

面向海水泵的宽频环状超结构隔振器力学设计及试验

刘海平^{1,2} 王哲¹ 周诗坤¹ 郑莉芳¹

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

(2. 北京科技大学 顺德创新学院, 佛山 528399)

摘要: 针对海水泵工作过程中的旋转振动问题,结合实测振动特性,基于准零刚度隔振原理和超结构带隙特征设计了准零刚度环状超结构隔振器用于振动控制。首先,以典型海水泵为研究对象,以一体化准零刚度结构为基础,提出了环状超结构隔振器的结构方案。然后,分别采用有限元法和理论法建立了准零刚度单胞、一维准零刚度超结构、准零刚度环状超结构隔振器的模型,计算并分析了其静、动态力学特性,并评估了其对海水泵输出振动的隔振效果。计算分析及试验结果表明,准零刚度环状超结构隔振器可在低频构建多个带隙,对海水泵典型频率的振动控制效果显著。

关键词: 一体化准零刚度; 宽频隔振; 超结构; 环状隔振器; 旋转机械

中图分类号: TH312; TB383 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.09.018

0 引言

水下航行器作为探索海洋资源的重要装备之一,为推动海洋强国发展提供基础支撑。其中,水下航行器的声振特征是决定其工作性能的核心指标。水下航行器中广泛使用的海水泵等旋转机械是主要声振源之一^[1]。受制造装配误差、运转磨损及变形等影响,转子出现不平衡或转轴弯曲,进而引发海水泵产生强烈振动^[2]。因此,对海水泵开展声振控制,是提升水下航行器技术指标的必要保障。

为解决旋转机械的振动问题,ABBASI等^[3]提出了“高静低动”隔振器,通过多目标优化实现转子系统力传递率减少29%、隔振器静态承载能力提升25%的目标。路凯华等^[4]采用整体式挤压油膜阻尼器实现了对滑动轴承转子系统不平衡振动的有效控制。LI等^[5]采用压电陶瓷驱动构建了一种基于挤压油膜阻尼的主动凹槽补偿空气静压止推轴承,使得振动幅值显著减小。YAN等^[6]针对压缩机多盘转子系统不平衡引起的振动,提出了一体化高阻尼的整体阻尼轴承方案,可显著抑制转子系统不同工况引起的振动。刘明利等^[7]采用环状调谐质量阻尼器对核电厂大型立式泵组的振动实施了有效控制。此外,非线性吸振器也被引入旋转机械减振领域。SU等^[8]提出了采用负刚度动力吸振器控制推进轴系的纵向振动。DOU等^[9]采用了永磁体构建非线性能量阱对转子系统扭转振动的减振效率可达65.37%。GUO等^[10]采用环状非线性吸振器,实现了

对转子振动的有效控制;ZHANG等^[11]提出了一种可满足不同边界条件环状圆柱壳宽频减振需求的圆周分布楔形锥体结构。虽然上述研究已实现转子振动的有效控制,但是受限于结构复杂、体积大、工作频率不可变、或仅给出理论方案等因素的影响,难以推广应用。

利用一体化结构的变形特征构建准零刚度隔振器,不仅可实现低频宽带隔振,而且结构紧凑便于工程应用。DALELA等^[12]采用底部加筋余弦梁结构实现准零刚度特征。XU等^[13]采用拓扑优化方法提出具备“轻量化、高承载、低刚度”特征的不同类型准零刚度隔振器。丁伯森等^[14]重点研究不同类型冲击激励下,一体化准零刚度隔振器的抗冲击性能及关键几何参数的影响。HOU等^[15]针对准零刚度隔振器不同组合方式对其宽频减振效果的影响展开研究,并发现串联安装方式影响显著。LIU等^[16]提出一种变截面一体化准零刚度隔振器,通过与等截面一体化准零刚度隔振器、传统线性隔振器对比发现,所提方案的低频减振效果更好。为了进一步拓宽适用范围并提升其减振性能,科研人员探索将准零刚度结构低频宽带特征和具有超常物理特性的人工超结构相结合,提出新型减振隔振方法。YANG等^[17]针对水下航行器水声监测设备提出准零刚度超结构实现高性能减振。LIN等^[18]提出一种局域共振型准零刚度超结构,通过优化设计将其低频带隙拓宽465%。SHU等^[19]通过在准零刚度超结构表面粘贴压电薄膜实现低频宽带减振和能量收集。

综上所述,小型化、高稳定性、低频段宽带化是旋

收稿日期: 2025-05-05

基金项目: 北京市自然科学基金-怀柔创新联合基金项目(L245008)

作者简介: 刘海平,男,1982年生,山西吕梁人,博士,教授; 主要研究方向为振动噪声预测及智能控制新理论、新方法; E-mail: liuhaiping@ustb.edu.cn。

引用格式: 刘海平,王哲,周诗坤,等. 面向海水泵的宽频环状超结构隔振器力学设计及试验[J]. 机械强度,2025,47(9):190-196.

LIU Haiping, WANG Zhe, ZHOU Shikun, et al. Mechanical design and test of a broadband ring meta-structure isolator for seawater pump[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(9):190-196.

转机械振动控制始终追求的目标。结合海水泵输出振动特性和结构特点,本文提出一种准零刚度环状超结构隔振器(简称“隔振器”),采用数值仿真、理论建模、试验方法开展分析评价。相关研究可为后续工程应用提供参考和技术基础。

1 准零刚度环状超结构隔振器

1.1 安装方式

海水泵进水口和出水口通过法兰与输水管道连接,如图 1 所示。本文提出在海水泵进、出水口与输水管道之间安装隔振器,以减少传递到输水管道的振动。法兰 1 和橡胶阻尼环通过螺栓与海水泵出水口或进水口相连,法兰 2 通过螺栓与输水管道连接;隔振器内环安装在法兰 2 上,并通过限位环 2 进行限位;隔振器外环与法兰 1 连接,并通过限位环 1 进行限位;法兰 2 与法兰 1 之间安装密封圈,防止流体泄漏。从安装方式,本文提出的隔振器主要控制海水泵的径向振动,轴向振动则采用橡胶阻尼圈隔离。

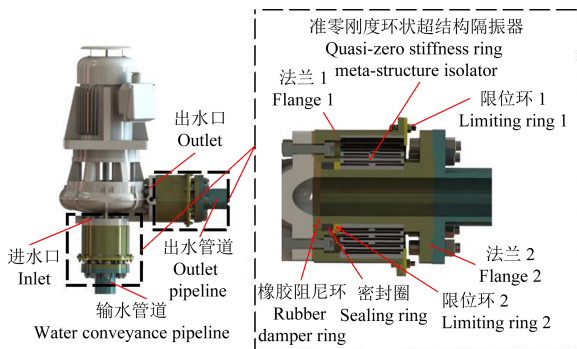


图 1 安装隔振器的海水泵输水系统

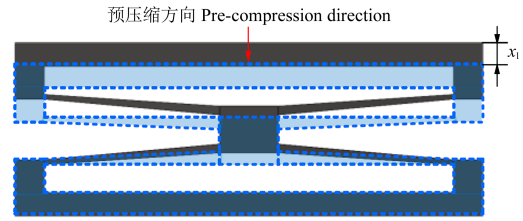
Fig. 1 Water delivery system of seawater pump with isolator

1.2 结构设计

隔振器由多个准零刚度单胞(简称“单胞”)构成,单胞结构需要施加预压缩才能达到准零刚度状态,单胞构型如图 2 所示。图 2 中,实线黑色区域为单胞原始状态,虚线蓝色区域为单胞准零刚度状态。其中, x_1 为单胞达到准零刚度状态的预压缩量; a 为外壁长度; b 为内壁长度; h_1 为外壁高度; t_1 为倾斜壁靠近外壁侧厚度; t_0 为倾斜壁靠近内壁侧厚度; d 为倾斜壁水平长度; s 为倾斜壁竖直高度; h_c 为底部框架厚度; h_e 为中心质量高度; c_1 为倾斜壁初始宽度; c_2 为倾斜壁内侧宽度。

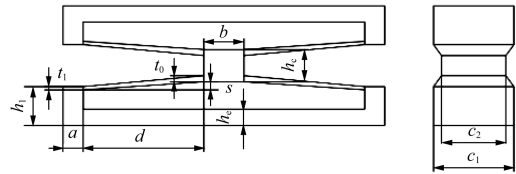
将单胞沿垂直方向阵列构成一维超结构,再将一维超结构沿周向阵列构成隔振器,如图 3 所示。可见作为一类典型的非线性准零刚度隔振器,需要将隔振器压缩至刚度近似为零的平衡位置才能达到工作状态。隔振器初始状态外环保持分开,通过环形结构限位方式,隔振器沿径向受到预压缩载荷,从而达到工作状态。

所提单胞结构的具体设计参数如表 1 所示,选用材料为 60Si2Mn 弹簧钢。



(a) 示意图

(a) Schematic diagram



(b) 结构图

(b) Structural diagram

图 2 单胞构型

Fig. 2 Unit cell configuration

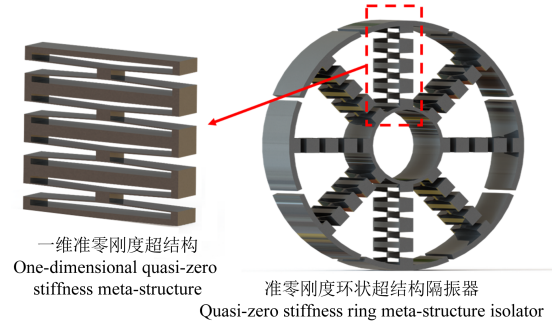


图 3 隔振器结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of isolator

表 1 单胞结构参数

Tab. 1 Structural parameters of the unit cell

a	b	c_1	c_2	d	h_1	h_e	h_c	t_1	t_0	s
10	10	20	16	45	9.6	4	8	0.8	1	1.2

利用 Ansys WorkBench 有限元软件建模并分析单胞及一维超结构的静力学特性,分别在准零刚度胞元与一维准零刚度超结构底部施加固定约束,在顶部添加垂直向下的位移载荷,如图 4、图 5 所示。

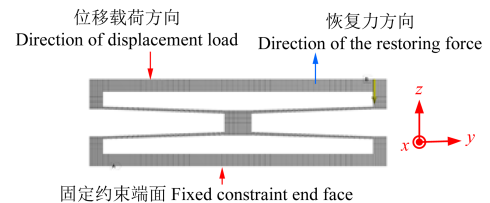


图 4 准零刚度单胞有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the quasi-zero stiffness unit cell

单胞结构与一维准零刚度超结构的恢复力与预压缩方向相反,恢复力-位移曲线、刚度-位移曲线分别如图 6、图 7 所示。可见,单胞和一维超结构均呈准零刚度特性,且一维超结构的准零刚度位移范围更宽。同时,一维超结构在平衡位置的刚度更小,说明相同工况下,一维超结构较单胞结构稳定性与力学性能更好。

在此基础上,建立隔振器有限元模型。首先,在 8

个一维超结构外环面沿径向施加预应力,保证所有单胞达到准零刚度状态;接着,在内环沿径向施加位移载荷,提取内环运动时的约束反力,得到相应的恢复力-位移曲线、刚度-位移曲线,分别如图8、图9所示。

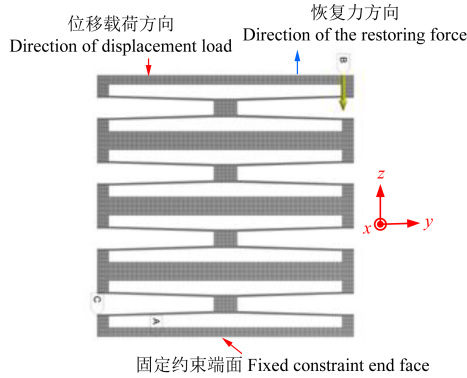


图5 一维准零刚度超结构有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the one-dimensional quasi-zero stiffness meta-structure

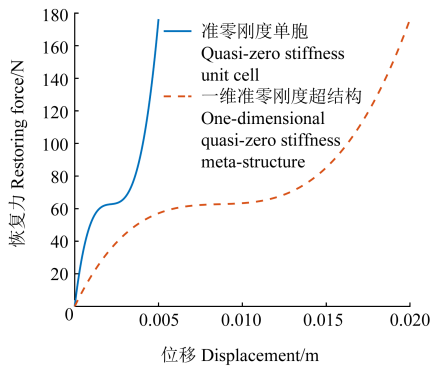


图6 准零刚度单胞与一维准零刚度超结构的恢复力-位移曲线

Fig. 6 Restoring force-displacement curves of the quasi-zero stiffness unit cell and one-dimensional quasi-zero stiffness meta-structure

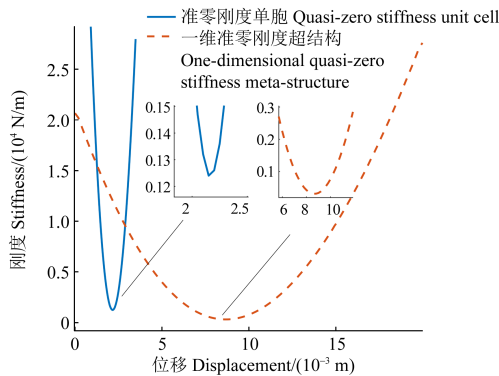


图7 准零刚度单胞与一维准零刚度超结构的刚度-位移曲线

Fig. 7 Stiffness-displacement curves of the quasi-zero stiffness unit cell and one-dimensional quasi-zero stiffness meta-structure

可见内环运动过程中隔振器呈低刚度特征,但由于受多个一维超结构之间的耦合作用影响,准零刚度特征被削弱。

1.3 静态稳定性分析

建立隔振器输水管道部分结构有限元模型,包括:隔振器、法兰2、输水管道。法兰2、输水管道均采用304不锈钢,为模拟输水管道的实际安装形式,在输

水管道距离法兰面1 m处的端面添加固定约束;其余连接位置为绑定约束;在隔振器外环沿径向施加位移约束,模拟法兰1对隔振器外环面施加的预应力,使其达到工作状态;沿Y轴方向添加重力场,进行静力学分析。

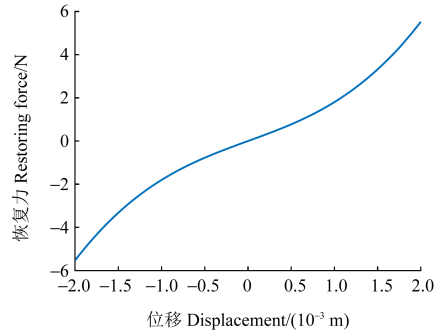


图8 隔振器的恢复力-位移曲线

Fig. 8 Restoring force-displacement curve of the isolator

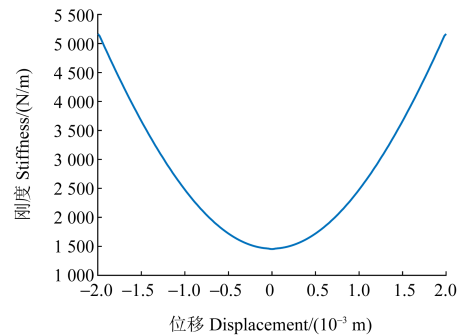


图9 隔振器的刚度-位移曲线

Fig. 9 Stiffness-displacement curve of the isolator

计算得到隔振器连接部分的应力分布如图10所示。由图10可知,最大应力为392 MPa,小于材料屈服强度。因此,海水泵、隔振器和输水管道连接可靠。图11表明,在受载条件下,法兰2的最大变形约为 3.7×10^{-4} m,出现在其左端,说明法兰2与海水泵出水口的对中性及隔振器静态稳定性均较好。

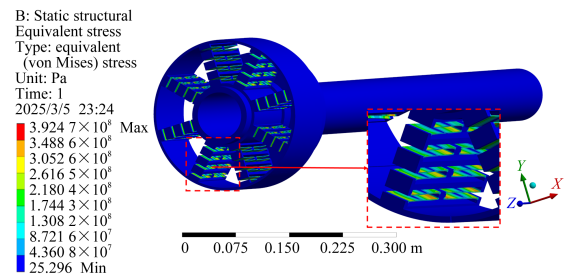


图10 安装隔振器连接部分应力分布云图

Fig. 10 Stress distribution nephogram of the connection part with isolator

2 隔振器力学性能设计及分析

2.1 隔振器传递特性

2.1.1 带隙特性

由于隔振器是由多个一维超结构沿周向阵列得到,所以隔振器的径向振动沿一维超结构排列方向衰

减。图 12(a)为一维超结构的几何结构,左侧红色虚线框内为单胞, m_1 、 m_2 分别为框架和中间质量, m_k 为倾斜梁质量。将一维超结构等效为集总弹簧-质量模型 [图 12(b)], k 为单胞结构刚度, L 为单胞沿阵列方向长度,即晶格常数。

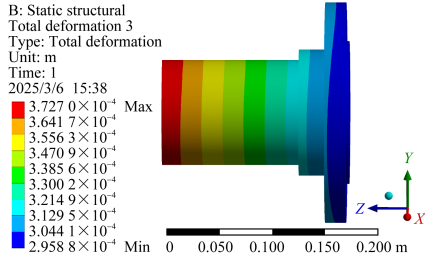


图 11 法兰 2 变形云图

Fig. 11 Deformation nephogram of the flange 2

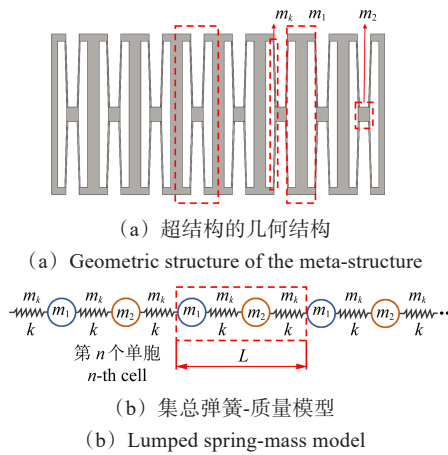


图 12 一维超结构

Fig. 12 One-dimensional meta-structure

多数超结构的等效集总弹簧-质量模型仅考虑弹性元件的刚度特性,忽略其质量特性,导致计算结果与实测数据偏差较大。根据参考文献[20],考虑倾斜梁质量,一维超结构的色散关系为

$$\omega_{1,2}^2 = \left(3 \{ 3km_1 \pm \sqrt{3k \sqrt{m_1^2 - m_1m_2 + m_2^2 + m_1m_2 [2 + 2\cos(qL)]} + 3km_2 + 4km_k - km_k [2 + 2\cos(qL)]} \} / \{ 9m_1m_2 + 6m_1m_k + 6m_2m_k - m_k^2 [2 + 2\cos(qL)] + 4m_k^2 \} \right) \quad (1)$$

式中, q 为波数。

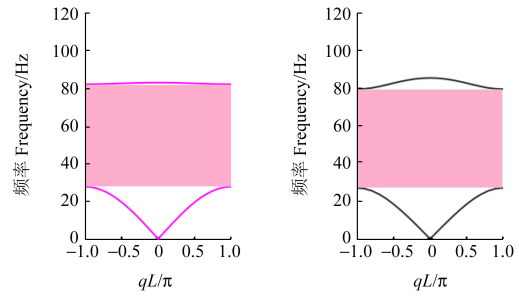
分别利用理论法和有限元法计算得到一维超结构的色散曲线,如图 13 所示。由图 13 可知,理论模型所得带隙频率为 27.72~82.12 Hz,带宽为 54.40 Hz;有限元模型所得带隙频率为 27.15~79.55 Hz,带宽为 52.40 Hz。最大误差为 3.68%,一致性良好。

2.1.2 加速度传递率

利用前文所建隔振器的有限元模型,输入加速度激励,提取内环面频响结果,可得到绝对加速度响应幅值为

$$A = \sqrt{(a_0 + a_r)^2 + a_i^2} \quad (2)$$

式中, a_0 为输入加速度激励幅值; a_r 为相对加速度响应实部; a_i 为相对加速度响应虚部。



(a) 理论结果

(b) 仿真结果

(a) Theoretical result

(b) Simulation result

图 13 色散曲线

Fig. 13 Dispersion curves

加速度传递率为

$$T_a = 20 \lg \left(\frac{A}{a_0} \right) \quad (3)$$

计算得到的加速度传递率如图 14 所示。由图 14 可知,隔振器在 28.6~48.5 Hz、70.8~168 Hz、176.5~445 Hz 频率范围均存在带隙。另外,内环运动沿径向受到各一维超结构耦合作用影响,导致隔振器和一维超结构的带隙特征图 13 差别较大。

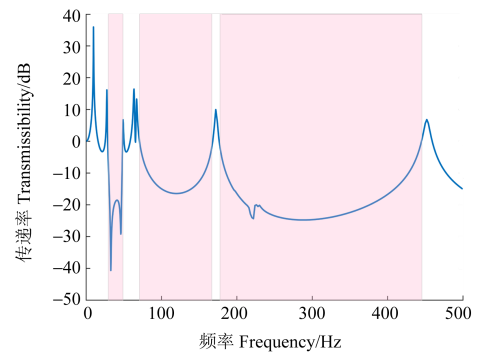


图 14 隔振器传递率曲线

Fig. 14 Transmissibility curves of the isolator

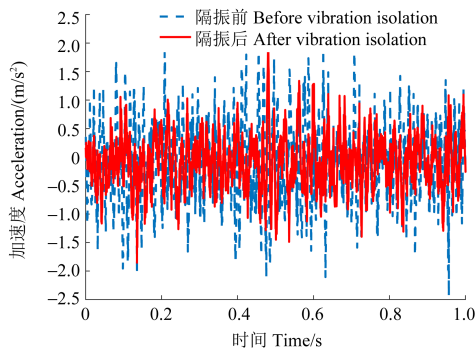
2.2 海水泵振动抑制效果分析及评估

将海水泵实测振动数据作为输入,分析评价隔振器对海水泵进、出水口径向振动的抑制效果。首先,分别在 8 个一维超结构外环面沿径向施加预应力,使所有单胞结构达到静平衡状态。然后,将海水泵出水口的振动数据作为输入。最后,计算得到内环面径向的时域响应,如图 15 所示。

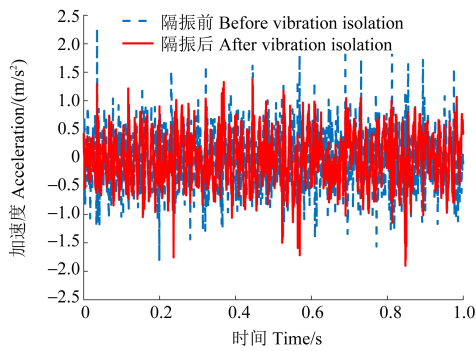
为评价隔振器的减振效果,计算出水口隔振前、后的加速度频响曲线如图 16 所示。由图 16 可知,隔振后系统响应分别在 11.1、26.3、60.7 Hz 附近出现谐振峰。并且对 45.5、86、209 Hz 附近的振动响应衰减明显,这与隔振器传递率变化规律基本一致。

将海水泵进水口的振动数据作为输入,采用相同方法,计算得到隔振器内环面径向时域响应,如图 17 所

示。由图 17 可知,隔振后的时域响应均有明显衰减。



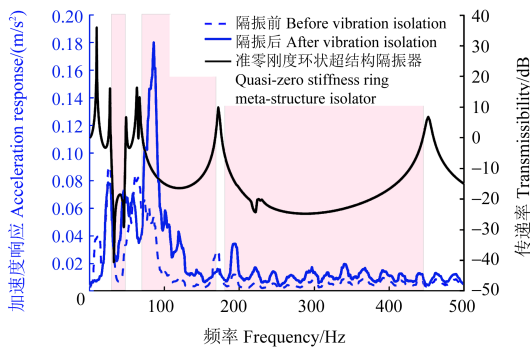
(a) Y轴方向
(a) Y-axis direction



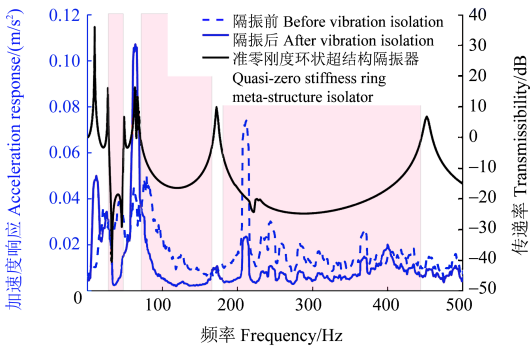
(b) Z轴方向
(b) Z-axis direction

图 15 出水口时域响应曲线

Fig. 15 Time-domain response curves of the water outlet



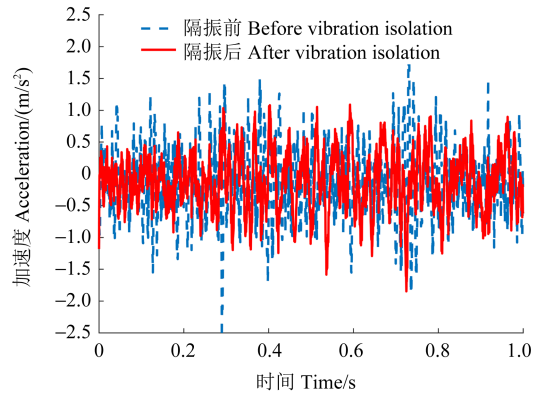
(a) Y轴方向
(a) Y-axis direction



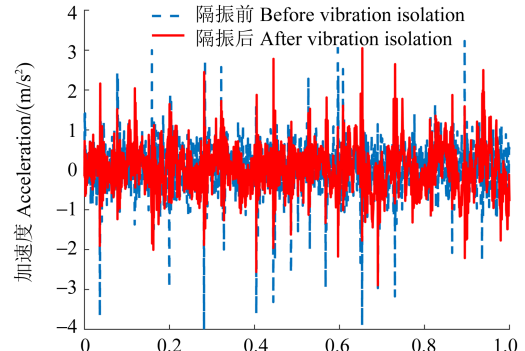
(b) Z轴方向
(b) Z-axis direction

图 16 出水口频域响应曲线

Fig. 16 Frequency-domain response curves of the water outlet



(a) Y轴方向
(a) Y-axis direction



(b) Z轴方向
(b) Z-axis direction

图 17 进水口时域响应曲线

Fig. 17 Time-domain response curves of the water inlet

进水口隔振前和隔振后的加速度频响曲线,如图 18 所示。由图 18 可知,隔振后系统响应在 10、26、64 Hz 附近出现谐振峰;并且,对 46、84、248 Hz 附近的振动衰减比较明显,这与隔振器传递率变化规律基本一致。

3 试验研究

3.1 测试系统

为验证前述隔振器方案、理论模型及数值仿真结果的正确性,搭建隔振器动力学测试系统(图 19),主要包括:隔振器、激振器、加速度传感器、信号发生器、功率放大器、数据采集卡、计算机等。隔振器采用悬吊方式并维持水平,保持质心高度与激振器输出位置一致。通过激振器顶杆与隔振器外环连接,并分别在激振器顶杆输出位置和隔振器内环面粘贴加速度传感器,以实测输入和输出的加速度信号。

3.2 传递率

通过激振器施加扫频信号,扫频范围 0~100 Hz,扫频时间为 500 s,输入电压的峰峰值为 20 mV,采样频率为 256 Hz,实测隔振器径向加速度传递率,如图 20 所示。由图 20 可知,隔振器加速度传递率在 31~67 Hz、77~100 Hz 频率范围存在明显带隙,可以对

径向振动实现衰减。但是,由于加工制造误差,实测数据与仿真结果存在一定误差。总体而言,二者曲线

变化趋势基本一致,证明所提隔振器方案有效,并可实现低频带隙。

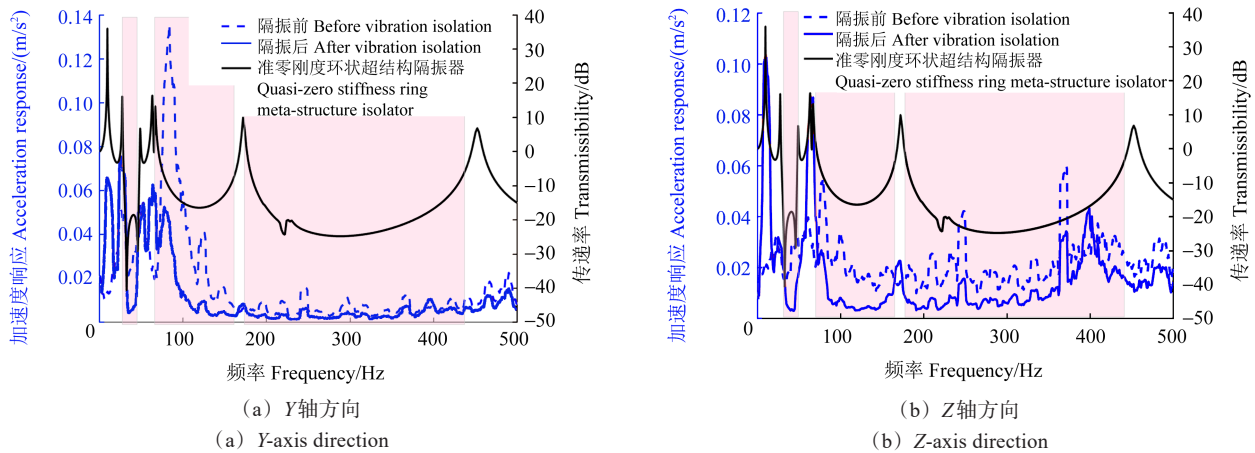


图 18 进水口频域响应曲线

Fig. 18 Frequency-domain response curves of the water inlet

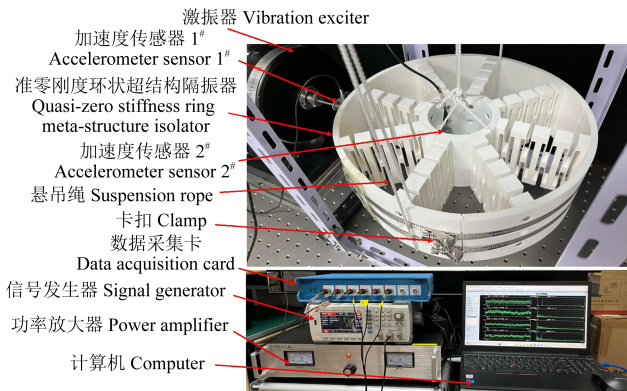


图 19 隔振器动力学测试系统

Fig. 19 Dynamic testing system of the isolator

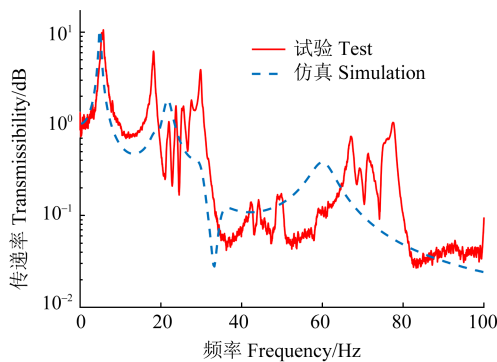


图 20 加速度传递率曲线

Fig. 20 Transmissibility curves of the acceleration

4 结论

以抑制海水泵旋转振动为目标,提出了一种准零刚度环状超结构隔振器,通过理论建模、数值仿真和试验验证,得到如下主要结论:

1)对比单胞、一维超结构和隔振器的恢复力-位移和刚度-位移曲线,一维超结构准零刚度范围比单胞大,且平衡位置附近刚度更小。另外,隔振器的刚

度也较小。

2)结合理论计算结果和有限元仿真数据,认为一维超结构的色散曲线与传递率曲线呈现的带隙特征吻合度较好。

3)采用海水泵实测振动数据,结合所建模型,分析发现,隔振器对海水泵出水口在Y方向和Z方向的隔振率分别为29.88%、8.73%;对海水泵进水口在Y方向、Z方向的隔振率分别为20.02%、8.82%,对带隙内振动有明显衰减效果。

4)试验表明,隔振器实测传递率曲线与仿真结果变化趋势基本一致,且存在多个带隙。

参考文献 (References)

- [1] 华丽娟,吴英友,周复涛,等. 水下航行器螺旋桨降噪技术研究进展[J]. 广东造船,2022,41(6):40-42.
HUA Lixian, WU Yingyou, ZHOU Futao, et al. Research on noise reduction technology of underwater vehicle propeller [J]. Guangdong Shipbuilding, 2022, 41(6): 40-42. (In Chinese)
- [2] 苏常伟,梁冉,王雪仁,等. 水下航行器线谱振动噪声研究进展[J]. 舰船科学技术,2023,45(9):1-8.
SU Changwei, LIANG Ran, WANG Xueren, et al. Research progress of line spectrum vibration and noise of underwater vehicle [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(9): 1-8. (In Chinese)
- [3] ABBASI A, KHADEM S E, BAB S, et al. Vibration control of a rotor supported by journal bearings and an asymmetric high-static low-dynamic stiffness suspension [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 85(1): 525-545.
- [4] 路凯华,耿斌斌,何立东,等. 基于ISFD的滑动轴承转子系统不平衡振动抑制研究[J]. 机电工程,2023,40(11):1768-1775.
LU Kaihua, GENG Binbin, HE Lidong, et al. Unbalanced vibration suppression of sliding bearing rotor system with integral squeeze film damper [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(11): 1768-1775. (In Chinese)
- [5] LI J, HUANG J F, HAN S C, et al. A novel active recess compensation aerostatic thrust bearing with hermetic squeeze film damper:

- theoretical and experimental investigation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 224: 112207.
- [6] YAN W, WU B W, PAN J B, et al. Design and evaluation of integral damping bearing for vibration suppression in multi-disk rotor systems[J]. *Machines*, 2024, 12(12): 883.
- [7] 刘明利, 张辉仁, 夏莹沛, 等. 一种用于核电大型立式泵组振动治理的新方法[J]. *核科学与工程*, 2024, 44(1): 168-179.
LIU Mingli, ZHANG Huiren, XIA Yingpei, et al. A new method for vibration control of large vertical pumps in nuclear power plant [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2024, 44(1): 168-179. (In Chinese)
- [8] SU Z W, ZHENG Z W, HUANG X C, et al. Research on dynamic vibration absorber with negative stiffness for controlling longitudinal vibration of propulsion shafting system [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112375.
- [9] DOU J X, YAO H L, CAO Y B, et al. Permanent magnet based nonlinear energy sink for torsional vibration suppression of rotor systems[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2023, 149: 104321.
- [10] GUO H L, CAO Z W, YANG T Z, et al. A variable-thickness-arch based nonlinear vibration absorber for rotor-bearing systems [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 224: 111979.
- [11] ZHANG S, DING L Z, WU X W, et al. Broadband vibration reduction of cylindrical shell structures with circumferential taper scatters [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, 599: 118853.
- [12] DALELA S, PRASAD P, BALAJI P S, et al. A novel bottom reinforced cosine beam based metastructure with quasi zero stiffness characteristics for vibration isolation applications [J]. *Structures*, 2024, 67: 106950.
- [13] XU Y Q, DONG H W, WANG Y S. Topology optimization of programable quasi-zero-stiffness metastructures for low-frequency vibration isolation [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 280: 109557.
- [14] 丁伯森, 刘海平, 朱冬梅. 设计参数对一体化准零刚度隔振器冲击隔离性能的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2024, 46(4): 159-168.
DING Bosen, LIU Haiping, ZHU Dongmei. Influences of design parameters on shock isolation performance of integrated quasi-zero stiffness isolator [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, 46(4): 159-168. (In Chinese)
- [15] HOU S, WEI J Z, SUI G D, et al. Effects of series sequence on the nonlinear dynamic responses of integrated quasi-zero stiffness isolators[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2025, 113(11): 12661-12691.
- [16] LIU H P, ZHOU S K, WANG Y, et al. Effects of section configurations on the dynamic responses of an integrated quasi-zero isolator [J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 197: 111617.
- [17] YANG Y H, SUN Q D, XU S F, et al. Design, analysis, and testing of a metamaterial vibration isolator for hydrophone equipped on autonomous underwater vehicles [J]. *Polish Maritime Research*, 2025, 32(1): 121-128.
- [18] LIN Q D, ZHOU J X, QUQA S, et al. Harnessing quasiperiodic pattern to widen the low-frequency band gap of quasi-zero-stiffness metamaterials[J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 214: 113393.
- [19] SHU Y Q, WANG K, CHEN T T, et al. A quasi-zero-stiffness metastructure for concurrent low-frequency vibration attenuation and energy harvesting [J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 214: 113371.
- [20] LIU X, CHEN S, WANG B, et al. A compact quasi-zero-stiffness mechanical metamaterial based on truncated conical shells [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 277: 109390.

Mechanical design and test of a broadband ring meta-structure isolator for seawater pump

LIU Haiping^{1,2} WANG Zhe¹ ZHOU Shikun¹ ZHENG Lifang¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Shunde Innovation School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 528399, China)

Abstract: Addressing the rotational vibration issues encountered during the operation of seawater pumps, and integrating measured vibration characteristics, a quasi-zero stiffness ring meta-structure isolator was designed for vibration control based on the principles of quasi-zero stiffness isolation and the bandgap features of meta-structure. First of all, taking a typical seawater pump as the research object and based on an integrated quasi-zero stiffness structure, a structural design scheme of the ring meta-structure isolator was proposed. Then, models of quasi-zero stiffness unit cell, one-dimensional quasi-zero stiffness meta-structure and quasi-zero structure ring meta-structure isolator were established using finite element method and theoretical method, respectively. Their static and dynamic mechanical characteristics were calculated and analyzed, and their isolation effect on the output vibration of seawater pumps was evaluated. The calculation and test results show that the quasi-zero stiffness ring meta-structure isolator provides multiple bandgaps at low frequencies, and exhibits significant vibration suppression effects on typical frequencies of seawater pumps.

Key words: Integrated quasi-zero stiffness; Broadband vibration isolation; Meta-structure; Ring isolator; Rotating machinery

Corresponding author: LIU Haiping, E-mail: liuhaiping@ustb.edu.cn

Fund: Beijing Natural Science Foundation-Huairou Innovation Joint Fund Project (L245008)

Received: 2025-05-05