

赖文龙, 陈洋洋, 燕乐纬, 等. 基于模拟退火算法的高层结构粘滞阻尼器优化布置[J]. 华南地震, 2017, 37 (4): 88-93. [LAI Wenlong, CHEN Yangyang, YAN Lewei, et al. Optimal Installation of Viscous Dampers in Tall Buildings Based on Simulated Annealing Algorithms [J]. South China journal of seismology, 2017, 37(4): 88-93.]

基于模拟退火算法的高层结构粘滞阻尼器优化布置

赖文龙¹, 陈洋洋¹, 燕乐纬², 谭平¹

(1. 广州大学 减震控制与结构安全国家重点实验室培育基地, 广州 510405;

2. 广州大学土木工程学院工程力学系, 广州 510006)

摘要: 提出基于模拟退火算法的高层结构阻尼器优化布置方法。对模拟退火进度表中的初始温度、退火参数进行对比分析, 给出了解决高层结构阻尼器优化布置问题的一个较好的寻优参数组合。此模拟退火算法增加记忆功能并设置阈值使得在尽量保持最优性的前提下减少计算量, 通过此组参数的模拟退火对 20 层框架结构的粘滞阻尼器布置方案进行优化, 数值算例证明了算法的有效性。

关键词: 模拟退火; 初始温度; 退火因子; 高层结构; 粘滞阻尼器

中图分类号: TU352.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 04-0088-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.04.015

Optimal Installation of Viscous Dampers in Tall Buildings Based on Simulated Annealing Algorithms

LAI Wenlong¹, CHEN Yangyang¹, YAN Lewei², TAN Ping¹

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The simulated annealing algorithm is used to solve the problem of optimum installation for dampers in tall buildings. On this basis, the performance of the initial temperature and cooling ratio in cooling function of annealing schedule are contrasted and analyzed. A preferable optimal parameter combination is obtained to solve the problem of optimum installation for dampers in tall buildings. The algorithm that increase memory function and set the threshold try to keep the optimality under the premise of reduce amount of calculation. The simulated annealing algorithm based on the preferable optimal parameter was used to optimize the installation of dampers in a 20 layers frame structure. The results demonstrate the efficiency and applicability of the preferable optimal parameter.

Keywords: Simulated annealing algorithm; Initial temperature; Cooling ratio; Tall building; Viscous damper

收稿日期: 2017-06-10

基金项目: 广州市“珠江科技新星”(201610010159); “广东特支计划”科技创新领军人才(2014TX01C141); 广东省自然科学基金(2016A030313544); 广东省普通高校特色创新项目(2015KTSCX102) 联合资助

作者简介: 赖文龙(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事智能优化算法与结构减震控制研究。E-mail: 512969509@qq.com.

通讯作者: 陈洋洋(1981-), 男, 副研究员, 主要从事非线性动力学、结构隔减震(振)及控制研究。

E-mail: yychen@gzhu.edu.cn.

0 前言

结构被动减震控制装置的粘滞阻尼器^[1]广泛应用于高层、超高层建筑结构的减震控制。早期被动减震控制装置被均匀分布于高层建筑各层。随结构层数及阻尼器数量的增加,为降低耗能减震系统成本、提高耗能效率,优化阻尼器布置成为布置耗能装置须考虑的问题之一^[2-4]。结构的阻尼器优化布置属于离散型优化问题,采用模拟退火算法是能够有效解决离散型优化问题的一种途径。模拟退火求解过程无需目标函数梯度信息,是一种解决大规模组合优化问题的算法。对于阻尼器可选安装位置,即安装阻尼器于不安装阻尼器两种状态可映射到优化问题优化变量中使用 $\{0,1\}$ 表示是否在某一楼层安装阻尼器^[5-6],对该编码的优化变量进行模拟退火优化,即可得到最优布置方案。

模拟退火算法是一种启发式随机搜索方法^[4],可以在一定条件下接受劣解,使得优化过程可以跳出局部最优解,在实际工程优化问题上,能有效地求解出优化问题的全局最优或近似全局最优解等优点,且原理简单、算法设置灵活。但算法的缺点时求解时间太长、温度进度表中影响算法参数较难确定、寻优过程中由于执行 Metropolis 环节而可能遗失当前遇到的最优解等缺点,模拟退火在优化问题的运用所表现的性能和这些参数设置相关^[7],一个好的优化参数设置能够显著缩短程序运行时间和提高算法性能。因此,如何正确选取合适的优化参数是使用算法去解决工程实际问题的关键。

本文将算法寻优过程中所接受的状态(无论好坏状态)记忆下来,使得模拟退火在整个最优解搜索完后能够输出最优解;并设置阈值使得当算法稳定收敛时,结束优化,减少计算量^[8],但存在陷入局部最优解的风险,可设置较大阈值进行控制。使用算例进行讨论模拟退火冷却进度表中初始温度与退火因子的选择对算法性能的影响。数值表明,使用合适的算法参数下的模拟退火对高层结构阻尼器优化布置有高效性,稳定性等优良性能。

1 模拟退火

1.1 模拟退火原理

模拟退火算法(SA)最初的思想由 Metropolis 在 1953 年提出,1982 年 KirkPatrick^[9]将退火思想引入组合优化领域,提出一种解决大规模组合优化问题的算法,特别是解 TSP 等 NP-hard 问题的通用有效的全局优化方法^[10]。

模拟退火算法来源于固体退火原理^[11],先将固体加温至充分高,再让其徐徐冷却。当温度升高的过程,固体内部粒子状态变为无序状态,而温度降低冷却时粒子趋向有序。在降温过程中,使得每降一次温度,系统都达到一个内能很小的平衡态,最后在常温下系统达到一个内能最小的一个基态。其过程包括降温环节和 Metropolis 概率接受环节。Metropolis 概率是粒子在温度 T 时趋于平衡的概率为 $e^{-\Delta E/(kT)}$ 。 $(\Delta E$ 为其改变能量改变量, k 为 Boltzmann 常数)。用模拟退火解决优化问题,能量改变量模拟为新状态与旧状态目标函数值之差 $\Delta f(x)$ 。得到解组合优化问题的模拟退火算法:由初始解 S_0 和控制参数初值 T_0 开始,对当前温度下,进行重复“产生新解,计算目标函数差,接受或舍弃”的 Metropolis 概率接受环节,并逐步衰减温度值,算法终止时的当前解即为所得近似最优解^[7]。模拟退火过程是基于蒙特卡罗迭代求解法的一种启发式随机搜索过程。退火过程由冷却进度表(Cooling Schedule)控制^[4],包括控制参数的初值 T_0 及其衰减因子 λ 、每个 T 值时的迭代次数(马氏链长度) L 和停止条件 S 。冷却进度表参数影响模拟退火的性能。

1.2 冷却进度表

初始温度越高,温度缓缓下降时求得最优解的概率越大,但其迭代次数多,导致模拟退火的计算效率低,性能差。Kirkpatrick et al.^[4] 建议以初始接受差解的概率(P)确认初始温度,则: $T_0 = -\frac{\Delta y}{\ln P}$ 。降火方式可采用线性降火函数即: $T_k = \lambda^{k-1} T_0$,但降火因子对算法的影响甚至决定模拟退火算法是否能找到最优解。马氏链长度 L 的选取,应使得在同一温度下,系统达到稳定状态,及不在有新解长生, L 的选取亦可根据优化变量的解空间大小及经验选取。算法的终止条件可用退火次数 M 及不在有新解的接受次数 H 来控制。

1.3 模拟退火的一般流程

典型 SA 步骤通常在给定冷却进度表下可描述为:

- (1) 给定冷却进度表参数,包括降温次数 M , Metropolis 抽样次数 L , 初温 T_0 , 衰减因子 λ 等参数,令 $k = 0$;
- (2) 随机产生初始状态 S ;
- (3) 重复下列步骤 L 次:
 - ① 从 S 的邻域中随机产生状态 S' ;
 - ② 令 $\Delta = f(S') - f(S)$, 其中 $f(S)$ 表示优化目标

函数;

③ 若 $\Delta < 0$, 令 $S = S'$; 若 $\Delta \geq 0$, 且 $e^{-\Delta/(kT)} \geq \theta$, $\theta \in (0, 1)$ 的随机数, 令 $S = S'$;

(4) 若达到最大仿量真 ($k=M$), 则输出整个 SA 过程所接受解中最好的解 S_{best} 并终止算法; 否则令 $T_{k+1}=\lambda T_k$, $k=k+1$ 并返回(3)。

在模拟退火寻优的过程中, 可加入具有记忆功能的模拟退火, 使得在模拟退火过程中所接受的解中取出最优值; 当算法降火次数还没达到最大降火次数 M 时, 可加入寻优过程不在有新解的接受的次数 H 来控制, 使算法达到一定稳定性时输出最优解, 提前终止算法。经典模拟退火流程图见图 1。

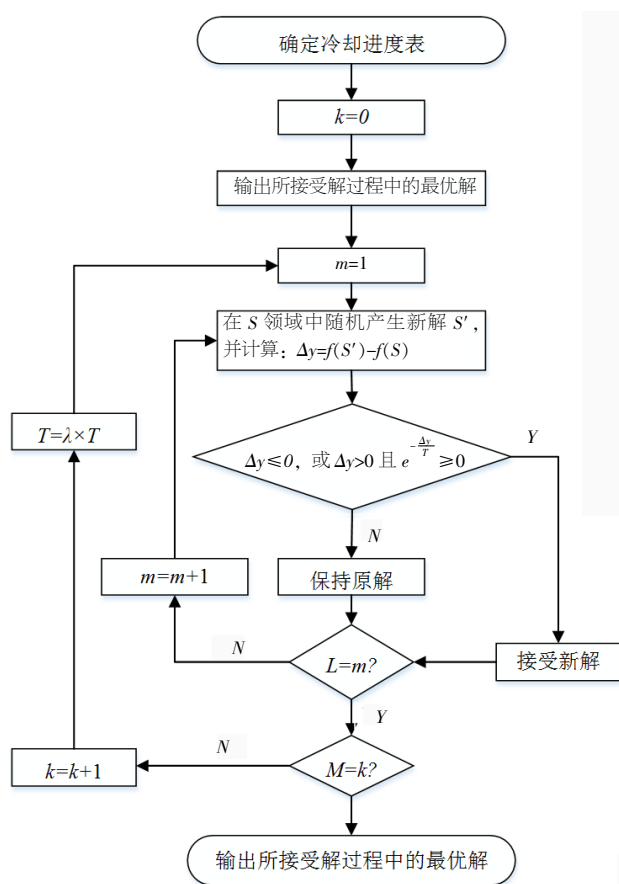


图 1 模拟退火流程图

Fig.1 Classic simulated annealing algorithm flow chart

2 模型

2.1 结构模型

通常线性粘滞阻尼器出力取决于其瞬时相对速度大小^[12], 即:

$$F(t)=-c_{eq}\dot{U}(t) \quad (1)$$

一般在地震激励作用下, 其中设置粘弹性阻尼器的结构体系运动微分方程即为:

$$[M]\{\ddot{U}(t)\}+([C]+[C_z])\{\dot{U}(t)\}+([K]+[K_z])\{U(t)\}=-[M]\{I\}\ddot{x}_g(t) \quad (2)$$

式(2)中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别是主体结构的质量、阻尼和刚度矩阵; $\{\ddot{U}(t)\}$ 、 $\{\dot{U}(t)\}$ 、 $\{U(t)\}$ 分别是主体结构的加速度、速度和位移向量; $\ddot{x}_g(t)$ 为地面加速度; $[C_z]$ 为阻尼器附加矩阵。

方程 (2) 一般可以采用经典的时程分析法求解, 本文采用 Newmark- β 法求解。

2.2 目标函数

本文取层间位移角的相对值作为响应目标函数^[5-6]:

$$f=\min(\frac{\theta_{\max}}{\theta_{0,\max}}) \quad (3)$$

式(3)中: θ 为结构在地震作用下层间位移角; 下标 \max 表示有控结构响应最大值; $\theta_{0,\max}$ 表示无控结构响应最大值。

2.3 优化模型

高层结构阻尼器优化布置问题的一般数学表达式为:

$$\begin{cases} \min f(X, t) \\ X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T \\ s.t: x_j \in \{0, 1\}, (j=1, 2, \dots, n) \\ g(X, t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: X 为阻尼器的布置方案; t 为动荷载作用时间; n 为结构层数; $x_j \in \{0, 1\}$ 为结构楼层是否布置阻尼器, 0 表示不布置阻尼器, 1 表示布置阻尼器; $g(X, t)$ 经过标准化处理后的约束条件。 f 为优化问题目标函数, 本文取 2.2 目标函数的层间位移角的相对值^[9-10]:

3 高层结构粘滞阻尼器优化布置

3.1 模型信息

选取工程算例^[9]为某 20 层钢筋混凝土框架结构作为高层结构建筑研究对象, 该框架模型的总高 60.6 m, 首层高 3.6 m, 其余层高 3 m, 结构阻尼比 0.05, 一阶模态振动周期 2.849 6 s。要求选择 10 层安装等效阻尼系数 $c_{eq}=2.1 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 的粘

滞阻尼器，每层安装五个。各层质量及水平侧移刚度见表 1，各阶周期与周期见表 2。选取美国 1940 年 5 月 18 日 Imperial Valley 地震 EL Centro 地震波为输入，以各层最大层间位移角最小化 为目标进行优化。根据场地条件要求，将地震波峰值调整为 400 gal（0.4 g）

表 1 各层质量及与水平侧移刚度值

Table 1 Layer quality and horizontal lateral stiffness		
层号	质量/t	刚度×10 ⁷ /(N·m ⁻¹)
1	3 030	319
2~5	2 920	225
6~10	2 550	158
11~15	2 230	135
16~20	2 000	130

表 2 模型各阶固有频率与周期

Table 2 Each order natural frequency and period of model		
阶数	ω	T
1	0.350 9	2.849 7
2	0.956 6	1.045 3
3	1.565 4	0.638 8
4	2.135 3	0.468 3
5	2.796 4	0.357 6
6	3.376 8	0.296 1
7	3.934 1	0.254 2
8	4.421	0.226 2
9	4.963 8	0.201 5
10	5.454 3	0.183 3
11	5.906 3	0.169 3
12	6.292 5	0.158 9
13	6.648 6	0.150 4
14	6.987 7	0.143 1
15	7.266 1	0.137 6
16	7.545	0.132 5
17	7.706 8	0.129 8
18	7.878 8	0.126 9
19	7.914 2	0.126 4
20	8.568 1	0.116 7

3.2 模拟退火参数选择^[4]

本文对最大降火次数 $M=60$ ，马氏链长度 $L=30$ ，探讨初始温度与降温函数中的衰减因子对算法的效率的影响。此算法加入记忆功能的模拟退火，不在有新解接受的次数 $H=100$ ，选取初始温度下接受差解的概率 $P=0.5$ 。

3.3 初始温度及衰减因子 的讨论

在确定最大降火次数及马氏链长度后，初始温度及衰减因子对模拟退火的性能影响极大，本

文研究初始温度和衰减因子的不同组合对模拟退火算法的效率、收敛性等性能影响极大。

为了确定 T_0 的范围，可随机算 1 000 个解空间的值，并算求得评价函数 最大值 $y_{\max}=0.822\ 2$ ，评价函数次最大值 $y_{\max,\text{second}}=0.820\ 2$ ，评价函数最小值 $y_{\min}=0.642\ 4$ ；则 $\Delta y_{\max}=0.179\ 8$ ， $\Delta y_{\min}=0.002$ ； $\overline{\Delta y}=0.909$ 。

预设 Δy 最小时， $e^{-\frac{\Delta y}{T_0}}=0.5$ ； $T_{0.1}=-\frac{\Delta y}{\ln 0.5}=-\frac{0.002}{\ln 0.5}=0.002\ 9$ ；

预设 Δy 平均时， $e^{-\frac{\Delta y}{T_0}}=0.5$ ； $T_{0.2}=-\frac{\Delta y}{\ln 0.5}=-\frac{0.179\ 8}{\ln 0.5}=0.259\ 4$ ；

预设 Δy 最大时， $e^{-\frac{\Delta y}{T_0}}=0.5$ ； $T_{0.3}=-\frac{\Delta y}{\ln 0.5}=-\frac{0.090\ 9}{\ln 0.5}=0.131\ 1$ ；

衰减因子取值 λ ； $\lambda_1=0.85$ ， $\lambda_2=0.90$ ， $\lambda_3=0.95$ 。

表 3 为所计算的初始温度与选取温度衰减因子不同组合的标号，并逐一对各编号所代表的初温与衰减因子各运行对应冷却进度表的模拟退火 10 次，其所获得最优解次数及目标函数平均计算次数见表 4。其数值结果显示：不同的 SA 参数对其收敛性和计算效率影响极大，参数选择不好时（如编号为⑥⑧⑨），算法容易陷入局部最优解，使其在实际运用中无法保证寻找到最优解。只有选择恰当的算法参数方可使得算法具有收敛性、效率等良好性能。

表 3 初始温度与降火因子组合编号

Table 3 Combination number (initial temperature, cooling ratio)			
T_0	λ		
	λ_1	λ_2	λ_3
$T_{0.1}$	①	②	③
$T_{0.2}$	④	⑤	⑥
$T_{0.3}$	⑦	⑧	⑨

由表 4 得出组号为③④⑦的初始温度 T_0 与降火因子 λ 时，10 次寻优中每次都收敛，其对应初始温度与降火因子见表 5。在高层粘滞阻尼器优化布置中，数值结果显示，当初始温度选择较低时，而温度降火因子较大时可使 SA 能快速的寻找到最优解，具有良好的性能。图 2 为第③号组合参数下模拟退火一次寻优过程，由图可看出，算法具有快速收敛性。

表 4 各组组合编号算法性能对比
Table 4 The performance comparison of the combination numbering algorithms of each group

编号	计算次数	得到全局最优解次数	目标函数平均计算次数
①	10	9	674*
②	10	9	701*
③	10	10	912
④	10	10	1 451
⑤	10	8	1 822*
⑥	10	0	0*
⑦	10	10	1 303
⑧	10	1	1 513*
⑨	10	0	0*
穷举法	1	1	184 756

注 *: 目标函数平均计算次数仅计入所得全局最优解下的平均次数

表 5 十次全收敛参数及效率对比
Table 5 Ten times full convergence parameters and performance comparison

组号	初始温度 T_0	降火因子 λ	目标函数平均计算次数
③	0.002 9	0.95	912
④	0.259 4	0.85	1 451
⑦	0.131 1	0.85	1 303

最优布置方案为 [0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0]，即阻尼器最优布置位置在 2~9，11~12 层，不同布置方案的层间最大位移角包络图见图 3，加阻尼器的优化布置方案比无控下的结构系统具有明显的控制优势。最优布置方案阻尼器偏中下层。

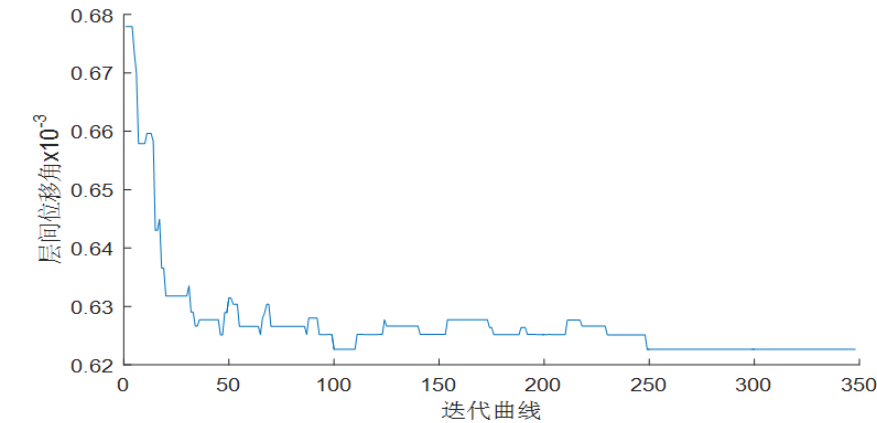


图 2 第③号组合参数下模拟退火寻优曲线
Fig.2 Simulated annealing optimization curve under the third combined parameters

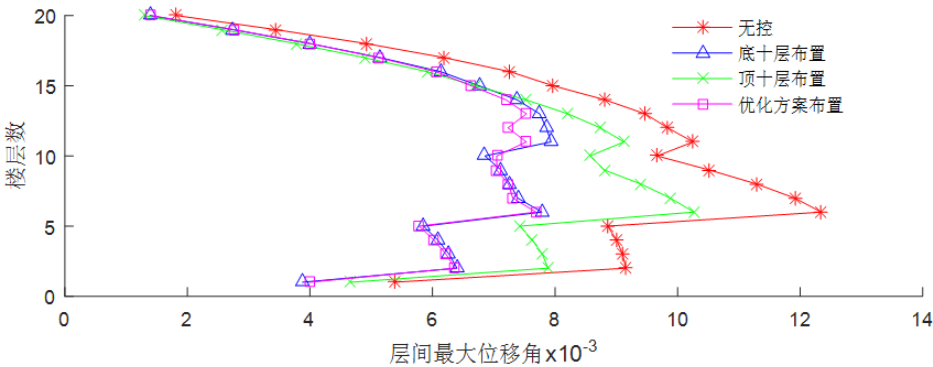


图 3 楼层最大层间位移角包络图
Fig.3 Envelope diagrams of maximal story drift ratio

4 结语

在高层结构粘滞阻尼器的布置中，当选择一定层数进行布置阻尼器，优化问题设计空间巨大，使用穷举法需要花费大量的时间，在实际工程的寻优中无法满足对时间的要求，在合适的参数下，模拟退火可快速稳定的寻找到最优解。模拟退火冷却进度表中参数选择对算法的性能影响极大，

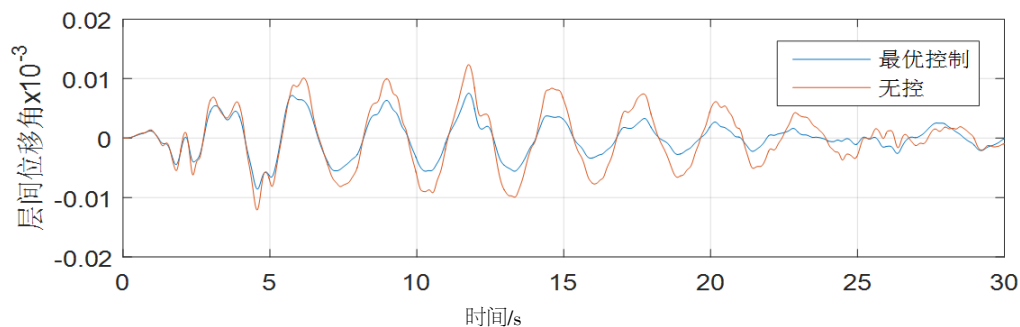


图4 第7层层间位移角时程图

Fig.4 Story drift ratio time histories

只有选择合适的算法参数才能使模拟退火能够高效的寻找到最优解。

本文对控制模拟退火性能的冷却进度表中初始温度及降火因子进行不同的分组并研究其收敛、效率等性能。给出此实例下能快速稳定的寻找到高层粘滞阻尼器最优布置的初始温度及降火因子,其初始温度及降火因子的选择也可作为其他工程优化问题的一个借鉴。

参考文献:

- [1] 汪志昊, 陈政清. 高层建筑结构中粘滞阻尼器的新型安装方式[J]. 世界地震工程, 2010, 26(4):135-140.
- [2] Huang Z S, Wu C, Hsu D S. Semi-active fuzzy control of mrdamper on structures by genetic algorithm [J]. journal of Mechanics, 2009, 25(1): N1-N6.
- [3] 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.
- [4] Park M W, Kim Y D. A systematic procedure for setting parameters in simulated annealing algorithms[J]. Computers & Operations Research, 1998, 25(3): 207-217.
- [5] 燕乐纬, 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(6): 196-200.
- [6] 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.
- [7] 刘洪普, 侯向丹. 模拟退火算法中关键参数的研究[J]. 计算机工程与科学, 2008(10): 55-57.
- [8] 朱颢东, 钟勇. 一种改进的模拟退火算法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 32-35.
- [9] Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. Jr. Vecchi, M. P., Optimization by simulated annealing. Science, 1983, 220: 671-680.
- [10] Papadimitrou CH, Steiglitz K. Combinatorial optimization: a lgorithms and comp lexity[M] . Prentice -Hall, 1982.
- [11] Alfonsas misevicius. A Modifiend simulated annealing algorithm for the quadraricc assignment problems [J]. Informatica, 2003, 14(4) 497-51.
- [12] 徐赵东, 马乐为. 结构动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.