丝绳隔振器的抗冲击性能, 每个工况跌落台高度和波形发生器的型号保持一致, 忽略脉冲峰值和脉宽少许差异

的影响.

工况一新型与球形钢丝绳隔冲系统的加速度响应曲线如图17所示, 设备加速度为正是向下压缩状态, 加速度为负是向上压缩状态. 从图17(a)中可以看出, 新型钢丝绳隔冲系统向下压缩时设备的加速度响应幅值为2.4g, 向上压缩时设备的加速度响应幅值为1.37g, 向下冲击隔离率为82.5%^[23,24], 向上冲击隔离率为90%; 从图17(b)中可以看出, 球形钢丝绳隔冲系统设备向下运动时的加速度响应幅值为2.63g, 设备向上运动时的加速度响应幅值为2.86g, 向下冲击隔离率为79.7%, 向上冲击隔离率为77.9%.

工况二新型与球形钢丝绳隔冲系统的加速度响应曲线如图18所示, 从图18(a)中可以看出, 新型钢丝绳隔冲系统向下压缩时设备的加速度响应幅值为3.64g, 向上压缩时设备的加速度响应幅值为2.39g, 向下冲击隔离率为88.5%, 向上冲击隔离率为92.5%; 从图18(b)中可以看出, 球形钢丝绳隔冲系统设备向下运动时的加速度响应幅值为6.54g, 设备向上运动时的加速度响

图 13 (网络版彩图)加速度激励为2g时隔振系统加速度响应. (a) 20 Hz新型; (b) 20 Hz球形; (c) 60 Hz新型 (d) 60 Hz球形

Figure 13 (Color online) Acceleration response of isolation system when the acceleration excitation is 2g. (a) 20 Hz, new type; (b) 20 Hz, spherical type; (c) 60 Hz, new type; (d) 60 Hz, spherical type.

表 1 新型与球形钢丝绳隔振系统定频试验对比

Table 1 Comparison of fixed frequency test between new and spherical wire rope vibration isolation systems

工况	型号	基座加速度 幅值 (g)	设备加速度 幅值 (g)	传递率
5 Hz 2.5 mm	新型	0.109	0.147	1.35
	球形	0.108	0.127	1.18
10 Hz 2.5 mm	新型	0.401	0.902	2.25
	球形	0.388	0.891	2.30
20 Hz 2g	新型	1.703	0.999	0.59
	球形	1.651	0.693	0.42
60 Hz 2g	新型	1.510	0.401	0.26
	球形	1.466	0.253	0.17

应幅值为7.83g, 向下冲击隔离率为76.7%, 向上冲击隔离率为72.1%.

工况三新型与球形钢丝绳隔冲系统的加速度响应曲线如图19所示, 从图19(a)中可以看出, 新型钢丝绳隔冲系统向下压缩时设备的加速度响应幅值为3.82g,

向上压缩时设备的加速度响应幅值为1.5g, 向下冲击隔离率为93.2%, 向上冲击隔离率为97.3%; 从图19(b)中可以看出, 球形钢丝绳隔冲系统设备向下运动时的加速度响应幅值为3.84g, 设备向上运动时的加速度响应幅值为5.15g, 向下冲击隔离率为94.2%, 向上冲击隔离率为92.2%.

工况四新型与球形钢丝绳隔冲系统的加速度响应曲线如图20所示, 从图20(a)中可以看出, 新型钢丝绳隔冲系统向下压缩时设备的加速度响应幅值为5.5g, 向上压缩时设备的加速度响应幅值为3.4g, 向下冲击隔离率为95.5%, 向上冲击隔离率为97.2%; 从图20(b)中可以看出, 球形钢丝绳隔冲系统设备向下运动时的加速度响应幅值为8.29g, 设备向上运动时的加速度响应幅值为17.86g, 向下冲击隔离率为92.6%, 向上冲击隔离率为84%.

不同工况下的新型与球形钢丝绳隔冲系统的冲击隔离率如表3所示.

从表3可以看出, 球形钢丝绳隔振器向上冲击隔离

图 14 (网络版彩图)冲击试验系统原理图

Figure 14 (Color online) Schematic diagram of shock test system.

图 15 (网络版彩图)新型钢丝绳隔振器隔冲系统实物图

Figure 15 (Color online) Picture of the new wire rope isolator isolation system.

图 16 (网络版彩图)球形钢丝绳隔振器隔冲系统实物图

Figure 16 (Color online) Picture of spherical wire rope isolator isolation system.

率均小于向下冲击隔离率, 而新型钢丝绳隔振器向上冲击隔离率均大于向下冲击隔离率, 有效地改善了球形钢丝绳隔振器的拉伸性能. 新型钢丝绳隔振器充分利用了压缩时刚度软化这一特性, 在设备向上和向下运动时均处于压缩状态, 能够较好地吸收冲击能量, 最大限度地对设备进行冲击隔离^[25].

新型钢丝绳隔冲系统的冲击隔离率在82.5%以上,

表 2 不同工况的半正弦波

Table 2 Half sine wave under different working conditions

工况	型号	波形发生器	跌落台高度 (mm)	脉冲幅值 (g)	脉宽 (ms)
一	新型	1号垫	100	13.7	15.3
	球形			12.95	13.9
二	新型	2号垫	160	31.7	11.4
	球形			28.06	11
三	新型	3号垫	75	56.4	5
	球形			62.8	5.8
四	新型	4号垫	110	120.9	3.7
	球形			111.83	4.2

且在各个工况时向上和向下的冲击隔离率均大于球形钢丝绳隔冲系统, 在工况四时, 新型钢丝绳隔冲系统向上冲击隔离率达到了97.2%, 而球形钢丝绳隔冲系统向上冲击隔离率只有84.0%, 新型钢丝绳隔振器的隔冲性能更加优异.

5 结论

本文首先对钢丝绳的静力学特性及结构参数和球形钢丝绳隔振器的力学特性进行了研究, 随后对新型钢丝绳隔振器进行结构设计并对新型与球形钢丝绳隔振器进行振动与冲击试验研究, 得出以下结论.

(1) 球形钢丝绳隔振器绳圈数目为8, 高宽比为0.5时力学性能最优. 球形钢丝绳隔振器双向压缩时可将其力学迟滞模型简化为双线性模型.

(2) 从扫频试验可以看出, 不同输入信号对隔离器的振动特性有一定的影响, 随着位移幅值的增加, 新型钢丝绳隔振器的固有频率由9.75降为7.89 Hz, 共振峰

图 17 (网络版彩图)工况一钢丝绳隔冲系统加速度响应曲线. (a) 新型钢丝绳隔振器; (b) 球形钢丝绳隔振器
Figure 17 (Color online) Acceleration response curve of isolation on Case One. (a) New wire rope isolator; (b) spherical wire rope isolator.

图 18 (网络版彩图)工况二钢丝绳隔冲系统加速度响应曲线. (a) 新型钢丝绳隔振器; (b) 球形钢丝绳隔振器
Figure 18 (Color online) Acceleration response curve of isolation system on Case Two. (a) New wire rope isolator; (b) spherical wire rope isolator.

图 19 (网络版彩图)工况三钢丝绳隔冲系统加速度响应曲线. (a) 新型钢丝绳隔振器; (b) 球形钢丝绳隔振器
Figure 19 (Color online) Acceleration response curve of isolation system on Case Three. (a) New wire rope isolator; (b) spherical wire rope isolator.

图 20 (网络版彩图)工况四钢丝绳隔冲系统加速度响应曲线. (a) 新型钢丝绳隔振器; (b) 球形钢丝绳隔振器

Figure 20 (Color online) Acceleration response curve of isolation system on Case Four. (a) New wire rope isolator; (b) spherical wire rope isolator.

表 3 新型与球形钢丝绳隔冲系统冲击试验响应对比

Table 3 Comparison of shock test response between new and spherical wire rope isolation systems

工况	型号	基座加速度幅值 (g)	设备向下加速度幅值 A_1 (g)	设备向上加速度幅值 A_2 (g)	向下隔离率 (%)	向上隔离率 (%)
一	新型	13.70	2.40	1.37	82.5	90.0
	球形	12.95	2.63	2.86	79.7	77.9
二	新型	31.70	3.64	2.39	88.5	92.5
	球形	28.06	6.54	7.83	76.7	72.1
三	新型	56.40	3.82	1.50	93.2	97.3
	球形	65.80	3.84	5.15	94.2	92.2
四	新型	120.90	5.50	3.40	95.5	97.2
	球形	111.83	8.29	17.86	92.6	84.0

值由1.72升为3.29, 球形钢丝绳隔振器的固有频率保持不变为7.9 Hz, 共振峰值由6.1升为6.6.

(3) 从不同工况定频试验可以看出, 新型与球形钢丝绳隔振器的加速度传递率相差不大, 新型钢丝绳隔振器在结构改进的基础上仍保持了较好的隔振性能.

(4) 新型双向压缩式钢丝绳隔振器向上的冲击隔离率均大于向下的冲击隔离率, 有效地改善了球形钢丝绳隔振器的拉伸性能.

(5) 新型钢丝绳隔冲系统的冲击隔离率在82.5%以

上, 且在各个工况时向上和向下冲击隔离率均大于球形钢丝绳隔冲系统. 在脉冲幅值120.9g, 脉宽3.7 ms的半正弦波作用时, 向上冲击隔离率达到了97.2%, 而球形钢丝绳隔冲系统的冲击隔离率只有84.0%, 新型钢丝绳隔振器的隔冲性能更加优异.

新型钢丝绳隔振器即可双向压缩钢丝绳隔振器在保持其原有隔振性能的基础上, 有效地改善了传统钢丝绳隔振器拉伸性能差的缺点, 对于工程应用有一定的实用价值.

参考文献

- Xu J. Overview of research progress in vibration control (in Chinese). Quart Mech, 2015, 36: 547–565 [徐鉴. 振动控制研究进展综述. 力学季刊, 2015, 36: 547–565]
- Tu S, Lu X, Zhu X. Effect of structure parameters on polycal wire rope isolator stiffness-damping characteristics. Shock Vib, 2019, 2019: 1–10

- 3 Li X F. Mechanical Characteristics Analysis and Experimental Study of Wire Rope Vibration Isolator (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xi'an: Xidian University, 2015 [李现粉. 钢丝绳隔振器的力学特性分析与实验研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2015]
- 4 Zhong Z G. Low frequency large damping shock resistant arched stainless steel wire rope vibration isolator (in Chinese). Ship Eng, 1995, 3: 36–38 [钟章贵. 低频大阻尼抗冲击拱型不锈钢钢丝绳隔振器. 船舶工程, 1995, 3: 36–38]
- 5 Cao X Z, Jiang W T, Li Q, et al. Random vibration analysis of vehicle electronic equipment vibration isolation (in Chinese). Yunnan Elec Power Technol, 2018, 46: 68–71 [曹晓政, 姜文涛, 李倩, 等. 车载电子设备隔振的随机振动分析. 云南电力技术, 2018, 46: 68–71]
- 6 Zhu Z H, Li S, Song J C, et al. Experimental research on wire rope vibration isolator of shipboard cabinet (in Chinese). Electron Mech Eng, 2019, 35: 25–28 [朱曾辉, 李舒, 宋骏琛, 等. 舰载机柜钢丝绳隔振器试验研究. 电子机械工程, 2019, 35: 25–28]
- 7 Li J, Feng H J, Zhou X R, et al. Research on the ultimate impact load of GS2 wire rope vibration isolator (in Chinese). Noise Vib Control, 2013, 33: 89–93 [李佳, 冯海军, 周相荣, 等. GS2型钢丝绳隔振器极限冲击载荷研究. 噪声与振动控制, 2013, 33: 89–93]
- 8 Zhan R, Qin J M. Research on impact characteristics of HGGS-200 wire rope vibration isolator (in Chinese). Jiangsu Shipbuild, 2012, 29: 18–20 [詹韧, 秦俊明. HGGS-200型钢丝绳隔振器冲击特性研究. 江苏船舶, 2012, 29: 18–20]
- 9 Liu P P. Research on the Anti-Shock Characteristics of Passive and Semi-Active Vibration Isolation Systems (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019 [刘盼盼. 被动及半主动隔振系统的抗冲击特性研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2019]
- 10 Du J G, Feng J J, Xie Q L, et al. Research on energy consumption characteristics of YGG type steel wire rope vibration isolator under impact load (in Chinese). Noise Vib Control, 2011, 31: 107–114 [杜建国, 冯进技, 谢清粮, 等. 冲击荷载下YGG型钢丝绳隔振器耗能特性研究. 噪声与振动控制, 2011, 31: 107–114]
- 11 Zhao J H, Ding X W, Zhang M M. A shock simulation method and experimental study of a distribution box under flexible installation conditions (in Chinese). J Naval Univ Eng, 2019, 31: 72–76 [赵建华, 丁先威, 张明明. 一种弹性安装条件下配电箱的冲击仿真方法与试验研究. 海军工程大学学报, 2019, 31: 72–76]
- 12 Chen B, Zhang L, Wang Y, et al. An analysis and calculation method of equivalent stiffness of wire rope vibration isolator (in Chinese). Noise Vib Control, 2009, 29: 20–22 [陈斌, 张磊, 汪玉, 等. 钢丝绳隔振器等效刚度的一种分析计算方法. 噪声与振动控制, 2009, 29: 20–22]
- 13 Lu K T. Research on the Impact Mechanics Characteristics of a New Type of Wire Rope Vibration Isolator (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020 [卢凯田. 新型钢丝绳隔振器冲击力学特性研究. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020]
- 14 Gao P, Yan M, Wen Z D, et al. Design and performance analysis of eight-link shock-resistant isolator (in Chinese). Vib Shock, 2019, 38: 231–237 [高鹏, 闫明, 温肇东, 等. 八连杆抗冲击隔离器设计与性能分析. 振动与冲击, 2019, 38: 231–237]
- 15 Bai H B, Huang X Q. Response calculation of hysteretic vibration system composed of dry friction nonlinear damper (in Chinese). Chin J Mech Eng, 1998, 34: 71–76 [白鸿柏, 黄协清. 干摩擦非线性减振器构成的迟滞振动系统的响应计算. 机械工程学报, 1998, 34: 71–76]
- 16 Zhang C H, Lu K T, Zhang L, et al. Summary of research on mechanical properties of wire rope vibration isolators (in Chinese). Chin J Ordn Equipm Eng, 2020, 41: 231–236 [张春辉, 卢凯田, 张磊, 等. 钢丝绳隔振器的力学性能研究综述. 兵器装备工程学报, 2020, 41: 231–236]
- 17 GJB150.18–86. Environmental test methods for military equipment (in Chinese). [GJB150.18–86. 军用设备环境试验方法]
- 18 Li Z Y, Peng Z L, Wen H B, et al. Improved design of floating raft structure and analysis of vibration isolation performance (in Chinese). Noise Vib Control, 2019, 39: 245–249 [李志远, 彭子龙, 温华兵, 等. 浮筏筏体结构改进设计及隔振性能分析. 噪声与振动控制, 2019, 39: 245–249]
- 19 Ren C H, Yang D Q. Vibration isolation performance of cosine-shaped prefabricated hyperbolic beam nonlinear vibration isolator (in Chinese). J Shanghai Jiaotong Univ, 2019, 53: 852–859 [任晨辉, 杨德庆. 余弦形预制双曲梁非线性隔振器的隔振性能. 上海交通大学学报, 2019, 53: 852–859]
- 20 Song J C, Yang C P. Finite element vibration simulation analysis of a ship-borne counterweight cabinet (in Chinese). Radars Countermeas, 2019, 39: 41–45 [宋骏琛, 杨春鹏. 一种舰载型配重机柜的有限元振动仿真分析. 雷达与对抗, 2019, 39: 41–45]
- 21 Huang D D, Wen J J, Xing L L, et al. Study on a nonlinear dynamic model and its parameters determination method for half-sine programmer (in Chinese). J Northwest Polytech Univ, 2019, 37: 1085–1094 [黄德东, 温晶晶, 邢亮亮, 等. 半正弦波发生器的非线性动力学模型及模型参数标定方法研究. 西北工业大学学报, 2019, 37: 1085–1094]
- 22 Cheng S, Zhang D Z, Liu W X, et al. Semi-sine wave pulse generator based on collision-hydraulic principle (in Chinese). Modern Appl Phys, 2018, 9: 52–57 [程帅, 张德志, 刘文祥, 等. 基于碰撞-液压原理的半正弦波脉冲发生装置. 现代应用物理, 2018, 9: 52–57]
- 23 Wang P, Yan M, Zhang C H, et al. Research on impact resistance of hydraulic limit isolation system (in Chinese). Vib, Test Diagn, 2020, 40: 963–

- 968, 1026–1027 [王鹏, 闫明, 张春辉, 等. 液压限位隔离系统的抗冲击性能研究. 振动, 测试与诊断, 2020, 40: 963–968, 1026–1027]
- 24 Huang X, Yan M, Wen Z D, et al. Analysis of evaluation methods for impact resistance of shipborne equipment isolators (in Chinese). Machinery, 2016, 43: 9–13 [黄鑫, 闫明, 温肇东, 等. 舰载设备用隔离器抗冲击性能评价方法分析. 机械, 2016, 43: 9–13]
- 25 Gao P, Yan M, Wen Z D, et al. Design and performance analysis of eight-link shock-resistant isolator (in Chinese). Vib Shock, 2019, 38: 231–237 [高鹏, 闫明, 温肇东, 等. 八连杆抗冲击隔离器设计与性能分析. 振动与冲击, 2019, 38: 231–237]

Experimental study on mechanical properties of new biaxial compression wire rope isolator

ZHANG ChunHui¹, LU KaiTian^{2*}, ZHANG Lei¹, YAN Ming³ & ZHANG Yi²

¹ Naval Research Institute, Beijing 100161, China;

² Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China;

³ School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China

Wire rope isolator is widely used in the field of vibration isolation and shock resistance of naval equipment. To overcome the shortcomings of the poor tensile performance of the traditional wire rope isolator, a new biaxial compression wire rope isolator was designed, and the performance characteristics of the new biaxial compression wire rope isolators and spherical wire rope isolators were tested using vibration and shock test methods. By conducting a comparative experiment, the characteristics of the performance difference are studied. The frequency sweep test results show that the resonance peak of the spherical wire rope isolator is larger than that of the new one at the natural frequency. The fixed frequency test finds that the vibration performance of the new and the spherical wire rope isolator is not much different under different working conditions. The shock test results show that the shock isolation rate of the new biaxial compression wire rope isolator is above 82.5%, and the shock isolation rate in all working conditions is greater than that of the spherical wire rope isolation system, which effectively improves the tensile performance of the spherical wire rope isolator. The new biaxial compression wire rope isolator further improves the shock resistance of the vibration isolator on the basis of maintaining the original vibration isolation effect of the spherical wire rope isolator.

new wire rope isolator, spherical wire rope isolator, biaxial compression, shock isolation

PACS: 05.45-a, 46.40.-r

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0380](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0380)