

SMA 压电复合减震装置电力学性能及其本构模型^{*}

展 猛^{1,2}, 王社良², 赵 云³

(1. 黄淮学院建筑工程学院 驻马店, 463000) (2. 西安建筑科技大学土木工程学院 西安, 710055)

(3. 天津大学建筑工程学院 天津, 300000)

摘要 针对形状记忆合金(shape memory alloy, 简称 SMA)阻尼器控制力不可调和压电摩擦阻尼器启动难的问题,提出了一种 SMA 单元和压电摩擦单元依次工作的复合减震装置,进行了相应的电力学性能试验,分析了位移幅值、激励频率和输入电压对复合减震装置电力学性能的影响。在试验结果的基础上,建立了以速率符号、电压和位移为神经元输入的优化反向传播(back propagation, 简称 BP)神经网络预测模型。结果表明,该复合减震装置的滞回曲线饱满且基本对称,工作性能稳定,随着电压的增大,滞回环的面积逐渐增大,耗能能力不断增强。在位移幅值为 12 mm、电压为 120 V 下,单圈耗能量提高了 138.23%,等效阻尼比提高了 94.23%。两种智能材料经过合理组合而成的 SMA 压电复合减震装置耗能好、适应性强,可以更好地用于工程结构的减震控制。BP 网络预测模型能够较好地跟踪 SMA 类复合减震装置的输出,而优化后的 BP 网络更加稳定,能够快速得到误差更小的网络模型,该神经网络算法为 SMA 类复合减震装置本构模型的建立和应用提供了新途径。

关键词 形状记忆合金; 压电陶瓷; 力学性能试验; 神经网络; 本构模型

中图分类号 TH14; TU31

引 言

形状记忆合金是一种应用较为广泛的智能材料,利用其相变伪弹性设计成的 SMA 阻尼器已被广泛用于土木工程结构的被动耗能减震控制中^[1-2]。由于不能实时调整控制力,限制了其在结构振动控制中的应用。压电陶瓷是一种具有瞬间电致变形特性的功能材料,其与摩擦阻尼器结合制成的压电摩擦阻尼器是土木工程结构控制常见的一种耗能减震装置^[3-4]。但是,压电摩擦阻尼器一般都需要施加较大的初始压力来约束压电驱动器的变形,其半主动可控制力有限;而预压力较小的话,出力也较小,大震中可能由于耗能不足而起不到有效地减震作用。将 SMA 材料与压电材料制成复合型减震装置可以实现优势互补,对工程结构全过程起到有效减震控制,但研究处于探索阶段,相关研究成果较少。王社良等^[5]前期利用改进的遗传算法,对设计的 SMA 压电复合阻尼器在空间杆系结构中的优化配置进行了分析。Dai 等^[6]将研发的 SMA 压电复合减震装置应用于钢框架模型的基础隔震,进行了振动台试验研究。Ozbulut 等^[7]采用模糊控制算法对 20 层非线性基准结构进行了 SMA 压

电复合减震控制分析。

目前, SMA 复合型减震装置的本构模型大都采用“SMA 数学模型+其他”的形式。例如,钱辉等^[8]设计的 SMA 摩擦复合阻尼器, SMA 单元应力采用 Graesser & Cozzarelli 模型,摩擦耗能单元采用 Bouc-Wen 模型。卞晓芳等^[9]设计的 SMA - 磁流变(magneto-rheological, 简称 MR)复合型阻尼器, SMA 单元采用 Graesser 模型, MR 阻尼力采用 Bingham 模型。这些 SMA 复合型减震装置的本构模型大都将 SMA 和其他单元割裂开,采用传统的数学模型,不但公式繁琐复杂、难以在 Matlab 程序中直接调用,而且精度很难保证。人工神经网络是一种非线性的建模方法,该方法无需预知材料的本构形式,只需考虑影响因素和预期的目标,避免了传统建模方法中的误差。目前,关于 SMA 神经网络本构已有一些研究。崔迪等^[10]采用 BP 网络分别预测了加载段和卸载段不同应变幅值的 SMA 的应力-应变曲线,虽然分段预测的结果精度较高,但实际应用中需将加载段和卸载段合并成完整的受力过程,此时的预测精度将难以保证。任文杰等^[11]以循环次数、加卸载信息和应变值作为神经元输入,采用

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51678480);河南省科技攻关资助项目(192102310277, 182102310834);河南省高等学校重点科研资助项目(19A560016);驻马店市重大科技攻关资助项目(19005)

收稿日期:2018-05-09;修回日期:2018-06-25

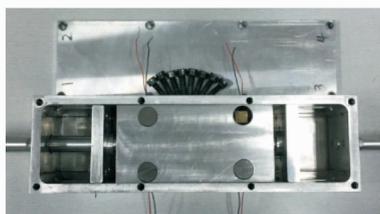
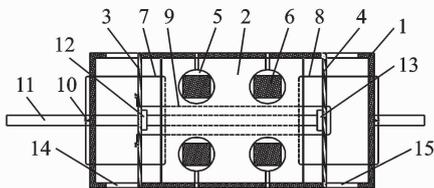
径向基函数(radial basis function,简称RBF)网络预测了同一应变幅值的应力-应变曲线,该模型虽输入参数少、便于应用,但对应变幅值在卸载的初始段无法准确预测。文献[12]考虑加载速率和加载历史等因素,建立了SMA的遗传算法优化BP网络模型,较好地预测了不同应变幅值在卸载初始段的应力-应变曲线,但该模型神经元输入参数较多,增加了结构减震分析计算中的编程难度。神经网络本构模型虽然有一定预测精度,但神经元初始权/阈值的变化对人工神经网络的结果影响较大,因此建立神经网络本构模型中应对其初始权/阈值进行优化,以提高本构模型的精度和稳定性。

笔者结合SMA材料和压电驱动器的物理力学性能特点,提出了一种SMA单元和压电摩擦单元依次工作的复合减震装置,进行了相应的电力学性能试验。在试验结果的基础上,以速率的符号来判断加卸载的方向,建立了以速率符号、电压和位移为神经元输入的复合减震装置BP神经网络模型,并利用人工免疫算法对BP网络模型的权/阈值进行了优化。

1 SMA压电复合减震装置

1.1 构造设计

如图1所示,SMA压电复合减震装置主要由箱体、滑块、挡板、挡环、SMA丝和可拆卸推拉杆等组成。滑块上有4个装有压电陶瓷驱动器的圆孔,上下各有一垫片,压电驱动器的电线穿过圆洞和减震装置箱体侧壁的小圆孔与外接电源连接。SMA丝由复位丝(SMA丝1,2)和耗能丝(SMA丝3)组成,复位丝同时兼具耗能功能,每根SMA丝的两端均由六角法兰带齿螺栓固定在同一侧,以便减少接头。推拉杆在两



1.减震装置箱体; 2.滑块; 3.左挡板; 4.右挡板; 5.圆洞; 6.垫片; 7.SMA丝1; 8.SMA丝2; 9.SMA丝3; 10.六角法兰带齿螺栓; 11.推拉杆; 12.左挡环; 13.右挡环; 14.左滑槽; 15.右滑槽

图1 SMA-压电复合减震装置示意图

Fig. 1 SMA-piezoelectric composite vibration damper

档中间位置断开分成两部分,并通过螺丝旋转拧紧,便于安装。挡板可以在滑槽内左右滑动,同时用来固定SMA丝3。该复合装置的SMA和压电摩擦单元依次工作,当发生小的振动时,SMA单独工作;当发生大的振动时,SMA先工作,然后SMA和压电摩擦单元同时工作,且可以实时调节控制力。

当推拉杆向左运动时,左挡环推着左挡板向左移动,SMA丝3受拉耗能;当右挡环运动至滑块右端时,滑块和左挡板开始一起向左运动,此时SMA丝2,3和压电陶瓷驱动器同时耗能。当推拉杆向右运动时,右挡环顶住右挡板向右侧运动,SMA丝3受拉耗能;当左挡环运动至滑块左端时,滑块和右挡板开始一起向右运动,此时SMA丝1,3和压电陶瓷驱动器同时耗能。

1.2 性能试验

1.2.1 加载方案

考虑到SMA压电复合减震装置试验模型的尺寸以及SMA丝在减震装置中的固定,本次试验所用SMA丝直径为0.7 mm,化学成分为Ti-51%at-Ni。相变温度: M_f 为 -42°C , M_s 为 -38°C , A_s 为 -6°C , A_f 为 -2°C ,该丝在常温状态下处于奥氏体状态。在复合减震装置试验之前,首先对奥氏体SMA丝进行力学试验,以确保SMA丝的性能满足复合装置的耗能要求。鉴于目前单纯SMA丝试验研究较多,这里就不在赘述,仅给出复合装置的电力学试验。各项材料具体参数:SMA丝的最大应变幅值按7%计算,SMA丝3的数量为2根,长度为175 mm,单独工作位移为5 mm,最大伸长量为12 mm;SMA丝1,2卸载时其力比较小且行程较短,为保证复位效果,数量取为4根,长度取为100 mm,最大伸长量为7 mm;压电陶瓷驱动器是苏州攀特电陶瓷科技股份有限公司研制的型号为PTJ1501010301的矩形压电陶瓷驱动器,各项性能指标如表1所示。

表1 矩形压电陶瓷驱动器主要性能指标

Tab. 1 Performance indicators of piezoelectric actuator

参数指标	数值
型号	PTJ1501010301
外形尺寸(A×B×H)/mm	10×10×36
标称位移/ μm	40
0位移推力/N	3 600
刚度/($\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)	90
最大预压力/N	2 000
压电应变系数 $d_{33}/(10^{-12}\text{C}\cdot\text{N}^{-1})$	≥ 650

该试验在某动静材料试验机上进行,试验采用位移控制,三角波加卸载。大量研究证明,频率对SMA丝和压电智能阻尼器力学性能影响很小^[13-14],

这里激励频率取 0.05, 0.1, 0.2 和 0.3 Hz, 加载幅值分别为 5 mm (SMA 丝 3 单独工作)、9 mm 和 12 mm。激励电压分别为 0, 40, 80 和 120 V。试验前, 复合装置在频率为 0.1 Hz, 电压为 0, 最大位移为 12 mm 处拉压循环 30 次, 以保证 SMA 丝的力学性能达到稳定。试验时每个工况拉压循环 2 圈。试验装置如图 2 所示。



图 2 试验装置

Fig. 2 Test apparatus

1.2.2 试验结果

图 3 为不同频率时 SMA 丝 3 单独工作时的控制力-位移曲线。限于篇幅, 图 4 仅给出了施加 40 V 和 80 V 电压下不同频率的输出力-位移曲线。可以看出, 该复合减震装置可以双向受力, 滞回曲线饱满且基本对称, 耗能能力较好、性能稳定, 加载频率对减震装置的性能几乎没有影响。

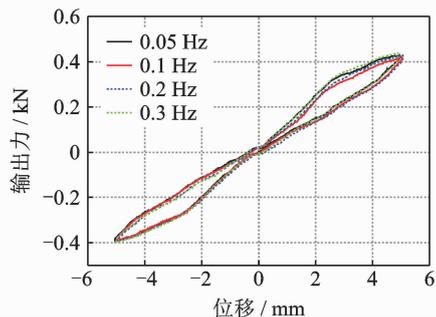
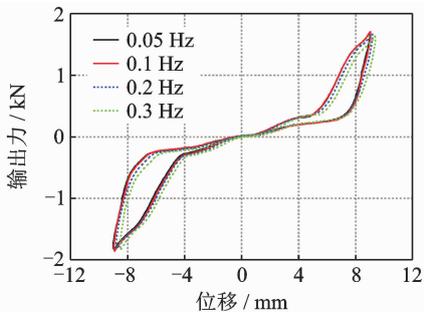
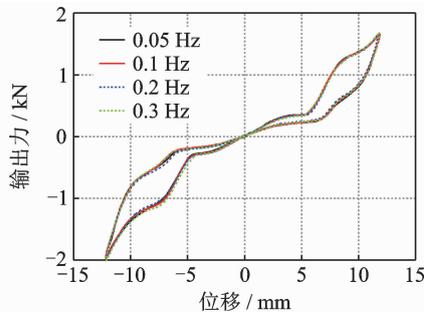


图 3 SMA 丝 3 单独工作时的输出力-位移曲线

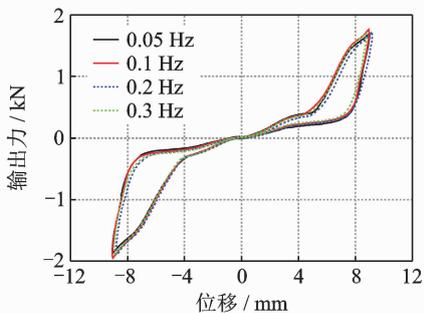
Fig. 3 The output force-displacement curves when SMA wire 3 alone works



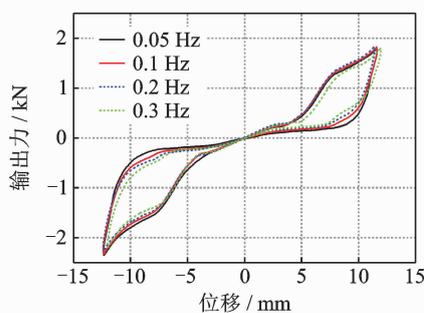
(a) 40 V, 9 mm



(b) 40 V, 12 mm



(c) 80 V, 9 mm



(d) 80 V, 12 mm

图 4 不同频率下的输出力-位移曲线

Fig. 4 The output force-displacement curves under different frequencies

鉴于频率对试验结果影响较小, 这里仅给出 0.1 Hz 下不同电压的控制力位移曲线, 如图 5 所示。可以看出, 当位移幅值大于 5 mm 时, 由于复位丝和初始摩擦力的介入, 控制力显著增大; 且随着电压的增大, 滞回环的面积逐渐增大, 耗能能力不断增强。由于预紧螺栓为点固定, 不能使摩擦面上的摩擦力绝对均匀, 因此滞回曲线并非完全对称, 这里取其绝对平均值作为最大控制力, 如表 2 所示。图 6

为不同位移幅值时各工况对应的最大输出力曲线。可以看出, 压电陶瓷驱动器提供的控制力与输入电压值近似呈线性关系。

压电陶瓷驱动器提供的控制力并不能直观反映其对复合减震装置耗能能力的贡献, 为了分析施加电压下 SMA 压电复合减震装置的力学性能, 现定义以下指标。

1) 单圈循环耗能 W_d 为一次拉压循环滞回曲

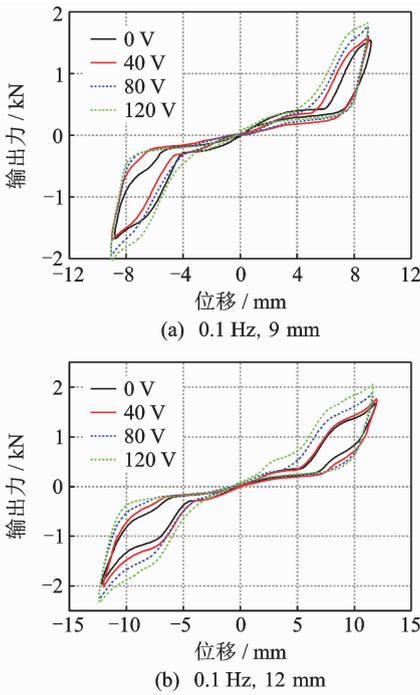


图 5 不同电压时的输出力-位移曲线

Fig. 5 The output force-displacement curves under different voltages

表 2 不同电压下的平均最大控制力

Tab. 2 The average maximum control force under different voltages

位移幅值/ mm	U/ V	最大值/ kN	最小值/ kN	绝对平均值/ kN
5	0	0.420 7	0.388 4	0.404 6
	40	1.541 2	-1.675 8	1.608 5
9	40	1.641 6	-1.789 4	1.715 5
	80	1.758 7	-1.950 7	1.854 7
12	80	1.870 7	-2.095 4	1.983 1
	120	1.666 9	-1.955 3	1.811 1
12	40	1.761 6	-2.088 3	1.925 0
	80	1.878 4	-2.261 8	2.070 1
	120	2.049 8	-2.332 9	2.191 3

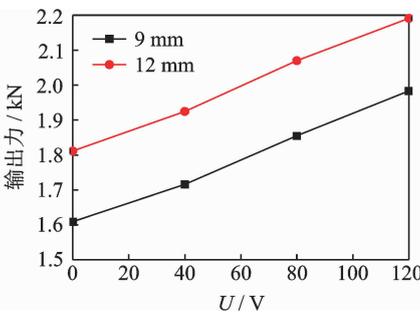


图 6 不同电压时的最大输出力曲线

Fig. 6 The maximum output force curves under different input voltages

能力。耗能提高率 α 为施加电压后减震装置耗能量的提高率,表达式为

$$\alpha = (W_{dU} - W_{d0}) / W_{d0} \quad (1)$$

其中: W_{d0} 为 0 V 所对应的单圈循环耗能; W_{dU} 为除 0 V 外,其他电压下的单圈循环耗能。

2) 单圈循环的等效割线刚度 K_s 的表达式为

$$K_s = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (2)$$

其中: F_{\max}, F_{\min} 为单圈循环中的最大和最小控制力; d_{\max}, d_{\min} 为单圈循环中的最大和最小位移。

3) 单圈循环的等效阻尼比 ζ_a 表示 SMA 压电复合减震装置的阻尼能力,表达式为

$$\zeta_a = \frac{W_d}{2\pi K_s d^2} \quad (3)$$

其中: d 为一次拉压循环中位移幅值。

SMA 压电复合减震装置的各项力学性能指标如表 3 所示。图 7 为不同电压时的单圈耗能曲线。可以看出,同一位移幅值下,随着电压的增加,耗能量逐渐增大,相邻电压间的耗能增量不断增大;相比位移幅值 9 mm 下,12 mm 时的耗能量随电压增加的更快,且同一电压下的耗能增量随电压增加不断增大。这主要是因为随着电压或位移幅值的增大,滞回环的面积增大,在增加相同的控制力时,滞回环增加的面积也越大。电压从 0 V 增加到 120 V,位

表 3 SMA 压电复合减震装置的力学性能指标

Tab. 3 Mechanical performance indicators of composite vibration damper

位移幅值/ mm	U/ V	W_d / J	α / %	K_s / (N · mm ⁻¹)	ζ_a
9	0	4.795	—	179	0.053
	40	5.674	18.33	182.7	0.061
	80	6.906	44.03	205.7	0.066
	120	8.791	83.34	214.4	0.081
12	0	7.007	—	150.7	0.052
	40	9.694	38.35	157	0.068
	80	12.777	82.35	172.5	0.082
	120	16.693	138.23	182.3	0.101

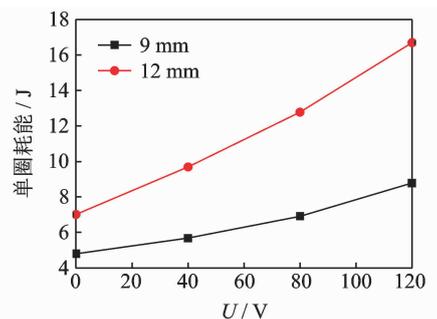


图 7 不同电压时的单圈耗能值

Fig. 7 Lap value of energy consumption under different input voltages

线包围的面积,表示复合减震装置每个循环的耗能

移幅值为 9 mm 时单圈耗能量提高了 83.34%, 位移幅值为 12 mm 时单圈耗能量提高了 138.23%。压电陶瓷驱动器提供的半主动控制力在数值上看起来虽然并不大,但对 SMA 压电复合减震装置的耗能能力却提高较多。

图 8 为等效割线刚度和等效阻尼比随输入电压的变化曲线。同一位移幅值下,随着电压的增加,等效割线刚度和等效阻尼比都不断增大。电压从 0 V 增加到 120 V 时,位移幅值 9 mm 时的等效割线刚度提高了 19.78%,等效阻尼比提高了 52.83%;位移幅值 12 mm 时的等效割线刚度提高了 20.97%,等效阻尼比提高了 94.23%。随着位移幅值增大,等效割线刚度减小,等效阻尼比增大,耗能能力增强。随着电压的增大,不同位移幅值的等效割线刚度的增量变化较小,而此时的单圈耗能增量增大(图 7),因此等效阻尼比的增量也逐渐增大。

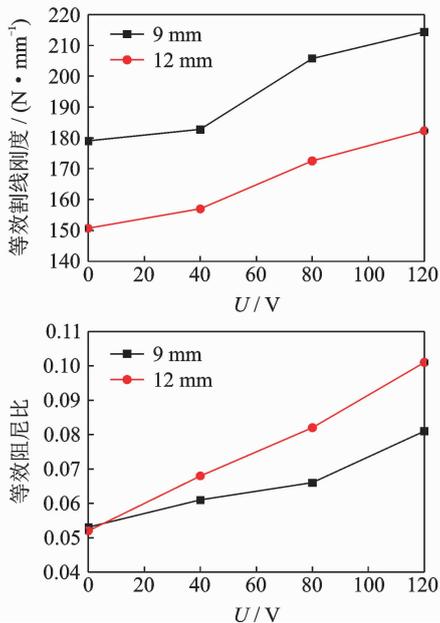


图 8 等效割线刚度和等效阻尼比随电压变化曲线

Fig. 8 Equivalent secant stiffness and damping ratio curves under different voltage

2 复合减震装置神经网络本构模型

2.1 网络结构

以速率的符号来判断加卸载的方向,同时考虑施加电压的影响,建立 3 层 BP 神经网络模型来预测 SMA 压电复合减震装置的输出力。由于频率对试验结果影响较小,且没有呈现明显的规律性,因此 SMA 压电复合减震装置神经网络本构模型不再考虑频率因素,其神经元输入为电压、位移和速率符号,隐层通过估算法确定^[15],取 10 个,神经元输出

为控制力,拓扑结构为 3-10-1。

2.2 样本数据

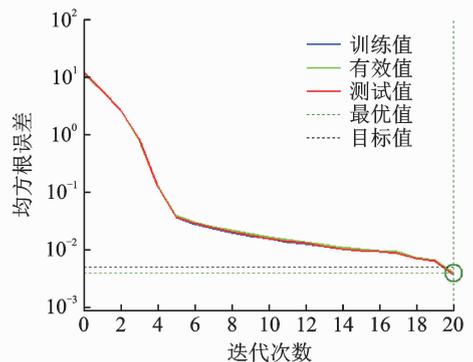
由于 SMA 压电复合减震装置试验工况较少,施加电压的位移幅值只有 2 个,且每个工况仅循环了 2 圈,可以把不同频率的试验数据看成圈数,以增加样本数量,同时不再预测不同位移幅值的输出力-位移曲线,仅考虑不同电压下的本构曲线预测。试验工况共有 8 个,选取其中 2 组作为检验数据,分别为:a. 位移幅值为 9 mm、电压为 80 V;b. 位移幅值为 12 mm、电压为 80 V。其余 6 种工况为训练样本。

2.3 优化参数

未经优化 BP 网络的初始权/阈值由系统随机分配;而经优化 BP 网络的初始权/阈值由人工免疫算法^[16]寻优确定。由 BP 网络的结构可知,BP 网络待确定的权值有 $3 \times 10 + 10 \times 1 = 40$ 个,待确定的阈值有 $10 + 1 = 11$ 个,因此优化算法的变量为所有权值和阈值,变量总数为 51 个。采用实值编码,染色体长度为 51,目标函数取训练样本经 BP 网络预测所得的期望输出与实际输出的误差平方和。人工免疫算法的其他参数设置如下:初始抗体种群为 10,克隆规模为 10,变异概率为 0.005,一般抗体单元概率阈值取 0.1,记忆单元概率阈值取 0.01,记忆单元个体数量为 5。

2.4 仿真结果

图 9 为第 2 组检验数组神经网络预测模型的收敛进程。由于神经网络每次运行得到的结果都在变化,而理论上未优化的 BP 网络在多次运行中也能找到最优值,因此这里采取随机运行进行优化与未优化对比。图 10 为随机二次运行的未优化 BP 预测曲线与试验曲线的对比图。可以看出,由于初始权/阈值的随机性,使每次训练学习后得到的 BP 网络波动较大。图 11,12 为试验曲线与未优化 BP 网络、优化 BP 网络预测曲线的对比图与样本绝对误差图。可以看出,除个别点偏差较大外,大部分数据点误差控制在



(a) 收敛进程

(a) Convergence process

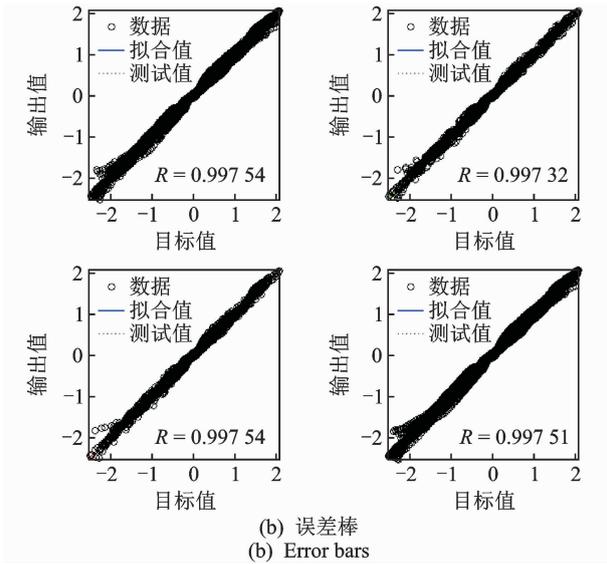


图 9 第 2 组检验数据的收敛进程

Fig. 9 Convergence process of the second group test data

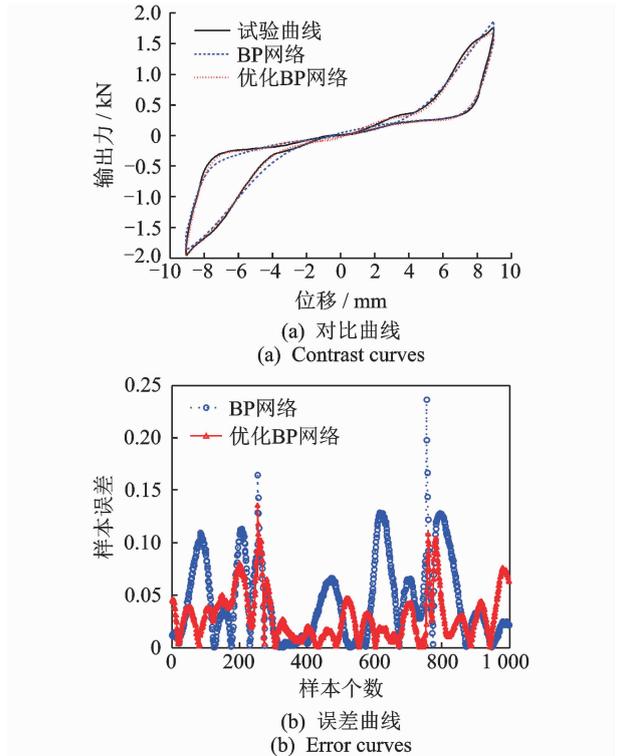


图 11 位移幅值 9 mm 时的预测曲线与样本绝对误差

Fig. 11 Prediction curve and absolute error at 9 mm

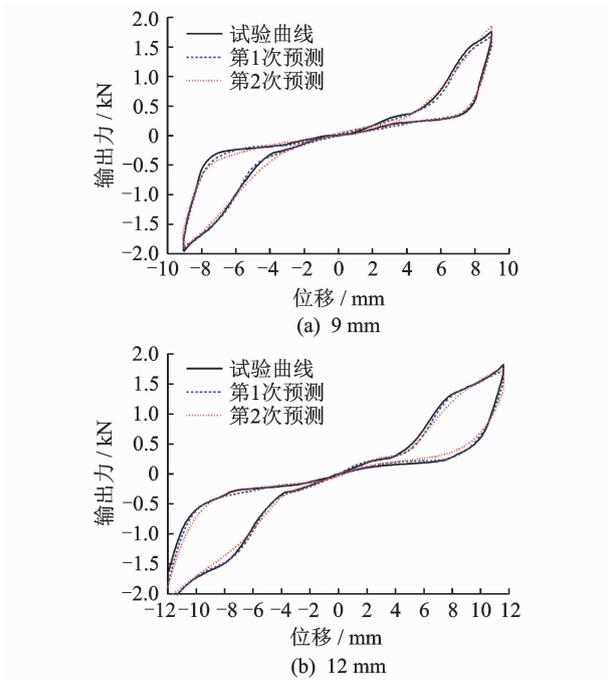


图 10 未优化预测曲线与试验曲线对比

Fig. 10 The comparison between no optimization forecasting curve and test curve

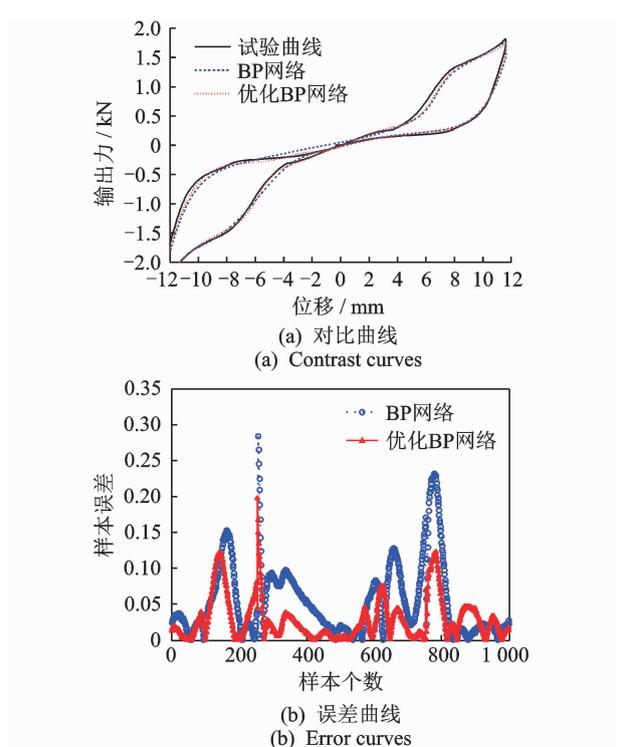


图 12 位移幅值 12 mm 时的预测曲线与样本绝对误差

Fig. 12 Prediction curve and absolute error at 12 mm

0.2 kN 以内,能够满足实际应用需要。优化与未优化 BP 网络模型均能较好地预测复合减震装置在施加电压下的输出力,但优化后 BP 网络更稳定、精度更高,可以快速得到误差更小的网络模型。

3 结论

1) 该复合减震装置滞回曲线饱满且基本对称,

耗能能力较好,性能稳定。随着电压的增大,滞回环的面积逐渐增大,耗能能力不断增强。在位移幅值为 12 mm、电压为 120 V 下,单圈耗能量提高了

138.23%,等效阻尼比提高了94.23%。可见,SMA压电复合减震装置具有较好的半主动耗能能力。

2) 由于神经网络的初始权/阈值为人工免疫算法寻优得到的最优初始权/阈值,相比未优化的BP网络而言,优化后的BP网络提高了预测模型的稳定性,可以更加快速地得到误差更小的网络模型。

3) 除个别点偏差较大外,BP网络模型预测后的大部分数据点误差控制在0.2 kN以内,可以满足实际应用需要,且这种以速率符号、电压和位移为神经元输入的BP神经网络本构模型便于在Matlab中实现,为SMA复合类减震装置本构模型的建立和应用提供了新途径。

参 考 文 献

- [1] Li Ran, Ge Hanbin, Shu Ganping. Parametric study on seismic control design of a new type of SMA damper installed in a frame-type bridge pier[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 31(2): 1-14.
- [2] Khosravi H, Ghaderi M, Atashi A, et al. Study on seismic behavior of a concrete elevated tank with frame shaped base using SMA damper[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2017, 19(7): 5248-5260.
- [3] Pardo-Varela J, Llera J C. A semi-active piezoelectric friction damper[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2015, 44(3): 333-354.
- [4] Etedali S, Sohrabi M R, Tavakoli S. Optimal PD/PID control of smart base isolated buildings equipped with piezoelectric friction dampers[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12(1): 39-54.
- [5] 王社良,黄鑫,展猛. 基于SMA-压电摩擦智能阻尼器的空间杆系结构优化控制[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(6): 86-91.
Wang Sheliang, Huang Xin, Zhan Meng. Optimization control of spatial frames based on SMA-piezoelectric smart friction damper[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 36(6): 86-91. (in Chinese)
- [6] Dai Naxin, Tan Ping, Zhou Fulin. A smart base-isolation using piezoelectric friction damper[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 250/253: 1281-1286.
- [7] Ozbulut O E, Hurlbauss S. Application of an SMA-based hybrid control device to 20-story nonlinear benchmark building[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2012, 41: 1831-1843.
- [8] 钱辉,李宏男,任文杰,等. 形状记忆合金复合摩擦阻尼器设计及试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(9): 58-64.
Qian Hui, Li hongnan, Ren Wenjie, et al. Design and test study of shape memory alloy composite friction damper [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(9): 58-64. (in Chinese)
- [9] 卞晓芳,薛素铎. SMA-MR复合型阻尼器[J]. *世界地震工程*, 2004, 20(2): 23-29.
- Bian Xiaofang, Xue Suduo. SMA - MR composite damper [J]. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(2): 23-29. (in Chinese)
- [10] 崔迪,李宏男,宋钢兵. 形状记忆合金超弹性本构关系的神经网络模型[J]. *振动工程学报*, 2006, 19(1): 109-113.
Cui Di, Li Hongnan, Song Gangbing. Neural network model of shape memory alloy hyperelastic constitutive relation [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2006, 19(1): 109-113. (in Chinese)
- [11] 任文杰,李宏男,王利强. 基于神经网络的超弹性形状记忆合金循环本构模型[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 9(2): 243-246.
Ren Wenjie, Li Hongnan, Wang Liqiang. Superelastic shape memory alloy cyclic constitutive model based on neural network [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 9(2): 243-246. (in Chinese)
- [12] 余滨杉,王社良,杨涛,等. 基于遗传算法优化的SMABP神经网络本构模型[J]. *金属学报*, 2017, 53(2): 248-256.
Yu Binshan, Wang Sheliang, Yang Tao, et al. BP neural network constitutive model based on optimization with genetic algorithm for SMA [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2017, 53(2): 248-256. (in Chinese)
- [13] Ramos A D D O, Araújo C J D, Macêdo G A, et al. An experimental investigation of the superelastic fatigue of NiTi SMA wires[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering*, 2018, 40(4): 1-14.
- [14] Unsal M, Niegreeki C. A new semi-active piezoelectric-based friction damper[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 5052: 413-420.
- [15] 展猛,王社良,王德利. 基于BP网络本构模型的SMA拉索系统优化控制分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(3): 187-192.
Zhan Meng, Wang Sheliang, Wang Deli. Optimization control analysis of SMA lasso system based on BP network constitutive model [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 36(3): 187-192. (in Chinese)
- [16] Zhan Meng, Wang Sheliang, Yang Tao, et al. Optimum design and vibration control of a space structure with the hybrid semi-active control devices [J]. *Smart Structures and Systems*, 2017, 19(4): 341-350.



第一作者简介:展猛,男,1989年4月生,博士、讲师。主要研究方向为智能材料与结构振动控制。

E-mail: zhanyi313@163.com