

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.10.020

基于混合灵敏度设计的结构 H_∞ 鲁棒半主动控制

林秀芳^{1,2}, 陈淑梅², 林蔚青³

1. 闽江学院 福建省先进运动控制重点实验室, 福州 350108;
2. 福州大学 福建省流体动力与电液智能控制重点实验室, 福州 350108;
3. 宁德师范学院 信息与机电工程学院, 福建 宁德 352000

摘要: 为兼顾基于磁流变阻尼器(MRD)的结构减振效果和控制算法的鲁棒性, 提出了一种改进的 H_∞ 鲁棒半主动控制方法. 将基于干扰抑制问题的 H_∞ 控制系统的设计转化为混合灵敏度求解问题, 为了克服对工程经验的依赖性, 并提高主动控制力的计算精度, 提出利用鲸鱼优化算法对 H_∞ 控制器的混合灵敏度加权函数进行带约束优化设计. 利用限幅电压定律, 将所设计的鲁棒控制器输出的主动控制力转换成 MRD 的控制信号, 从而输出理想的阻尼力. 研究表明: 相较于其他 4 种半主动控制算法, 本文所提出的控制算法具有更优越的综合控制性能. 此外, 该算法对地震波和结构参数的变化具有鲁棒性.

关键词: 磁流变阻尼器; 振动控制; 鲸鱼优化算法; H_∞ 控制;
混合灵敏度设计; 限幅电压定律

中图分类号: TU352; TP273

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2021)10-0154-13

Mixed-Sensitivity Design Based H_∞ Robust Semi-Active Control for Structural Vibration

LIN Xiufang^{1,2}, CHEN Shumei², LIN Weiqing³

1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Motion Control, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Fluid Power and Intelligent Electro-Hydraulic Control, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
3. College of Information and Mechatronics Engineering, Ningde Normal University, Ningde Fujian 352000, China

Abstract: To ensure both the MRD-based (magnetorheological damper-based) structural vibration control effect and the robustness of the control algorithm, an advanced semi-active H_∞ robust control strategy is proposed in this paper. The design of the H_∞ control system is converted into the solution of a mixed sen-

收稿日期: 2020-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405084); 福建省教育厅科技项目(JAT190643).

作者简介: 林秀芳, 副教授, 博士, 主要从事机电液系统控制和智能优化算法研究.

通信作者: 林蔚青, IET 特许工程师, 高级工程师, 硕士.

sitivity problem. In order to overcome the dependency on engineering experience and improve the accuracy of active control calculation, we use the whale optimization algorithm to make an optimization design with constraint of the mixed weighted sensitivity function of the H_∞ control. Using the limited voltage law, we convert the active control put out by the designed robust controller into the control command of the MRD, so as to put out the desired damping force. Numerical analysis results based on a three-story Benchmark frame structure verify that the proposed control algorithm outperforms the other four semi-active control algorithms in terms of the comprehensive control performance and exhibits robustness in terms of the changes of the earthquake excitations and structural parameters.

Key words: magnetorheological damper; vibration control; whale optimization algorithm; H_∞ control; mixed-sensitivity design; clipped voltage law

土木结构抗震性能的优劣关乎人类生命和财产安全, 如何提高土木结构的抗震能力一直以来都是工程领域的研究热点. 磁流变阻尼器(MRD)是一种颇具应用前景的智能半主动控制装置, 它兼有主动控制装置和被动控制装置的优点. 近年来, 基于它的振动控制研究已经获得越来越多的关注^[1-2]. 为了使 MRD 的优良减震特性得到充分发挥, 基于它的半主动控制研究仍有待进一步深入.

现有的利用 MRD 进行振动控制的算法主要包括线性最优控制^[3]、 H_∞ 控制^[4]、滑模控制^[5]、模糊控制^[6]、神经网络控制^[7]等. 在结构振动控制中, 由于存在系统建模误差和结构参数摄动, 难以建立精确的控制模型, 因此要求所采用的控制算法具有较强的鲁棒性. 作为一种鲁棒控制方法, 近年来 H_∞ 控制在 MRD 半主动振动控制中的研究受到越来越多的关注. Yeganehfallah 等^[4] 为了实现地震波激励下的斜拉索桥 MRD 振动控制, 设计了一种 H_∞ 鲁棒控制器. 研究表明, 这种控制方法能够有效减小参数不确定性对系统地震响应的影响. Wu 等^[8] 针对 MRD 悬架减振问题, 设计了一种考虑时变载荷的 H_∞ 半主动控制方法, 仿真和实验结果均表明在不同的路况激励下, 该控制方法都能提升乘坐舒适度和车辆驾驶性能. 然而, 这些研究中的 H_∞ 控制算法更侧重考虑系统的鲁棒稳定性, 控制器的设计相对比较保守.

混合灵敏度 H_∞ 控制作为一种典型的 H_∞ 控制, 可以通过调整控制器结构以及对闭环传递函数进行增益成形, 满足系统的动态特性的不同需求, 在保证鲁棒稳定的同时改善系统的性能指标. 张子健等^[9] 针对机翼颤振问题, 设计了一种混合灵敏度 H_∞ 控制器, 仿真结果表明, 相比 LQG 控制器, 该控制方法将颤振速度提高了 12.2%, 能够更加有效地抑制机翼颤振. Çetin 等^[10] 针对全阶-六自由度建筑结构的 MR 阻尼器振动控制问题, 提出一种考虑降阶模型的混合灵敏度 H_∞ 半主动控制方法, 实验结果表明, 这种控制方法具有良好的结构响应控制效果和鲁棒稳定性. 但是, 混合灵敏度 H_∞ 控制性能在很大程度上取决于其加权函数的选择, 且当控制对象和控制指标改变时, 其加权函数也必须随之改变. 而目前加权函数还没有确切的选择方法, 函数之间也没有特定的规律可循, 通常需要经过一系列试计算确定. 为了克服加权函数的选取对工程经验的依赖性, 采用智能优化算法对其进行优选是一种切实可行的方案^[11].

智能优化算法是一类能够有效求解复杂非线性问题的优化方法, 具有很强的通用性和鲁棒性^[12-14]. 鲸鱼优化算法(WOA)由 Mirjalili 等^[15] 于 2016 年提出, 是一种新兴的群智能优化算法. 该算法需要调节的参数很少, 算法简单易实现, 且具有很强的寻优能力. 该文献研究结果表明, WOA 在求解一系列数学优化问题和结构设计问题时所展现的性能均优于差分进化算法和重力搜索算法等多种现有的优化算法. Aljarah 等^[16] 采用 WOA 训练多层感知神经网络, 仿真结果表明, 针对大部分数据集而言, WOA 在收敛精度和收敛速度方面的性能都优于反向传播算法和包括遗传算法、人工蜂群算法以及蚁群算法在内的其他 6 种智能优化算法. 此外, WOA 还被成功地用于解决传感器网络优化^[17]、电力设备定位优化^[18]、机组组合^[19] 以及无线网络资源分配^[20] 等工程问题.

基于上述分析, 本文针对地震波激励下的结构振动问题, 考虑到结构模型中忽略的不确定性和减振性能要求, 提出一种改进的混合灵敏度 H_∞ 鲁棒半主动控制方法. 其中, 鉴于混合灵敏度 H_∞ 控制器加权函数难以确定的问题, 提出采用 WOA 对其进行优化设计. 虽然 WOA 已在多领域得到成功应用, 但据笔者所知, 尚未发现其在 H_∞ 控制器优化设计方面的研究. 在该半主动控制策略中, 首先利用基于 WOA 优化的混合灵敏度 H_∞ 控制器计算主动控制力, 然后引入限幅电压定律(CVL)^[1], 使其根据主动控制力计算 MRD 的控制信号, 最终实现基于 MRD 的半主动控制. 为验证所提出的控制方法的有效性, 本文将针对地震波激励下的 Benchmark 结构, 通过仿真测试, 比较所提出的控制方法与现有其他几种控制方法的控制效果. 此外, 还将分析地震波和结构参数变化时该控制方法的控制效果.

1 半主动控制策略

本文所提出的 H_∞ 鲁棒半主动控制策略(简称 WOA- H_∞ -CVL)框图见图 1. 该半主动控制系统由两级子系统组成, 第一级是混合灵敏度 H_∞ 控制系统, 其作用是计算闭环控制系统的主动控制力. 鉴于全状态结构响应往往难以直接测量, 即使可以全部测量, 传感器的需求量将大幅增加, 这将会增加控制成本, 同时还有可能降低系统的可靠性, 因此, 本文采用基于加速度的输出反馈的控制方式.

确定了最优主动控制力后, 决定 MRD 输入电压的切换方法是 MRD 半主动控制的关键. 本控制策略中第二级控制系统是采用限幅电压定律将主动控制力转换成 MRD 的控制信号. 其核心控制律^[1]是: 当 MRD 的阻尼力 $f = f_c$ (主动控制力) 时, 控制电压 u 维持原值; 当 $f < f_c$ 或者这两个力同号时, 为了让 f 尽可能与 f_c 匹配, 使 $u = u_{max}$; 否则, 令 $u = 0$.

本文采用 WOA 优化混合灵敏度 H_∞ 控制系统, 在优化过程中, CVL 也参与闭环计算, 以获得更优的主动控制力. 由于位移响应和加速度响应分别与建筑结构的稳定性和建筑内部人员在地震时的体感舒适度密切相关, 故将这两种结构响应定为 WOA 优化目标函数(见公式(16))的两大因素. 需要注意的是, 在本文中仿真时采用现象模型^[1]作为 MRD 的正向模型, 以替代真实的阻尼器, 用于计算阻尼力.

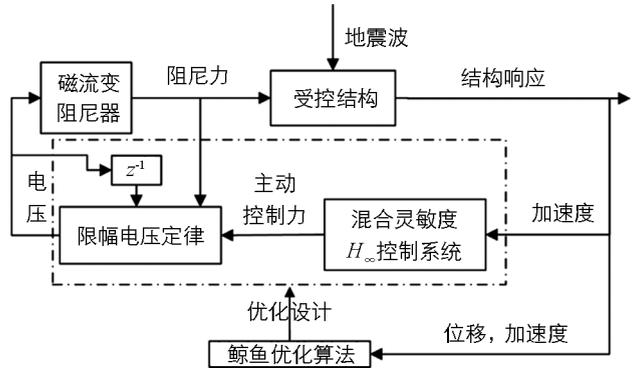


图 1 WOA- H_∞ -CVL 半主动控制策略框图

2 结构减振混合灵敏度 H_∞ 控制

2.1 标准 H_∞ 控制

广义控制对象 G 和控制器 K 组成的标准 H_∞ 闭环系统如图 2 所示. 图中, w, u, y 和 z 分别是外部激励输入、控制输入、测量输出和受控输出.

广义控制对象 G 是一个两输入-两输出的开环系统, 可将其分块表达为

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

受控输出 z 和受控输出 y 可用如上的分解矩阵表达为

$$z = G_{11}w + G_{12}u$$

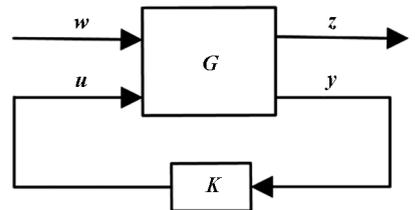


图 2 标准 H_∞ 控制框图

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}_{21}\mathbf{w} + \mathbf{G}_{22}\mathbf{u} \quad (2)$$

根据图 2, 控制输入 \mathbf{u} 表示为

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{y} \quad (3)$$

如果 $(\mathbf{I} - \mathbf{G}_{22}\mathbf{K})$ 是可逆的真实有理矩阵, 则

$$\mathbf{z} = (\mathbf{G}_{11} + \mathbf{G}_{12}\mathbf{K}(\mathbf{I} - \mathbf{G}_{22}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{G}_{21})\mathbf{w} \quad (4)$$

其中, \mathbf{I} 是单位矩阵. 于是, 从 \mathbf{w} 到 \mathbf{z} 的传递函数 $\mathbf{T}_{z\mathbf{w}}$ 可用线性分式变换表示为

$$\mathbf{T}_{z\mathbf{w}}(s) = LFT(\mathbf{G}, \mathbf{K}) = \mathbf{G}_{11} + \mathbf{G}_{12}\mathbf{K}(\mathbf{I} - \mathbf{G}_{22}\mathbf{K})^{-1}\mathbf{G}_{21} \quad (5)$$

因此, 标准 H_∞ 控制的设计问题可描述为求解一个正则实有理控制器 \mathbf{K} , 使闭环系统内稳定且闭环传递函数 $\mathbf{T}_{z\mathbf{w}}$ 的 H_∞ 范数达到最小.

2.2 标准 H_∞ 控制混合灵敏度问题

混合灵敏度 H_∞ 控制是对传递函数 $\mathbf{T}_{z\mathbf{w}}$ 进行加权处理, 构建混合灵敏度广义对象模型. 鉴于地震波激励下的结构的减振控制属于抗干扰问题, 本文采用 PS/T 型混合灵敏度控制^[10], 该混合灵敏度 H_∞ 控制标准形式如图 3 所示.

图中, \mathbf{P} 是名义对象, 即真实的控制对象. 虚线框所示内容为广义控制对象. \mathbf{K} 是控制器系统, \mathbf{u} 是控制器产生的控制力, \mathbf{w} 是地震波激励, \mathbf{y} 是测量得到的结构加速度响应, z_1 和 z_2 是评估信号.

\mathbf{W}_1 称为灵敏度加权函数, 用于描述扰动的频谱, 又称为干扰衰减性能指标, 引入该加权函数是为了保证 H_∞ 控制系统的鲁棒性能, 即提高系统输出信号 \mathbf{y} 抵抗外部扰动 \mathbf{w} 的能力. \mathbf{W}_2 称为补灵敏度加权函数, 它代表系统乘性不确定性的范数界, 通过设计合理的 \mathbf{W}_2 可以抑制未建模动态不确定性, 并限制控制量的大小, 以防执行器因控制量过大造成损害.

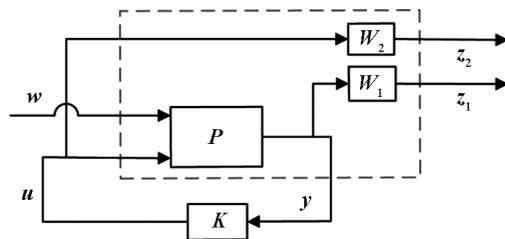


图 3 混合灵敏度 H_∞ 控制标准形式

图 3 虚线框中的名义对象 \mathbf{P} 与加权函数 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 组成了标准 H_∞ 控制中的广义对象 \mathbf{G} , \mathbf{G} 可表达为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1\mathbf{P} & \mathbf{W}_1\mathbf{P} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_2 \\ \mathbf{P} & \mathbf{P} \end{bmatrix} \quad (6)$$

针对图 3, 可以构建一个标准受控系统, 则从扰动输入 \mathbf{w} 到受控输出 \mathbf{z} 的闭环传递函数可表示为

$$\mathbf{T}_{z\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1\mathbf{P}(\mathbf{I} - \mathbf{PK})^{-1} \\ \mathbf{W}_2(\mathbf{I} - \mathbf{PK})^{-1}\mathbf{PK} \end{bmatrix} \quad (7)$$

令

$$\mathbf{S} = (\mathbf{I} - \mathbf{PK})^{-1} \quad \mathbf{T} = (\mathbf{I} - \mathbf{PK})^{-1}\mathbf{PK}$$

则 \mathbf{S} 和 \mathbf{T} 分别称为灵敏度函数和补灵敏度函数. \mathbf{S} 越小, 对外干扰信号的抵抗能力越强. \mathbf{T} 越小, 系统的鲁棒稳定性越强.

因此, 闭环传递函数可重新定义为

$$\mathbf{T}_{z\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1\mathbf{PS} \\ \mathbf{W}_2\mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (8)$$

该混合灵敏度设计的目的是针对控制对象 \mathbf{P} , 通过选择合适的加权函数 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 , 找到一个合适的控制器 \mathbf{K} , 使得上述闭环系统的闭环系统 H_∞ 范数达到最小.

针对该混合灵敏度 H_∞ 控制问题, 当将其转化为标准 H_∞ 控制问题后, 可以采用线性矩阵不等式 (LMI) 方法求得控制器 \mathbf{K} . 由上述分析可知, 在确定实际受控对象 \mathbf{P} 之后, 广义对象 \mathbf{G} 由加权函数决定,

因此控制器设计成功与否的关键在于加权函数 W_1 和 W_2 的选择.

3 基于 WOA 的半主动控制系统的优化设计

3.1 WOA 的工作原理

鲸鱼优化算法(WOA)是一种基于座头鲸 Bubble-net 捕食方法的新型元启发式优化算法,在该算法中,每一个鲸鱼个体都携带一串对应其位置的代码(即问题的可能解).基于文献[14],WOA 的核心数学模型可以描述为搜索和包围猎物与螺旋更新位置两个阶段,其相应的伪代码为

初始化鲸鱼种群 $\mathbf{X}(0) = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N]$

计算每个解的适应度

\mathbf{X}^* = 最优解

开始执行 WOA 搜索

$t = 1$

当 $t \leq$ 最大迭代次数 T_{\max} 时,

更新每个解的 \mathbf{a} , \mathbf{A} , \mathbf{C} , l 以及 p

如果 $p < 0.5$

如果 $|\mathbf{A}| < 1$, 则

用公式(14)更新当前解

如果 $|\mathbf{A}| \geq 1$, 则

选择一个随机解 \mathbf{X}_{rand}

用公式(10)更新当前解

如果 $p \geq 0.5$, 则

用公式(15)更新当前解

检验解中的任何一个参数是否超过给定的搜索空间,如有,对其进行修正

计算每个解的适应度

如果有更优解,则更新 \mathbf{X}^*

$t = t + 1$

结束循环

返回 \mathbf{X}^*

结束程序

1) 搜索和包围猎物

搜索猎物的数学模型表达为

$$\mathbf{D} = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}_{\text{rand}} - \mathbf{X}| \quad (9)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}_{\text{rand}} - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (10)$$

其中 t 表示目前迭代次数, \mathbf{X} 表示该个体的位置向量, \mathbf{X}_{rand} 是从当前种群中选取的随机位置向量. 在每次迭代后如果有更优解,位置向量 \mathbf{X} 将被更新. \mathbf{A} 和 \mathbf{C} 是系数向量,表达为

$$\mathbf{A} = 2\mathbf{a} \cdot \mathbf{r} - \mathbf{a} \quad (11)$$

$$\mathbf{C} = 2 \cdot \mathbf{r} \quad (12)$$

式中, \mathbf{a} 在整个迭代过程中沿着 $2 \sim 0$ 线性下降, \mathbf{r} 是一个变化范围为 $[0, 1]$ 的随机向量.

需要注意的是,按照公式(9)和公式(10)执行猎物搜索的前提条件是 $|\mathbf{A}| \geq 1$,该搜索机制侧重算法的全局搜索.当 $|\mathbf{A}| < 1$ 时,将执行收缩机制以便包围猎物,这是局部深度搜索阶段.此时,根据如下公式进行解的更新:

$$\mathbf{D}' = |\mathbf{C} \cdot \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)| \quad (13)$$

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}' \quad (14)$$

其中, \mathbf{X}^* 表示目前为止最优的位置向量(即最优解).

2) 螺旋更新位置

座头鲸在收缩包围猎物的同时, 还作螺旋式上升运动. 为了模拟这种运动行为, 假设采用收缩包围机制和螺旋上升机制更新解的概率均为 50%. 该过程的数学模型如下:

$$\mathbf{X}(t+1) = \begin{cases} \mathbf{X}^*(t) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}' & \text{如果 } p < 0.5 \\ \mathbf{D}'' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(t) & \text{如果 } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

其中 p 是一个 $[0, 1]$ 之间的随机数, 根据这个值, 算法能够在螺旋和圆周运动之间切换, 其中, 后者也是一种局部深度搜索过程. $\mathbf{D}'' = |\mathbf{X}^*(t) - \mathbf{X}(t)|$ 表示第 i 个鲸鱼个体迄今为止与最佳猎物的距离. b 是用于定义对数螺旋线的常量, l 是一个 $[-1, 1]$ 之间的随机数.

3.2 半主动控制系统的优化流程

WOA- H_∞ CVL 控制系统的具体设计流程描述如下:

1) 确定优化目标函数:

$$Obj = \alpha O_1 + (1 - \alpha) O_2 \quad (16)$$

式中,

$$O_1 = \frac{\max |x_i(t)|}{x_{\text{unctrl}}} \quad O_2 = \frac{\max |\ddot{x}_{ai}(t)|}{\ddot{x}_{a,\text{unctrl}}}$$

其中, $x_i(t)$ 和 $\ddot{x}_{ai}(t)$ 分别是第 i 层楼的相对位移(后续简称为位移)和绝对加速度(后续简称为加速度), x_{unctrl} 和 $\ddot{x}_{a,\text{unctrl}}$ 分别是结构在无控时的最大位移和最大绝对加速度. α 是反映单目标函数 O_1 和 O_2 相对重要性的权重. 在本文中, 令 Obj 亦为 WOA 中的适应度函数.

2) 根据名义受控对象和 MRD 的数量, 确定控制系统的输入和输出的数量, 并确定加权函数的结构及其待优化参数. 其中, 为使所设计的控制器结构简单且在工程上易于实现, 令加权函数均为对角化的实有理函数阵, 即

$$\mathbf{W}_1 = \text{diag}(\omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1m}) \quad (17)$$

$$\mathbf{W}_2 = \text{diag}(\omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{2n}) \quad (18)$$

为便于解耦计算, 令该 m 输入 $-n$ 输出的混合灵敏度 H_∞ 控制系统的加权函数上述元素的结构均为一阶正则形式, 见第 4.1 节.

3) 对代表加权函数参数完整信息的待优化参数进行编码. 为了同时保证控制系统的抗干扰能力和稳定鲁棒性, 分别将加权函数 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 选为低通滤波器和高通滤波器. 在此基础上, 根据受控对象属性界定待优化参数的搜索空间.

4) 算法初始化: 随机生成鲸鱼个体的位置信息 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N]$, 将其作为初始的待优化参数, 并初始化算法参数, 包括种群大小 N 和迭代次数 T_{\max} .

5) 计算适应度: 首先根据步骤 2 和 3 确定每个鲸鱼个体对应的加权函数 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 , 然后求解广义对象 \mathbf{G} , 接着基于 LMI 方法求解相应的控制器 \mathbf{K} , 最后根据公式(16) 计算第 i 个个体位置向量 \mathbf{X}_i 的适应度 $F(\mathbf{X}_i)$. 由于 WOA- H_∞ CVL 半主动控制系统是由混合灵敏度 H_∞ 主动控制系统和 CVL 组成的闭环系统, 即使主动控制闭环系统稳定, 其开环控制系统也可能失稳. 因此计算适应度 $F(\mathbf{X}_i)$ 时, 首先判断混合灵敏度 H_∞ 开环系统是否稳定, 如果否, 则该解无效, 令 $F(\mathbf{X}_i) = 1$; 否则, 继续判断 H_∞ CVL 闭环半主动控制系统中任意一个主动控制力是否超过 MRD 的出力量程, 如果是, 则该解也无效, 令 $F(\mathbf{X}_i) = 1$; 否则, 根

据公式(16) 计算 $F(X_i)$; 令 $t=0$, 进入步骤 6.

6) 开始迭代计算: 令 $t=t+1$, 更新 a, A, C, l 以及 p .

7) 更新解 X_i : 如果 $p < 0.5$, 则执行如下操作: 如果 $|A| \geq 1$, 执行猎物搜索操作, 即在当前种群范围中随机确定一个位置 X_{rand} 并根据公式(10) 更新 X_i ; 如果 $|A| < 1$, 执行猎物包围操作, 即利用公式(14) 更新 X_i .

如果 $p \geq 0.5$, 则根据公式(15) 执行螺旋更新操作.

8) 判断解的有效性: 更新完每个个体的位置后, 判断是否有任何参数超出预定的范畴, 如果存在大于上限值(或者小于下限值)的参数, 则用上限值(或者下限值)取代该参数.

9) 更新整个种群的最优解: 如果新种群的最优解优于原种群的最优解, 则将前者替代后者; 否则, 保持后者不变.

10) 判断是否满足算法终止条件: 如果 $t < T_{max}$, 记录最优解及其相应的适应度, 并返回步骤 6; 否则, 终止迭代, 输出最优解, 其即为混合灵敏度加权函数的最优参数.

11) 求解 MRD 阻尼力: 利用最优参数求解加权函数, 继而求解出最优主动控制力, 结合 CVL 计算半主动闭环控制系统中 MRD 所需的控制电压, 并基于 MRD 正向模型计算减振所需的阻尼力.

4 数值计算及分析

4.1 系统建模及优化结果

减震对象是一个在地面和第一层之间安装一个 MRD 的三层剪切框架 Benchmark 结构, 对该结构采用前 20 s 的 El-Centro 地震波激励, 按照相似准则, 将地震波的时间历程缩短为原来的五分之一^[1,21-22]. 该结构的质量矩阵 M 、刚度矩阵 K 和阻尼矩阵 C 分别为

$$M = \begin{bmatrix} 98.3 & 0 & 0 \\ 0 & 98.3 & 0 \\ 0 & 0 & 98.3 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

$$K = 10^5 \times \begin{bmatrix} 12.0 & -6.84 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$C = \begin{bmatrix} 175 & -50 & 0 \\ -50 & 100 & -50 \\ 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \frac{\text{Ns}}{\text{m}}$$

MRD-受控结构系统的标准状态方程为

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) \quad (19)$$

$$y(t) = Cz(t) + Du(t) \quad (20)$$

式中, 状态变量 $z(t) = [x(t)^T, \dot{x}(t)^T]^T_{2n \times 1}$ 中的 $x(t)$ 和 $\dot{x}(t)$ 分别为结构的位移和速度向量, $y(t) = [x(t)^T, \dot{x}(t)^T, \ddot{x}_a(t)^T]^T_{3n \times 1}$ 为输出状态向量, 其中 $\ddot{x}_a(t)$ 为绝对加速度(后续简称为加速度).

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = [B_w \quad B_u]$$

$$C = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M^{-1}\Gamma \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_g(t) \\ \mathbf{f}(t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{\Gamma} \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{I} 和 $\mathbf{0}$ 分别是单位矩阵和零矩阵; $\mathbf{\Gamma}$ 是 MRD 的位置向量; $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 是地震波加速度; $\mathbf{f}(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_m(t)]^T$ 是 m 个 MRD 产生的阻尼力; \mathbf{A} 表示地震波加速度系数向量.

针对本文减振对象, 上述公式中的 $n = 3$, $m = 1$, $\mathbf{A} = [-1, -1, -1]^T$, $\mathbf{\Gamma} = [-1, 0, 0]^T$, 如令该控制器的输入仅为第三层的加速度, 则该混合灵敏度 H_∞ 控制器是一个单输入-输出系统. 优化时, 令目标函数的权重 $\alpha = 0.8$, WOA 的种群大小 N 和迭代次数 T_{\max} 分别为 100 和 150. 为了进行算法性能的比较, 分别采用遗传算法(GA)和差分进化算法(DE)进行控制器设计, 其中 GA 的交叉率和变异率分别为 0.7 和 0.02, DE 的交叉概率和变异放大因子分别为 0.1 和 0.4. 这两种算法的种群大小和迭代次数均与 WOA 相同. 图 4 是 3 种优化算法的收敛曲线比较结果. 可见, WOA 的寻优能力更强, 它能够获得比 GA 和 DE 更优的目标值. 而且从迭代次数的角度而言, WOA 的收敛速度也是最优的. 经过 WOA 优化得到的加权函数 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 分别为

$$\mathbf{W}_1 = \frac{967 \left(\frac{1}{60394} s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{5.095} s + 1 \right)}$$

$$\mathbf{W}_2 = \frac{0.0379 \left(\frac{1}{9.265} s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{11513} s + 1 \right)}$$

4.2 控制结果讨论

为了验证所提出的 WOA- H_∞ CVL 半主动控制算法的有效性, 本节将其控制结果与未经优化的 H_∞ CVL 控制以及现有文献中的 LQR-CVL 控制^[1]、模糊控制^[21]、模糊 GH₂^[22] 的控制结果进行比较. 其中, 通过试算法, 确定未经优化的 H_∞ CVL 控制中的加权函数的参数如下:

$$\begin{array}{lll} b_{11} = 1\ 000 & b_{21} = 10 & b_{31} = 10 \\ b_{41} = 1\ 000 & a_{11} = 1\ 000 & a_{21} = 0.001 \end{array}$$

在无控和使用这 5 种控制方法时得到的所有楼层的响应峰值的比较结果见表 1. 其中, x_i , d_i 和 \ddot{x}_i 分别为第 i 层的位移、层间位移和加速度响应的峰值, F 是控制方法中所需的最大阻尼力, 括号中的数值是有控响应峰值相对于无控响应峰值的减小率.

由表 1 可知, 虽然 LQR-CVL 控制对最大位移的控制效果略优于本文提出的 WOA- H_∞ CVL 控制, 但其最大加速度减小率仅为 50%. 虽然模糊 GH₂ 控制对加速度的控制效果是所有控制方法中最佳的, 但是其对各层位移的控制效果均不如 WOA- H_∞ CVL 控制. 通过综合分析可知, 在 5 种控制方法中, 本文提出的 WOA- H_∞ CVL 方法对最大位移和最大加速度响应的综合控制效果最佳, 这两个值相对于无控时的减小率分别为 77% 和 64%. 说明控制器的设计满足了优化目标函数的要求, 证明了基于 WOA 的优化方法的有

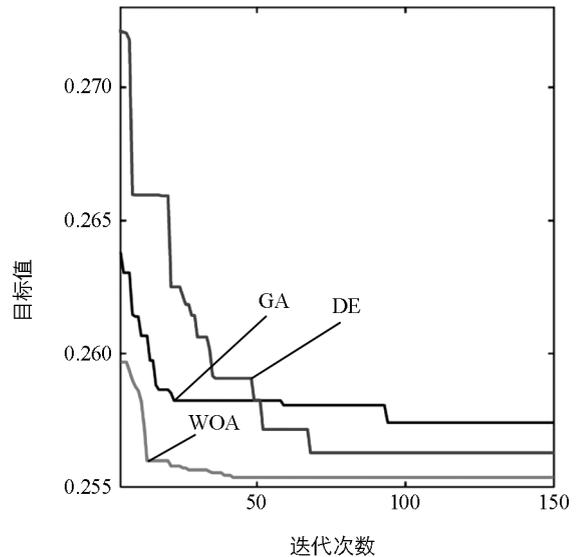


图 4 3 种优化算法的迭代曲线对比

效率. 图 5 显示了在 WOA- H_{∞} -CVL 控制下的各层响应峰值控制效果. 由表 1 和图 5 可见, WOA- H_{∞} -CVL 方法还可以显著减小其他楼层的位移和加速度响应峰值以及所有楼层的层间位移响应峰值. 另一方面, 除了模糊 GH_2 控制以外, WOA- H_{∞} -CVL 控制所需的最大阻尼力小于另外 3 种控制方法. 为了更直观地说明本文控制算法的减震效果, 图 6 和图 7 分别比较了无控时和 WOA- H_{∞} -CVL 控制时第三层的位移时程响应和加速度时程响应, 由图可见, 这两种响应均得到明显的抑制.

表 1 不同控制策略下各层的响应峰值

响应	无控	LQR-CVL	模糊	模糊 GH_2	无优化 H_{∞} -CVL	WOA- H_{∞} -CVL
x_i/cm	0.294	0.114 (79%)	0.101 (82%)	0.156 (72%)	0.149 (73%)	0.127 (77%)
	0.561	0.185 (78%)	0.184 (78%)	0.27 (68%)	0.228 (73%)	0.188 (77%)
	0.741	0.219 (77%)	0.282 (71%)	0.334 (66%)	0.294 (70%)	0.223 (77%)
d_i/cm	0.294	0.114 (79%)	0.101 (82%)	0.156 (72%)	0.149 (73%)	0.127 (77%)
	0.270	0.09 (72%)	0.137 (57%)	0.119 (62%)	0.135 (57%)	0.099 (69%)
	0.181	0.101 (50%)	0.101 (50%)	0.064 (68%)	0.097 (52%)	0.073 (64%)
$\ddot{x}_i/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	834	721 (18%)	400 (54%)	273 (69%)	474 (46%)	502 (43%)
	1 001	746 (30%)	438 (59%)	388 (64%)	397 (63%)	443 (59%)
	1 642	706 (50%)	704 (50%)	448 (68%)	673 (52%)	505 (64%)
F(N)		953	843	673	919	774

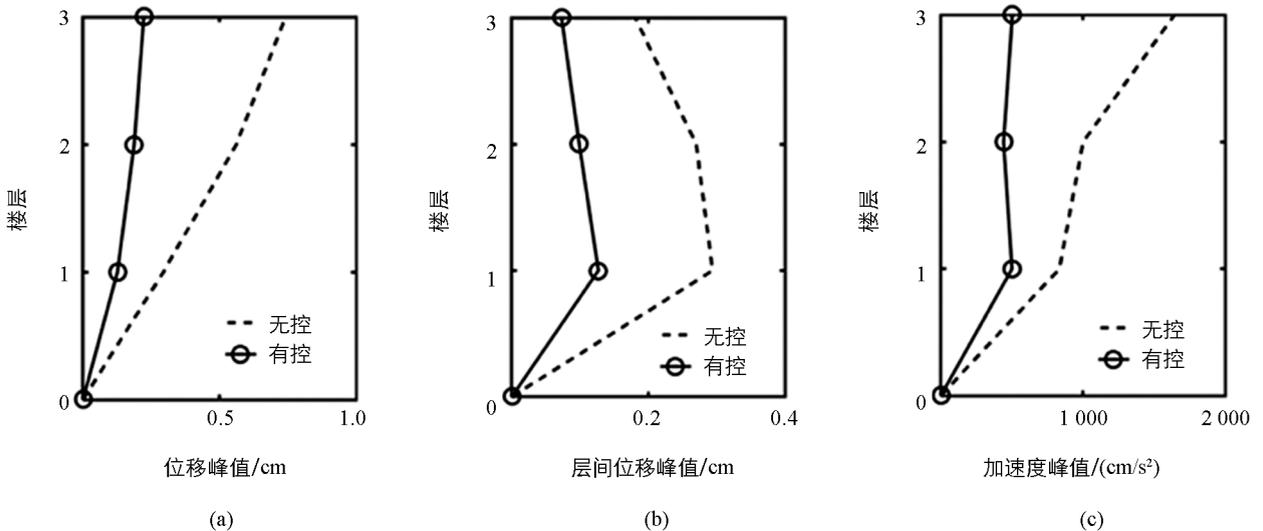


图 5 不同控制方法下的响应峰值控制效果

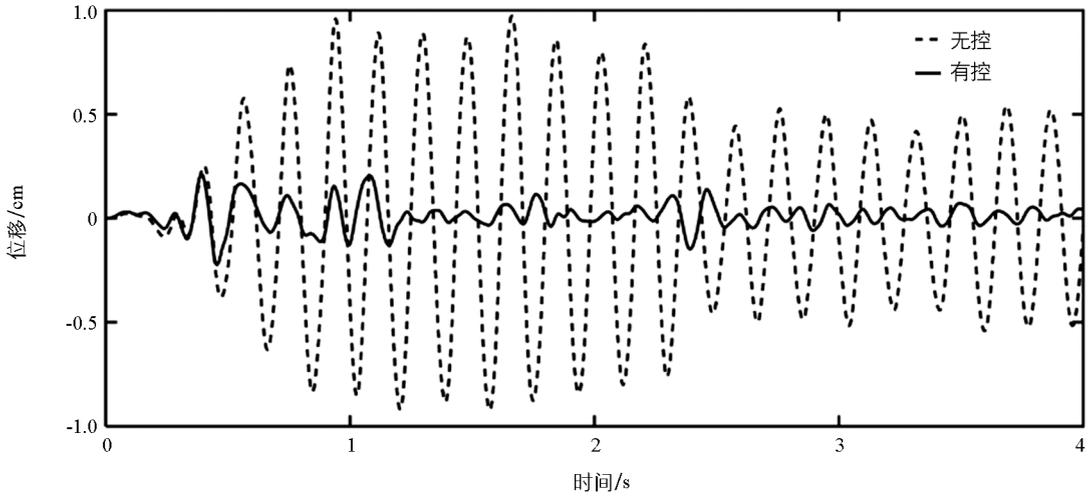


图 6 第三层位移时程响应的控制效果

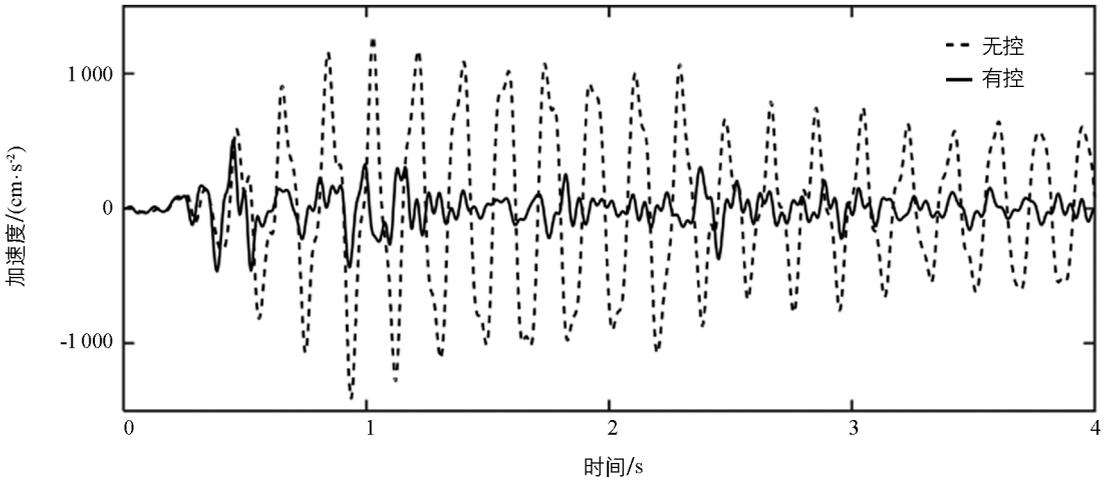


图 7 第三层加速度时程响应的控制效果

接着, 为了评估所设计的 $WOA-H_\infty CVL$ 控制器对未受训地震波激励时的结构振动控制效果, 分别采用 TianjinNS 地震波和 Taft 地震波对上述结构进行动态激励, 图 8 和图 9 分别显示了在这两个地震波激励下的结构响应峰值的控制效果。

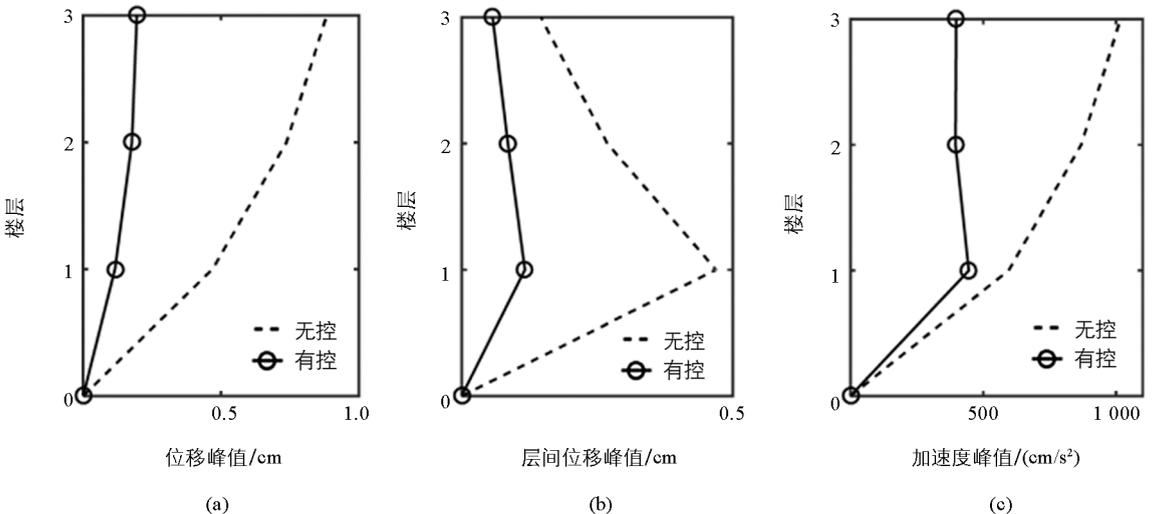


图 8 地震波变化为 TianjinNS 时的响应峰值控制效果

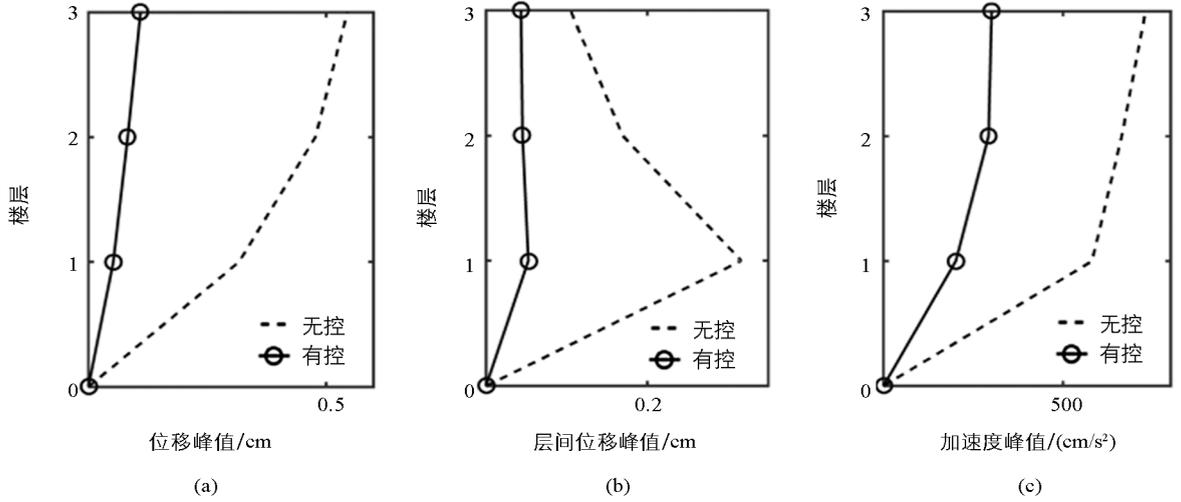


图 9 地震波变化为 Taft 时的响应峰值控制效果

由图可见, 在 El-Centro 地震波激励下所设计的控制器仍然可以有效控制未受训地震波激励下的所有楼层的位移、层间位移和加速度响应。

最后, 为了分析结构参数变化对 WOA- H_{∞} -CVL 控制效果的影响, 假设该结构所有楼层的刚度都变化 +10% 和 +30%, 这两种工况下的控制结果分别见图 10 和图 11。

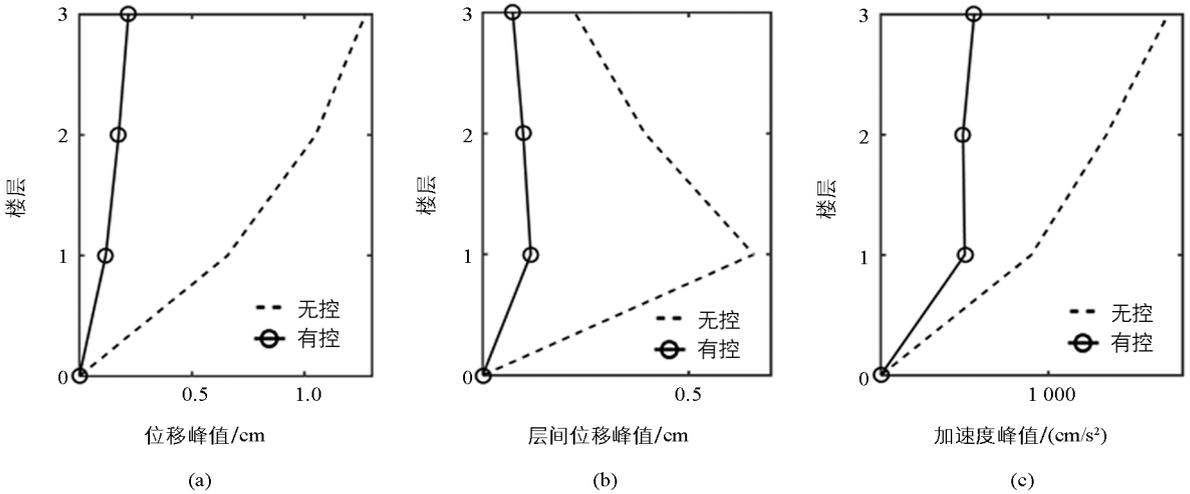


图 10 刚度变化 +10% 时的响应峰值控制效果

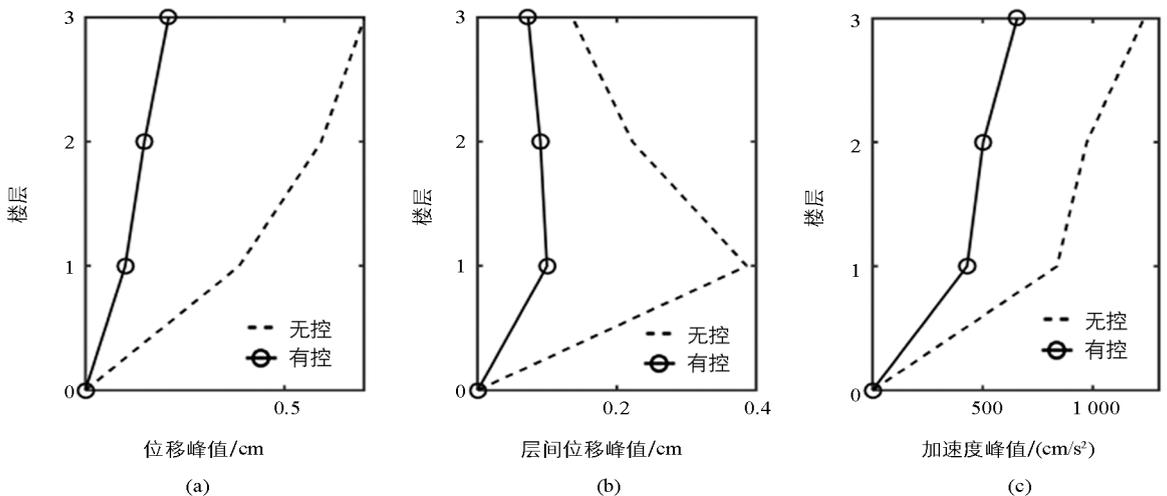


图 11 刚度变化 +30% 时的响应峰值控制效果

由图可见, 针对原始结构设计得到的 WOA- H_∞ CVL 控制算法仍能有效地控制现有结构所有楼层的位移、层间位移和加速度响应. 其中, 当刚度变化率为 +30% 时, 控制效果虽然有所下降, 但所有楼层的位移、层间位移和加速度响应仍然得到非常显著的抑制.

5 结 论

1) 使用 WOA 优化混合灵敏度 H_∞ 控制的加权函数参数, 克服了普通 H_∞ 控制系统设计的保守性, 避免了传统的人工试凑. 此外, WOA 的寻优能力和收敛速度均优于遗传算法和差分进化算法.

2) 所设计的 WOA- H_∞ CVL 控制能够使最大位移和最大加速度分别比无控时下降 77% 和 64%, 同时还能有效地降低所有楼层的层间位移响应. 这种控制方法对结构响应的综合控制性能优于未经优化的 H_∞ CVL 控制以及现有文献中的 LQR-CVL 控制、模糊控制、模糊 GH_2 控制.

3) WOA- H_∞ CVL 控制方法所需要的最大阻尼力小于其他 3 种所比较的控制方法, 说明了该算法在保证良好的结构响应控制效果的同时, 还具有较优的节能性.

4) 以 TianjinNS 和 Taft 地震波为例, 证明了针对 El-Centro 波激励所设计的 WOA- H_∞ CVL 控制算法仍然能够有效控制未受训地震波激励下的结构响应. 以刚度变化 +10% 和 +30% 为例, 证明了针对原始结构所设计的 WOA- H_∞ CVL 控制算法也具有较弱的抵抗结构刚度变化的鲁棒性.

参考文献:

- [1] DYKE S J, SPENCER B F, SAIN M K, et al. Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction [J]. *Smart Materials and Structures*, 1996, 5(5): 565-584.
- [2] YANG B, SUN S S, DENG L, et al. Vibration Control of a Tunnel Boring Machine Using Adaptive Magnetorheological Damper [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(11): 115012-115026.
- [3] 林秀芳, 陈淑梅, 黄国荣. 基于帝国竞争算法和 LQG 的磁流变阻尼器-建筑结构系统的振动控制 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(5): 194-201.
- [4] YEGANEHFALLAH A, ATTARI N K A. Robust Control of Seismically Excited Cable Stayed Bridges with MR Dampers [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(3): 35-56.
- [5] EL-KHOURY O, KIM C, SHAFIEEZADEH A, et al. Mitigation of the Seismic Response of Multi-Span Bridges Using MR Dampers: Experimental Study of a New SMC-Based Controller [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, 24(1): 83-99.
- [6] MAHMOODABADI M J, MOTTAGHI M B S, MAHMODINEJAD A. Optimum Design of Fuzzy Controllers for Non-linear Systems Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2016, 22(3): 769-783.
- [7] HASHEMIS M A, HAJI K H, KARAMODIN A. Localized Genetically Optimized Wavelet Neural Network for Semi-Active Control of Buildings Subjected to Earthquake [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(8): 1074-1087.
- [8] WU J, ZHOU H L, LIU Z Y, et al. A Load-Dependent PWA- H_∞ Controller for Semi-Active Suspensions to Exploit the Performance of MR Dampers [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 127: 441-462.
- [9] 张子健, 徐敏, 陈士槽. 机翼颤振的混合灵敏度 H_∞ 鲁棒控制器设计 [J]. *计算力学学报*, 2010, 27(4): 661-666.
- [10] CETIN S, SIVIOGLU S, ZERGEROGLU E, et al. Semi-Active H_∞ Robust Control of Six Degree of Freedom Structural System Using MR Damper [J]. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2011, 19(5): 797-805.
- [11] LIN X F, CHEN S M, HUANG G R. A Shuffled Frog-Leaping Algorithm Based Mixed-Sensitivity H_∞ Control of a Seismically-Excited Structural Building Using MR Dampers [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, 24(13):

2832-2852.

- [12] 田 梦, 曲宗希, 吴彬贵, 等. 一种基于花授粉算法的 WRF 风速集合预报新模型 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(8): 99-106.
- [13] 李建国, 张海飞, 周璐婕, 等. 基于改进遗传算法的立体车库布局对比及服务资源优化 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 139-148.
- [14] 李玉善, 唐惟胜, 季学武, 等. 基于鲁棒补偿 RBF 网络的 IEHB 系统液压力控制 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(1): 51-57.
- [15] MIRJALILI S, LEWIS A. The Whale Optimization Algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 95: 51-67.
- [16] ALJARAH I, FARIS H, MIRJALILI S. Optimizing Connection Weights in Neural Networks Using the Whale Optimization Algorithm [J]. *Soft Computing*, 2018, 22(1): 1-15.
- [17] RATHORE R S, SANGWAN S M, MAZUMDAR S, et al. W-GUN: Whale Optimization for Energy and Delay-Centric Green Underwater Networks [J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1377.
- [18] NADEEM M, IMRAN K, KHATTAK A, et al. Optimal Placement, Sizing and Coordination of FACTS Devices in Transmission Network Using Whale Optimization Algorithm [J]. *Energies*, 2020, 13(3): 753-765.
- [19] KUMAR V, KUMAR D. Binary Whale Optimization Algorithm and Its Application to Unit Commitment Problem [J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32(7): 2095-2123.
- [20] PHAM Q V, MIRJALILI S, KUMAR N, et al. Whale Optimization Algorithm With Applications to Resource Allocation in Wireless Networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4285-4297.
- [21] CHOI K M, CHO S W, JUNG H J, et al. Semi-Active Fuzzy Control for Seismic Response Reduction Using Magneto-rheological Dampers [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2004, 33 (6): 723-736.
- [22] DU H P, ZHANG N. Model-Based Fuzzy Control for Buildings Installed with Magneto-Rheological Dampers [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, 20(9): 1091-1105.

责任编辑 汤振全