

基于遗传算法的消能减震结构优化研究综述

李俊卫, 翁大根, 张瑞甫

(同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

[摘要] 遗传算法作为一种用于求解最优解的高效、并行、全局搜索方法,现在已经广泛应用在结构优化等领域。在总结遗传算法在结构优化应用的基础上,从遗传算法改进和目标函数研究等方面阐述了遗传算法在消能减震结构优化中的应用现状;给出了基于遗传算法和 SAP2000 API 功能的联合优化方法;最后提出了遗传算法在消能减震结构优化中的主要问题和发展展望。

[关键词] 遗传算法; 消能减震; SAP2000 API; 优化研究

中图分类号: TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-848X(2015)S2-0461-07

Reviews of optimization study on energy dissipation structures based on genetic algorithm

Li Junwei, Weng Dagen, Zhang Ruifu

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As an effective method in finding the global optimum, genetic algorithm (GA) is widely used in the structure optimization and other fields. It is of global convergence and parallelism. Based on the summary of application of GA in structure optimization, the application of GA in the energy dissipation structure was discussed from the aspects of some improved genetic algorithms and objective functions. Then, a combined optimization method based on GA and SAP2000 API was given. Some suggestions and prospects of the optimization of GA in the energy dissipation were presented.

Keywords: genetic algorithm; energy dissipation; SAP2000 API; optimization study

0 引言

遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法,能在搜索过程中自动获取和积累有关搜索空间的知识,并自适应地控制搜索过程以求得最优解^[1]。1976年, Bagley^[2]发明了“遗传算法”一词并发表了第一篇遗传算法应用的论文, Goldberg^[3]、Davis^[4]分别于1989年和1991年出版了关于遗传算法的专著,人们对遗传算法开展了深入的研究。遗传算法作为建立在自然选择和群体遗传学机理上的迭代、进化、具有广泛适用性的搜索方法,具有内在启发式随机搜索特性,能以很大概率寻找到全局最优解,常被用于寻求最优化的解决方案^[5]。

消能减震技术的不断发展和完善为结构抗震提供了一条行之有效的解决途径,国内外学者已经开展了大量将消能减震技术应用于拟建或既有建筑改造加固的优化研究^[6,7]。消能减震技术涉及阻尼器力学性能、数量和位置等因素,采用传统方法很难有效求解多目标优化问题,随着交叉学科的不断拓展和延伸,土木工程领域学者开展了基于遗传算法的优化问题研究,但是针对消能减震结构的优化研究还比较少,还存在一些问题有待进一步探讨。

1 遗传算法在结构优化中的应用

传统的结构优化设计往往采用迭代设计方法,通

过有限次的反复迭代验算,直到满足既定设计目标为止。结构优化设计引入搜索的手段,通过一定优化方法的搜索来实现修改设计,使得设计方案达到“最佳”的目标^[8]。随着科学技术的发展,学科交叉日趋成为解决科学问题的有效途径,遗传算法这一仿生物学方法与工程结构优化的相互交叉、协作正体现了这一趋势。国内外学者开展了大量将遗传算法应用在工程结构优化的研究,主要集中在一下几个方面。

1.1 桁架结构优化

基于遗传算法的桁架结构优化是国内外学者较早开始研究的领域,现在研究的重点是对遗传算法进行改进或者与其他智能算法相结合,以期能应用在更为复杂的桁架结构。基于遗传算法的桁架优化一般以结构重量最轻、各杆应力比最大等为目标,受到位移或其他规范条件限制。1991年, Jenkins^[9]将遗传算法应用在杆梁组合屋顶、三杆桁架和薄壁结构优化;1999年, Ghasemi等^[10]针对连续变量和离散变量两种情况,对4杆、10杆、64杆、200杆、940杆平面桁架进行了优化;2005年,黄志望^[11]建立以重量最小为目标的桁架结构的数学模型,将改进的遗传算法应用在钢筋混凝土空腹桁架结构的优化问题;2009年,闫

作者简介:李俊卫,硕士研究生, Email: ljwup@hotmail.com。

宏亮^[12]采用改进的自适应遗传算法对三杆及十杆两种典型桁架结构进行优化研究;2013年,刘伟^[13]基于并行计算思想采用拟分层遗传算法解决25空间杆桁架结构优化问题,加快了收敛速度,具有很高的搜索效率;2014年,陈孝珍等^[14]运用并列选择技术改进传统遗传算法,应用到离散变量型钢桁架的拟满应力优化设计中。

1.2 框架结构优化

2000年,Pezeshk^[15]基于遗传算法对二维钢框架结构进行了线性和非线性优化设计对比,并在非线性分析时考虑P- Δ 效应;2001年,Kameshki等^[16]采用遗传算法对梁柱半刚性连接的钢框架的非线性分析进行了优化设计,考虑了耐用性以及规范约束条件的限制和P- Δ 效应;2011年,程冬梅^[17]针对钢框架结构优化变量离散性和多约束特点,对遗传算法进行改进实现对半刚性框架静、动力尺寸优化和支撑体系拓扑优化;2014年,李志强等^[18]引入层次分析法理论,在遗传算法编码中依据不同变量对目标函数的贡献程度确定权重赋值,实现对SRC框架梁多目标优化;刘晓峰等^[19]采用自动分组遗传算法,建立了覆盖框架、框架-剪力墙和矩形结构三种体系的优化模型,实现了结构体系与构件尺寸的协同优化设计。

1.3 拓扑和形状优化

1998年,Hajela等^[20]应用遗传算法实现了对格结构和框架结构的拓扑优化;1999年,Kita等^[21]借助边界元法的遗传算法研究了连续体结构的拓扑和形状优化问题;2007年,刘伟等^[22]提出了一种可以解决具有连续变量和离散变量的桁架结构形状优化问题的拟满应力遗传算法,解决了15杆桁架结构优化问题;2008年,黄翼卓等^[23]提出了一种能同时考虑应力、稳定及位移等约束的离散型结构拓扑优化问题统一数学模型,用于解决桁架和框架结构拓扑优化问题,还能解决奇异最优解问题;2013年,Chen等^[24]提出了两种新的方法解决遗传算法在拓扑优化中的结构性联合和计算量问题;2014年,He Jianjun等^[25]提出了结合继电器式控制策略的联合遗传算法,实现对压电智能桁架结构的整体拓扑优化。

1.4 与其他智能算法的结合

工程结构优化一般都是多目标、多因素、多变量、隐式的优化问题。采用单一的遗传算法进行优化分析会存在计算效率比较低、无法避免遗传算法早熟现象、局部搜索能力不佳等问题,学者开始尝试将遗传算法与神经网络算法、模拟退火算法、蚁群算法以及单向搜索法等智能算法进行结合。

1996年,文毅等^[26]提出遗传算法与神经网络

(BP网络)协作的结构优化方案,利用神经网络的特征提取和联想记忆能力,提高遗传算法收敛速度,节省计算时间;2005年,张延年等^[27]提出了单亲遗传算子,用于对遗传算法改进,并提出了用于一种离散变量结构优化设计的单向搜索遗传联合算法,既发挥了单向搜索算法局部搜索能力强的特点,又发挥了遗传算法全局性好的优势;2010年,汪权等^[28]将模糊算法与遗传算法结合,构造出单个、多个阻尼器的模糊控制策略,实现了减小结构地震响应的优化;2010年,陈少杰等^[29]通过遗传算法和禁忌算法来改善蚁群算法的全局优化能力,并应用到10杆平面桁架的优化分析中;2010年,刘敬宇等^[30]综合模拟退火算法和遗传算法的特点,生成了一种混合遗传算法,发挥了遗传算法强大的全局搜索能力,并改善了局部寻优效果;2011年,赵艳敏等^[31]提出了用于钢桁架结构离散变量优化设计的模拟遗传退火算法,数值实验结果比较表明该方法相对于其他优化算法具有较大优势;2014年,万晋等^[32]应用神经网络模拟圆柱壳结构参数的关系,并应用到遗传算法程序中实现对结构优化设计,优化结果符合工程要求并节省了时间。

2 基于遗传算法的消能减震结构优化研究

2.1 基于遗传算法的结构振动控制优化研究现状

基于遗传算法的结构振动控制是目前研究较为关注的领域,主要是通过对遗传算法的改进或者联合其他算法,实现对主动控制、被动控制等领域的优化设计,取得了大量的研究成果。1999年,刘福强等^[33]提出一种强制变异方法来改进遗传算法,以主动构件输入矩阵的奇异值为目标函数,研究了主动构件在智能桁架结构中的优化配置问题;2006年,贝伟明、李宏男^[34]提出了一种基于改进遗传算法和等效二次型性能指标的优化方法,实现在磁流变液阻尼器半主动控制系统中的阻尼器位置优化;2007年,李刚等^[35]提出了一种新型优化数学模型,采用遗传算法实现了对位移型耗能减震结构优化设计,同时解决了不同地震波下优化结果各不相同使优化参数难以选择的问题;2012年,郭一峰等^[36]基于能量方程提出了基于遗传算法的目标优化函数,采用ANSYS和MATLAB并行对结构进行参数优化分析,结果表明该方法受不同地震波影响较小;2013年,杨佑发等^[37]运用遗传算法工具箱编制遗传优化程序,提出一种基于遗传算法的黏滞阻尼器空间位置优化方法;徐庆阳等^[38]在MATLAB遗传工具箱基础上进行了改进,通过编制目标函数实现了遗传算法在结构被动控制系统位置优化分析中的应用;姚书闲等^[39]基于一体化优化设计思想,运用遗传算法实现结构/控制一体化优化;2014

年,陈鑫等^[40]采用多目标遗传算法对附设环形调谐液体阻尼器的高耸结构风振控制进行了优化设计;燕乐纬等^[41]综合考虑多种地震波作用与多个不同优化目标,提出了一种基于相对适应度遗传算法的优化布置方法,实现了对高层结构黏滞阻尼器优化布置。

2.2 遗传算法的改进

(1)编码方式。遗传算法的基本编码形式是 $\{0, 1\}$ 符号集的二进制编码形式,例如减震装置的位置进行优化时,若减震结构共有 N 个可布置减震装置的位置,则相应的码长为 N ;基因值为1,表示该基因位对应的结构位置布置减震装置,基因值为0,表示对应的结构位置不布置减震装置。李聘等^[42]为解决二进制编码的染色体过长,导致搜索效率非常低的问题,将单个阻尼器在结构中可能布置作为自变量,采用了十进制编码,可以直观反映阻尼器的布置位置。乌兰等^[43]采用了对称分组编码,即一个基因位代表了结构的两个可以布置减震构件的位置,并通过与自由编码对比研究指出,在计算精度相当的前提下,采用对称分组编码能极大地提高优化效率。

(2)交叉算子。交叉运算是指相互配对的染色体按照某种方式相互交换部分基因,从而产生两个新个体^[1]。交叉运算有单点交叉、多点交叉、均匀交叉以及循环交叉等多种算子。在消能减震结构优化中,采用普通的交叉运算产生的子代个体不能满足减震装置数目一定的约束条件。刘福强、乌兰等^[33, 44]采用了改进的二进制单点交叉算法,即首先确定所有可能的交叉点位置,使得在该点进行交叉操作产生的两个子代个体能满足数目固定的约束,然后随机选择交叉点位置进行交叉。

(3)变异算子。变异算子能够改善遗传算法的局部搜索能力,防止出现早熟^[1]。经过交叉和基本变异后,即使父代的个体满足约束条件,生成的子代也可能违背约束条件。刘福强等^[33]提出了强制变异方法,即当某个个体含有的构件数目 k 与需要布置的构件数目 m 不同时,若 $k > m$,则从这 k 个已经布置了构件的位置中任选 $k - m$ 个位置不放置构件,即对应位的基因值变为0;若 $k < m$,则从个体未布置构件的位置中任选 $m - k$ 个位置布置构件,即对应位的基因值变为1。这种方法能够避免采用惩罚函数选择参数的人为影响。乌兰等^[44]采用了双基因座的基本变异算子,即同时在基因值为1和0的基因位上随机选取一个基因座,以变异概率进行变异。

2.3 结构优化的目标函数^[35, 37, 42, 43, 45-49]

遗传算法演化过程的驱动力是适应度函数,适应度函数是根据目标函数来区分群体中个体优良的标准。

在目标函数和适应度函数之间存在线性尺度、乘幂尺度以及指数尺度的变换。各种不同优化方式的不同主要体现在目标函数的差异上。消能减震结构的控制指标主要有层间位移角、层间剪力以及减震装置性能,采用的目标函数主要是基于以上某一因素或者多种因素的组合。

(1)目标函数 Z 取为整个时程的最大层间位移角,即:

$$Z = \max\{\theta_i\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 θ_i 为结构第 i 层的层间位移角。

(2)目标函数取非线性时程分析中,得到的绝对最大层间位移角与无量纲的绝对最大加速度值之线性组合,即:

$$Z = 0.7 \max\{\theta_i\} + 0.3 \max\{|A_i|/g\} \quad (2)$$

式中: A_i 为结构第 i 层的加速度值; g 为重力加速度;0.7和0.3为权重系数。

(3)目标函数取非线性时程分析中,得到的绝对最大层间位移角与累计滞回耗能之和,即:

$$Z = \max\{\theta_i\} + \sum \left(\int_0^T R_i(u_i, \dot{u}_i) \dot{u}_i dt / R_{i,y} u_{i,y} \right) \quad (3)$$

式中: $R_{i,y}, u_{i,y}$ 分别为主题结构的层间屈服恢复力和层间屈服位移; $\int_0^T R_i(u_i, \dot{u}_i) \dot{u}_i dt$ 是结构的累计滞回耗能; T 是积分的时间长度。

(4)目标函数采用有控结构与无控结构的弹性应变能和最大应变能的比值之和,即:

$$Z = \frac{1}{2} \left[\frac{SEA}{SEA_{(0)}} + \frac{U_{\max}}{U_{\max(0)}} \right] \quad (4)$$

式中: $SEA, U_{\max}$ 分别为地震作用下有控结构的弹性应变能和最大应变能; $SEA_{(0)}, U_{\max(0)}$ 分别为地震作用下无控结构的弹性应变能和最大应变能。

(5)目标函数采用有控结构与无控结构的最大层间位移和最大加速度之比之和,即:

$$Z = \frac{1}{2} \left[\frac{\max \Delta_i}{\max \Delta_{i(0)}} + \frac{\max \ddot{x}_i}{\max \ddot{x}_{i(0)}} \right] \quad (5)$$

式中: $\Delta_i, \Delta_{i(0)}$ 分别为有控结构和无控结构的层间位移; $\ddot{x}_i, \ddot{x}_{i(0)}$ 分别为有控结构和无控结构楼层的最大加速度。

(6)目标函数取为安减震装置的刚度之和,即

$$Z = \sum_{i=1}^n K_{bi} \quad (6)$$

式中: K_{bi} 为结构第 i 层安装的耗能支撑的刚度; n 为结构层数。

该目标函数考虑到了经济因素。

(7)目标函数取几种地震波作用下结构最大层间

位移角和结构阻尼器的初始刚度之和,即:

$$Z = |\theta_{\max} - \theta| + \beta \sum_{j=1}^m K_{dj} \quad (7)$$

式中: $\theta_{\max}$ 为所选几种地震波作用下结构最大层间位移角; θ 为结构设定层间位移角; $\sum_{j=1}^m K_{dj}$ 为结构各层阻尼器的初始刚度之和; β 为调整系数。

该目标函数解决了不同地震作用下优化结果不同的问题,同时兼顾了耗能体系的经济性。

(8) 针对偏心结构优化问题,目标函数取为受控结构楼层层间位移角所在层刚性端和柔性端层间位移角的标准差的相关函数,即:

$$Z = \max[\sigma(u_s, u_f)_i] \quad (8)$$

$$Z = \sum_{i=1}^n \sigma(u_s, u_f)_i \quad (9)$$

式中: u_s, u_f 分别为受控结构刚性端(靠近刚心的一端)和柔性端(远离刚心的一端)的楼层层间位移角; $\sigma(u_s, u_f)_i$ 为楼层层间位移角所在层刚性端和柔性端层间位移角的标准差。

(9) 目标函数取为有控结构与无控结构最大层间位移比值的相关函数,即:

$$Z = 1 - \frac{\max[\sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_\theta^2}_i]}{\max[\sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_\theta^2}_{j,0}]} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$Z = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (d_x^2 + d_y^2 + d_\theta^2)_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (d_x^2 + d_y^2 + d_\theta^2)_{j,0}}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中 d_x, d_y, d_θ 分别为结构在 x 向、 y 向和扭转方向的位移反应。

式(8)、式(10)在于控制结构最大的楼层层间位移角反应,式(9)、式(11)则考虑了所有楼层反应,在于减小所有楼层的相关反应特性。

(10) 目标函数取为某个响应指标在受控结构与无控结构的数值之比、所布置阻尼器数量占所有可布置阻尼器总位置之比的函数,即:

$$Z = \frac{(E_i(x, y)/E_0) + \alpha(N_i(x)/N_{\text{total}})}{1 + \alpha} \quad (12)$$

式中: $E_i(x, y)$ 为某个响应指标在受控结构中的值,表示为阻尼器数量 x 和布置位置 y 的函数; E_0 为该响应指标在无控结构中的值; $N_i(x)$ 为所布置阻尼器的数量; N_{total} 为结构所有可能布置的阻尼器位置数量; α 权重系数;该目标函数综合考虑了耗能效果和经济性,关键在于确定合适的权重系数。

(11) 目标函数取为受控结构与无控结构的层间位移角、最大绝对加速度和最大绝对位移三个反应量的无量纲线性组合,即:

$$Z = \alpha \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\max,0}} + \beta \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\max,0}} + \gamma \frac{u_{\max}}{u_{\max,0}} \quad (13)$$

式中: $\theta_{\max}, \theta_{\max,0}$ 分别为受控结构和无控结构的层间最大位移角的平均值; $\alpha_{\max}, \alpha_{\max,0}$ 分别为受控结构和无控结构的最大绝对加速度平均值; $u_{\max}, u_{\max,0}$ 分别为受控结构和无控结构的最大绝对位移平均值; α, β 和 γ 为加权系数。

(12) 目标函数取为时程分析中阻尼器总滞回耗能值及滞回曲线饱满程度的函数,即:

$$Z = 1 / \left[\sum_{i=1}^n E_i \right]^{1/d} \quad (14)$$

式中: E_i 为第 i 个阻尼器在时程分析下的滞回耗能值; n 为阻尼器的个数; d 表征这 n 个阻尼器耗能值相差的远近程度,即:

$$d = \sqrt{(B - AQ)^T (AA^T)^{-1} (B - AQ)} \quad (15)$$

其中 A 和 B 为 n 为空间直线 $x_1 = x_2 = \dots = x_n$ 的一般方程中 $AX = B$ 的矩阵 A 和 B 。

3 基于遗传算法和 SAP2000 API 的消能减震结构优化方法及流程

3.1 基于遗传算法和 SAP2000 API 的消能减震结构优化研究

SAP2000 API (Application Programming Interface) 是从 SAP2000 V11 开始引进的,为用户提供了与 SAP2000 成熟的有限元分析技术无缝对接的平台,通过 API 调用 SAP2000 的内部功能,实现模型的自动创建、自动分析和自动结果输出^[50]。借助于 SAP2000 API 功能,学者结合 MATLAB 强大的编程及数据处理功能,利用遗传算法工具箱的函数编制优化主程序,通过子程序循环调用 SAP2000 有限元分析模块,实现双向直接、快速、高效的数据交换,寻找到最优化结果。

2013 年,李聘等^[42]利用 MATLAB 遗传算法工具箱调用 SAP2000 来执行优化算法,实现了对某办公楼附设金属阻尼器的优化布置,结果表明了该优化布置方法兼顾了阻尼器使用效率、结构指标和收敛速度,是可行有效的。乌兰等^[44]开发了一种基于改进遗传算法和 SAP2000 有限元平台的联合优化算法,将结构所需要的阻尼器位置作为优化变量,通过 MATLAB 自带的编程工具实现通过编程来调用 SAP2000 API 函数,对导入满布阻尼器的有限元模型,根据阻尼器位置编码矩阵来删除有限元模型中的阻尼器,进行动力时程分析,将分析结果输入到利用遗传算法编制的优

化主程序,实现对不规则结构附设软钢阻尼器的位置优化;笔者还通过对布置不同数量阻尼器的结构进行时程分析,给出了阻尼器数量的最优值。之后,提出了两种为抑制偏心结构扭转效应而设计的评价函数,通过对比分析验证了该方法优化结果的可靠性和高效性,并通过引入性能评价指标,研究了影响偏心结构中阻尼器位置优化的不同因素^[51]。2014年,乌兰等^[43,52]将该方法进一步延伸到偏心结构采用粘滞阻尼器的位置优化研究中。

3.2 联合优化方法的一般流程

笔者在总结国内外学者研究的基础上,编制了基于 MATLAB 的 GATBX 和 SAP2000 API 功能的联合优化设计方法,以遗传算法作为主程序来调动 SAP2000 模型修改、时程分析等模块,流程见图1。

其中遗传算法模块按照如下步骤进行:1)利用编码准则产生指定规模的初始种群,种群中每一个个体称为一个染色体,染色体与待解决问题的解是一一对应关系;2)调用 SAP2000 动力时程分析模块,计算种群中每一个个体的适应度;3)通过选择、交叉、变异和重插入等遗传操作产生子种群;4)循环执行2),3)直至满足终止条件;5)输出最优个体,解码获取问题的解。

4 基于遗传算法的消能减震结构优化研究存在问题及发展趋势

由上文可以看出,遗传算法在工程结构优化的诸多方面得到了应用,从最开始对桁架框架结构的静力分析,到应用于有限元模型的动力分析,均取得了一定的成果。随着消能减震技术的发展和成熟,学者尝

试将遗传算法应用在消能减震结构的优化设计中,主要应用在目标函数设计、优化对象选定和遗传算法改进等方面,但是目前受限于遗传算法自身的局限性以及消能减震设计方法的不成熟,该领域的应用还不是很成熟,存在的问题及发展趋势有:

(1)遗传算法的优化效率及结果受初始种群影响比较大,既有研究中初始种群较多地采用随机生成或人为设定的方法,势必会影响到计算效率和优化结果。针对具体优化问题的特征,可以尝试结合一些启发算法来确定初始种群,缩短寻优路径。

(2)针对不同工程结构的具体特征,学者会将遗传算法的交叉等算子进行改进,改进的算子往往只适用于特定的工程结构,并且改进算子之间缺少对比,难以评判不同改进方式在算法精度、计算效率、计算复杂性等方面的优劣。

(3)进行遗传算法优化不一定总获得最优解,如何有效地解决遗传算法的早熟现象还需要进一步研究,特别是针对改进的遗传算法的收敛性研究。

(4)遗传算法交叉、变异、重插入等算子的实现需要许多参数,比如交叉率、变异率等,这些参数在消能减震结构优化中的取值主要依靠经验,严重影响了优化结果的质量,有待进一步研究。

(5)消能减震结构的优化涉及到阻尼器力学参数、位置以及数量等诸多因素,目前的优化研究主要针对单个影响因素,较少地进行多目标问题的优化。

(6)采用遗传算法进行优化设计时,关键在于目标函数的选取,不同学者提出的目标函数各不相同,导致难以直观地对比不同优化方式的优劣。

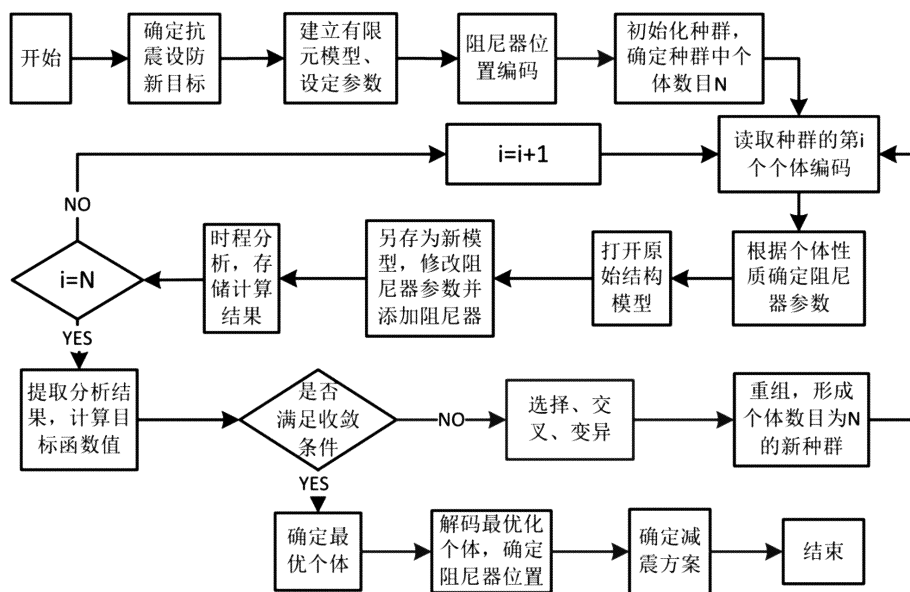


图1 基于遗传算法和 SAP2000 API 的优化设计程序流程图

(7)地震动记录的选取具有很大的随机性,选取不同的地震波进行时程分析的优化结果不尽相同,采用适用于多条地震波的目标函数进行优化,势必会增加计算的时间。可以尝试选取某一地震动模型作为结构输入,对结构进行随机反应分析,求得最优目标解。

(8)较多地进行结构弹性状态下的优化分析,优化结果可能不是结构弹塑性状态下的最优值,如何寻找到小震、中震和大震下的综合最优结果是需要深入探究的课题。

(9)较多地在 MATLAB 环境中通过编程,建立工程结构的时程分析模型,循环调用时程分析结果进行基于遗传算法的优化,这样势必会增加编制程序的时间和难度,降低效率。可以借助于 SAP2000 API 功能,在 MATLAB 中编制遗传算法主程序,实现循环调用 SAP2000 进行分析。

参 考 文 献

- [1] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [2] BAGLEY J D. The behavior of adaptive systems which employ genetic and correlation algorithms [D]. University of Michigan, 1967.
- [3] GOLDBERG D E. Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning[M]. New Jersey: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [4] DAVIS L D. Handbook of genetic algorithm [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [5] 唐文艳,顾元宪. 遗传算法在结构优化中的研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(1): 26-40.
- [6] 翁大根,张瑞甫,张世明,等. 基于性能和需求的消能减震设计方法在震后框架结构加固中的应用[J]. 建筑结构学报,2010(S2):66-75.
- [7] 翁大根,张超,吕西林,等. 附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 80-88.
- [8] 张炳华,候昶. 土建结构优化设计[M]. 上海:同济大学出版社,1998.
- [9] JENKINS W M. Towards structural optimization via the genetic algorithm [J]. Computers & Structures, 1991, 40(5): 1321-1327.
- [10] GHASEMI M R, HINTON E, WOOD R D. Optimization of trusses using genetic algorithms for discrete and continuous variables [J]. Engineering Computations, 1999, 16(3): 272-301.
- [11] 黄志望. 改进遗传算法及其在结构工程优化中的应用研究[D]. 北京:北京工业大学,2005.
- [12] 闫宏亮. 改进的自适应遗传算法在桁架结构优化中的应用[D]. 西安:长安大学,2009.
- [13] 刘伟. 混合变量桁架结构的拟分层遗传算法优化设计[J]. 工业建筑,2012, 42(S1): 125, 135-137.
- [14] 陈孝珍,张学军. 改进的遗传算法在型钢桁架结构拟满应力优化设计中的应用研究[J]. 河南大学学报:自然科学版,2014, 44(3):364-369.
- [15] PEZESHK S. Design of nonlinear framed structures using genetic optimization [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(3): 382-388.
- [16] KAMESHKI E S, SAKA M P. Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm [J]. Compute & Structure, 2001, 79(5): 1593-1604.
- [17] 程东梅. 半刚性钢框架结构研究及优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [18] 李志强,何明胜,夏多田. 基于层次分析遗传算法的 SRC 框架梁优化设计[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2014,37(5):609-614.
- [19] 刘晓峰,程耿东. 基于自动分组遗传算法的建筑结构体系与构件尺寸协同优化设计[J]. 计算力学学报, 2014, 31(1):1-7.
- [20] HAJELA P, LEE E, CHO H. Genetic algorithms in topologic design of grillage structure [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1998, 13: 13-22.
- [21] KITA E, TANIE H. Topology and shape optimization of continuum structure using GA and BEM [J]. Structural Optimization, 1999, 17(2-3): 130-139.
- [22] 刘伟,宋俐,石坤. 基于拟满应力遗传算法的桁架结构形状优化设计[J]. 工业建筑,2007, 37(S1): 487-489.
- [23] 黄冀卓,王湛. 基于遗传算法的离散型结构拓扑优化设计[J]. 工程力学,2008, 25(5): 32-38.
- [24] CHEN T Y, CHIOU Y H. Structural topology optimization using genetic algorithms [C]//The World Congress on Engineering 2013. London, 2013.
- [25] HE JIANJUN, CHEN XIANGZI. Integrated topology optimization design and experimental study of piezoelectric smart truss structure/bang-bang controls based on genetic algorithm [C]//The 4th International Conference on Dynamics, Vibration and Control. Shanghai, 2014.
- [26] 文毅,武广号. 遗传算法与神经网络协作求解结构优化问题[J]. 土木工程学报,1996, 29(5):24-29.
- [27] 张延年,刘剑平,刘斌,等. 改进单向搜索遗传算法的工程结构优化设计[J]. 力学季刊,2005, 26(2):293-298.
- [28] 汪权,王建国. 建筑结构地震响应半主动控制的遗

- 传-模糊算法[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(6): 127-133.
- [29] 陈少杰,段敬民,赵洪波. 桁架结构优化设计的改进蚁群算法[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 55-58, 101.
- [30] 刘敬宇,朱朝艳. 遗传模拟退火算法在结构优化设计中的应用[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2010, 27(2): 5-8.
- [31] 赵艳敏,霍达. 基于遗传模拟退火算法的钢桁架结构优化设计[J]. 郑州大学学报:工学版, 2011, 32(6): 54-57.
- [32] 万晋,郑津. 基于遗传算法和BP神经网络的圆柱壳大开孔接管结构优化研究[J]. 福州大学学报:自然科学版, 2014, 42(5): 727-730.
- [33] 刘福强,张令弥. 遗传算法在主动构件优化配置中的应用[J]. 振动与冲击, 1999, 18(4): 16-21, 89.
- [34] 贝伟明,李宏男. 半主动控制装置在受控结构中的优化布置[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(1): 28-33.
- [35] 李钢,李宏男. 位移型耗能减震结构优化设计[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 65-68.
- [36] 郭一峰,徐赵东,涂青. 基于遗传算法与能量方程的粘弹性隔震装置参数优化分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(17): 116-119.
- [37] 杨佑发,李帅,熊丽. 偏心结构黏滞阻尼器的空间位置优化[J]. 土木工程学报, 2012, 45(S2): 99-102.
- [38] 徐庆阳,李爱群,丁幼亮,等. 基于改进遗传算法的大跨机库柱间消能支撑的位置优化研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 35-43.
- [39] 姚书闲,徐斌. 基于遗传算法的三维钢筋混凝土结构/控制一体化优化设计[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 108-114.
- [40] 陈鑫,李爱群,张志强,等. 高耸结构环形TLD控制的多目标遗传优化设计[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 73-81.
- [41] 燕乐伟,陈洋洋,王龙,等. 基于相对适应度遗传算法的高层结构粘滞阻尼器优化布置[J]. 振动与冲击, 2014, 33(06): 195-200.
- [42] 李聃,周颖. 基于遗传算法和Sap2000应用程序接口的金属阻尼器优化布置[J]. 结构工程师, 2013, 29(6): 69-75.
- [43] 乌兰,李爱群,沈顺高. 基于遗传算法的偏心结构粘滞阻尼器优化布置研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(2): 1-7, 47.
- [44] 乌兰,李爱群,沈顺高. 软钢阻尼器在中国妇女活动中心酒店结构中优化研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(S1): 255-260.
- [45] 徐玉野,王全凤,罗漪. 摩擦耗能支撑参数优化[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2004, 25(1): 45-50.
- [46] 吴泽厚,周福霖. 消能减震建筑结构的计算分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(2): 47-51, 82.
- [47] 洗巧玲,成文山,周福霖. 消能支撑参数优化方法的进一步研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2000, 27(3): 73-80.
- [48] 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.
- [49] 曲激婷,李宏男. 粘弹性阻尼器在结构减震控制中的位置优化研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(6): 87-91.
- [50] 北京金土木软件技术有限公司,中国建筑标准设计研究院. SAP2000 中文版使用指南[M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2012.
- [51] 乌兰,李爱群,沈顺高. 基于遗传算法的水工L型偏心结构中软钢阻尼器优化布置研究[J]. 特种结构, 2013, 30(6): 64-70.
- [52] 乌兰,李爱群,沈顺高. 偏心结构非线性黏滞阻尼器位置优化的遗传算法求解[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2014, 30(2): 201-208.