

庞森,姜子航,刘可宁,等.负刚度NES减震器抗震性能有限元分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):25-34.
doi:10.11956/j.issn.1008-0562.20240112

PANG Sen, JIANG Zihang, LIU Kening, et al. Finite element analysis of seismic performance of negative stiffness NES shock absorbers[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(1): 25-34. doi: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240112

负刚度NES减震器抗震性能有限元分析

庞森¹, 姜子航¹, 刘可宁², 吴圆圆²

(1. 北京中建建筑科学研究院有限公司, 北京 100076; 2. 东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 为拓宽非线性能量阱 (nonlinear energy sink, NES) 的频率变化范围, 基于负刚度原理, 通过预压弹簧构造负刚度系统, 设计水平向的负刚度NES减震器。利用ABAQUS有限元软件对负刚度NES减震器进行数值模拟, 在导杆无摩擦且弹簧不发生侧向屈曲的状态下, 分析弹簧行程长宽比、预压缩量、刚度和阻尼比对负刚度NES减震器抗震性能的影响。研究表明: 在固定弹簧行程长宽比的条件下, 增加弹簧的预压缩量, 可提高减震器的抗震性能; 在固定弹簧预压缩量的条件下, 随着弹簧行程长宽比的增大, 减震器的承载力逐渐减小, 抗震性能下降; 弹簧刚度和阻尼比的增加可显著增大减震器的承载力, 提高抗震性能。研究结果为负刚度NES减震器的工程应用提供参考。

关键词: 被动控制系统; NES减震器; 负刚度; 滞回曲线; 抗震性能

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)01-0025-10

Finite element analysis of seismic performance of negative stiffness NES shock absorbers

PANG Sen¹, JIANG Zihang¹, LIU Kening², WU Yuanyuan²

(1. Beijing Zhongjian Building Research Institute Company Limited, Beijing 100076, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to broaden the frequency variation range of nonlinear energy sink (NES), based on the principle of negative stiffness, a negative stiffness system is constructed by pre-compression springs, and a horizontal negative stiffness NES shock absorber is designed. Numerical simulation of negative stiffness NES shock absorber using ABAQUS finite element software to analyze the effects of length-width ratio of spring stroke, pre-compression, stiffness and damping ratio on the seismic performance of negative stiffness NES shock absorber in the state of no friction on the guide rod and no lateral buckling of the spring. The results show that increasing the pre-compression of the spring can improve the seismic performance of the shock absorber under the condition of fixed length-width ratio of spring stroke; under the condition of fixed spring pre-compression, as the length-width ratio of spring stroke increases, the bearing capacity of the shock absorber gradually decreases, and the seismic performance decreases. The increase in spring rate and damping ratio can significantly increase the bearing capacity of the shock absorber and improve the seismic performance. The research results provide a reference for the engineering application of negative stiffness NES.

Key words: passive control systems; NES shock absorbers; negative stiffness; hysteresis curves; seismic performance

0 引言

非线性能量阱 (nonlinear energy sink, NES)

是一种具有非线性刚度的吸振器, 具有宽频、吸振、耗能能力强等特点, 可吸收和耗散主结构的能量, 既可用于航空航天、建筑、机械等领域的

收稿日期: 2024-04-28 修回日期: 2024-06-02 接受日期: 2024-06-13 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家级大学生创新训练项目 (202310225037); 中建集团研发青年项目 (CSCEC-2022-Q-43)

作者简介: 庞森 (1989-), 男, 北京人, 博士, 工程师, 主要从事建筑健康诊治与绿色低碳方面的研究。E-mail: pang.sn@qq.com

结构减振,也可用于各种隔震结构。

GENDELMAN 等^[1]、VAKAKIS 等^[2]将两个非线性振子耦合成一个振动系统,由理论分析研究靶能量传递现象并提出了 NES。GENDELMAN 等^[3-4]最早提出立方刚度 NES 的实现方法,并研究了多项式刚度和非多项式刚度 NES 靶向能量的传递规律。YAO 等^[5]提出分段线性刚度 NES 的构造方法,并通过扫频试验验证了在中等大小的激励下,分段线性刚度 NES 的减振效果较好。WEI 等^[6]将立方刚度 NES 与冲击 NES 组合形成并联 NES,并通过周期性激励试验证明了并联 NES 的靶向能量传递更高效。WU 等^[7]通过数值模拟发现,当未发生碰撞时,新型振动冲击立方 NES 的性能与立方刚度 NES 一致;当发生碰撞时,新型振动冲击立方 NES 在不动点方面的鲁棒性更好。姚红良等^[8]利用遗传算法对分段线性刚度 NES 进行参数优化,研究表明,在宽频激励下,优化后的分段线性刚度 NES 能有效减小振幅,振动抑制效果较好。张运法等^[9-10]通过复变量平均法得到耦合式组合刚度 NES 系统的慢变方程,提出组合式非线性阻尼 NES,并通过能量谱法研究阻尼比及刚度对振动抑制效果的影响,结果表明组合式非线性阻尼 NES 的减振效果较好。尽管 NES 对频率表现出较好的鲁棒性,但需要一定的能量才能激发靶能量传递,能量过大或过小均会削弱 NES 的减振性能。给定参数的条件下,在 NES 中引入负增量刚度可形成负刚度 NES,表现为载荷下降时,刚度元件的变形增大^[11-13],减振效率提高。LEMURA 等^[14]采用可变阻尼器,通过拟负刚度算法及数值模拟,分析斜拉桥被动和半主动控制的有效性。LI 等^[15]研究了负刚度对非线性调谐惯性阻尼器(TNSID)性能的影响,并通过参数优化提高负刚度的稳定性以及对能量的敏感度。王珏等^[16]提出三种含负刚度的惯容减振系统(N-ISD),并分别进行解析优化和减振效果分析,研究表明引入负刚度能有效减小结构的动力放大系数,增强 N-ISD 的减振效果。郜辉等^[17-18]基于单自由度结构-调谐负刚度阻尼器(TNSD)耦合系统,推导 TNSD 最优负刚度系数和最优阻尼系数设计公式,并通过数值分析研究 TNSD 对隔震结构耗能性能的影响,研究表明 TNSD 可进一步增强负刚度阻尼器对结构的减振效果。孙天威等^[19-20]对具有负刚度特征的半周负刚度摩擦阻尼装置开展振动台试验,研究表明半周负刚度摩擦阻尼装置可实现结构的位移及加速度响应双重控制,振动控制效果较好。

在减震装置中引入负刚度,可减小结构刚度,增大结构阻尼,即使在低能量输入的情况下,也能发挥减震作用。但上述研究中的负刚度装置主要用于隔震结构,较少用于耗能减震装置,且负刚度的实现也较为复杂和困难。本文在 NES 中引入水平“X”型弹簧作为负刚度元件,利用预压弹簧实现负刚度,在振动过程中输出与变形方向相同但与变形量成反比的控制力,从而构造一种新型负刚度 NES 减震器,使其频率覆盖 0~20 Hz 低频段,减震频带更宽,共振频率更低。利用 ABAQUS 软件建立有限元模型,对负刚度 NES 减震器进行数值模拟,研究弹簧行程长宽比、预压缩量、刚度和阻尼比对负刚度 NES 减震器抗震性能的影响,为 NES 的研发与设计提供参考。

1 理论分析

引入负刚度的减震器滞回模型见图 1。

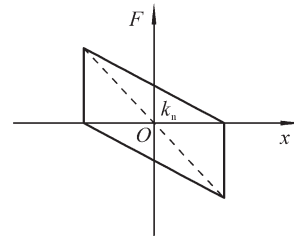


图1 引入负刚度的减震器滞回模型

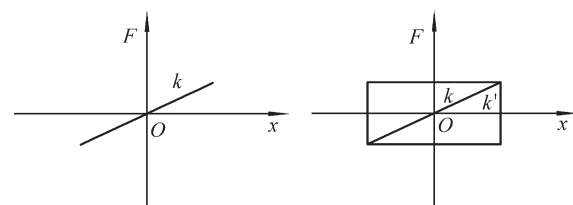
Fig.1 hysteresis model of shock absorber with negative stiffness introduced

减震器提供负刚度控制力 F , 即

$$F = c\dot{x}(t) + k_n x(t), \quad (1)$$

式中: c 为减震器的阻尼; x 为减震器随时间 t 的位移; k_n 为减震器的刚度, $k_n < 0$ 。

主体结构刚度及耦合减震器系统的滞回曲线见图 2。



(a) 主体结构刚度 (b) 耦合减震器系统滞回曲线

图2 主体结构刚度及耦合减震器系统的滞回曲线
Fig.2 stiffness of the main structure and the hysteresis curve of the coupled shock absorber system

当在结构中耦合负刚度减震器时,主体结构的刚度 k 减小为 k' , 阻尼比增大,滞回曲线达到最饱满状态,输入结构的能量可快速传递到减震器

并耗散, 结构耗能能力显著提高。

耦合负刚度的减震器系统模型见图 3。

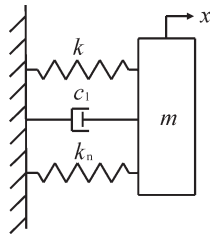


图 3 耦合负刚度的减震器系统模型

Fig.3 system model of coupled negative stiffness damper

在受到外载荷 $F(t)$ 激励时, 系统动力学方程为

$$m\ddot{x} + c_1\dot{x} + (k + k_n)x = F(t), \quad (2)$$

式中: m 为主体结构的质量; c_1 为系统等效阻尼。

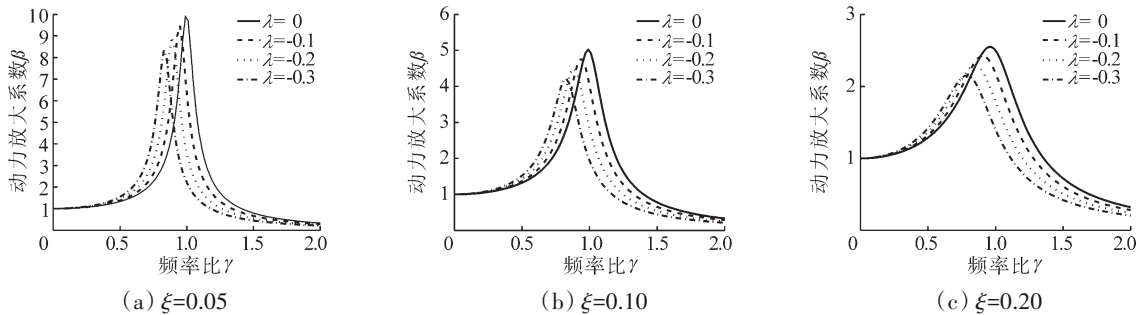


图 4 动力放大系数随频率比的变化

Fig.4 variation of power amplification factor with frequency ratio

2 负刚度 NES 减震器构造及振动试验

典型 NES 构造是通过在振子两侧垂直连接两根弹簧, 从而产生立方刚度, 其频率范围较窄, 对能量输入不敏感, 鲁棒性较差。现改变弹簧的布置方式, 在平衡位置增加准零刚度特性。在振子四周布置 4 根“X”型压缩弹簧, 构造负刚度 NES 减震器, 见图 5。与典型 NES 相比, 该负刚度 NES 减震器的减震频带更宽, 鲁棒性更好, 且不需外加负刚度元件, 构造简单, 阈值更低, 对能量输入更敏感。

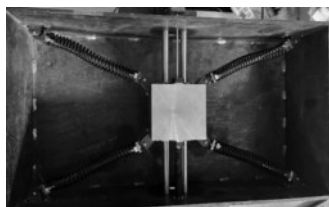


图 5 负刚度 NES 减震器实体模型

Fig.5 solid model of negative stiffness NES shock absorber

负刚度 NES 减震器实体模型由四周的挡板、轨道、振子和弹簧组成。弹簧和轨道固定在挡板

内侧, 根据最优质量比, 大致估算振子的尺寸为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 质量为 26.5 kg , 振子在轨道的导向下左右往复振动, 行程为 $\pm 150 \text{ mm}$ (向左侧振动为正, 向右侧振动为负)。由于预压弹簧的相互作用, 负刚度 NES 减震器的起始平衡位置处于非稳定的准零刚度状态。振子往复振动时, 在弹簧的拉压作用下, 输出的控制力与压缩变形方向相同但与变形量成反比, 表现为恢复力随位移的增大而减小, 呈负刚度特性。振子在振动过程中先从非稳定准零刚度点开始, 经负刚度区域过渡到邻近的另一个非稳定准零刚度点, 然后进入正刚度区域, 通过结构形态的高效变换, 达到宽频带变刚度振动效果。负刚度 NES 减震器力学模型见图 6。

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\gamma^2}{1 + \lambda}\right)^2 + \frac{4\gamma^2 \xi^2}{(1 + \lambda)^2}}}. \quad (3)$$

固定结构的阻尼比, 通过改变负刚度影响系数, 得到结构的动力放大系数随频率比的变化曲线, 见图 4。由图 4 可知, 随着负刚度影响系数和等效阻尼比的增大, 动力放大系数的峰值逐渐减小, 表明负刚度减震器具有优良的减震性能, 耦合负刚度的减震器可显著提高结构的抗震性能。

对负刚度 NES 减震器的静力学原理进行推导。设弹簧初始长度为 l , 刚度为 k_0 , 上侧弹簧长度为 l_1 , 下侧弹簧长度为 l_2 , 振子到 A、B、C、D 四个点的距离为 l_0 , $l_0 = \sqrt{a^2 + b^2}$, 其中, a 为振子上侧弹簧连接点到挡板弹簧连接点的垂直距离; b 为挡板

弹簧连接点水平距离的 1/2。弹簧的预压缩量 $\Delta = l - l_0$ 。上侧弹簧与挡板之间的夹角为 θ_1 ，下侧弹簧与挡板之间的夹角为 θ_2 。当振子产生 x 的位移后， $l_1 = \sqrt{(a+x)^2 + b^2}$ ， $l_2 = \sqrt{(a-x)^2 + b^2}$ 。

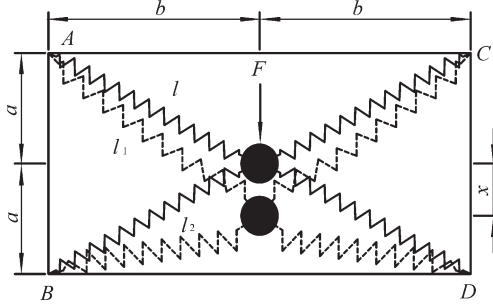


图 6 负刚度 NES 减震器力学模型

Fig.6 mechanical model of negative stiffness NES shock absorber

上下两侧弹簧产生的恢复力分别为

$$\begin{cases} F_1 = 2k_0(l_1 - l) \\ F_2 = 2k_0(l - l_2) \end{cases} \quad (4)$$

振子所受的非线性恢复力为

$$F = 2k_0(l - l_2)\sin\theta_2 - 2k_0(l_1 - l)\sin\theta_1. \quad (5)$$

将 l_1 和 l_2 代入式 (5)，化简得

$$F = 2k_0(a-x) \left[\frac{l}{\sqrt{(a-x)^2 + b^2}} - 1 \right] + 2k_0(a+x) \left[\frac{l}{\sqrt{(a+x)^2 + b^2}} - 1 \right]. \quad (6)$$

由式 (6) 可知，负刚度 NES 减震器的减震性能与弹簧行程长宽比及预压缩量有关。

当 $a=b$ 时，考虑不同弹簧预压缩量对系统减震效果的影响，对随机载荷激励下负刚度 NES 减震器振子的动力学响应方程进行推导分析，设负刚度 NES 减震器受到 $f\cos(\omega t)$ 的外载荷，则有

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + 4k_0x - k_0l_0 \left[\frac{\sqrt{2}l + 2x}{\sqrt{(x + \sqrt{2}l/2)^2 + l^2/2}} + \frac{2x - \sqrt{2}l}{\sqrt{(\sqrt{2}l/2 - x)^2 + l^2/2}} \right] = f\cos(\omega t). \quad (7)$$

将动力学响应方程无量纲化，令 $y = x/l$ ， $L_0 = l_0/l$ ， $\omega_n = \sqrt{k_0/m}$ ， $\zeta_1 = c/2m\omega_n$ ， $f_0 = f/k_0l$ ， $\Omega = \omega/\omega_n$ ， $\tau = \omega_n t$ ，则式 (7) 可改写为

$$\ddot{y} + 2\zeta_1\dot{y} + (4 - 4L_0)k_0y + \sqrt{2}k_0L_0y^3 = f_0\cos(\Omega\tau), \quad (8)$$

振子的非线性恢复力为

$$F = (4 - 4L_0)k_0y + \sqrt{2}k_0L_0y^3. \quad (9)$$

振子的非线性恢复力曲线见图 7。由图 7 可知，当弹簧无预压缩量时，振子仅有一个准零刚度平衡点；当弹簧有预压缩量时，振子的非线性恢复力曲线具有良好的负刚度区段，其刚度变化过程与设计构想一致，达到了宽频、低频的变刚度效果。

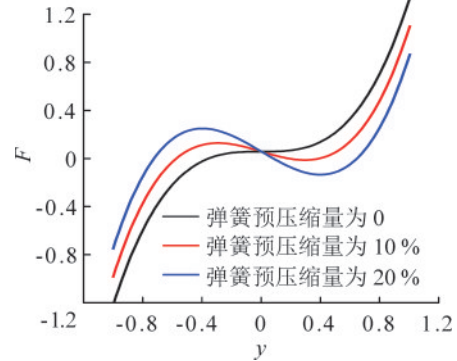


图 7 振子的非线性恢复力曲线

Fig.7 nonlinear restoring force curves of the oscillator

设式 (7) 解的形式为 $y = A \cos(\Omega\tau + \varphi)$ (A 为振子位移的响应幅值)，则振子基于外载荷的位移幅值与频率的关系式为

$$\Omega = \left[2\beta A^4 + 2\alpha A^2 - 4\zeta_1^2 A^2 \pm (16\zeta_1^4 A^4 - 16\beta\zeta_1^2 A^6 - 16\alpha\zeta_1^2 A^4 + 4A^2 f_0^2)^{1/2} \right]^{1/2} \cdot (2a^2)^{-1/2}, \quad (10)$$

式中： $\alpha = (4 - 4L_0)k_0$ ； $\beta = \sqrt{2}k_0L_0$ 。

对式 (10) 进行数值仿真计算。 $k_0=1$ 时，不同弹簧预压缩量下振子位移的响应幅值见图 8。

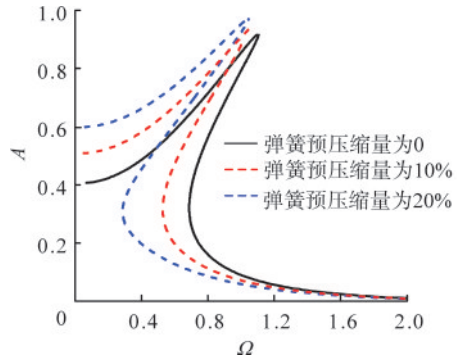


图 8 不同弹簧预压缩量下振子位移的响应幅值

Fig.8 amplitude response of oscillator displacement under different spring precompressions

由图 8 可知, 负刚度 NES 减震器在 1:1 共振区时, 振动幅值最大。弹簧无预压缩量时, 振子位移表现出较强的非线性, 随着预压缩量的增加, 非线性更为明显, 同时, 振动幅值也逐渐增大, 对结构的控制效果更好。

为检验负刚度 NES 减震器的频率变化范围是否覆盖低频段, 设计 4 种工况, 具体参数见表 1。采用小型振动台对其模态进行测试, 见图 9。

表 1 不同工况下负刚度 NES 减震器参数
Tab.1 parameters of negative stiffness NES shock absorber under different working conditions

工况	弹簧行程长宽比	弹簧预压缩量/%
1	1:1.0	10
2	1:1.0	20
3	1:2.0	10
4	1:2.0	20

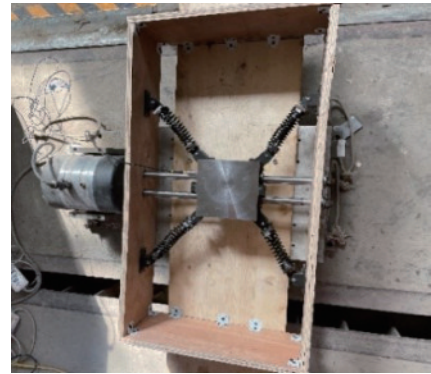
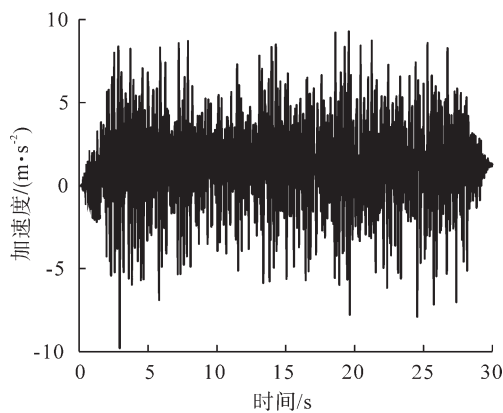


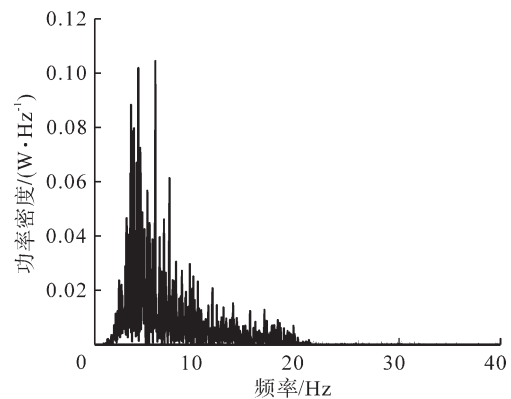
图 9 负刚度 NES 减震器模态测试

Fig.9 negative stiffness NES shock absorber modal test

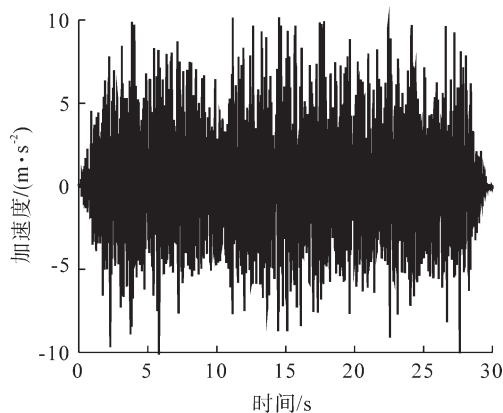
在台面输入白噪声随机激励, 得到负刚度 NES 减震器的加速度时程及功率谱变化曲线, 见图 10。由图 10 可知, 随着弹簧行程长宽比及预压缩量的增加, 加速度响应逐渐增大, 响应频带逐渐拓宽。工况 1~工况 4 的频率分别为 2.41~10.16 Hz、2.65~17.48 Hz、1.67~18.40 Hz、2.89~19.16 Hz, 均在 0~20 Hz 内, 4 种工况的输出功率更密集, 表明引入负刚度后, NES 具有更宽频、更低频的特性, 可完全覆盖大部分建筑结构的频率, 具有极强的适用性。



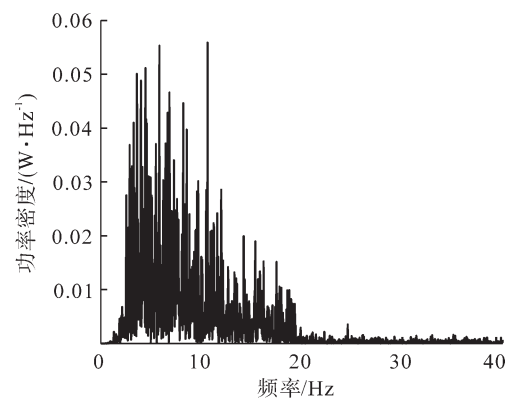
(a) 工况 1-加速度时程



(b) 工况 1-功率谱



(c) 工况 2-加速度时程



(d) 工况 2-功率谱

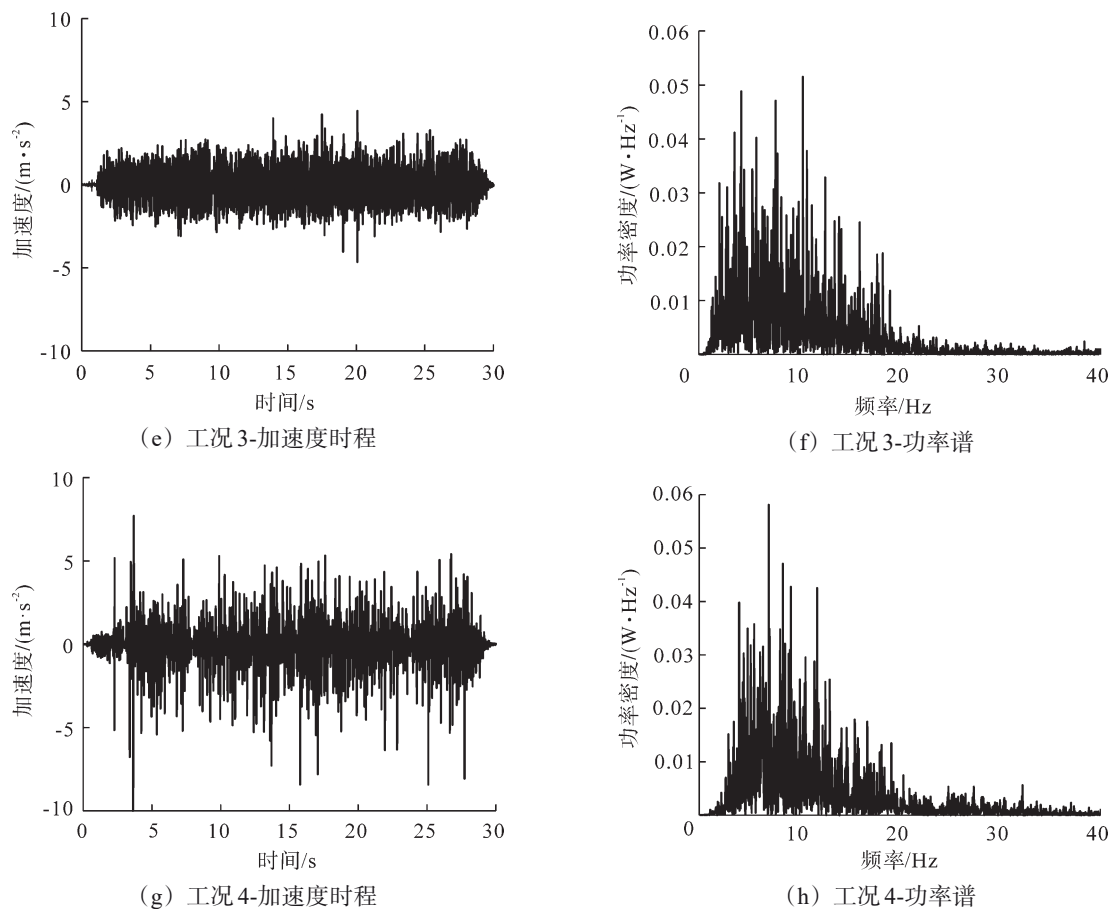


图10 不同工况下加速度时程及功率谱变化

Fig.10 acceleration time history and power spectrum changes under different working conditions

3 有限元模拟分析

3.1 有限元模型的建立

考虑各参数对负刚度NES减震器耗能能力及抗震性能的影响,利用ABAQUS有限元软件建立负刚度NES减震器模型并进行数值模拟,见图11。

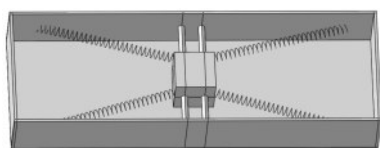


图11 负刚度NES减震器有限元模型

Fig.11 finite element model of negative stiffness NES shock absorber

有限元模型的尺寸与实体模型一致,挡板、轨道、振子均采用三维实体单元,弹簧采用线性梁单元。在Materials模块赋予各部件材料属性,采用65Mn弹簧钢,其余部件材质均为Q235钢材。弹簧力学参数见表2,本构模型见图12。采用六面体单元进行网格划分,见图13。挡板和轨道的网格尺寸均为20mm,振子的网格尺寸为7mm,网格总数为13 063。

设置挡板与轨道的连接方式为固定连接,振子与轨道的连接方式为无摩擦表面接触。当振子上有载荷作用时,振子沿轨道方向振动。在底板设置固定支座,使减震器完全固定,不产生滑动。弹簧预压缩量通过在振子与挡板之间施加相互作用力来实现。采用线性检索积分单元,通过隐式动力分析法在振子上定义参考点,并在参考点上施加载荷。分阶段进行低周往复循环加载,共进行40个分析步,每个分析步位移加载量为15mm,总位移为147mm。负刚度NES减震器模拟工况见表3。

表2 弹簧力学参数

Tab.2 spring mechanical parameters

弹簧编号	长/mm	刚度/(N·mm ⁻¹)	最大力/N	最大变形量/mm
1	170	7.48	437.20	69
2	190	6.38	392.20	64
3	230	5.25	367.61	65
4	250	5.49	307.38	62
5	300	5.84	321.86	60
6	350	4.97	243.48	58

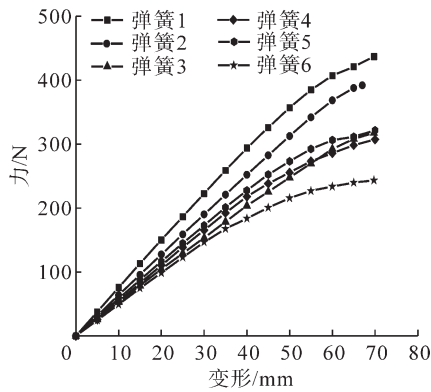


图 12 弹簧本构模型

Fig.12 spring constitutive model

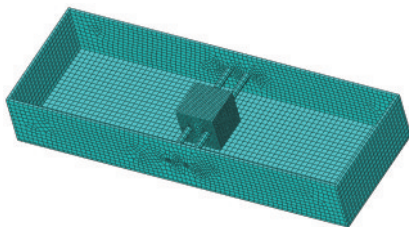


图 13 有限元模型网格划分

Fig.13 finite element model meshing

表 3 负刚度 NES 减震器模拟工况

Tab.3 simulated working conditions of negative stiffness NES shock absorber

工况	振子质量/kg	弹簧行程长宽比	弹簧预压 缩量/%	弹簧 长/mm	弹簧 线径/mm	弹簧 阻尼比
1	26.5	1:1.0	0	212	4	0
2	26.5	1:1.0	10	235	4	0
3	26.5	1:1.0	20	265	4	0
4	26.5	1:1.5	0	270	4	0
5	26.5	1:1.5	10	300	4	0
6	26.5	1:1.5	20	338	4	0
7	26.5	1:2.0	0	335	4	0
8	26.5	1:2.0	10	372	4	0
9	26.5	1:2.0	20	419	4	0
10	26.5	1:3.0	0	475	4	0
11	26.5	1:3.0	10	522	4	0
12	26.5	1:3.0	20	570	4	0
13	26.5	1:4.0	0	620	4	0
14	26.5	1:4.0	10	680	4	0
15	26.5	1:4.0	20	742	4	0
16	26.5	1:1.5	10	300	3	0
17	26.5	1:1.5	10	300	5	0
18	26.5	1:1.5	10	300	4	0.05
19	26.5	1:1.5	10	300	4	0.20
20	26.5	1:1.5	10	300	4	0.50
21	25.5	1:2.0	10	372	3	0
22	26.5	1:2.0	10	372	5	0
23	26.5	1:2.0	10	372	4	0.05
24	26.5	1:2.0	10	372	4	0.20
25	26.5	1:2.0	10	372	4	0.50

3.2 有限元分析

(1) 弹簧预压缩量对抗震性能的影响

固定弹簧行程长宽比, 不同弹簧预压缩量下振子的滞回曲线见图 14。由图 14 可知, 弹簧行程长宽比为 1:1.0、1:1.5 时, 不同弹簧预压缩量下振子的滞回曲线基本相同, 表明这两种弹簧行程长宽比下, 弹簧预压缩量对负刚度 NES 减震器的抗震性能影响较小。弹簧行程长宽比为 1:2.0、1:3.0 时, 随着弹簧预压缩量的增加, 承载力有所增大, 滞回曲线更加饱满, 表明负刚度 NES 减震器的耗能能力增强, 抗震性能更好。弹簧行程长宽比为 1:4.0 时, 随着弹簧预压缩量的增加, 承载力及滞回曲线的面积均逐渐减小, 表明负刚度 NES 减震器的耗能能力逐渐减弱, 抗震性能较差。弹簧预压缩量为 20%, 弹簧行程长宽比为 1:3.0、1:4.0 时, 负刚度 NES 减震器的刚度均有不同程度的退化, 这是由于弹簧行程长宽比及预压缩量过大时, 振子极不稳定, 导致承载力减小, 减震性能较弱。

(2) 弹簧行程长宽比对抗震性能的影响

固定弹簧预压缩量, 不同弹簧行程长宽比下振子的滞回曲线见图 15。由图 15 (a) 可知, 弹簧预压缩量为 0, 弹簧行程长宽比为 1:1、1:1.5 时, 最大承载力基本一致, 但弹簧行程长宽比为 1:1.5 时, 振子的滞回曲线面积相对更小。随着弹簧行程长宽比的增大, 承载力及滞回曲线的面积显著减小。由图 15 (b) 和图 15 (c) 可知, 弹簧预压缩量为 10%、20% 的条件下, 弹簧行程长宽比为 1:1.5 时, 承载力相对最大。随着弹簧行程长宽比的增大, 负刚度 NES 减震器的承载力及滞回曲线的面积均有所减小。

整体来看, 随着弹簧行程长宽比的增大, 承载力呈下降的变化趋势, 滞回曲线的面积逐渐减小, 表明负刚度 NES 减震器的耗能能力及抗震性能减弱。弹簧行程长宽比为 1:1.5 时, 振子的滞回曲线最饱满, 抗震性能最好。

(3) 弹簧刚度对抗震性能的影响

不同弹簧线径下振子的滞回曲线见图 16。由

图 16 可知, 弹簧行程长宽比为 1 : 1.5、1 : 2.0 时, 振子滞回曲线的变化趋势基本一致。弹簧行程长宽比为 1 : 1.5 的条件下, 弹簧线径为 5 mm 时的最大承载力约为弹簧线径为 3 mm 时的 4 倍。整体来看, 随着弹簧刚度的增加, 滞回曲线的面积增大, 抗震性能显著增强。

(4) 弹簧阻尼比对抗震性能的影响

不同弹簧阻尼比下振子的滞回曲线见图 17。由图 17 (a) 可知, 弹簧阻尼比为 0.05、0.50 时, 最大承载

力分别为 703.68 N、844.67 N。随着弹簧阻尼比的增大, 承载力逐渐增大, 滞回曲线更加饱满, 表明负刚度 NES 减震器的耗能能力更强, 抗震性能更好。由图 17 (b) 可知, 弹簧阻尼比为 0.05 时, 与不设置阻尼时相比, 最大承载力基本没有变化。弹簧阻尼比为 0.20、0.05 时, 最大承载力基本相同, 但弹簧阻尼比为 0.20 时, 滞回曲线相对更饱满。弹簧阻尼比为 0.50 时, 最大承载力为 606.7 N, 滞回曲线最饱满, 负刚度 NES 减震器的抗震性能最好。

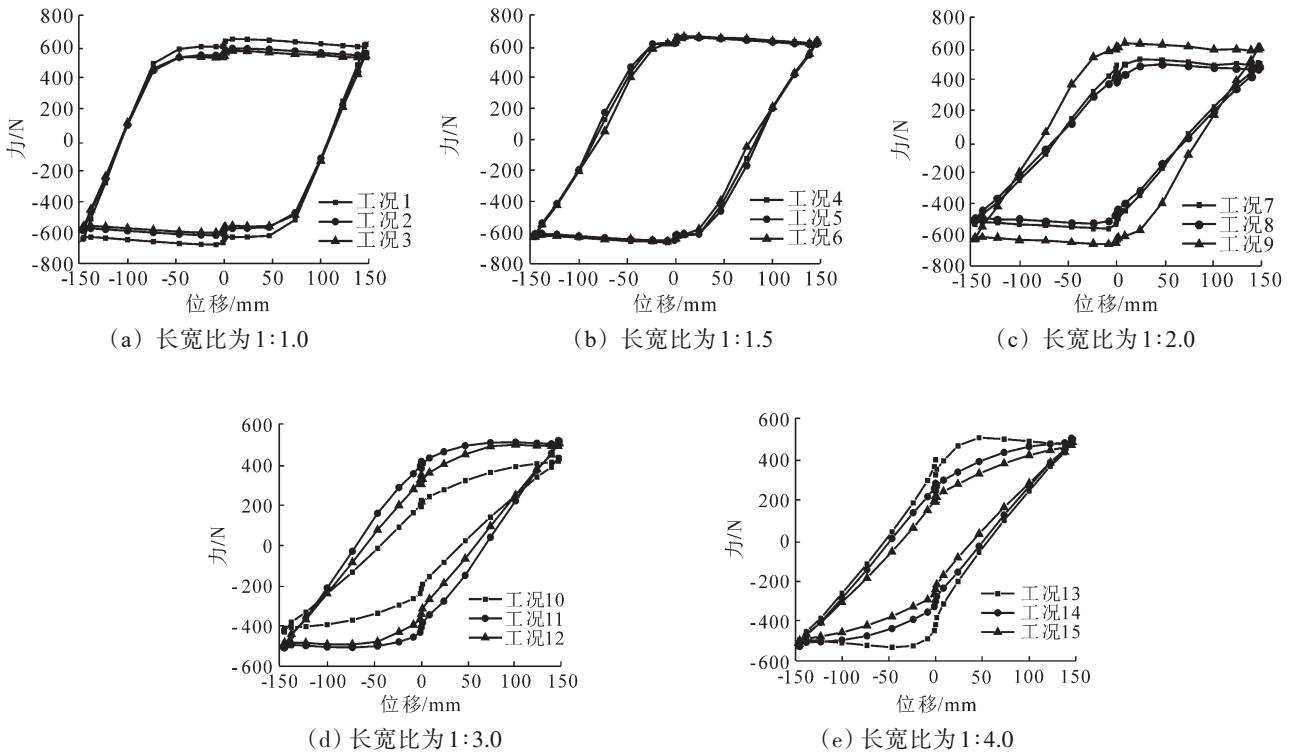


图 14 不同弹簧预压缩量下振子的滞回曲线

Fig.14 hysteresis curves of the oscillator under different spring pre-compressions

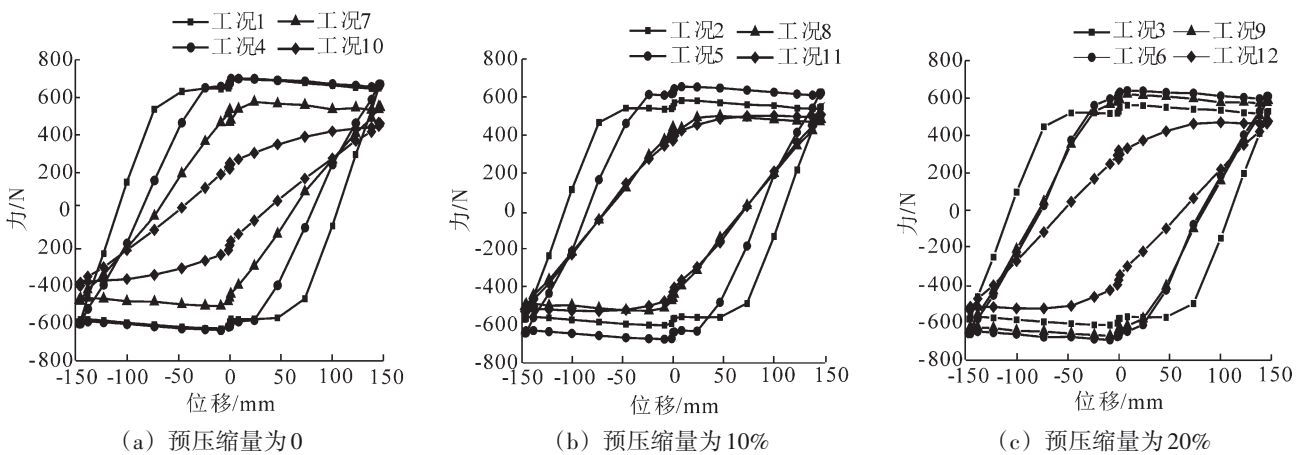


图 15 不同弹簧行程长宽比下振子的滞回曲线

Fig.15 hysteresis curves of the oscillator under different spring stroke length-width ratios

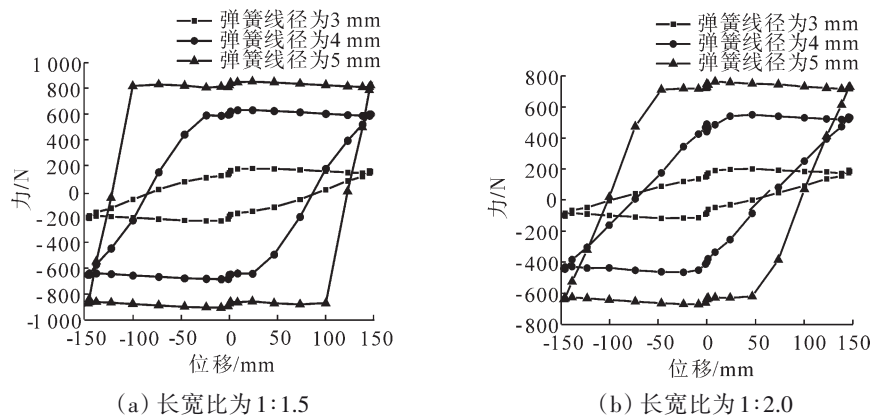


图 16 不同弹簧线径下振子的滞回曲线

Fig.16 hysteresis curve of the oscillator under different spring wire diameters

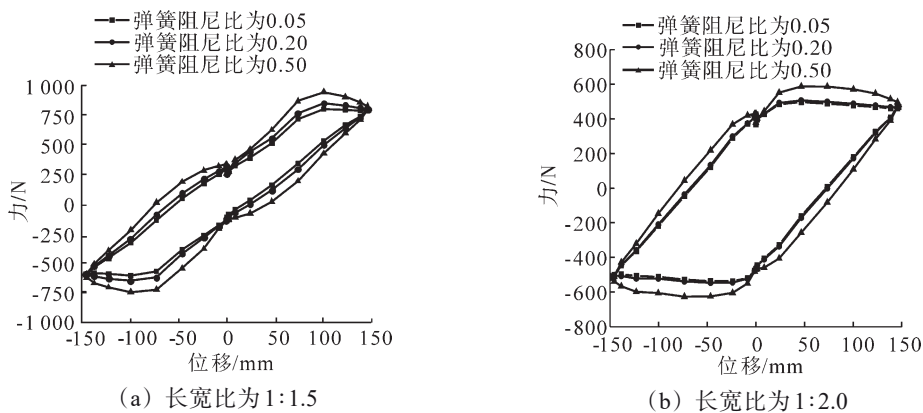


图 17 不同弹簧阻尼比下振子的滞回曲线

Fig.17 hysteresis curves of oscillator under different spring damping ratio

4 结论

本文在 NES 中引入负刚度, 改变弹簧布置方式, 设计一种新的负刚度 NES 减震器。通过动力学原理分析及 ABAQUS 有限元软件数值模拟, 得出如下结论。

(1) 负刚度 NES 减震器振子的非线性恢复力曲线具有良好的负刚度区段和强非线性特性, 且随着弹簧预压缩量的增大, 负刚度区段逐渐拓宽, 非线性逐渐增强。

(2) 不同工况下负刚度 NES 减震器的频率变化范围集中在 0 ~ 20 Hz, 与其他 NES 减震器相比, 频率更宽、更低, 对建筑结构的覆盖范围更广。

(3) 弹簧行程长宽比为 1 : 1.0、1 : 1.5 和 1 : 2.0 时, 随着弹簧预压缩量的增大, 负刚度 NES 减震器的非线性和抗震性能逐渐增强。弹簧行程长宽比为 1 : 3.0、1 : 4.0 时, 负刚度 NES 减震器的承载力和抗震性能均不理想。弹簧预压缩量为 20%, 弹簧行程长宽比为 1 : 1.5 时, 负刚度 NES 减震器

的抗震性能最好。

(4) 随着弹簧刚度和阻尼比的增大, 负刚度 NES 减震器的承载力和抗震性能显著增强。选取最优弹簧刚度和阻尼比是负刚度 NES 减震器有效提高结构抗震性的关键。

参考文献 (References):

[1] GENDELMAN O, VAKAKIS A F. Transitions from localization to nonlocalization in strongly nonlinear damped oscillators[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2000, 11(10): 1535-1542.

[2] VAKAKIS A F, MANEVITCH L I, GENDELMAN O, et al. Dynamics of linear discrete systems connected to local, essentially non-linear attachments[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 264(3): 559-577.

[3] GENDELMAN O V. Targeted energy transfer in systems with non-polynomial nonlinearity[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 315(3): 732-745.

[4] GENDELMAN O V, STAROSVETSKY Y, FELDMAN M. Attractors of harmonically forced linear oscillator with attached nonlinear energy sink I: description of response regimes[J]. Nonlinear Dynamics, 2008, 51(1): 31-46.

[5] YAO H L, CAO Y B, ZHANG S J, et al. A novel energy sink with

- piecewise linear stiffness[J]. *Nonlinear Dynamics*,2018,94(3):2265-2275.
- [6] WEI Y M,WEI S,ZHANG Q L, et al. Targeted energy transfer of a parallel nonlinear energy sink[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*,2019,40(5):621-630.
- [7] WU Z H,PAREDES M,SEGUY S. Targeted energy transfer in a vibro-impact cubic NES:description of regimes and optimal design [J]. *Journal of Sound and Vibration*,2023,545:117425.
- [8] 姚红良,张钦,杨沛然,等. 分段线性刚度非线性能量阱的参数优化方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*,2019,40(12):1732-1738.
YAO Hongliang,ZHANG Qin,YANG Peiran, et al. Optimization method of nonlinear energy sinks with piecewise linear stiffness [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2019, 40 (12):1732-1738.
- [9] 张运法,孔宪仁,岳程斐. 耦合组合刚度非线性能量阱的线性振子动力学分析[J]. *振动与冲击*,2022,41(13):103-111,151.
ZHANG Yunfa,KONG Xianren,YUE Chengfei. Dynamic analysis of linear oscillator coupled with coupled combined stiffness NES [J]. *Journal of Vibration and Shock*,2022,41(13):103-111,151.
- [10] 张运法,孔宪仁. 具有组合非线性阻尼的非线性能量阱振动抑制响应分析[J]. *力学学报*,2023,55(4):972-981.
ZHANG Yunfa, KONG Xianren. Analysis on vibration suppression response of nonlinear energy sink with combined nonlinear damping[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*,2023,55(4):972-981.
- [11] ESIN M,PASTERNAK E,DYSKIN A V. Stability of chains of oscillators with negative stiffness normal, shear and rotational springs[J]. *International Journal of Engineering Science*,2016,108: 16-33.
- [12] MOORE B,JAGLINSKI T,STONE D S, et al. Negative incremental bulk modulus in foams[J]. *Philosophical Magazine Letters*,2006,86(10):651-659.
- [13] 谭小俊. 负刚度力学超材料设计及其性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022:16-19.
- [14] IEMURA H,PRADONO M H. Passive and semi-active seismic response control of a cable-stayed bridge[J]. *Journal of Structural Control*,2002,9:189-204.
- [15] LI H,BI K M,HAO H. Effect of negative stiffness nonlinearity on the vibration control effectiveness of tuned negative stiffness inerter damper[J]. *Engineering Structures*,2023,293:116641.
- [16] 王珏,张莹,黄榛,等. 位移激励下含负刚度的惯容减振系统参数优化解析研究[J]. *振动工程学报*,2023,36(3):804-814.
WANG Jue,ZHANG Ying,HUANG Su, et al. Analytical study on optimal inerter vibration absorbers with negative stiffness under displacement excitations[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2023,36(3):804-814.
- [17] 郜辉,邢晨曦,王浩,等. 调谐负刚度阻尼器的H2优化及减震性能评估[J]. *哈尔滨工程大学学报*,2023,44(9):1571-1578.
GAO Hui, XING Chenxi, WANG Hao, et al. H2 optimization and seismic performance evaluation of tuned negative stiffness damper[J]. *Journal of Harbin Engineering University*,2023,44(9):1571-1578.
- [18] 郜辉,邢晨曦,王浩,等. 调谐负刚度-惯质阻尼器对隔震结构减震性能的提升[J]. *东南大学学报(自然科学版)*,2023,53(4): 592-599.
GAO Hui, XING Chenxi, WANG Hao, et al. Performance improvement of base-isolated structures by the tuned negative stiffness-inertial mass damper[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*,2023,53(4):592-599.
- [19] 孙天威,彭凌云,李小军. 负刚度摩擦阻尼装置减震原理分析及振动台试验研究[J]. *建筑结构学报*,2023,44(11):92-101.
SUN Tianwei, PENG Lingyun, LI Xiaojun. Analysis of seismic reduction principle and shaking table test of negative stiffness friction damping device[J]. *Journal of Building Structures*,2023, 44(11):92-101.
- [20] 孙天威,彭凌云,李小军,等. 半周负刚度摩擦阻尼装置振动台试验研究[J]. *振动工程学报*,2024,37(3):423-435.
SUN Tianwei,PENG Lingyun,LI Xiaojun, et al. Shaking table test of a half-cycle negative stiffness friction damping device[J]. *Journal of Vibration Engineering*,2024,37(3):423-435.