

基于改进遗传算法的高层结构粘滞阻尼器优化布置

赵文浩

华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

收稿日期: 2023年7月23日; 录用日期: 2023年8月13日; 发布日期: 2023年8月23日

摘要

粘滞阻尼器在高层结构减震中应用广泛, 为了提升粘滞阻尼器的减震效果, 本文对粘滞阻尼器位置布置进行优化。在传统的遗传算法基础上采用了精英保留策略, 以及进化逆转操作, 提出了一种新的遗传终止规则对算法进行改进, 并用改进的遗传算法对结构阻尼器位置进行优化。通过穷举法和传统遗传算法与本文改进遗传算法的对比, 发现了改进遗传算法加强了算法的寻优能力, 提升了算法的效率。使用时程分析法对粘滞阻尼器优化布置结果与无控结构和阻尼器隔层布置进行对比分析, 发现了阻尼器优化布置具有更好的减震效果。

关键词

进化逆转, 改进遗传算法, 阻尼器优化

Optimal Arrangement of Viscous Dampers in Tall Structures Based on Improved Genetic Algorithm

Wenhao Zhao

School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Jul. 23rd, 2023; accepted: Aug. 13th, 2023; published: Aug. 23rd, 2023

Abstract

Sticky dampers are widely used in high-rise structural seismic mitigation, and in order to enhance

their damping effectiveness, this paper optimizes the layout of sticky dampers. Based on the traditional genetic algorithm, this paper introduces elite reservation strategy and evolution reversal operation to propose a new genetic termination rule for algorithm improvement. The improved genetic algorithm is then applied to optimize the positions of structural dampers. By comparing the exhaustive method, traditional genetic algorithm, and the improved genetic algorithm, it is found that the improved algorithm enhances the optimization capability and improves the efficiency of the algorithm. Utilizing the time-history analysis method, a comparative analysis is conducted between the optimized layout of sticky dampers and uncontrolled structures and damper interlayer layouts, revealing that the optimized damper arrangement exhibits better seismic mitigation effects.

Keywords

Evolution Reversal, Improved Genetic Algorithm, Optimized Damper

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震具有震级大、烈度高、波及范围广、地形地貌复杂、地震灾害导致人员伤亡占比较高、宏观地震中发生在高烈度设防区等特点[1]。并且我国位于环太平洋地震带与欧亚地震带之间，地震断裂带十分活跃，是一个震灾严重的国家。因此建筑结构消能减震研究就显得至关重要。

在结构消能减震研究中附设阻尼器是其中的一种有效解决方案[2]。其减震原理是通过在结构中设置消能阻尼器，来减少地震能量对结构的影响，提高结构的抗震性能和安全性。然而，如何最佳地布置阻尼器以实现最优的减震效果一直是一个复杂的问题。遗传算法(GA)作为一种全局搜索和适应性优化的方法，能够解决这一问题，因此在阻尼器优化布置中得到广泛应用[3]。

Takewaki 和 Wu [4]等将遗传算法与结构引入解决结构振动问题，从此，遗传算法在结构阻尼器优化布置中得到普遍应用。李志军等[5]使用遗传算法解决了应用新型电磁惯性质量阻尼器于偏心高层结构抗震工程中的优化布置问题。关晓迪等[6]通过 Matlab 编写算法主程序，利用有限元进行循环计算，实现对 STMD 系统的刚度、阻尼参数以及 MTMD 系统的位置组合的优化。

2. 计算模型

2.1. 结构模型

线性粘滞阻尼器的计算模型为：

$$F_d(t) = C_d \cdot \dot{u}(t) \quad (1)$$

式中 $F_d(t)$ 是线性粘滞阻尼器的阻尼力； C_d 是阻尼器系数； $\dot{u}(t)$ 是阻尼器的相对运动速度。

地震作用下，安装阻尼器的结构体系的微分动力学方程为：

$$[M] \cdot \{\ddot{u}(t)\} + ([C] + [C_d]) \cdot \{\dot{u}(t)\} + [K] \cdot \{u(t)\} = -[M] \cdot [E] \cdot \ddot{x}_g \quad (2)$$

其中 $[M]$ 、 $[K]$ 、 $[C]$ 分别为原结构的质量，刚度，阻尼矩阵，其中原结构的阻尼矩阵用 Rayleigh 比例阻尼构造， $[C_d]$ 为阻尼器的阻尼矩阵， $[E]$ 是地震波的维数位置向量矩阵， \ddot{x}_g 为地震波的加速度向量。对

结构的动力分析采用逐步积分法中的 Newmark- β 法求解。

2.2. 优化模型

对建筑结构阻尼器位置优化布置的数学模型[7]一般为:

$$\begin{cases} f(X,t) \\ X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \\ s.t.: x_j \in \{0,1\}, j = (1,2,\dots,n) \\ g(X,t) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 n 为阻尼器楼层布置方案, $f(X,t)$ 为优化的目标函数, 根据不同的目标函数构成情况寻找最大值或者最小值, X 为阻尼器布置方案, 而 $g(X,t) \leq 0$ 为标准化处理的约束条件。

2.3. 目标函数

建筑阻尼器优化的目标函数[8]为:

$$f = \min \left(\alpha \frac{\theta_{\max}}{\theta_{0,\max}} + \beta \frac{a_{\max}}{a_{0,\max}} + \gamma \frac{u_{\max}}{u_{0,\max}} \right) \quad (4)$$

其中 θ 、 a 、 u 为结构的层间位移角, 层间加速度与层间位移, 下角标为 0 的表示无阻尼结构的响应最大值, 下角标为 max 表示有控结构的响应最大值, α 、 β 、 γ 为组合系数, 本文取的系数组合之为 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 0$ 、 $\gamma = 0$ 。

3. 遗传算法的改进

3.1. 基因逆转操作

基因逆转[9]操作的原理是随机在一个基因串上随机标记两个位置, 在这两个位置之间的这段基因调转 180 度再重新放入原来的基因的过程, 例如 10 | 1100 | 1010 逆转后为: 10 | 0011 | 1010。每当基因进行逆转操作后就与原来的基因进行比较, 如果比原来的基因表现型好, 就对原基因进行替换, 否则原基因不变。逆转操作是一种单向的朝着好方向进化的操作, 既可以提高传统遗传算法的择优收敛效率, 也有效的避免了传统遗传算法容易陷入局部最优解的问题。

3.2. 精英保留策略

传统的遗传算法在整个运算过程中进化的, 但是中间会有局部的几代偶尔会有退化现象发生, 即相对最优解丢失的问题, 使计算的效率大大降低, 为了解决这个问题, 本文采用新的精英保留策略, 当这一代的最优个体不如上一代时, 将上一代的最优个体替换当前种群最差个体, 然后进行迭代计算, 从而保证迭代运算的过程中不会发生相对最优解的丢失导致局部退化现象。

3.3. 迭代终止规则

在标准的遗传算法中迭代到最大进化代数(一般为 50~200 代)的时候计算终止, 由于其收敛择优速度比较慢, 迭代次数设置的少就会导致无法寻得最优解, 而迭代次数选择的过多, 会造成许多没有意义的计算, 从而增加了计算时间。为了避免此现象, 本文提出当一个种群在进化的过程中连续 M 代, 其最优个体的数量占整个种群数量的百分比 P 大于某个值 N 时, 认定此基因型个体时最优个体, 从而停止迭代计算, 本文 M 取 1, $N = 90$ 。改进的遗传算法流程如图 1 所示:

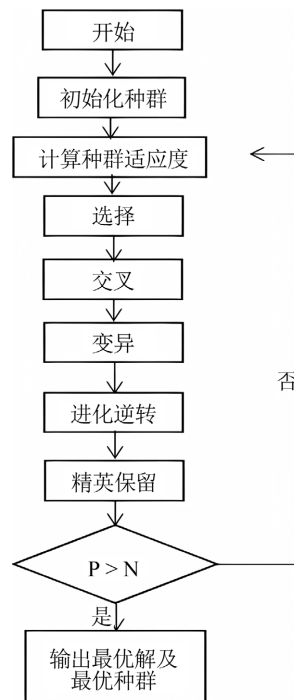


Figure 1. Calculation flow chart
图 1. 计算流程图

4. 算例验证

4.1. 工程概况

本文以某 16 层混凝土框架结构为例，结构阻尼比为 0.05，一阶模态振动周期为 2.3140 s。结构总高 48.6 米，首层高 3.6 米，其余层高 3 米，各层质量及水平侧移刚度如表 1 所示，选择其中 8 层布置等效阻尼系数 $C_d = 2.3 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 的粘滞阻尼器，每层安装 5 个，地震波选用 EL Centro 波作为输入，地震波峰值加速度为 200 gal，以减小最大层间位移角为优化目标。

Table 1. Mass and horizontal stiffness

表 1. 各层质量及水平侧移刚度值

层号	质量/t	刚度 $\times 10^7/(\text{N} \times \text{m}^{-1})$
1	3030	319
2~5	2920	225
6~10	2550	158
11~15	2230	135
16	2000	130

4.2. 算法参数设置

改进遗传算法，种群规模为 60，交叉概率 $P_c = 0.8$ ，变异概率 $P_m = 0.05$ ，标准遗传算法增设了最大遗传代数 100 代，没有进化逆转与精英保留，其他参数与改进遗传算法一致。

4.3. 优化计算结果

经过计算得出目标函数最优值为 0.7237，最优解为(0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)，阻尼器优化布置位置在 2 到 9 层，不同算法对比见表 2，由表 2 可以看出，改进的遗传算法的最优解准确率比标准遗传算法的高，而且计算时间与标准的遗传算法相比减少了 39.9%，由图 2 可以看出，改进遗传算法比标准遗传算法具有更快的收敛效果，综合来看，改进的遗传算法相较于标准遗传算法计算效率大大提高。

Table 2. Algorithm comparison
表 2. 算法对比

优化算法	改进遗传算法	遗传算法	穷举法
计算次数	10	10	1
得到最优解的次数	10	7	1
平均计算时间/s	92.62	154.23	4162.18

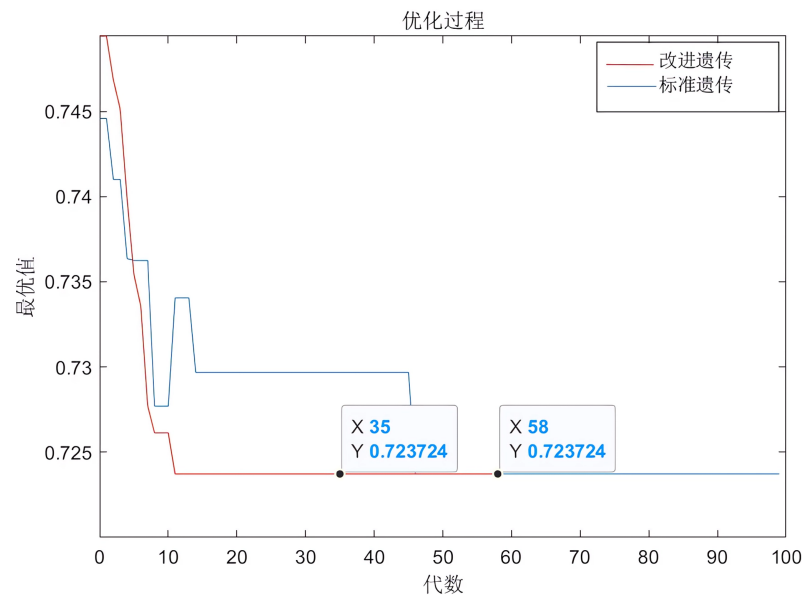


Figure 2. Evolution curves of improved GA and SGA
图 2. 改进 GA 与 SGA 进化曲线

4.4. 结构动力分析

通过时程分析法对阻尼器优化布置与隔层布置以及无控结构进行结构动力分析。

4.4.1. 结构层间位移角对比

地震波作用下的三种结构的层间位移角如图 3 所示，由隔层布置与无控结构对比可得最大层间位移角减少了 19.95%，优化布置与无控结构对比可得最大层间位移角减少了 27.63%，在阻尼器数量相同的情况下，阻尼器优化布置具有更好的减震效果。

其原因是因为传统的隔层布置是一种经验布置法，通过以往的经验进行布置，虽然能一定程度上保证减少层间位移，但是不一定是最优的结果，而优化布置是根据每一种不同的框架结构的数据以及优化目标针对性的对减少层间最大位移布置，是通过计算得出，更加精确，减震效果更好。

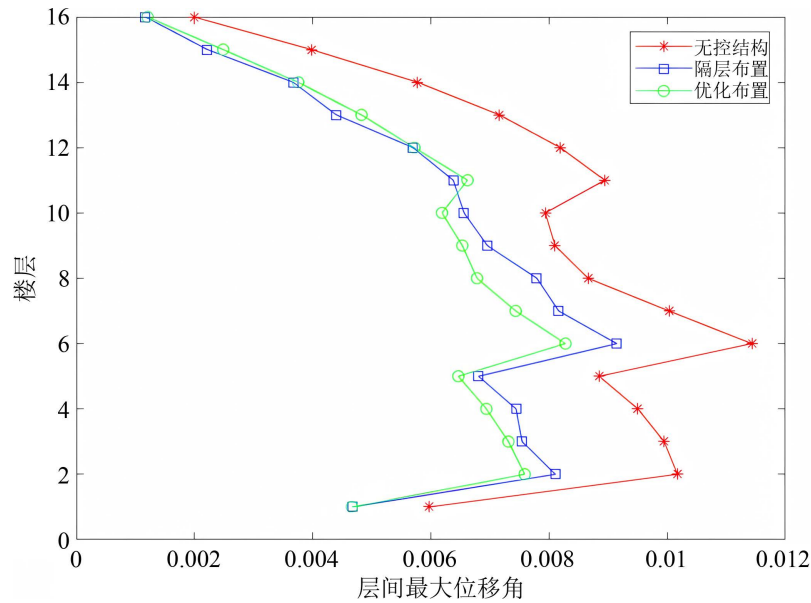


Figure 3. Maximum displacement angle between floors
图 3. 楼层层间最大位移角

4.4.2. 结构顶层位移分析

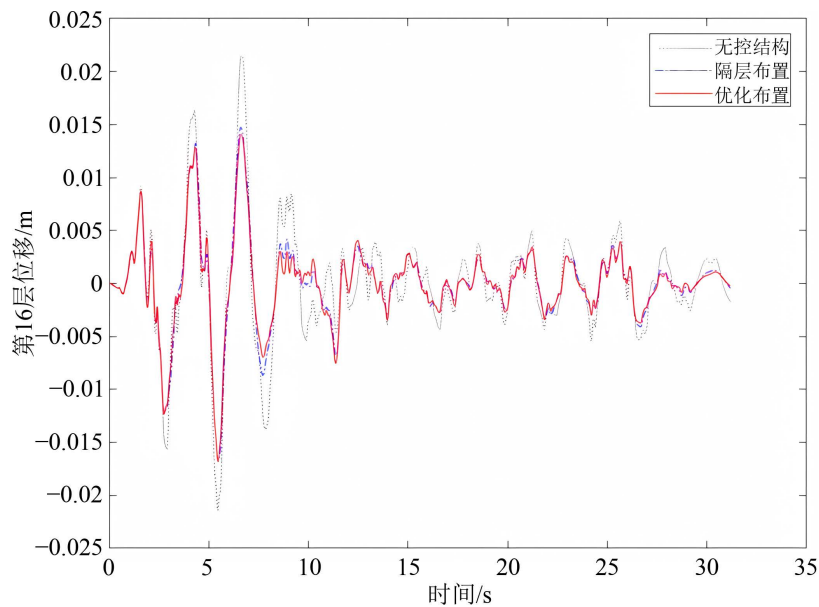


Figure 4. Displacement time history curve of the top layer
图 4. 顶层位移时程曲线

三种结构的顶层位移时程曲线如图 4 所示，无控结构顶层最大位移为 21.3068 mm。隔层布置结构顶层最大位移为 16.8103 mm，减少了 21.1%。优化布置结构顶层最大位移为 16.4030 mm，减少了 23.0%，并且优化布置的红色曲线基本一直在最内侧，优化布置能更好的减少结构顶层位移。

4.4.3. 结构层间加速度对比

地震波作用下三种结构的各层加速度与减震率如表 3 以及图 5 所示。

Table 3. Acceleration and damping rate of each layer relative to the ground under different schemes
表 3. 不同方案时各层相对于地面的加速度及减震率

楼层	原结构加速度/ $m \times s^{-2}$	阻尼器优化结构		阻尼器隔层布置结构	
		加速度/ $m \times s^{-2}$	减震率/%	加速度/ $m \times s^{-2}$	减震率/%
1	3.23086	2.39196	25.97	2.18995	32.2
2	3.80957	3.32175	12.81	3.67542	3.52
3	3.79793	3.23225	14.89	3.36421	11.4
4	4.47446	3.27933	26.71	3.65906	18.22
5	4.84258	3.67006	24.21	3.86775	20.13
6	4.53556	3.78811	16.48	4.32219	4.70
7	4.15929	3.72184	10.52	3.94904	5.05
8	4.60347	3.87132	15.90	4.33370	5.86
9	4.80404	3.94447	17.89	4.28455	10.81
10	4.65358	4.09510	12.00	4.34508	6.62
11	4.26321	4.08499	4.18	4.09620	3.92
12	4.27171	4.18038	2.13	4.11802	3.60
13	4.44423	4.35925	1.91	4.20162	5.46
14	5.45309	4.48905	17.67	4.52642	17.00
15	6.43153	4.88252	24.08	4.91316	23.61
16	6.98436	5.09968	26.98	5.13647	26.46

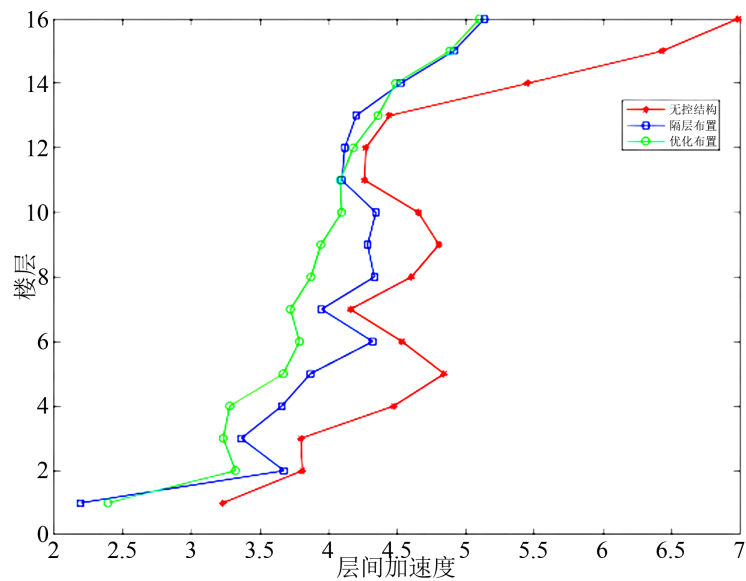


Figure 5. Acceleration between floors
图 5. 楼层层间加速度

由表 3 和图 5 可以看出除了在 1 层, 12 层, 13 层中隔层布置减震率比优化布置的高, 其余层都是优化布置减震效果好, 综合来看, 阻尼器优化布置的减震效果比隔层布置的要好。

5. 结论

通过引入进化逆转操作, 采用精英选择策略, 提出了新的进化终止规则对传统的遗传算法进行了改进, 并对结构的阻尼器进行优化布置, 结果表明, 改进的遗传算法具有更快的收敛速度, 更高的准确率以及计算效率, 阻尼器应在本算例结构的 2~9 层进行设置。

通过对 16 楼结构的阻尼器优化布置与传统的隔层布置以及无控结构相比较, 表明了阻尼器在数量相同的情况下, 阻尼器优化布置在结构最大层间位移角比隔层布置减少了 7.68%, 在结构顶层最大位移比隔层布置减少了 1.9%, 以及在大多数楼层减小加速度方面具有更加良好的效果, 并且验证了改进遗传算法的可行性以及实用性。

参考文献

- [1] 高永武, 林旭川. 四川泸定 6.8 级地震震害调查——以磨西镇为例[J]. 防灾博览, 2022(5): 36-39.
- [2] 汤昱川, 张玉良, 张铜生. 粘滞阻尼器减震结构的非线性动力分析[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 67-71.
- [3] Mohebbi, M. and Joghataie, A. (2012) Designing Optimal Tuned Mass Dampers for Nonlinear Frames by Distributed Genetic Algorithms. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, **21**, 57-76. <https://doi.org/10.1002/tal.702>
- [4] Takewaki, I. (1997) Optimal Damper Placement for Minimum Transfer Functions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **26**, 1113-1124. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199711\)26:11<1113::AID-EQE696>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199711)26:11<1113::AID-EQE696>3.0.CO;2-X)
- [5] 李志军, 雷海涛, 袁渊, 等. 基于遗传算法的不规则高层结构新型电磁惯性质量阻尼器优化布置研究[J]. 力学与实践, 2020, 42(2): 177-183.
- [6] 关晓迪, 郭宏超, 王洪臣, 等. 基于遗传算法的 TMD 参数优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(2): 211-216. <https://doi.org/10.15986/j.1006-7930.2023.02.008>
- [7] 燕乐纬, 陈洋洋, 周云. 基于数字序列编码遗传算法的高层结构黏滞阻尼器优化布置[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 101-107.
- [8] 曲激婷, 李宏男, 李钢. 位移型消能器在结构减震控制中的位置优化研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 43-48.
- [9] 张凯举, 彭先涛. 基于进化逆转操作算子的遗传算法对步进式加热炉炉温优化[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2013, 12(6): 677-681.