

文章编号:1006-1355(2021)01-0224-05

新型自复位变摩擦耗能装置理论研究与数值分析

韩少渊

(中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 武汉 430064)

摘要:提出一种兼具自复位、变摩擦和高耗能于一体的新型自复位变摩擦耗能装置,通过合理的构造措施,将SMA弹簧、摩擦材料和型钢集成一体,由SMA弹簧实现复位功能,变摩擦机构提供耗能作用,基于SMA力学特性和库伦摩擦理论建立该耗能装置的恢复力模型,并利用MATLAB对其力学性能进行数值分析。结果表明:所建立的恢复力模型能够较好地描述该耗能装置的力学特性,随着位移幅值的增加,其耗能能力逐渐增强,加载频率对其耗能能力影响不大,在应用中能够表现出稳定的耗能能力。

关键词:振动与波;SMA弹簧;自复位;变摩擦;恢复力模型;数值分析

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.041

Theoretical Study and Numerical Analysis of a New Type Self-centering Variable Friction Energy Dissipation Device

HAN Shaoyuan

(Wuhan Design and Research Institute Co., Ltd. of China Coal Technology and Industry Group,
Wuhan 430064, China)

Abstract : A new type self-centering variable friction energy dissipation device is presented. This device combines self-centering, variable friction and high energy consumption. Through reasonable construction measures, the SMA spring, friction material and steel section are integrated. The SMA spring realizes the reset function and the variable friction mechanism provides energy consumption. Based on SMA mechanical characteristics and Coulomb friction theory, the restoring force model of the energy dissipation device is established, and its mechanical properties are analyzed by MATLAB. The results show that the restoring force model can well describe the mechanical characteristics of the energy dissipation device. With the increase of displacement amplitude, the energy dissipation capacity increases gradually, and the loading frequency has little effect on the energy dissipation capacity. This new type device can show a stable energy consumption capacity in application.

Key words : vibration and wave; SMA spring; self-centering; variable friction; restoring force model; numerical analysis

2008年汶川地震对高层建筑、基础设施和生命线工程造成了巨大破坏,产生了严重的经济损失,再次显示了地震的破坏效应以及控制结构和非结构构件破坏的重要性^[1]。消能减震技术已被实践证明能够有效地控制结构损伤,降低结构响应^[2],它通过在结构构件之间或建筑物与基础之间设置隔震、减震装置,利用隔震、减震装置的耗能特性,降低地震能量向建筑物的传递,以达到减小结构震动目的。目前,虽然国内外研究学者已开发出多种类型的减震装置,但由于受其本身特性影响仍具有一些不足之处,如黏弹性阻尼器易老化,金属阻尼器震后易损

伤,黏滞阻尼器密封性差等^[3-4]。

摩擦阻尼器是一种耗能能力强,受荷载大小、加载频率和加卸载循环次数影响小的减震控制装置。自1982年Pall和Marsh^[5]第一次提出摩擦型阻尼器以来,研究人员从改进结构形式以及材料等方面设计了不同类型的摩擦阻尼器,并对其耗能能力进行了探讨。王伟等^[6]设计制作了电磁摩擦耗能装置,可根据结构控制层的层间位移来调节工作电流,以实现控制力的连续变化。石光磊等^[7]利用形状记忆合金的超弹性,结合Pall摩擦阻尼器,提出了一种SMA复合摩擦阻尼器,并对其进行了试验研究。张洵安等^[8]针对被动摩擦阻尼器滞回曲线不饱满问题,提出了一种具有简单控制律的Off-On半主动摩擦阻尼器,并对其减震控制效果进行了计算分析。王社良等^[9]利用压电陶瓷材料的压电效应,设计了一种新型

收稿日期:2020-04-24

作者简介:韩少渊(1981-),男,武汉市人,硕士,主要研究方向为工程结构抗震。

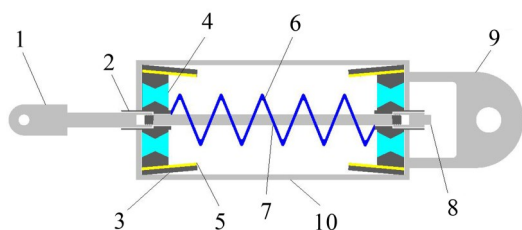
E-mail: 1454623062@qq.com

的压电摩擦阻尼器,并对其进行了试验研究,结果表明,该阻尼器具有较好的耗能能力,能够有效地减小地震作用。Samani等^[10]设计并制作了一种可调摩擦阻尼器,且对其进行了试验研究。Monir等^[11]利用钢板和螺栓设计了一种新型摩擦阻尼器,并对该阻尼器的耗能能力和减振效果进行了试验研究。韩建强等^[12]针对滑动长孔高强螺栓摩擦阻尼器,设计了由钢板与四种摩擦板材料组成的摩擦阻尼器,并对其进行了低周反复荷载试验。

虽然国内外专家学者已对摩擦阻尼器进行了大量的试验和理论研究,但大多数研究局限于传统意义上的摩擦阻尼器,该类型摩擦阻尼器控制力单一,而地震荷载又具有较强的不确定性,使得该类型摩擦阻尼器很难较好地适应结构的变化需求。即使有少数专家提出变摩擦阻尼器的概念,但也需依靠外界能源对阻尼器的调节,这样势必带来阻尼器结构复杂,造价成本过高等问题。同时,传统摩擦阻尼器并不具备自复位能力,地震作用下结构残余变形大。基于此,本文利用形状记忆合金(Shape memory alloy,简称SMA)弹簧的超弹性提供复位功能,巧妙地改变传统摩擦阻尼器的结构形式,提出了一种新型自复位变摩擦阻尼器,并对其力学性能进行探讨分析,为其在工程中的应用提供理论基础。

1 构造形式

新型自复位变摩擦耗能装置构造设计如图1所示。由左侧预紧端柄1、滑块2、斜板3、橡胶弹簧4、摩擦材料5、形状记忆合金弹簧6、导杆7、右侧预紧螺母8、右侧端柄9、外筒10等几部分组成。左侧预紧端柄1和右侧预紧螺母8通过螺纹与导杆7相连,通过调整预紧端柄和预紧螺母与导杆之间的间隙可实现对形状记忆合金弹簧施加预压力。橡胶弹簧4通过工业胶水与滑块粘结成整体共同滑动。斜板3与水平夹角为 θ ,可通过调整水平夹角的大小实现变摩擦的功能。右侧端柄9主要起连接结构作用。



1. 左侧预紧端柄; 2. 滑块; 3. 斜板; 4. 橡胶弹簧;
5. 黄铜片; 6. 形状记忆合金弹簧; 7. 导杆;
8. 右侧预紧螺母; 9. 右侧端柄; 10. 外筒

图1 自复位变摩擦耗能装置图

新型自复位变摩擦阻尼器的工作原理是:首先

通过调整预紧端柄和预紧螺母与导杆之间间隙对装置施加预压力。外部荷载作用于预紧端柄,将力传递至滑块,当外部荷载作用力超过滑块与摩擦材料之间的静摩擦力时,滑动将会产生移动,从而消耗地震传递的能量。由于斜板的作用,在外部荷载作用下,斜板对滑块产生挤压,从而压缩橡胶弹簧,进而改变该装置摩擦力的大小,故可以自适应地实现变摩擦的功效。同时,由于形状记忆合金弹簧的作用,当外部荷载消除后,可以依靠其自身的超弹性特性,使得该减震装置回复至原始位置。

2 恢复力模型

2.1 SMA弹簧力学模型

根据SMA弹簧宏观试验和纯剪状态下受力特性,可将其轴向变形 x 与 F_1 之间的关系描述为^[13]

$$F_1 = Kx + K\beta x_L \quad (1)$$

式中: K 为SMA弹簧刚度系数; β 为SMA弹簧形状记忆系数; x_L 为SMA弹簧最大记忆变形。

$$K = K_1 + (K_1 + K_2) \beta \quad (2)$$

式中: $K_1 = \frac{F_{ms}}{x_{ms}}$ 为加载阶段弹性刚度, $K_2 = \frac{F_{mf} - F_{as}}{x_{mf} - x_{as}}$,

F_{ms} 、 F_{mf} 、 F_{as} 、 x_{ms} 、 x_{mf} 、 x_{as} 为相变临界参数,可表示为

$$F_{ms} = \frac{\pi d^3}{8D} \tau_{ms} \quad (3)$$

$$x_{ms} = \frac{\pi D^2 N}{Gd} \tau_{ms} \quad (4)$$

$$F_{mf} = \frac{\pi \tau_{ms}}{D} r_{ms}^3 + \frac{\pi a_1}{D} \left(\frac{d^4}{16} - r_{ms}^4 \right) + \frac{4\pi b_1}{3D} \left(\frac{d^3}{8} - r_{ms}^3 \right) \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{\tau_{mf} - \tau_{ms}}{\frac{d}{2} - r_{ms}} \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{\tau_{ms} \frac{d}{2} - \tau_{mf} r_{ms}}{\frac{d}{2} - r_{ms}} \quad (7)$$

$$r_{ms} = \frac{d}{2\gamma_{\max}} \gamma_{ms} \quad (8)$$

$$x_{mf} = \frac{\pi D^2 N}{d} \left(\frac{\tau_{mf}}{G} + \frac{E}{\sqrt{3}G} \varepsilon_L \eta \right) \quad (9)$$

$$F_{as} = \frac{\pi \tau_{af}}{D} r_{af}^3 + \frac{\pi a_2}{D} \left(\frac{d^4}{16} - r_{af}^4 \right) + \frac{4\pi b_2}{3D} \left(\frac{d^3}{8} - r_{af}^3 \right) \quad (10)$$

$$a_1 = \frac{\tau_{af} - \tau_{as}}{\frac{d}{2} - r_{as}} \quad (11)$$

$$b_1 = \frac{\tau_{as} \frac{d}{2} - \tau_{af} r_{as}}{\frac{d}{2} - r_{as}} \quad (12)$$

$$r_{af} = \frac{d}{2\gamma_{\max}} \gamma_{af} \quad (13)$$

$$x_{as} = \frac{\pi D^3 N}{d} \left(\frac{\tau_{as}}{G} + \frac{E}{\sqrt{3} G} \varepsilon_L \eta \right) \quad (14)$$

式中: D 为弹簧平均直径; N 为弹簧总圈数; d 为形状记忆合金直径; $\tau_{ms} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_{ms}$, $\tau_{mf} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_{mf}$, $\tau_{af} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_{af}$, $\tau_{as} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_{as}$ 。

加载过程中, SMA 弹簧形状记忆系数 β 可表示为

$$\beta = \frac{1 - \beta_0}{2} \cos \left(\pi \frac{F_1 - F_{ms}}{F_{ms} - F_{mf}} \right) + \frac{1 + \beta_0}{2} \quad (15)$$

式中: β_0 为开始加载时形状记忆系数初值。

卸载过程中, SMA 弹簧形状记忆系数 β 可表示为

$$\beta = \frac{\beta'_0}{2} \cos \left(\pi \frac{F_1 - F_{as}}{F_{af} - F_{as}} \right) + \frac{\beta'_0}{2} \quad (16)$$

式中: β'_0 为开始卸载时形状记忆系数初值。

SMA 弹簧最大记忆变形 x_L 可以表示为

$$x_L = \frac{\pi D^3 N}{d} (1 + \mu) \varepsilon_L \quad (17)$$

式中: ε_L 为 SMA 最大残余变形。

根据所建立的 SMA 弹簧力学模型, 采用 MATLAB 编制相应的计算求解程序, 为便于同试验结果对比, 引用文献[14]中 SMA 弹簧几何参数和材料性能进行计算, 如表 1 所示。计算结果如图 2 所示。

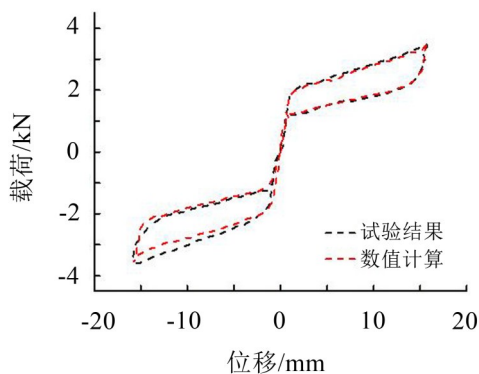


图 2 数值计算与试验结果对比图

从图 2 可以看出, SMA 弹簧在轴向荷载作用下其变化曲线呈现旗帜形, 表现出良好的复位性能; 数值计算结果与试验结果吻合较好, 表明文中所建立的模型能够较好地表述 SMA 弹簧的力学性能。

2.2 变摩擦耗能装置理论模型

当滑块在摩擦板上滑动时, 其力学模型可以简化为沿斜坡运动的滑块, 如图 3 所示。滑块质量为 m , θ 为斜板与水平面夹角。

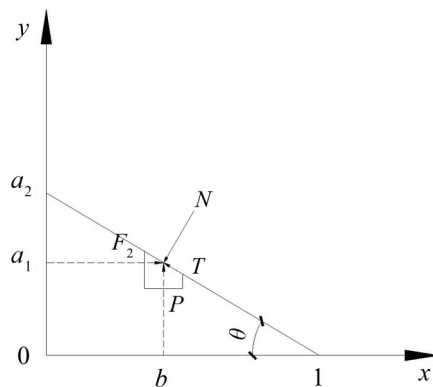


图 3 滑块力学简化模型

假定斜板的函数曲线为 $y = f(x)$, 在斜板两端 $a_2 = f(0)$, $0 = f(1)$, 当滑块运动到任一位置 b 时, 由图 3 所示, 可列出此时滑块受力平衡方程。

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_2 - T \cos \theta - N \sin \theta = 0 \quad (18)$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow P - T \sin \theta - N \cos \theta = 0 \quad (19)$$

式中: T 为滑块在接触面所受摩擦力; N 为滑块在接触面所受法向力; P 为橡胶弹簧所提供弹性力。

倘若滑块处于滑动状态, 则可得出:

$$T = \operatorname{sgn}(\dot{x}) \mu N \quad (20)$$

式中: μ 为滑动与斜板之间的摩擦系数。

由式(19)、式(20)和式(21)可得:

$$F_2 = \frac{\operatorname{sgn}(\dot{x}) \mu + \tan \theta}{\operatorname{sgn}(\dot{x}) \mu \tan \theta + 1} P \quad (21)$$

根据文献[15]可将橡胶弹簧简化为线性弹簧, 由胡克定律可得:

$$P = k \Delta \quad (22)$$

$$k = \frac{E L_1 L_2}{L} \quad (23)$$

式中: k 为橡胶弹簧刚度系数, E 为橡胶弹簧弹性模量; L_1 和 L_2 为橡胶弹簧截面的长和宽; L 为橡胶弹簧初始长度; Δ 为橡胶弹簧压缩变形。

由图 2 可得:

$$\Delta = a_1 - f(b) + \Delta_0 \quad (24)$$

表 1 SMA 弹簧材料参数表

奥氏体弹性 模量 E_a /GPa	奥氏体弹性 模量 E_m /GPa	马氏体开始相 变应力 σ_{ms} /MPa	马氏体开始相 变应力 σ_{mf} /MPa	奥氏体开始相 变应力 σ_{as} /MPa	奥氏体开始相 变应力 σ_{af} /MPa
65.72	37.51	128.21	630.14	377.51	74.12
泊松比 μ	最大残余应变 ε_L	弹簧直径 D /mm	簧丝直径 d /mm	螺旋弹簧圈数	弹簧总长度/mm
0.33	0.047	50	12.5	5	129.8

结合式(22)至式(25)可得:

$$F_2 = \frac{\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu + \tan\theta}{\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu \tan\theta + 1} \frac{EL_1L_2}{L} (a_1 - f(b) + \Delta_0) \quad (25)$$

由 $\tan\theta = |f'(x)|$, 可得滑块滑动至任一 x 位置时出力为

$$F_2 = \frac{\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu + f'(x)}{\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu f'(x) + 1} \frac{EL_1L_2}{L} (a_1 - f(x) + \Delta_0) \quad (26)$$

由式(26)可以看出, 橡胶弹簧变形 $f(x)$ 不断变化, 由此所提供的弹性力也在不断发生变化, 故 F_2 也将随着滑块位置不同而发生变化。

2.3 自复位变摩擦耗能装置恢复力

根据构造形式可知, 自复位变摩擦耗能装置受力特性主要由 SMA 弹簧和变摩擦耗能装置两部分确定。故其恢复力模型应由两部分构成, 即:

$$F = F_1 + F_2 \quad (27)$$

式中: F 为自复位变摩擦耗能装置恢复力。

由式(1)和式(26)即可求出自复位变摩擦耗能装置恢复力模型。

3 自复位变摩擦耗能装置力学性能分析

本文设计自复位变摩擦耗能装置的主要尺寸为: 钢材均采用 Q355 钢材, 板件厚度为 10 mm, 杆件总长 800 mm; 外筒长为 500 mm, 横截面为 150×100 mm; 导杆直径为 30 mm, 长度为 450 mm; 斜板倾角 θ 为 5°; 摩擦材料选用黄铜片; 橡胶弹簧外形尺寸为 50 mm×50 mm×80 mm; SMA 弹簧主要参数如下表 1 所示。其中螺旋弹簧圈数和弹簧总长度分别修改为 12 和 380 mm。

利用 MATLAB 软件编制程序对自复位变摩擦耗能装置力学性能进行仿真分析^[6], 从加载频率和位移幅值两方面探讨其对自复位变摩擦耗能装置力

学性能的影响, 具体加载工况如表 2 所示。

3.1 力学性能参数定义

为便于分析该耗能装置在各工况下的力学性能, 定义如下三个性能参数进行分析:

(1) 单圈循环耗能 W_d

单圈循环耗能是指该耗能装置在一次循环荷载作用下滞回曲线所围面积, 用以描述耗能装置耗能能力。

(2) 等效割线刚度 K_{eq}

$$K_{eq} = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (28)$$

式中: D_{\max} 和 D_{\min} 分别为单次加载循环的最大位移和最小位移; F_{\max} 、 F_{\min} 分别为单次加载循环的最大输出力和最小输出力。

(3) 等效阻尼比 ξ_{eq}

$$\xi_{eq} = \frac{W_d}{2\pi K_{eq} D_{\max}^2} \quad (29)$$

3.2 位移幅值

根据所编程序计算自复位变摩擦耗能装置在各工况下的耗能能力, 图 4 和表 3 分别给出了耗能装置在频率为 0.05 Hz 时不同位移幅值下的滞回曲线和力学性能参数。

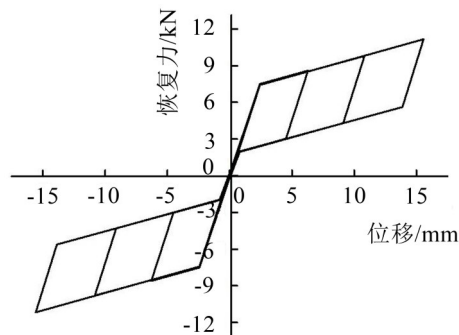


图 4 0.05 Hz 时滞回曲线

表 2 加载工况

工况	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
频率/Hz	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.5	0.5	0.5	1	1	1
幅值/mm	5	10	15	5	10	15	5	10	15	5	10	15

表 3 0.05 Hz 时力学参数

幅值/mm	耗散能量 W_d/J	等效割线刚度 $K_{eq}/(N \cdot mm^{-1})$	等效阻尼比 $\xi_{eq}/(\%)$
5	43.268	1 625	22.88
10	50.850	953	13.27
15	65.554	733	11.53

从表 3 可以看出, 该耗能装置随着位移幅值的增加, 单圈耗能能力逐渐增大, 但其等效割线刚度和

等效阻尼比随着位移幅值地增加呈现降低趋势; 当位移幅值由 5 mm 增加至 15 mm 时, 该耗能装置耗能能力增加了 51.5%, 其等效割线刚度和等效阻尼比分别降低了 54.85% 和 49.6%。

3.3 加载频率

仿真程序计算出自复位变摩擦耗能装置在不同加载频率下的耗能能力, 图 5 和表 4 分别给出了耗能装置在位移幅值为 5 mm 时不同加载频率下的滞回

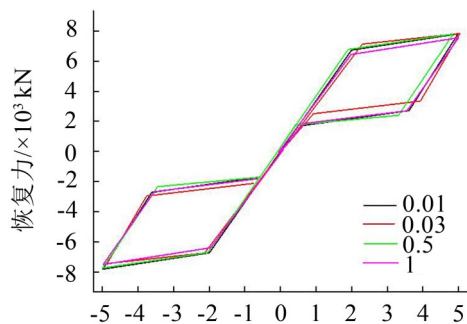


图5 位移幅值为5 mm时的滞回曲线

表4 位移幅值为5 mm时的力学参数

频率/ Hz	耗散能量 W_d/J	等效割线刚度 $K_{eq}/(N \cdot mm^{-1})$	等效阻尼比 $\xi_{eq}/(\%)$
0.01	43.268	1 625	22.88
0.03	43.787	1 641	23.15
0.5	44.046	1 654	23.29
1	42.489	1 595	22.46

曲线和力学性能参数。

从表4及图5可以看出,随着加载频率的增加,该耗能减震装置的单圈耗能能力、等效割线刚度及等效阻尼比的变化不大,表明该减震耗能装置具有稳定的耗能能力,受加载频率影响较小。

4 结 语

本文利用SMA弹簧的超弹性和摩擦材料的高耗能特性研制了一种具有高耗能且自复位的变摩擦耗能减震装置,详细地介绍了其构造形式以及工作原理,并对其滞回特性进行了数值分析,可以得出以下结论:

(1) 所建立的恢复力模型能够较好地描述该耗能装置的力学特性,并且在循环加载和卸载作用下表现出良好的耗能能力。

(2) 当频率相同时,该耗能减震装置的耗能能力随位移幅值的增加而逐渐增大,当位移幅值从5 mm增加到15 mm时,其耗能能力增加51.5%。

(3) 加载频率对该耗能减震装置影响不大,表明其具有稳定的耗能能力。

(4) 提出的自复位变摩擦耗能装置具有高耗能、变摩擦且兼具自复位,易于在工程结构中安装,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李红培,孙鸿玲,张鹏. 汶川地震房屋建筑破坏分析与建筑抗震问题探讨[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(S1): 130-134.
- [2] 吴宏磊,丁洁民,刘博. 超高层建筑基于性能的组合消能减震结构设计及其应用[J/OL]. 建筑结构学报, 2020(3): 14-24.
- [3] 周云,商城豪,张超. 消能减震技术研究与应用进展[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 33-48.
- [4] 景铭,戴君武. 消能减震技术研究应用进展侧述[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(3): 103-110.
- [5] PALL A S, MARSH C. Response of friction damped braced frames[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1982, 108 (6): 1313-1323.
- [6] 王伟,李庆祥. 电磁摩擦耗能装置结构体系被动控制试验研究[J]. 土木工程学报, 2004(12): 17-22.
- [7] 薛素铎,石光磊,庄鹏. SMA复合摩擦阻尼器性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007(2): 145-151.
- [8] 王茜茜,张洵安,任绍章,等. 一种新型半主动摩擦阻尼器的耗能性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 442-447.
- [9] 王社良,展猛,朱熹育,等. 新型压电摩擦阻尼器力学性能实验研究[J]. 材料导报, 2013, 27(22): 112-115.
- [10] SAMANI H R, MIRTAHERI M, ZANDI A P. Experimental and numerical study of a new adjustable frictional damper[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 354-362.
- [11] MONIR H S, ZEYNALI K. A modified friction damper for diagonal bracing of structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 87: 17-30.
- [12] 韩建强,张会峰,乔杨. 滑动长孔高强螺栓摩擦阻尼器滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S2): 315-320.
- [13] 周博,王志勇,薛世峰. 形状记忆合金超弹性螺旋弹簧的力学模型[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 56-64.
- [14] SPEICHER M, HODGSON D, DESROCHES R, et al. Shape memory alloy tension/compression device for seismic retrofit of buildings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(5-6): 746-753.
- [15] 滕睿,陈曦,王涛. 持续变刚度摩擦型阻尼器[J]. 世界地震工程, 2010, 26(4): 114-120.
- [16] 王正林. MATLAB/Simulink与控制系统仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.