

基于遗传算法的 TMD 参数优化研究

关晓迪¹, 郭宏超¹, 王洪臣², 王振山¹

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 将遗传算法应用于结构被动减振装置的参数优化之中, 提出了优化方法以及数学模型。以控制一个大跨度钢桁架连廊的人致振动为工程实例, 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。结果表明: 在 TMD 系统中应用遗传算法寻优得到的最优参数比 Den hartog 定点理论计算出的最优参数减振率提高 2.7%, 在 MTMD 系统中最优的布置方式比均布布置方式对中心频率的减振率能提高 2.2%, 同时也说明了遗传算法在 TMD 减振系统优化中的可行性。

关键词: 钢连廊; 遗传算法; 调谐质量阻尼器; 人致振动; 参数优化

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0211-06

Optimization analysis of TMD parameters based on genetic algorithm

GUAN Xiaodi¹, GUO Hongchao¹, WANG Hongchen², WANG Zhenshan¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: The genetic algorithm is applied to the parameter optimization of the structural passive vibration damping device, and the optimization method and mathematical model are proposed. Taking the control of human-induced vibration of a large-span steel truss corridor as an engineering example, the main program of the algorithm is written by Matlab, and the finite element is used for cyclic calculation to optimize the stiffness and damping parameters of the STMD system and the position combination of the MTMD system. The results show that the optimal parameters obtained by applying the genetic algorithm in the TMD system are 2.7% higher than the optimal parameters calculated by the Den hartog fixed-point theory. The optimal layout in MTMD system is 2.2% higher than that of uniform layout, and the feasibility of the genetic algorithm in the optimization of the TMD damping system is also illustrated.

Key words: steel corridor; genetic algorithm; tuned mass damper; human induced vibration; parameter optimization

被动控制装置调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)在结构减振控制中的应用越来越广泛, 除了对于控制高层结构在地震、风等动力作用下的响应, 对于大跨度结构在人致激励下产生的振动响应也已被证明有着良好的减振效果^[1]。结构被动减振设计的关键在于合理地设置减振装置的力学参数和布置方位^[2-3], 才能达到最为理想和经济的减振效果。1956 年, Den Hartog 根据定点理论导出了 TMD 最佳频率比和阻尼比的最优解析公式^[4], 推导该公式时为了简化计算, 假定主结构的阻尼为 0; 对于有阻尼主结构, Warburton^[5]表明无法继续利用定点理论推导出最佳参数的解析公式, 而是利用非线性数学规划的方法进行求解; 薛

素铎^[6]、李宏男^[7]对于阻尼器在结构中的位置进行了分析, 表明合理布置阻尼器可显著提高减震控制效率。目前, TMD 参数优化多针对于抗震方面, 本文针对 TMD 在结构人致振动控制中的这两类参数, 结合遗传算法进行寻优, 并将结果进行对比。

1 结构减振控制数学模型

优化问题的核心是寻求合理的数学模型, 目标函数与约束条件^[8], 结构被动减振的优化问题可以描述为在一定的约束条件下, 充分发挥减振器的性能将结构的振动响应降低到最小值, 其一般性的数学模型可以写成如下形式。

$$\min R(x) = [f_1(x), f_1(c)] \quad (1)$$

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978571); 陕西省杰出青年基金项目(2021JC-41); 陕西省重点研发计划(2022SF-199, 2022SF-121)

第一作者: 关晓迪(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事结构动力学与抗震、减震技术方面的研究。E-mail: 2837867139@qq.com

通信作者: 郭宏超(1981—), 男, 教授, 博导, 主要从事工程结构抗震、钢结构方面的研究。E-mail: ghc-1209@163.com

$$k_{\min} < f_1(x) < k_{\max}, L_{\min} < f_2(c) < L_{\max} \quad (2)$$

式中: $f_1(x)$ 为减振装置的参数变量; $f_2(x)$ 为减振装置的位置变量; K 、 L 为相应的约束条件。

对于减振结构来说,其优化问题的目标并不能精确的表示为变量的具体函数,所以在优化过程中并不能依靠变量的导数或梯度信息,这就要求算法能够自适应的在解空间中找到全局最优解。遗传算法作为一种自适应概率搜索方法对于参数的优化问题具有很好的效果,其可以与有限元方法进行结合来分析复杂的结构问题,并不需要对结构进行简化,且对任意形式的目标函数和约束都可以处理,具有较强的鲁棒性^[9]。

2 算法优化过程的实现

遗传算法原理为模拟生物界的选择、遗传特点以及优胜劣汰法则,对数个体(待优化参数)进行编码来组成初始群体,按照个体对环境的适应程度(减振效果)施加选择、交叉、变异等操作产生新的种群,如此循环,从而实现参数的寻优。

{0, 1}形式的二进制编码作为遗传算法的基本编码方式,便于个体间的交叉、变异等操作,简单易行,应用最为广泛。

本次参数优化的过程包括了结构人致振动的动力时程分析和遗传算法参数寻优,这里采用 Matlab 编制算法主程序,通过调用有限元程序进行参数验证,并依据算法自动修改模型参数,循环计算,流程如图 1 所示。

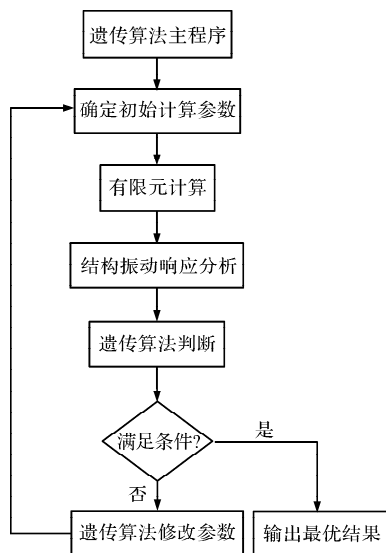


图 1 基于遗传算法的结构 TMD 参数优化流程

Fig. 1 Structural TMD parameter optimization process based on genetic algorithm

3 工程实例

某站站房改造项目中的一幢办公及商业配

楼^[10], 由于规划条件限制, 其建筑角部坐落在一条地裂缝上, 按照有关规程的要求对地裂缝进行有效避让后, 结构被分为了 3 个单体结构, 为了保证建筑功能的连续性, 使用钢连廊的形式将结构连接起来, 如图 2~3 所示。连廊跨度纵向 45 m, 横向 9.5 m, 为钢桁架结构形式, 在结构高度方向上共设置一个单层桁架和一个双层桁架^[11], 其中双层桁架设置标高为 14~22 m, 单层桁架设置标高为 5~10 m, 第一阶竖向自振频率较低为 2.5 Hz, 与人正常行走步频接近, 容易产生共振导致过大的振动加速度, 影响结构的使用功能, 为了抑制振动加速度, 采用调谐质量阻尼器 (TMD) 对其进行减振控制。利用 Abaqus 建立有限元模型如图 4, 结构杆件采用 B31 梁单元, 楼板采用 S4R 单元, 在钢梁下部设置节点, 施加点质量, 用具有刚度、阻尼属性的 Spring 单元将节点和钢梁进行连接来模拟 TMD 减振装置。

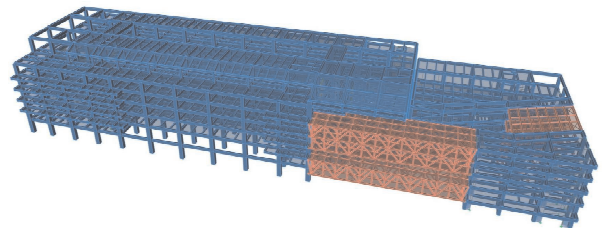


图 2 东配楼三维图

Fig. 2 Three-dimensional view of the East Building

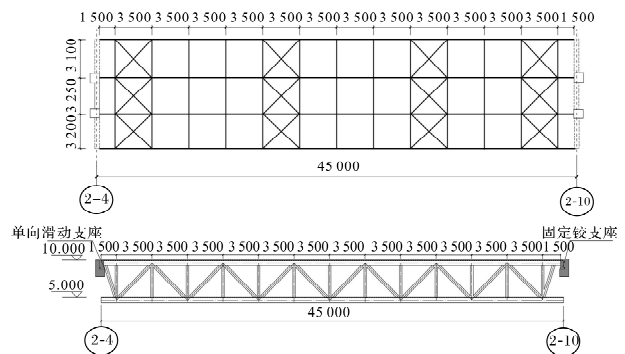


图 3 连廊平面及立面图

Fig. 3 Corridor plane and elevation

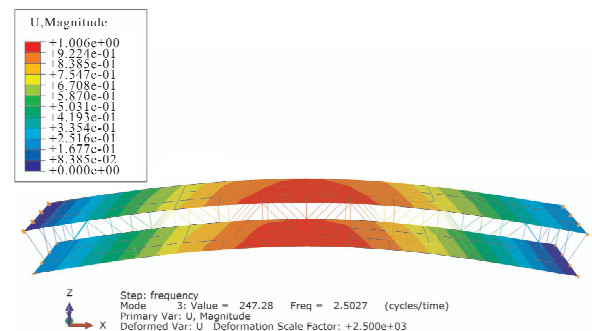


图 4 连廊有限元模型

Fig. 4 Finite element model of corridor

3.1 对 TMD 力学参数的优化

工程设计中 TMD 刚度、阻尼值常采用 Den hartog 提出的定点理论最优化参数进行计算, 根据双自由度体系的动力平衡方程推导出式(3~4), 该公式假定主结构的阻尼值为 0, 但实际结构中多少均存在一定的阻尼值, 这就导致由公式计算出的最优参数与实际的最优参数存在一定误差, 为了获得最佳的减振效果, 采用遗传算法对这两个力学参数进行寻优。

$$f_{\text{opt}} = 1/\sqrt{1+\mu} \quad (3)$$

$$\xi_{\text{opt}} = \sqrt{3\mu/8(1+\mu/2)} \quad (4)$$

式中: f_{opt} 为结构圆频率与激振力频率之比; μ 为固定质量比; ξ_{opt} 为阻尼比。

在进行优化时, 采用固定质量比, 也就是 TMD 的质量为常量取 4 000 kg, 刚度和阻尼系数为变量, 为了提高算法的寻优速度, 同时排除一些不合理的值, 需要指定一个合适的参数取值范围, 通常来说结构的阻尼比较小, 约为 2%~5% 之间, 最优参数值与利用 Den Hartog 计算出的参数值相差并不会太大, 因此给出待优化参数的取值范围如表 1 所示。

表 1 遗传算法参数取值

Tab. 1 Values of genetic algorithm parameters

参数	取值
刚度	[900~1 000]kN/m
阻尼	[7~8]kN·s/m
种群大小	30
适应度函数	减振率
交叉概率	0.6
变异概率	0.2

初始种群为一定数量的个体, 每个个体均包含有刚度和阻尼两条染色体, 种群越大, 越容易找到全局最优解, 但消耗的计算时间也越长。本次初始种群数量取为 30, 采用二进制的编码方式, 以原结构和减振结构在共振频率 2.5 Hz 的人行荷载激励下, 跨中节点加速度响应降低的幅度为基础, 定义减振率为适应度函数, 如式(5)。

$$F(x) = (a_{\min} - a_{\max})/a_{\max} \quad (5)$$

式中: $F(x)$ 为适应度函数; a_{\max} 为减振结构加速度响应峰值; a_{\max} 为原结构加速度响应峰值。

交叉和变异可以使得遗传算法的搜索能力得到提高, 同时也是获得新的优良个体的重要手段, 采用单点交叉的方法, 将种群中任意两个体的染色体编码中任意一位根据交叉概率进行互换, 根据变异概率将染色体中的任一位编码进行 0~1 互换, 如图 5 所示, 以此进行交叉、变异操作, 达到

产生新个体的目的。

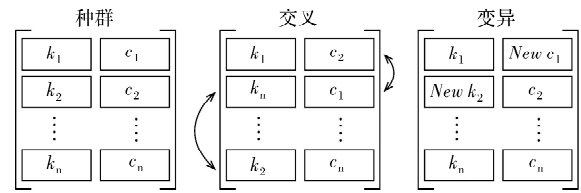


图 5 遗传算子操作示意图

Fig. 5 Schematic diagram of genetic operator operation

选择操作建立在种群中个体适应度评估的基础上, 将每代个体按适应度(减振率)大小进行排序, 采用末尾淘汰制, 每代淘汰适应度排名后 5% 的个体, 用适应度最好的染色体进行代替。

当计算出的适应度在解空间中无对应可行解时, 即根据个体约束的取值范围重新随机生成一个个体, 相比于罚函数法, 使用更加简单。

优化结果过程中适应度随迭代次数变化的曲线如图 6 所示, 可以看出, 该算法具有良好的收敛性, 当计算到第 11 代和第 17 代时, 种群中的最大适应度和平均适应度分别达到最大值, 说明寻优过程已经结束, 提取结果如表 2 所示, 从表中可以看出, 遗传算法得到的最优刚度为 976 kN/m、阻尼为 7.66 kN·s/m, 而 DH 算法计算的最优刚度为 966 kN/m、阻尼为 7.53 kN·s/m, 存在 1%~2% 的误差。

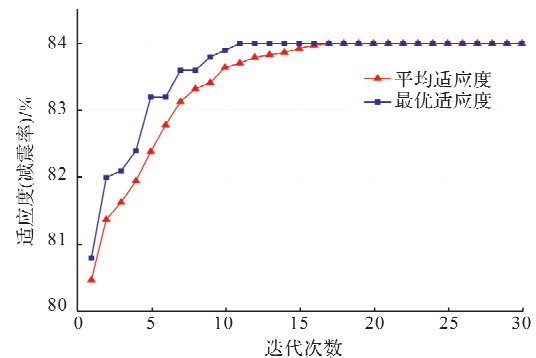


图 6 遗传算法的最优与平均适应度曲线

Fig. 6 Optimal and average fitness curves of genetic algorithms

表 2 不同计算方法下的最优 TMD 参数

Tab. 2 Optimal TMD parameters under different calculation methods

计算方法	质量 /kg	刚度/(kN·m ⁻¹)	阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	频率比	阻尼比
DH 解法	4 000	966	7.53	0.990	0.060 6
遗传算法	4 000	976	7.66	0.995	0.061 3

为了验证优化结果的正确性, 计算结构在共振频率 2.5 Hz 的人行荷载激励下, 两种 TMD 参

数时跨中节点的加速度,提取加速度时程曲线^[12]如图7所示,可以看出DH算法下的减振结构的加速度响应峰值为 0.087 m/s^2 ,非减振结构加速度响应峰值为 0.463 m/s^2 ,减振率为 81.2% ,遗传算法得到的峰值为 0.076 m/s^2 ,减振率为 83.9% ,减振率相比提高了 2.7% 。

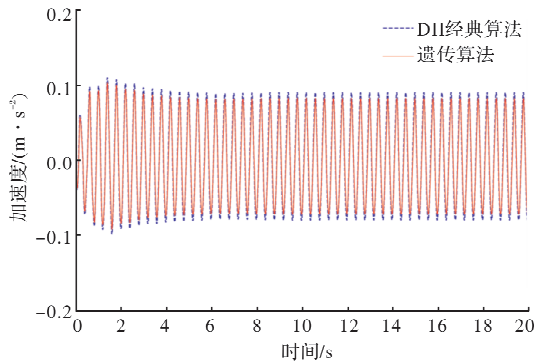


图7 两种算法加速度时程曲线对比

Fig. 7 Comparison of acceleration time history curves of the two algorithms

4 对 MTMD 位置组合的优化

在结构所受激励荷载频率分布较广或主结构

自振频率存在偏移时,由多个不同频率 TMD 组成的 MTMD 可以扩大减振频带的覆盖范围,相比 TMD 能获得更好的有效性和鲁棒性^[13]。当 TMD 数量较少时,其布置方位可以通过试算来确定,但当 TMD 数量较多时,位置组合可能多达百种,这时试算已经变得不可能了,通常采用均匀分布的布置方式,但不一定能获得最佳的减振效果,针对这个问题,需要采用遗传算法来对 MTMD 的位置组合进行优化。

进行优化时,MTMD 系统的总质量取为 $4\,000 \text{ kg}$,采用频率呈线性分布的 MTMD 参数计算方法^[14-15],即每个 TMD 刚度、阻尼相同,质量不同,设置减振频带宽度为 $2.2\sim 2.8 \text{ Hz}$,个数取为 9 个,各参数取值如表3所示,通过算法来寻找最优的布置位置。选取各钢梁中点为待选位置,为了减少算法循环优化的工作量且减振器越靠近跨中区域的减振效果越好,设定连廊 MTMD 的待选位置区域如图8所示,分为上下弦两层,每层 17 个,共 34 个待选位置,括号中的数字为下层对应位置编号。

表3 MTMD 减振系统力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters of MTMD vibration reduction system

计算方法	总质量/ kg	个数	单个质量/kg	刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	阻尼/ ($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	平均阻 尼比 ζ	频率间 隔 δ
刚度阻尼相同	4 000	9	$m_1=563, m_2=527$	107	0.548	0.02	0.24
质量不同			$m_3=494, m_4=464, m_5=437$				
			$m_6=411, m_7=388, m_8=367, m_9=348$				

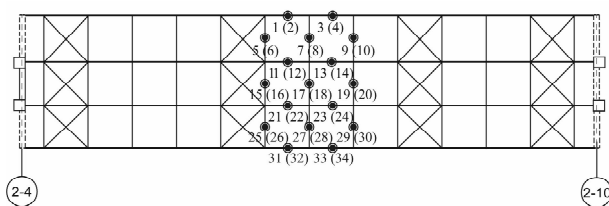


图8 MTMD 待选位置及编号

Fig. 8 MTMD candidate positions and numbers

种群数量取为 30 ,种群中的个体为 TMD 待选位置,每个个体由 34 个待选位置中随机选出的 9 个组成,分别对应着 $m_1\sim m_9$ 不同质量的 TMD,采用自然数的编码形式,如图9所示。

MTMD 系统对减振频段范围内的激励频率均具有减振效果^[16],为了评估个体的适应度,定义适应度函数为减振系统在减振区间 $2.2\sim 2.8 \text{ Hz}$ 内的总减振率,如式(6)。

$$F(x) = \left(\sum_{i \text{ Hz}}^{k \text{ Hz}} a_{i, \max} - \sum_{i \text{ Hz}}^{k \text{ Hz}} a'_{i, \max} \right) / \sum_{i \text{ Hz}}^{k \text{ Hz}} a_{i, \max} \quad (6)$$

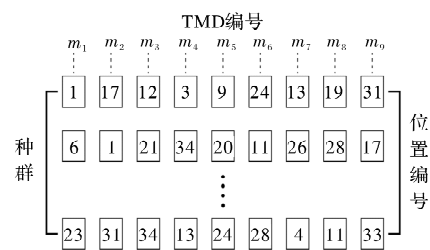


图9 初始种群及编码示意图

Fig. 9 Schematic diagram of initial population and coding 式中: $F(x)$ 为适应度函数; $a'_{i, \max}$ 为减振结构在受到频率为 $i \text{ Hz}$ 外激励时的加速度峰值; $a_{i, \max}$ 为原结构在受到频率为 $i \text{ Hz}$ 外激励时的加速度峰值。

将个体中某个 TMD 位置与另一个体进行互换,以此来进行交叉操作,将个体中某个 TMD 的位置改变为解空间中的其他待选位置,以此来进行变异操作,如图10所示,采用末尾淘汰制,每代淘汰适应度排名后 5% 的个体,用适应度最好的染色体进行代替,算法参数取值如表4所示。

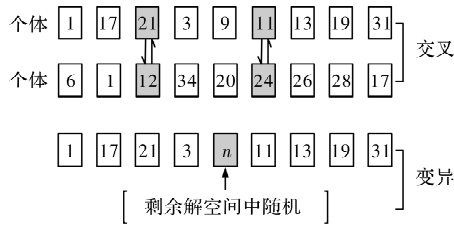


图 10 交叉和变异操作示意图

Fig. 10 Schematic diagram of crossover and mutation operations

表 4 遗传算法参数取值

Tab. 4 Values of genetic algorithm parameters

参数	取值
种群大小	30
个体	34 个待选位置中随机选 9 个
适应度函数	减振率
交叉概率	0.6
变异概率	0.3

外荷载为人群以频率为 2.2 Hz~2.8 Hz 的行走激励,按照上述设定的参数进行遗传算法的寻优计算,迭代过程中种群的最优适应度和平均适应度如图 11 所示,当计算到第 15 代和第 21 代时,种群中的最大适应度和平均适应度分别达到最大值,说明寻优过程已经结束,得到的 MTMD 最优布置方位如图 12 所示,将结果与均布位置时的结果进行对比,在受到中心频率 2.5 Hz 的外激励时,最优位置与采用均布位置的加速度时程曲线对比如图 13 所示,在减振器均布位置下的加速度峰值为 0.099 m/s²,在最优位置时的加速度峰值为 0.086 m/s²,减振率提高了 13%,对于整个减振频段 2.2~2.8 Hz 时的加速度峰值如表 5 所示,总减振效果提高了 2.2%。

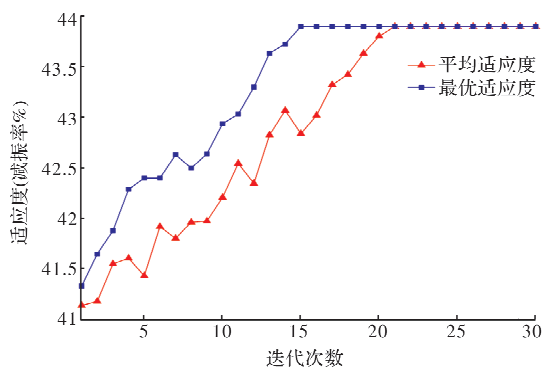


图 11 遗传算法的最优与平均适应度曲线

Fig. 11 Optimal and average fitness curves of genetic algorithms

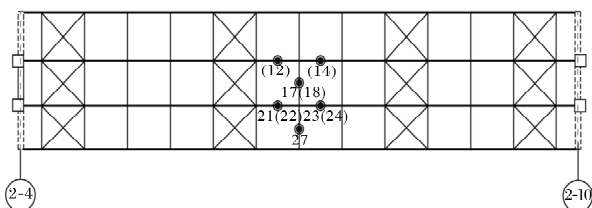


图 12 MTMD 减振系统的最优布置位置

Fig. 12 Optimal placement of MTMD vibration reduction system

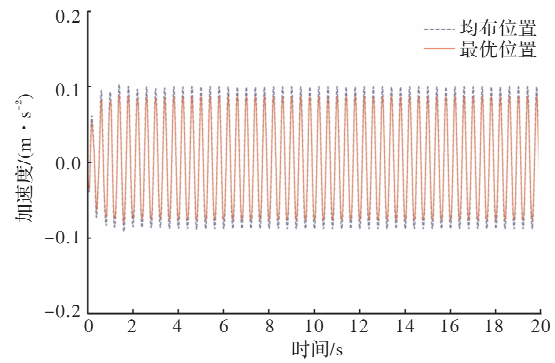


图 13 两种算法加速度时程曲线对比

Fig. 13 Comparison of acceleration time history curves of the two algorithms

表 5 两种 MTMD 布置方位下结构加速度峰值(m/s²)Tab. 5 Structural acceleration peaks under two MTMD layout orientations (m/s²)

激励频率/Hz	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
均布位置	0.137	0.113	0.139	0.099	0.092	0.103	0.106
最优位置	0.135	0.109	0.135	0.086	0.087	0.100	0.105

从对 MTMD 位置的优化结果来看,采用遗传算法得到的最优布置位置时,可以获得最佳的减振效果,对于中心频率的减振率提升较大,而对频段内的其他频率点提升效果不明显,主要是因为此连廊结构为单阶竖向振型起主要控制作用,而对于各阶模态较为集中,多个振型起控制作用的复杂结构,MTMD 位置将对于减振效果影响显著,采用遗传算法进行位置寻优可大大减少由于过多位置组合造成的巨大计算量。

5 结论

应用遗传算法在对 TMD 装置控制结构人致振动响应时的参数进行优化分析,具有良好的效果以及收敛性,同时可以得到如下结论:

(1)遗传算法是一种全局性的搜索方法,可以和有限元法联合仿真优化,在 TMD 参数优化中具有良好的效果,避免了传统优化方法中求全局最优解的困难;

(2)对于连廊 TMD 减振结构,采用遗传算法得到的最优刚度、阻尼参数可以达到最大减振率,与 Den Hartog 推导出的最优参数相比,减振率能提高约 2.7%,提升的幅度不大,工程应用时 DH 计算公式应用简单,也能起到很好的减振效果;

(3)对于连廊 MTMD 减振结构,各质量块的布置位置对于中心频率处的减振效果影响较大,对于减振频段内其他频率点的影响较小,当结构各阶模态较为密集,需对多模态进行减振控制时,MTMD 位置对于减振效果影响显著,相比穷举法,采用遗传算法进行位置寻优的优势更加明显。

参考文献 References

- [1] 李晓玮, 何斌, 施卫星. TMD减振系统在人行桥结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2013, 46(S1): 245-250.
LI Xiaowei, HE Bin, SHI Weixing. Application of TMD seismic vibration control system in the bridge structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S1): 245-250.
- [2] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
ZHOU Fulin. Engineering structure vibration control [M]. Beijing: Earthquake Press, 1997.
- [3] 王立伟, 蔡新江, 田石柱. 黏滞阻尼器耗能减振工程应用设计方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(3): 161-167.
WANG Liwei, CAI Xinjiang, TIAN Shizhu. Research on practical design method using liquid viscous damper passive energy dissipation in buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(3): 161-167.
- [4] Den HARTOG J P. Mechanical Vibrations[M]. New-york: Dover Publications, Inc., 1981.
- [5] WARBURTON G B. Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 10(3): 381-401.
- [6] 薛素铎, 凌和海. 粘弹性阻尼器在网架结构减震控制中的优化设置[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(4): 51-57.
XUE Suduo, LING Hehai. Optimum installation of viscoelastic dampers in space frame structures[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(4): 51-57.
- [7] 李宏男, 董松员, 李宏宇. 基于遗传算法优化阻尼器空间位置的结构振动控制[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 1-4.
LI Hongnan, DONG Songyuan, LI Hongyu. Structural vibration control based on genetic algorithm optimization of damper spatial position[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2): 1-4.
- [8] 徐庆阳, 李爱群, 丁幼亮, 等. 基于改进遗传算法的结构被动控制系统位置优化研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 530-535.
XU Qingyang, LI Aiqun, DING Youliang, et al. Research on location optimization of seismic reduction device based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 530-535.
- [9] 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.
WANG Xiaoping, CAO Liming. Genetic algorithm—theory, application and software implementation[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [10] 郭宏超, 李炎隆, 王凯励, 等. 大跨度钢连廊人致激励下 MTMD 减振控制[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 145-152.
GUO Hongchao, LI Yanlong, WANG Kaili, et al. MTMD vibration reduction control of large span steel corridor under the human-induced excitation[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 145-152.
- [11] 郭宏超, 王凯励, 王德法, 等. 大跨度钢连廊舒适度分析及减振控制[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(2): 269-277.
GUO Hongchao, WANG Kaili, WANG Defa, et al. Vibration comfort analysis and control of long-span steel corridor[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(2): 269-277.
- [12] 谢伟平, 徐薇, 刘隆. 人-板耦合动力响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(3): 45-50.
XIE Weiping, XU Wei, LIU Long. Research on dynamic responses human-floor system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(3): 45-50.
- [13] 李黎, 黄尚斌, 张卉. 结构振动控制中 MTMD 的基本特性研究[J]. 工程力学, 2000, 17(2), 90-96.
LI Li, HUANG Shangbin, ZHANG Hui. Research on the basic characteristics of MTMD in structural vibration control[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(2), 90-96.
- [14] LI Chunxiang. Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29: 1405-1421.
- [15] 李春祥, 杜冬. 基于结构加速度响应控制时不同激励下 MTMD 性能的比较研究[J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 93-95, 101, 114.
LI Chunxiang, DU Dong. Comparative study on MTMD performance under different excitations based on structural acceleration response control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2003(04): 93-95, 101, 114.
- [16] 张彦玲, 张建林, 李运生. 柔性人行悬索桥在不同人流量下人致振动分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 779-787.
ZHANG Yanling, ZHANG Jianlin, LI Yunsheng. Analysis of human-induced vibration for flexible suspension footbridge under different pedestrian flow[J]. Journal of Xi'an Univ of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(6): 779-787.

(编辑 桂智刚)