文章编号：1674-2974（2024）05-0143-11 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024056

基于改进遗传算法的磁流变阻尼半主动控制系统整体优化

梅真[1†]，张海龙[2]，高毅超[1]，陈业伟[3]，李海锋[1]
（1. 华侨大学 土木工程学院，福建 厦门 361021；
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司，陕西 西安 710075；
3. 中建四局建设发展有限公司，福建 厦门 361006）

摘 要：为解决磁流变阻尼半主动控制系统中控制算法参数、阻尼器参数与布置位置优化问题，提出一种改进的自适应小生境遗传算法.该遗传算法在选择策略、交叉和变异操作、交叉概率和变异概率的自适应调整等方面作了改进，并同时采用预选择机制和共享机制这两种小生境技术.算例分析结果表明：改进的自适应小生境遗传算法和改进的基本遗传算法优化结果总体一致，表明前者分析结果是正确的；前者首次得到最优解耗费的机时比后者平均少32.7%，可见前者比后者收敛速度更快；30次优化分析结果表明，前者比后者稳定性更强；经前者优化的磁流变阻尼半主动控制系统取得良好减振效果，El Centro波、集集波、人工波输入时，半主动控制结构层间位移角和绝对加速度的最大值较无控时分别平均减小64.1%、54.7%、55.9%.算例表明了改进的自适应小生境遗传算法的有效性，实现了对磁流变阻尼半主动控制系统的整体优化.

关键词：磁流变阻尼器；半主动控制系统；整体优化；自适应小生境遗传算法
中图分类号：TU352.1 **文献标志码**：A

Integrated Optimization of Semi-active Control System with Magneto-rheological Dampers Based on an Improved Genetic Algorithm

MEI Zhen[1†], ZHANG Hailong[2], GAO Yichao[1], CHEN Yewei[3], LI Haifeng[1]
(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. CCCC First Highway Consultants Co. Ltd., Xi'an 710075, China;
3. Construction & Development Co. Ltd. of China Construction Fourth Bureau, Xiamen 361006, China)

Abstract: To solve the optimization problem of control algorithm parameters, damper parameters, and layout location in the semi-active control systems with magnetorheological (MR) dampers, an improved adaptive niche genetic algorithm is proposed. The proposed genetic algorithm is improved in selection strategy, crossover and mutation operation, and adaptive adjustment of crossover probability and mutation probability. Two different niche

* **收稿日期**：2023-04-06
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51778248），National Natural Science Foundation of China（51778248）；福建省自然科学基金资助项目（2022J01291，2020J01057），Natural Science Foundation of Fujian Province（2022J01291，2020J01057）
作者简介：梅真（1983—），男，湖北黄冈人，华侨大学副教授，博士
† 通信联系人，E-mail：meizhen83@163.com

technologies, the pre-selection mechanism and sharing mechanism, are used in the improved genetic algorithm. The results of a numerical example show that the optimization result of the improved adaptive niche genetic algorithm (GA-Ⅰ) and an improved simple genetic algorithm (GA-Ⅱ) is generally consistent, indicating the correctness of the former algorithm. Moreover, the GA-Ⅰ consumes an average of 32.7% less computation time to obtain the optimal solution for the first time than the GA-Ⅱ, which means that the former algorithm converges faster than the latter. In addition, optimization results of 30 times indicate that the GA-Ⅰ has stronger stability than the GA-Ⅱ. The semi-active control system with MR dampers optimized by the GA-Ⅰ achieves effective vibration suppression. The maximum values of inter-story drift angles and floor absolute accelerations of the semi-actively controlled structure under El Centro, Chi-Chi and man-made waves are decreased by 64.1%, 54.7%, and 55.9% on average compared to those without control, respectively. The numerical example demonstrates the effectiveness of the GA-Ⅰ, and the integrated optimization of the semi-active control system with MR dampers is realized.

Key words: magnetorheological damper; semi-active control system; integrated optimization; adaptive niche genetic algorithm

磁流变阻尼器是利用磁流变液的磁流变效应制成的一种智能减振装置.它具有结构简单、响应速度快、阻尼力连续可调等优点,在结构振动控制领域已得到应用[1-2].为取得最优的减振性能,有必要对磁流变阻尼半主动控制系统进行优化分析.

遗传算法是模拟自然界生物进化机制而形成的一种概率搜索方法[3-4].Guo和Zhang[5]、贝伟明和李宏男[6]、Bhaiya等[7]、张香成等[8]分别采用遗传算法对磁流变阻尼器布置位置进行优化分析.Yan和Zhou[9]、Lafontaine等[10]、郭迎庆等[11]、Mehrkian等[12]、Bozorgvar和Zahrai[13]、Salajegheh和Asadi[14]分别将遗传算法用于模糊控制器或神经模糊控制器的优化,以提高磁流变阻尼器的结构控制效果.此外,Xue等[15]、Chaudhuri等[16]分别应用遗传算法优化磁流变阻尼器的控制策略,以提高半主动控制效果.以上相关文献,往往仅涉及控制算法(控制器)优化或磁流变阻尼器布置位置优化.客观上,磁流变阻尼半主动控制系统的减振效果同时与控制算法(控制器)、阻尼器参数、阻尼器布置位置等有关,并且这些因素互相耦合.因此,应对磁流变阻尼半主动控制系统进行整体优化分析.

值得指出的是,磁流变阻尼半主动控制系统整体优化,既涉及控制系统重要参数优化(数值优化),又涉及阻尼器布置位置的优化(组合优化).经典的优化方法(例如最速下降法、牛顿法、共轭梯度法等)求解时通常依赖梯度信息,而磁流变阻尼半主动控制系统整体优化问题中的目标函数无法求解梯度.基本遗传算法是最经典、最基本的遗传算法,可用于求解数值优化或组合优化问题,而不能求解同时涉及数值优化和组合优化的问题.

遗传算法中,交叉概率和变异概率的取值影响算法性能.上文相关文献中采用的遗传算法,交叉概率和变异概率大多根据经验分别取定值.采用固定的交叉概率和变异概率易使遗传算法产生早熟收敛、陷入局部最优.为此,学者们提出多种自适应遗传算法[17],即交叉概率和变异概率分别按一定的规则自动调整.其中,最常见的是根据种群中个体的适应度大小调整交叉概率和变异概率的数值.

基本遗传算法求解过程中可能会出现早熟或随机漫游现象,且该算法不具备全局收敛性.究其原因在于基本遗传算法缺乏对种群中个体多样性的保护机制.针对基本遗传算法存在的这一问题,小生境技术应运而生.小生境遗传算法能更好地保持解的多样性,兼具很强的全局寻优能力和很高的收敛速度[17].小生境技术的实现方法有预选择机制、排挤机制、共享机制、隔离机制等.

鉴于上述研究现状,为解决磁流变阻尼半主动控制系统整体优化问题,即同时对控制算法参数、阻尼器参数与布置位置进行优化,提出一种改进的自适应小生境遗传算法.该遗传算法在选择策略、交叉和变异操作、交叉概率和变异概率的自适应调整等方面作了改进,并同时采用预选择机制和共享机制

这两种小生境技术.本文将通过算例从正确性、高效性、稳定性三个方面验证改进的自适应小生境遗传算法的有效性.

1　磁流变阻尼半主动最优控制

1.1　受控结构模型

若在一个 n 自由度的结构上设置 p 个磁流变阻尼器,则受控结构运动方程为:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}}(t)+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{X}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{X}(t)=\boldsymbol{B}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{U}(t)+\boldsymbol{D}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{F}(t) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别为结构质量、阻尼、刚度矩阵;$\boldsymbol{X}(t)$、$\dot{\boldsymbol{X}}(t)$、$\ddot{\boldsymbol{X}}(t)$ 分别为结构位移、速度、加速度向量;$\boldsymbol{U}(t)$ 为磁流变阻尼器控制力向量;$\boldsymbol{B}_{\mathrm{s}}$ 为控制力位置矩阵;$\boldsymbol{F}(t)$ 为 $r\times1$ 维环境激励向量;$\boldsymbol{D}_{\mathrm{s}}$ 为激励位置矩阵;t 为时间.

式(1)所示运动方程在状态空间中可表示为:

$$\dot{\boldsymbol{Z}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{Z}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}(t)+\boldsymbol{D}\boldsymbol{F}(t) \tag{2}$$

式中:状态向量 $\boldsymbol{Z}(t)$、系统矩阵 $\boldsymbol{A}$、控制力位置矩阵 $\boldsymbol{B}$、激励位置矩阵 $\boldsymbol{D}$ 分别为:

$$\boldsymbol{Z}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}(t)\\ \dot{\boldsymbol{X}}(t)\end{bmatrix}_{2n\times1},\quad \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_n & \boldsymbol{I}_n\\ -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K} & -\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}\end{bmatrix}_{2n\times2n},$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{n\times p}\\ \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{B}_{\mathrm{s}}\end{bmatrix}_{2n\times p},\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{n\times r}\\ \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{D}_{\mathrm{s}}\end{bmatrix}_{2n\times r} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{I}_n$ 为 $n\times n$ 维单位矩阵.

1.2　主动和半主动控制算法

结构磁流变阻尼控制算法一般是参照主动最优控制力,并考虑磁流变阻尼器可以实现的控制力的实际情况,尽可能使得磁流变阻尼器的控制力接近主动最优控制力.

本文采用经典的线性二次型(Linear Quadratic Regulator,LQR)最优控制算法确定主动最优控制力.相应的二次型性能泛函为:

$$J_0=\frac{1}{2}\lim_{t_{\mathrm{f}}\to\infty}\int_{t_0}^{t_{\mathrm{f}}}\left[\boldsymbol{Z}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{Z}(t)+\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}\boldsymbol{U}(t)\right]\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中:t_0 和 t_{f} 分别为初始时刻和末了时刻;状态量权矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和控制力权矩阵 $\boldsymbol{R}$ 分别为半正定矩阵与正定矩阵,分别取为:

$$\boldsymbol{Q}=a\begin{bmatrix}\boldsymbol{K} & \boldsymbol{0}_n\\ \boldsymbol{0}_n & \boldsymbol{M}\end{bmatrix}_{2n\times2n},\boldsymbol{R}=b\boldsymbol{I}_p \tag{5}$$

式中:a 为状态量权矩阵系数;b 为控制力权矩阵系数;$\boldsymbol{I}_p$ 为 $p\times p$ 维单位矩阵.LQR 算法中,权矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 是两个重要的控制参数.一般而言,权矩阵系数 a 和 b 的比值越大,减振效果越好,相应地,所需控制力也越大.

LQR 最优控制力可表示为:

$$\boldsymbol{U}(t)=-\boldsymbol{G}\boldsymbol{Z}(t),\boldsymbol{G}=\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}(t) \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{G}$ 为控制力状态反馈增益矩阵;$\boldsymbol{P}(t)$ 为以下黎卡提方程的解:

$$\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{0} \tag{7}$$

剪切式、阀式和剪切阀式磁流变阻尼器的阻尼力均由黏滞阻尼力和库仑阻尼力两个部分组成[18]:

$$u_{\mathrm{d}}=c_{\mathrm{d}}\dot{\boldsymbol{x}}+f_{\mathrm{dy}}\mathrm{sgn}(\dot{\boldsymbol{x}}) \tag{8}$$

式中:$\dot{\boldsymbol{x}}$ 为磁流变阻尼器的相对速度;c_{d} 和 f_{dy} 分别为磁流变阻尼器的黏滞阻尼系数和可调库仑阻尼力;$\mathrm{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.

根据限界 Hrovat 最优控制算法[19],磁流变阻尼器的控制力可表示为:

$$u_{\mathrm{d}}=\begin{cases}c_{\mathrm{d}}\dot{\boldsymbol{x}}+f_{\mathrm{dy\,max}}\mathrm{sgn}(\dot{\boldsymbol{x}}),u\dot{\boldsymbol{x}}<0\text{且}|u|>u_{\mathrm{dmax}};\\ |u|\mathrm{sgn}(\dot{\boldsymbol{x}}),u\dot{\boldsymbol{x}}<0\text{且}|u|<u_{\mathrm{dmax}};\\ c_{\mathrm{d}}\dot{\boldsymbol{x}}+f_{\mathrm{dy\,min}}\mathrm{sgn}(\dot{\boldsymbol{x}}),u\dot{\boldsymbol{x}}\geqslant0\end{cases} \tag{9}$$

式中:$f_{\mathrm{dy\,max}}$ 和 $f_{\mathrm{dy\,min}}$ 分别为磁流变阻尼器的最大和最小库仑阻尼力;u 为当前时刻主动最优控制力,本文按 LQR 算法确定;$u_{\mathrm{dmax}}=c_{\mathrm{d}}|\dot{\boldsymbol{x}}|+f_{\mathrm{dy\,max}}$ 为磁流变阻尼器当前时刻可以实现的最大阻尼力.

1.3　最优控制准则

本文磁流变阻尼半主动控制系统整体优化时采用以下目标函数(求最小值):

$$J=\alpha\frac{\tilde{\theta}_{\max}}{\tilde{\theta}_{0,\max}}+\beta\frac{\tilde{a}_{\max}}{\tilde{a}_{0,\max}}+H\left(u_{\max}-u_{\mathrm{con}}\right) \tag{10}$$

式中:$\tilde{\theta}_{\max}$ 和 $\tilde{\theta}_{0,\max}$ 分别为半主动控制和无控时结构各楼层层间位移角的最大值;$\tilde{a}_{\max}$ 和 $\tilde{a}_{0,\max}$ 分别为半主动控制和无控时结构各楼层绝对加速度的最大值;α 和 β 为加权系数,且两者之和等于 1;$u_{\max}$ 为磁流变阻尼器控制力的最大值;u_{con} 为磁流变阻尼器阻尼力的约束值;$H(\cdot)$ 为 Heaviside 阶跃函数,当自变量大于 0 时函数值为 1,否则函数值为 0.

式(10)所示的最优控制准则,以表征结构安全性的层间位移角和体现结构适用性的楼层绝对加速度作为控制目标,并通过引入惩罚函数考虑磁流变阻尼器控制力(与结构控制系统的造价关系密切)约束.

2 改进的自适应小生境遗传算法

采用改进的自适应小生境遗传算法对磁流变阻尼半主动控制系统进行整体优化时,待优化的参数包括:控制力权矩阵$\boldsymbol{R}$的系数b(状态量权矩阵$\boldsymbol{Q}$的系数a取100)、磁流变阻尼器的黏滞阻尼系数c_{d}和最大库仑阻尼力$f_{\mathrm{dy\,max}}$(最小库仑阻尼力$f_{\mathrm{dy\,min}}$取0)、磁流变阻尼器的布置位置.

本文改进的自适应小生境遗传算法分析流程见图1.

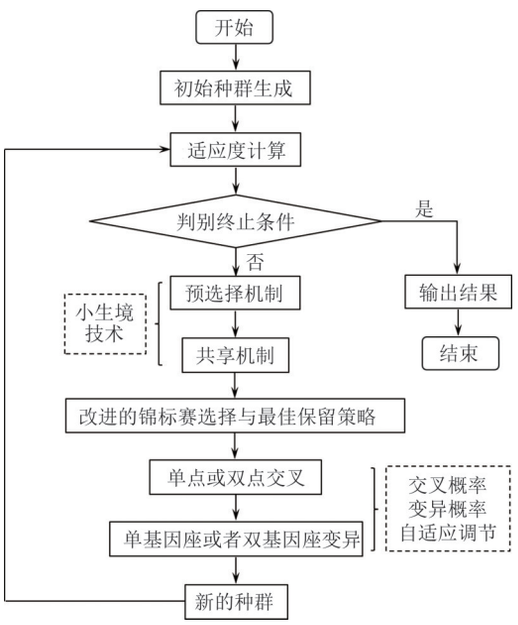


图1 改进的自适应小生境遗传算法的分析流程

Fig.1 Analysis process of improved adaptive niche genetic algorithm

2.1 初始种群生成

本文采用二进制编码方法.控制算法参数、磁流变阻尼器参数与布置位置分别编码,然后随机连接成串,形成初始种群中的独立个体.其中,控制力权矩阵$\boldsymbol{R}$的系数b、磁流变阻尼器的黏滞阻尼系数c_{d}和最大库仑阻尼力$f_{\mathrm{dy\,max}}$均采用8位二进制串表示.若被控结构共有n个楼层,每层最多只布置一个磁流变阻尼器,则表示阻尼器布置位置的编码长度为n.例如,编码"10101010"表示被控结构共8层,其中,第1、3、5、7层分别布置一个磁流变阻尼器.

本文中,表示控制算法参数和磁流变阻尼器参数的编码随机生成,表示磁流变阻尼器布置位置的编码由枚举法确定.

2.2 适应度计算

生物学中使用适应度度量某个物种对于生存环境的适应程度.类似地,遗传算法使用适应度度量种群中每个个体达到或接近最优解的优良程度.遗传算法中,度量个体适应度的函数称为适应度函数.适应度函数值应总是非负的,且其值越大越好.

本文磁流变阻尼半主动控制系统整体优化时采用的适应度函数为:

$$Fit(J)=\frac{1}{1+J} \tag{11}$$

式中:J为式(10)所示的目标函数值.

个体解码完毕之后,对半主动控制和无控结构分别进行动力响应分析,基于分析结果由式(10)和式(11)可计算出个体的适应度.

2.3 预选择机制

预选择机制是遗传算法小生境技术中的一种.只有当子代个体适应度超过父代个体适应度时,前者才能代替后者进入下一代种群中,否则父代个体将保留在下一代种群中,此即预选择机制.该机制仅允许子代个体替换与其编码结构相似的父代个体,因此它能够有效保持种群中个体的多样性.

预选择机制能够不断地以优秀个体更新种群,使得种群向适应度增大的方向进化,从而加快遗传算法的收敛速度.

2.4 共享机制

共享机制也是遗传算法小生境技术中的一种.它是根据表征种群中个体之间密切程度的共享函数调整每个个体的适应度,并依据调整后的适应度进行后续选择操作,以达到保持种群中个体多样性的目的.种群中个体之间的密切程度主要体现在个体编码相似性或个体适应度相似性上.

本文采用基因型差异与表现型差异相结合的方法定义共享函数[17].基因型差异采用个体编码的欧氏距离表示:

$$d_1(y_i,y_j)=\sqrt{\sum_{k=1}^{L}(y_{ik}-y_{jk})^2} \tag{12}$$

式中:y_i、y_j分别表示种群中的个体i和个体j,i、j为个体的序号;y_{ik}、y_{jk}分别为个体i和个体j中第k个基因座的基因值;L为个体编码长度.表现型差异用个体适应度距离表示:

$$d_2(y_i,y_j)=\left|Fit(y_i)-Fit(y_j)\right| \tag{13}$$

式中:$Fit(y_i)$和$Fit(y_j)$分别为个体i和个体j的适应度.共享函数定义为:

$$S(y_i,y_j)=\begin{cases}1-\dfrac{d_1(y_i,y_j)}{\sigma_1}, d_1<\sigma_1, d_2\geqslant\sigma_2;\\ 1-\dfrac{d_2(y_i,y_j)}{\sigma_2}, d_1\geqslant\sigma_1, d_2<\sigma_2;\\ 1-\dfrac{d_1(y_i,y_j)d_2(y_i,y_j)}{\sigma_1\sigma_2}, d_1<\sigma_1, d_2<\sigma_2;\\ 0,\text{其他}\end{cases}\tag{14}$$

式中:σ_1和σ_2分别为种群中个体的最大欧氏距离和最大适应度距离.

种群中个体i的适应度经共享函数调整后变为:

$$Fit'(y_i)=\frac{Fit(y_i)}{\sum_{j=1}^{N}S(y_i,y_j)}\tag{15}$$

式中:N为种群的个体总数.

本文改进的自适应小生境遗传算法,同时采用预选择机制和共享机制这两种小生境技术,以更加有效地保持种群中个体的多样性,从而提高算法的寻优能力和收敛速度.

2.5　改进的锦标赛选择与最佳保留策略

选择是从当前种群中选出优良的个体,产生新种群的过程.本文采用改进的竞赛规模为2的锦标赛选择,即每次按轮盘赌选择机制选取两个个体,适应度高的个体被选中,如此反复,选满为止.

对种群中适应度最高的个体不进行交叉、变异等遗传操作,而是将其完整地保留到下一代种群中,此即最佳保留策略.该策略是保证遗传算法收敛性的一个重要举措,它可以保证遗传算法终止时得到的优化结果是历代出现过的最优解.

2.6　单点或双点交叉

交叉是指将种群中的个体两两随机配对,然后交换配对的两个个体部分基因座的基因值.采用遗传算法对磁流变阻尼半主动控制系统进行整体优化时,表示磁流变阻尼器设置位置的编码要满足一定的约束条件.假设从8个楼层中选择4个楼层,各布置一个磁流变阻尼器,则每个个体中表示阻尼器布置位置的编码之和应等于4,例如编码“1 0 1 0 1 0 1 0”.应当指出的是,遗传算法中常用的单点交叉算子会产生不符合上述约束条件的子个体.

为避免交叉操作产生不符合上述约束条件的子个体,本文将已有的单点交叉算子和双点交叉算子相结合,形成一种新的交叉算子——单点或双点交叉算子,具体操作方法如图2中的例子所示.

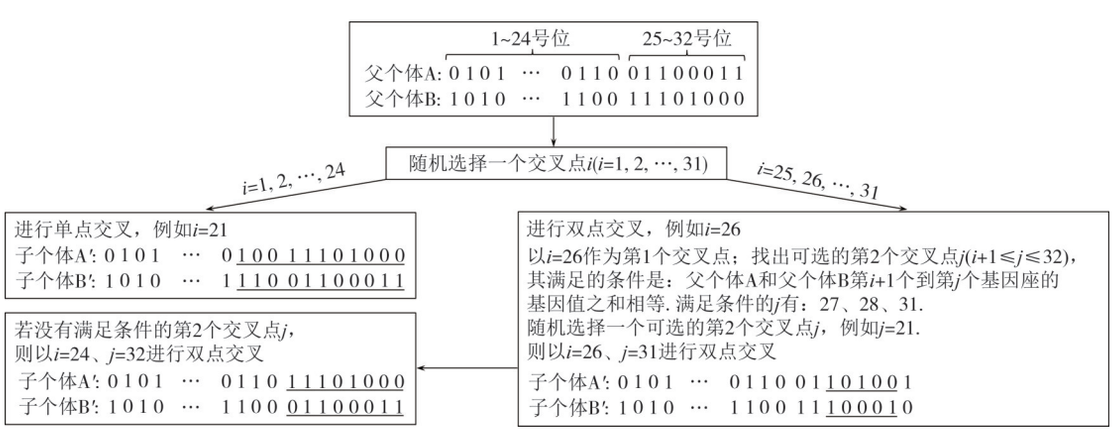


图2　单点或双点交叉

Fig.2　Single-point or double-point crossover

2.7　单基因座或双基因座变异

变异是对个体编码串上部分基因座的基因值按某一较小的概率进行改变,从而产生新的个体.值得指出的是,本文磁流变阻尼半主动控制系统整体优化问题,若采用常见的单基因座变异,有时会产生不符合上文所述约束条件的子个体.

为避免变异操作产生不符合上述约束条件的子个体,本文提出一种新的变异算子——单基因座或双基因座变异算子,如图3中的例子所示.

2.8　自适应交叉和变异概率

已有文献中的自适应遗传算法[17],大多仅根据种群中个体的适应度大小,使交叉概率和变异概率

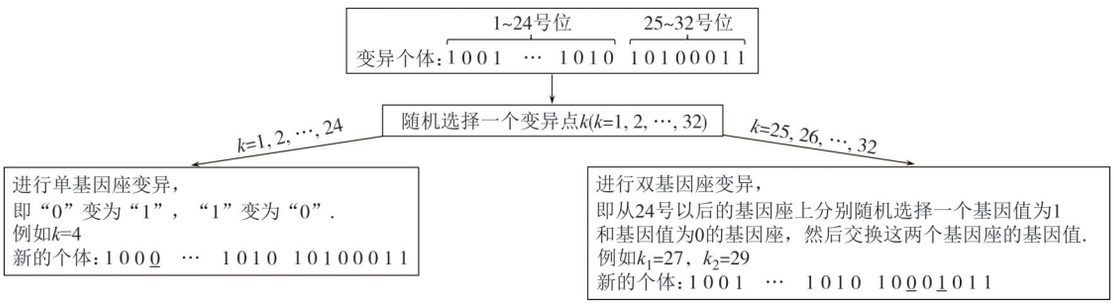


图3 单基因座或双基因座变异

Fig.3 Single-locus or two-locus mutation

自动调整,而未考虑遗传算法在不同的进化阶段对这两个重要参数的客观要求.在进化初期,种群中的个体编码差异性明显,此时提高交叉概率有利于加快优化速度、提高分析效率;在进化末期,种群中的个体编码趋同性增强,此时适度增大变异概率可防止陷入局部最优解[20].鉴于此,本文提出一种新的交叉概率和变异概率自适应调节规则,即:

$$P_{\mathrm{c}} = 0.9 - 0.3 \cdot \frac{f' - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \cdot \frac{1 + \tanh(2d/D)}{2} \tag{16}$$

$$P_{\mathrm{m}} = 0.1 - 0.099 \cdot \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \cdot \frac{1 + \tanh\left(2(1 - d/D)\right)}{2} \tag{17}$$

式中:P_{c}和P_{m}分别为交叉概率和变异概率;$f_{\min}$和$f_{\max}$分别为当前种群中个体的最小适应度和最大适应度;f'为交叉的两个个体适应度的较大值;f为变异个体的适应度;d和D分别为当前进化代数和最大进化代数;tanh(·)为双曲正切函数.

式(16)和式(17)所示自适应遗传算法中,交叉概率和变异概率能够随个体适应度大小、遗传算法进化代数自动改变,取值范围分别为0.6~0.9、0.001~0.1.具体调节方式为:若当前进化代数为定值,交叉概率和变异概率均随个体适应度的增大而减小;当个体适应度一定时,交叉概率和变异概率随当前进化代数的增大分别减小和增大.

2.9 终止条件

本文以最大进化代数作为改进的自适应小生境遗传算法的终止条件,并将终止运行时种群中适应度最高的个体作为优化问题的最优解输出.

遗传算法最大进化代数一般建议的取值范围是100~1 000,通常根据多次运行的收敛情况和解的质量确定其合理取值.

3 算例分析

被控结构采用文献[21]中的一栋8层建筑.该结构各楼层质量、刚度和阻尼系数见表1.假设被控结构层高均为4 m,并且始终处于线弹性状态.输入地震动选用两条实际地震动记录(El Centro波和集集波,均为N-S分量)和一条人工地震波.其中,人工地震波由丁艳琼和李杰[22]提出的工程地震动模型生成.这三条地震波的加速度峰值均调整为1.5 m/s^2,时长均取30 s,地震动加速度时程以及Fourier幅值谱如图4所示.由图可见,这三条地震波的时域和频域特性差异明显.

表1 结构参数

Tab.1 Structural parameters

楼层	质量/t	刚度/(N·m^{-1})	阻尼系数/(N·s·m^{-1})
1	345.6	3.40×10^8	4.90×10^5
2	345.6	3.26×10^8	4.67×10^5
3	345.6	2.85×10^8	4.10×10^5
4	345.6	2.69×10^8	3.86×10^5
5	345.6	2.43×10^8	3.49×10^5
6	345.6	2.07×10^8	2.98×10^5
7	345.6	1.69×10^8	2.43×10^5
8	345.6	1.37×10^8	1.96×10^5

假定从被控结构的8个楼层中选择4个楼层,各布置一个磁流变阻尼器,并且各阻尼器的参数均相同.待优化的参数包括:控制力权矩阵$\boldsymbol{R}$的系数b(取值范围10^{-6}~10^{-3})、磁流变阻尼器的黏滞阻尼系数c_{d}(取值范围1×10^6~2×10^6 N·s/m)和最大库仑阻尼力$f_{\mathrm{dy\,max}}$(取值范围6×10^5~7×10^5 N)、磁流变阻尼器的布置位置.

采用改进的自适应小生境遗传算法对磁流变阻尼半主动控制系统进行整体优化时,种群中的个体

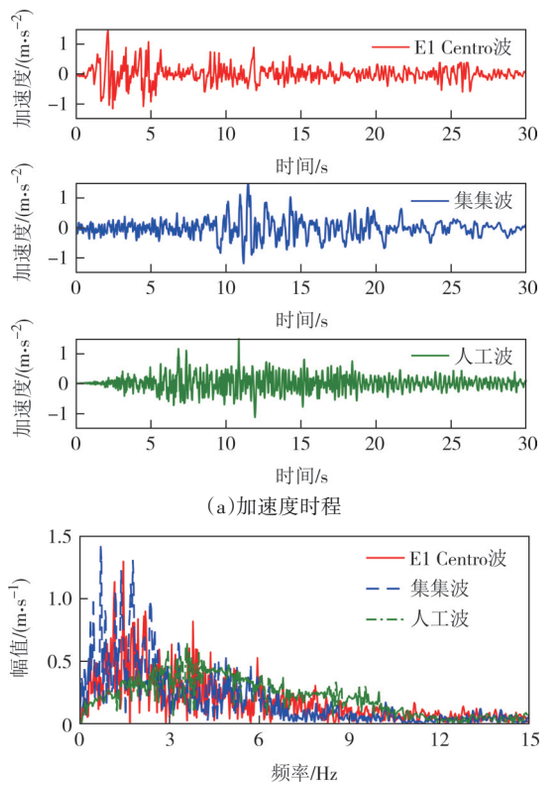


图 4　地震动加速度时程及 Fourier 幅值谱

Fig.4　Acceleration time histories and Fourier amplitude spectra of ground motions

数目取 140;每个个体 1~24 号位的编码随机生成,25~32 号位的编码由枚举法确定,前后两个部分的编码随机组合并连接成串;式(10)所示目标函数中,加权系数 α 和 β 取 0.5,磁流变阻尼器阻尼力的约束值取 750 kN;最大进化代数为 250.

为验证改进的自适应小生境遗传算法分析结果的正确性和优化分析的效率,同时采用改进的基本遗传算法对上文所述的优化问题进行分析.改进的基本遗传算法,采用二进制编码方法,初始种群随机生成;采用轮盘赌选择机制与最佳保留策略、单点或双点交叉、单基因座或双基因座变异;种群个体数目 140,个体编码 32 位;交叉概率和变异概率分别取定值 0.75 和 0.05;最大进化代数为 500.

值得指出的是,本文中改进的自适应小生境遗传算法和改进的基本遗传算法均采用了最佳保留策略,这两种遗传算法都具备全局收敛性[23].

采用 MATLAB 语言,分别编制改进的自适应小生境遗传算法和改进的基本遗传算法程序,对磁流变阻尼半主动控制系统进行整体优化分析,最大适应度曲线如图 5 所示,优化分析的结果见表 2.考虑到遗传算法优化结果客观上存在一定随机性,表 2 中给出的优化结果是多次运行两种改进的遗传算法程序得到的最优解,图 5 所示的是与最优解相对应的最大适应度曲线.

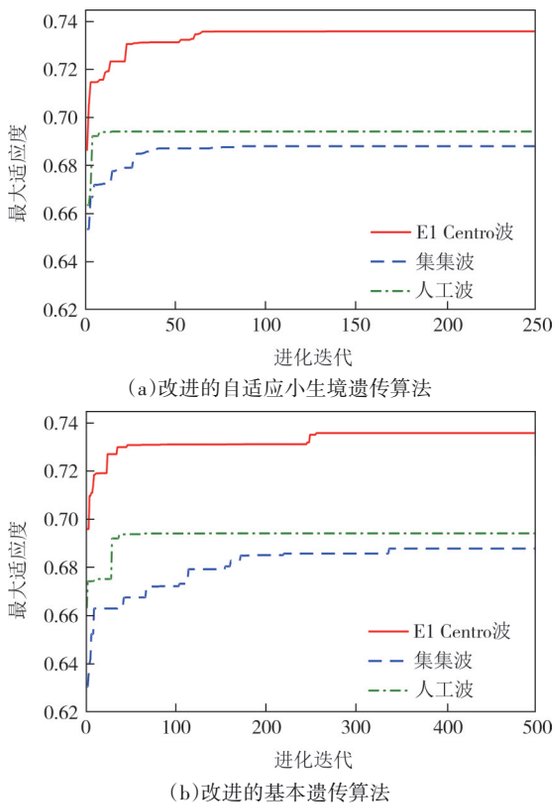


图 5　最大适应度曲线

Fig.5　Curves of maximum fitness

表 2 中,两种改进遗传算法的优化结果总体一致.适应度和目标函数值的相对误差最大分别为 0.03%、0.07%.控制力权矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的系数 b、磁流变阻尼器的黏滞阻尼系数 c_{d} 和最大库仑阻尼力 $f_{\mathrm{dy\,max}}$ 这三个优化参数的相对误差最大为 0.60%.三条不同的地震波输入时,磁流变阻尼器布置位置的优化结果分别一致.为进一步验证改进的自适应小生境遗传算法分析结果的正确性,表 2 中还给出了由枚举法(假设磁流变阻尼器的布置位置已知)和 MATLAB 全局优化工具箱函数 MultiStart(采用 active-set 算法求解)分析得到的最优解.可知,由枚举法和 MultiStart 函数分析得到的最优解,与改进的自适应小生境遗传算法分析结果吻合良好.

图 5 中,当 El Centro 波、集集波、人工波分别为

表2 优化结果

Tab.2 Optimization results

输入地震波	优化方法	适应度	目标函数值	优化参数			
				b	c_d/(N·s·m^{-1})	f_{dymax}/N	阻尼器位置
El Centro波	遗传算法1*	0.735 9	0.358 8	4.922×10^{-6}	1.012×10^{6}	6.882×10^{5}	1, 2, 3, 4
	遗传算法2*	0.735 9	0.358 9	4.922×10^{-6}	1.016×10^{6}	6.878×10^{5}	1, 2, 3, 4
	相对误差1*	0.00%	0.03%	0.00%	0.39%	0.06%	0.00%
	MATLAB-MultiStart	—	0.356 0	5.069×10^{-6}	1.015×10^{6}	6.880×10^{5}	1, 2, 3, 4
	相对误差2*	—	0.78%	2.94%	0.30%	0.03%	0.00%
集集波	遗传算法1	0.688 1	0.453 4	4.922×10^{-6}	1.004×10^{6}	6.698×10^{5}	1, 2, 3, 6
	遗传算法2	0.687 9	0.453 7	4.922×10^{-6}	1.010×10^{6}	6.686×10^{5}	1, 2, 3, 6
	相对误差1	0.03%	0.07%	0.00%	0.60%	0.18%	0.00%
	MATLAB-MultiStart	—	0.457 1	4.782×10^{-6}	1.010×10^{6}	6.700×10^{5}	1, 2, 3, 6
	相对误差2	—	0.81%	2.89%	0.60%	0.03%	0.00%
人工波	遗传算法1	0.694 2	0.440 5	8.843×10^{-6}	1.000×10^{6}	6.790×10^{5}	1, 3, 5, 7
	遗传算法2	0.694 2	0.440 5	8.843×10^{-6}	1.000×10^{6}	6.786×10^{5}	1, 3, 5, 7
	相对误差1	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.00%
	MATLAB-MultiStart	—	0.440 7	8.830×10^{-6}	1.010×10^{6}	6.800×10^{5}	1, 3, 5, 7
	相对误差2	—	0.05%	0.15%	1.00%	0.15%	0.00%

注:遗传算法1为改进的自适应小生境遗传算法,遗传算法2为改进的基本遗传算法;相对误差1=|遗传算法1数值−遗传算法2数值|/[0.5×(遗传算法1数值+遗传算法2数值)]×100%;相对误差2=|遗传算法1数值−MATLAB-MultiStart数值|/[0.5×(遗传算法1数值+MATLAB-MultiStart数值)]×100%.

输入地震动时,改进的自适应小生境遗传算法首次得到最优解的进化代数分别为134、86、15,而改进的基本遗传算法则分别为256、337、134.改进的自适应小生境遗传算法和改进的基本遗传算法首次得到最优解平均耗费的机时分别为389.2 s、577.9 s(在同一台计算机上运行算法程序),前者比后者平均少用机时32.7%.可见,与改进的基本遗传算法相比,改进的自适应小生境遗传算法的收敛速度更快.

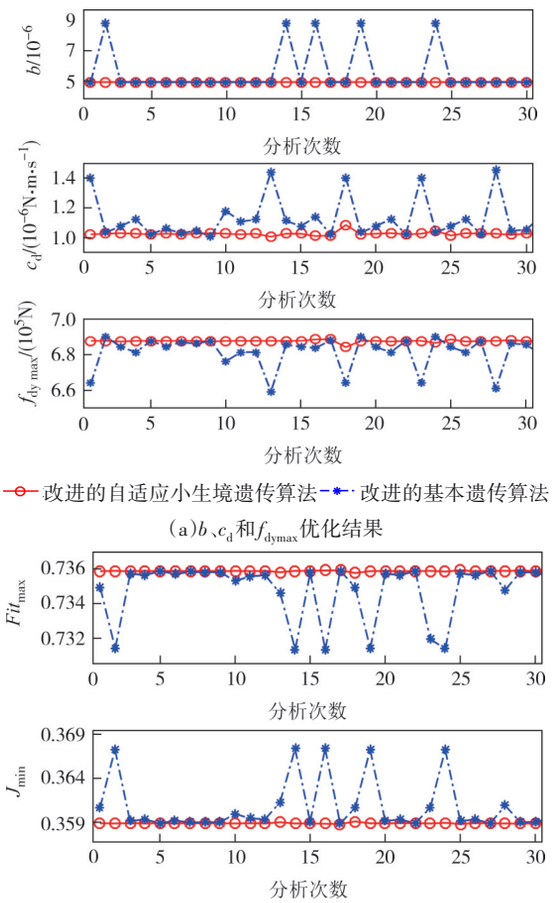
由表2可知,磁流变阻尼器黏滞阻尼系数c_d的最优值均等于或接近其下限值1×10^{6} N·s/m.应当指出的是,本文磁流变阻尼半主动控制系统整体优化时,假定磁流变阻尼器的最大阻尼力为750 kN.当最大阻尼力一定时,磁流变阻尼器黏滞阻尼系数c_d的取值越小,其库仑阻尼力的可调范围将越大,而这有利于取得更优的减振效果.

由表2可见,三条不同的地震波输入时,遗传算法的优化结果差异明显,例如磁流变阻尼器最优布置位置各不相同.事实上,不同时频域特性地震动作用下,设置和未设置磁流变阻尼器结构的动力响应不同.此外,由表2可知,输入地震动对优化后的磁流变阻尼半主动控制系统减振性能有一定影响.当El Centro波为输入地震动时,取得相对最优的结构控制效果.当考虑地震作用的随机性时,磁流变阻尼半主动控制系统整体优化可归为多目标优化问题.实际工程中,需要权衡不同地震波输入时被控结构的动力响应及相应的控制系统最优参数,综合分析后做出合理决策.

为研究优化结果的稳定性,分别采用改进的自适应小生境遗传算法和改进的基本遗传算法,对上文所述的优化问题(El Centro波输入时)进行30次优化分析,优化结果见图6.

改进的自适应小生境遗传算法和改进的基本遗传算法每次优化分析得到的磁流变阻尼器布置位置均收敛到表2中的最优解,即1~4层各布置一个阻尼器.图6(a)表明,由改进的自适应小生境遗传算法分析得到的控制力权矩阵$\boldsymbol{R}$的系数b、磁流变阻尼器的黏滞阻尼系数c_d和最大库仑阻尼力f_{dymax}的优化结果变化幅度更小,且更接近表2中的最优解.图6(b)中,改进的自适应小生境遗传算法最优目标函数值的范围为0.358 8~0.359 1,而改进的基本遗传算法最优目标函数值的范围为0.358 9~0.367 4,后者波动幅度是前者波动幅度的近29倍.综上所述,本文提出

的改进的自适应小生境遗传算法每次均达到或者接近表 2 中的最优解,而改进的基本遗传算法优化结果具有明显的随机性.



(a)b、c_d和f_{dymax}优化结果

(b)最优适应度Fit_{max}与最优目标函数值J_{min}

图 6　El Centro 波输入时优化结果

Fig.6　Optimization results under El Centro wave

El Centro 波输入时,半主动控制和无控结构峰值响应对比如图 7 所示.由图可知,经改进的自适应小生境遗传算法优化的半主动控制系统取得明显减振效果.半主动控制结构层间位移角峰值和绝对加速度峰值较无控时分别平均减小 66.8% 和 40.4%.其中,底层层间位移角峰值、顶层绝对加速度峰值分别减小 70.2% 和 63.6%.

El Centro 波输入时,半主动控制和无控结构典型动力响应时程对比如图 8 所示.由图可见,经过优化的磁流变阻尼半主动控制系统取得良好减振效果.在地震作用时段内,半主动控制结构底层层间位移和顶层绝对加速度较无控时均明显减小,均方根值分别减小 82.7% 和 78.8%.

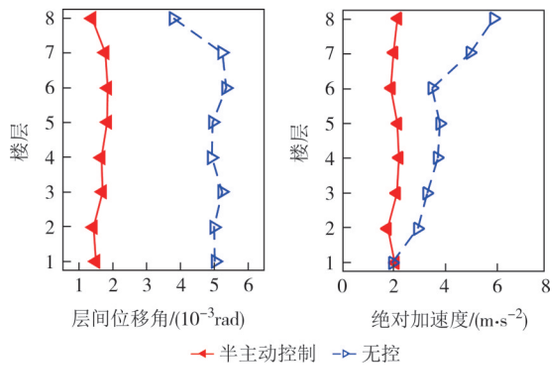
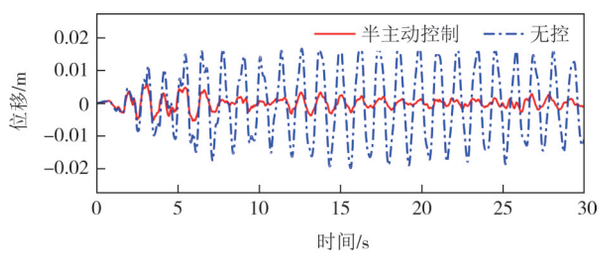
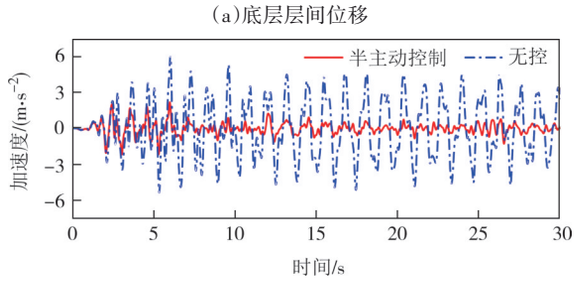


图 7　El Centro 波输入时结构峰值响应对比

Fig.7　Comparison of peak responses of structures under El Centro wave



(a)底层层间位移



(b)顶层绝对加速度

图 8　El Centro 波输入时结构典型动力响应时程对比

Fig.8　Time history comparison of typical dynamic responses of structures under El Centro wave

4　结 论

本文采用一种改进的自适应小生境遗传算法对磁流变阻尼半主动控制系统进行整体优化分析,可同时实现对控制算法参数、磁流变阻尼器参数与布置位置的优化.算例分析结论如下:

1)两种改进遗传算法的优化结果总体一致.控制算法参数和磁流变阻尼器参数的最大相对误差为 0.60%;磁流变阻尼器布置位置优化结果完全一致.这表明本文提出的改进的自适应小生境遗传算法的分析结果是正确的,且具有较高的精度.

2)改进的自适应小生境遗传算法首次得到最优解耗费的机时比改进的基本遗传算法平均少 32.7%,

可见,前者比后者收敛速度更快.这表明本文提出的交叉概率和变异概率自适应调节方法以及采用的两种小生境技术能够显著提高遗传算法的收敛速度.

3)30次优化分析结果表明,改进的自适应小生境遗传算法每次均达到或接近最优解,而改进的基本遗传算法优化结果具有明显的随机性,优化参数的波动幅度较大.可见,本文提出的改进的自适应小生境遗传算法与改进的基本遗传算法相比优化结果的稳定性更强.

4)经改进的自适应小生境遗传算法优化的磁流变阻尼半主动控制系统取得良好减振效果.El Centro波输入时,半主动控制结构层间位移角峰值和绝对加速度峰值较无控时分别平均减小66.8%和40.4%;结构底层层间位移和顶层绝对加速度的均方根值分别减小82.7%和78.8%.

总之,本文提出的改进的自适应小生境遗传算法具有寻优精度高、收敛速度快、稳定性强等特点,是一种有效的优化分析方法.采用该改进遗传算法可以对磁流变阻尼半主动控制系统进行整体优化,使得被控结构得到最优控制.其工程意义在于:当磁流变阻尼器的最大阻尼力(表征结构控制系统的造价)一定时,通过同时对控制算法参数、阻尼器参数与布置位置进行优化,进一步减小被控结构的位移和加速度等动力响应,从而更加有效地提高建筑结构在地震等作用下的安全性和适用性.

参考文献

[1] DANIEL C, HEMALATHA G, JEBADURAI S V S, et al. A review on the magnetorheological fluid, damper and its applications for seismic mitigation [J]. Civil Engineering Journal-Tehran, 2018, 4(12): 3058-3074.

[2] AZIZ M A, MOHTASIM S M, AHAMMED R. State-of-the-art recent developments of large magnetorheological (MR) dampers: a review [J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2022, 34(2): 105-136.

[3] 金波, 李梓溢, 周旺, 等. 基于改进遗传算法的阻尼器位置与数量优化分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 114-121.
JIN B, LI Z Y, ZHOU W, et al. Optimal analysis on location and quantity of dampers based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 114-121. (in Chinese)

[4] 梅真, 郭子雄, 高毅超. 改进遗传算法的结构随机控制系统优化分析[J]. 振动工程学报, 2017, 30(1): 93-99.
MEI Z, GUO Z X, GAO Y C. Optimization of stochastic control system of structures using an improved genetic algorithm [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(1): 93-99. (in Chinese)

[5] GUO H Y, ZHANG L. Optimal placement of MR dampers for structural control using identification crossover genetic algorithm [J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2004, 23(3): 167-178.

[6] 贝伟明, 李宏男. 磁流变阻尼器在结构减震控制中的位置优化研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(3): 73-78.
BEI W M, LI H N. Study on the optimal placement of magnetorheological damper in structural control [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(3): 73-78. (in Chinese)

[7] BHAIYA V, BHARTI S D, SHRIMALI M K, et al. Genetic algorithm based optimum semi-active control of building frames using limited number of magneto-rheological dampers and sensors [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2018, 140(10): 101013.

[8] 张香成, 徐宏辉, 赵军, 等. 基于改进遗传算法的磁流变阻尼器多目标空间优化布置[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 85-94.
ZHANG X C, XU H H, ZHAO J, et al. Multi-objective spatial optimization of magnetorheological dampers based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(5): 85-94. (in Chinese)

[9] YAN G, ZHOU L L. Integrated fuzzy logic and genetic algorithms for multi-objective control of structures using MR dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 296(1/2): 368-382.

[10] LAFONTAINE M, MORONI O, SARRAZIN M, et al. Optimal control of accelerations in a base-isolated building using magneto-rheological dampers and genetic algorithms [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2009, 13(8): 1153-1171.

[11] 郭迎庆, 周敏, 吴景, 等. 基于遗传算法优化的磁流变减震结构模糊控制研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1500-1507.
GUO Y Q, ZHOU M, WU J, et al. Study on fuzzy control of magnetorheological structure based on genetic algorithm optimization [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4): 1500-1507. (in Chinese)

[12] MEHRKIAN B, BAHAR A, CHAIBAKHSH A. Semiactive conceptual fuzzy control of magnetorheological dampers in an irregular base-isolated benchmark building optimized by multi-objective genetic algorithm [J]. Structural Control and Health

Monitoring, 2019, 26(3): e2302.1-e2302.28.

[13] BOZORGVAR M, ZAHRAI S M. Semi-active seismic control of buildings using MR damper and adaptive neural-fuzzy intelligent controller optimized with genetic algorithm [J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(2): 273-285.

[14] SALAJEGHEH S, ASADI P. Life-cycle cost optimization of semiactive magnetorheological dampers for the seismic control of steel frames [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2020, 29(18): e1807.

[15] XUE X M, SUN Q, ZHANG L, et al. Semi-active control strategy using genetic algorithm for seismically excited structure combined with MR damper [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(3): 291-302.

[16] CHAUDHURI P, MAITY D, MAITI D K. Semi-active control of a three-storey building structure [C]// Recent Advances in Theoretical, Applied, Computational and Experimental Mechanics —Proceedings of ICTACEM 2017. Switzerland: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020: 297-309.

[17] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 73-76.
WANG X P, CAO L M. Genetic algorithm—theory, application and software implementation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002: 73-76. (in Chinese)

[18] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 313-315.
OU J P. Structural vibration control—active, semi-active and intelligent control [M]. Beijing: Science Press, 2003: 313-315. (in Chinese)

[19] HROVAT D, BARAK P, RABINS M. Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1983, 109(3): 691-705.

[20] 薛晓敏, 孙清, 张陵, 等. 基于遗传算法策略的含时滞结构振动主动控制研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 143-149.
XUE X M, SUN Q, ZHANG L, et al. Research on active control for time delayed structure using modified genetic algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 143-149. (in Chinese)

[21] YANG J N, WU J C, REINHORN A M, et al. Control of sliding-isolated buildings using sliding-mode control [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(2): 179-186.

[22] 丁艳琼, 李杰. 工程随机地震动物理模型的参数识别与统计建模[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(12): 1422-1432.
DING Y Q, LI J. Parameters identification and statistical modelling of physical stochastic model of seismic ground motion for engineering purposes [J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(12): 1422-1432. (in Chinese)

[23] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 118-119.
ZHOU M, SUN S D. Genetic algorithms: theory and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 118-119. (in Chinese)