

徐莉,胡宏.考虑抗震性约束的建筑空间结构优化[J].地震工程学报,2018,40(6):1231-1235,1242.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1231

XU Li, HU Hong. Optimization of Spatial Building Structures Considering Seismic Constraints[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1231-1235, 1242. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1231

考虑抗震性约束的建筑空间结构优化

徐莉¹, 胡宏²

(1. 江苏城乡建设职业学院, 江苏常州 213147; 2. 湖北工程学院建筑学院, 湖北孝感 432000)

摘要: 当前对建筑空间结构进行优化时,所采用的算法趋同性高,无法实现多目标种群优化,易陷入局部最优解,存在寻优质量低、优化成本高、抗震性能低的问题。针对上述问题,提出一种基于改进粒子群算法的建筑空间结构优化方法。该方法以空间结构的抗震性能、工程造价为优化目标,来优化建立建筑空间结构设计;引入多子群协同进化机制解决建筑空间结构抗震优化设计中多目标间的种群优化问题,同时引入外部档案和精英学习策略改进粒子群算法,筛选出满足目标函数的最优设计方案,完成抗震性约束的建筑空间结构优化。实验结果表明:所提方法对建筑空间结构优化时的特点为寻优质量高、优化成本低、抗震性能高。

关键词: 抗震性约束; 建筑空间; 空间结构优化; 粒子群算法

中图分类号: TU318.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)06-1231-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1231

Optimization of Spatial Building Structures Considering Seismic Constraints

XU Li¹, HU Hong²

(1. Jiangsu Vocational College of Urban and Rural Construction, Changzhou 213147, Jiangsu, China;

2. School of Architecture, Hubei College of Engineering, Xiaogan 432000, Hubei, China)

Abstract: In the current method of optimizing the design of spatial building structures, the high convergence of the algorithm makes it impossible to realize multi-objective population optimization, and it is easy to fall into the local optimal solution. The method has the problems of low optimization quality, high optimization cost, and low seismic performance. To solve the above problems, in this work, a method of optimizing the design of spatial building structures based on the improved particle swarm algorithm is proposed, where the seismic performance and engineering cost of space structure are the optimization target. A co-evolutionary multiple sub-groups mechanism was introduced to solve the problem of population optimization among multiple objectives in the optimization of the seismic design of spatial structures. Meanwhile, the elite learning strategy

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(11601138); 2017年度江苏省住房城乡建设厅科技指导项目(2017ZD010); 2016年度江苏省教育厅“青蓝工程”优秀青年骨干教师资助项目

第一作者简介: 徐莉(1976-),女,江苏常州人,硕士,副教授,建筑师,副院长,研究方向:建筑设计技术及教学理论研究。

E-mail: xulic228@163.com.

通信作者: 胡宏(1975-),男,湖北孝感人,硕士,讲师,建筑师,研究方向:建筑工程技术及教学理论研究。

was introduced to improve the particle swarm algorithm. The optimal design scheme satisfying the objective function was selected, and the optimization of the building space structure with seismic constraints was completed. The experimental results showed that the proposed method is characterized by high optimization quality, low optimization cost, and high seismic performance.

Keywords: earthquake resistance constraint; building space; optimization of spatial structure; particle swarm optimization

0 引言

地震灾害给人类经济财产造成了巨大损失,这一现象引起了业界相关学者的高度关注^[1-2],也针对此问题进行了深刻反思,并且已经意识到仅考虑建筑的安全性已经难以满足当前建筑空间设计者和使用者对建筑空间结构抗震性能设计的需求,需要综合考虑建筑空间结构、性能以及经济等多方面的影响^[3-4]。

针对建筑空间结构方面的研究成果已有很多,但多数还不成熟。文献[5]提出基于改进蚁群算法的建筑空间结构优化设计方法建立基于性能的建筑空间结构抗震优化设计理念,从粒子最优解搜索路径、信息素更新方式以及浓度等方面优化蚁群算法,并采用改进后的蚁群算法进行求解。文献[6]对基于 NSGA-II 的建筑空间结构进行优化设计,构建以建筑空间结构最大竖直位移最小化为目标的多目标种群优化,结合有限元分析方法对建筑空间结构进行地震响应分析,考虑到上述带有约束条件,利用 NSGA-II 来优化求解。文献[7]提出并行遗传算法,对空间结构设计进行全局优化,建立多格空间设计模型,对设计参数进行最优匹配,并利用三杆平面桁架实验验证空间优化方法的合理性。

以上传统方法均在建筑空间结构优化设计目标函数选取方面存在不足,导致建筑造价目标与地震性能目标相冲突,易陷入局部最优解,存在工程造价高、抗震性能低的缺点。鉴于上述问题,提出一种基于改进粒子群算法的建筑空间结构优化设计方法。该方法通过多目标粒子群算法解决建筑空间结构多目标种群优化中多目标相互冲突的问题,将改进的粒子群算法应用到结构抗震性能多目标种群优化设计中来,以改善建筑结构的抗震性能。

1 结构优化设计

在地震中,建筑空间结构的设计主要受到恒载、活载的影响。地震产生的惯性力只对建筑下部结构产生较大的应力。从以往地震灾害调查结果中分析

可知,建筑空间结构破坏形式包含地基破坏、承重梁破坏。地基破坏形式可通过一些保护措施来避免,而承重梁在地震中受到的损害无法通过其他方式来避免,因此梁、柱节点连接处的质量是建筑空间结构抗震设计的关键部位。考虑建筑结构的抗震性能、工程造价,建立多目标函数优化式,如式(1)所示:

$$E[X] = \left[\sum_{i=1}^{N(t)} \sum_{j=1}^k C_j e P_{ij}(X, t_j) \right] + \int_0^t C_m(X) e^{-\lambda} dt \quad (1)$$

考虑建筑空间结构抗震性,约束条件如下:

$$C_e(X) = C_{dr}(X) + C_p(X) \quad \text{s.t.} \quad \begin{cases} \rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max} \\ \rho_{v,\min} \leq \rho_v \leq \rho_{v,\max} \\ \gamma_0 N_d \leq N_u \\ \gamma_0 M_d \leq M_u \\ \Delta_d \leq \Delta_u \\ V_d \leq V_u \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)和(2)中: X 表示建筑空间结构的初始造价; C 表示空间构件损失值; x 表示建筑结构截面大小; ρ 表示纵筋配筋率; ρ_v 表示箍筋配筋率; γ_0 表示建筑空间结构的重要性系数; N_d 表示建筑空间结构各构件受到的纵向力大小; N_u 表示结构各构件正截面承受的压力; M_d 表示结构各构件在地震作用下的最大弯矩; M_u 表示结构各构件正截面在地震作用下的抗弯承载力; N_d 、 N_u 和 M_d 、 M_u 均为描述 x 和 ρ 的函数; Δ_d 表示在地震作用下建筑结构各构件的剪力设计值; Δ_u 表示建筑结构各构件某一尺寸下的抗剪承压压力; V_d 和 V_u 均可转变成 x 和 ρ 的函数。 $\sum_{i=1}^{N(t)} \sum_{j=1}^k C_j e P_{ij}(X, t_j)$ 表示在地震作用下建筑空间结构的损失期望; $\int_0^t C_m(X) e^{-\lambda} dt$ 表示建筑结构各构件在正常服役期内的检查、维护费用; i 表示建筑空间结构上的可变作用数目; t 表示建筑空间结构的设计基准期; k 表示震害等级数目; $C_m(X)$ 表示每一年检查建筑空间结构的检查、修复成本; $N(t)$ 表示结构各构件在区间 t 内发生地震作用的数目; C_j 表示第 j 个破坏水平时建筑结构各构件损失值; P_{ij} 表示地震

作用下破坏等级为 j 时结构各构件的失效概率; $C_e(X)$ 表示拆除费用、残余费用总和。

可将地震发生视为泊松事件,利用下式给出建筑空间结构各构件损失期望:

$$E[X] = (C_1 P_1 + \dots + C_k P_k) \times \frac{v}{\lambda} (1 - e) + \frac{C_m}{\lambda} (1 - e) \quad (3)$$

其中: C_k 表示地震作用下第 k 个破坏水平的结构各构件损失值; P_k 表示第 k 个破坏作用下结构各构件的失效概率; v 表示地震近年来在此地区的平均发生率。

假设,想获得损失期望需要计算对应于结构各构件不同破坏水平的失效概率 P_k ,其可根据该破坏水平地震发生的超越概率 $P_i(\Delta > \Delta_k)$ 建立关系来求解:

$$P_k(\Delta > \Delta_k) = -\frac{1}{vt} [1 - P_i(\Delta > \Delta_k)] \quad (4)$$

将关系函数所得数值作为失效几率函数的参数,对应于地震五级破坏水平的失效几率为:

$$P_k = P_k(\Delta > \Delta_k) - P_k(\Delta > \Delta_{k+1}) \quad (5)$$

在整个服役期内,结构各构件在载荷作用下累积的损失程度也在逐级增长,结构各构件的刚度和强度逐渐减小^[8]。在整个服役期内需要对构件抗震性能进行测试,并根据测试情况针对不同构件选择合适的维护措施。建筑结构各构件修护费用与建筑结构各构件材料和破坏程度、维护方式等相关。

假设,建筑结构各构件工程造价与设计方案的初始造价相关,即:

$$C_m(X) = 3\% \times C_0(X) \quad (6)$$

其中: $C_0(X)$ 表示初始造价。

2 抗震性约束的建筑空间结构优化

引入多子群协同进化机制解决建筑空间结构抗震优化设计中多目标间的种群优化问题。子群之间的粒子彼此独立又相互合作,使个体之间通过信息交互朝向最优解方向搜索。对粒子群算法的改进主要在两个方面实现:一方面是设立一个外部档案,用于存储粒子获取的最优解;另一个方面是提高种群多样性,引入精英选择策略,更新外部档案中的个体^[9]。随着外部档案中最优解数量的不断增加,其容量也变得越来越大,降低了算法的效率,针对多目标间的种群优化问题,设定外部档案上限值,即最优解数量。当外部档案中最优解数量已满时,采用拥

堵距离策略对超过上限数量的最优解进行去除,提高算法的效率。

设定粒子群搜索空间是 D 维的, n 表示参与最优解搜索的粒子数量,粒子速度和位置更新式如下:

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (v_{id}^t - pb) + c_2 r_2 (v_{id}^t - gb) \quad (7)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (8)$$

其中: v_{id}^t, x_{id}^{t+1} 分别表示种群迭代过程中及第 $t+1$ 次迭代过程中第 i 个粒子当前速度; x_{id}^{t+1}, x_{id}^t 分别表示种群第 $t+1$ 次及第 t 次迭代过程中第 i 个粒子当前位置; pb 表示种群中最优粒子; gb 表示迭代次数达到 t 代时所获得的全局最优粒子; v_{id} 表示粒子 i 的速度; ω 表示保持当前粒子 i 搜索速度的惯性权重系数; c_1 和 c_2 分别表示加速因子; r_1 和 r_2 分别用于描述区间 $[0, 1]$ 内的随机数。

建筑空间结构抗震多目标种群优化设计中,结构抗震性能和建设成本需达到最优,但这两项目标之间存在冲突。采用多子群协同进化方法,通过信息共享可使得算法快速得到最优解^[10]。

多种群协同进化阶段,假设共有 n' 个优化目标,各个优化目标表示为 S_i ,种群中个体搜索最优解的方向不仅受到全局最优解的影响,同时还受到其他种群中个体搜索速度以及搜索位置的影响。设立一种外部档案来实现多种群中粒子之间迭代搜索过程中获得的最优解信息共享,给出多子种群协调优化结构图(图 1)。

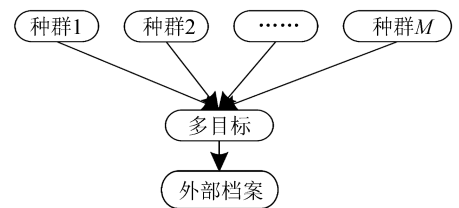


图 1 多子种群协同优化结构图

Fig.1 Structural diagram of multi-subpopulation collaborative optimization

从图 1 中可以看出,种群中适应度值的选取主要是由第 M 个目标函数决定的。利用多自种群协同优化多目标,各个种群选取最优粒子,这些最优粒子彼此交换搜索信息,使算法逼近最优解前沿。

在种群迭代过程中,为了实现不同种群中个体之间的信息共享,设定了一个外部档案,此档案的设立会使算法更加快速收敛至最优解前沿。

建筑空间多目标种群优化问题与单目标优化问题不同,得到的最优解也不同,这些最优解之间存在

冲突,采用外部档案存储可获得最优解集,即:

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (v_{id}^v - pb) + c_2 r_2 (v_{id}^v - gb) + c_3 (v_{id}^t - A_{id}) \quad (9)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (10)$$

其中: A_{id} 表示外部档案中的粒子。在改进的粒子群算法中,设立的外部档案保存了粒子迭代过程中搜索获得的最优解,同时也实现了个体之间最优解信息的共享。

利用精英学习策略对档案中的粒子进行更新,这些个体都是全局最优粒子,对档案 A 中的粒子采取以下措施:

$$E'_{id} = E_{id} + (X_{\max,d} - X_{\min,d})G(0,1) \quad (11)$$

档案中最优解数量增加,计算量也随之增加。

为了减少计算量,提高计算效率,对于外部档案,设定种群最优解存储最大容量 NA ,当容量大于 NA 时,利用拥挤距离对最优解进行削减。

3 实验数据与平台

为了验证本文设计的可行性,分别对本文方法的稳定性能、寻优性能、优化成本、抗震性能进行测试分析。

以一三层四跨空间框架结构为优化算例,建筑空间结构柱顶标高为 3.9 m,框架梁截面尺寸为 350 mm²,底层最大轴压比为 0.25,梁的两端各有 13 个四肢箍,间距为 150 mm,梁跨中部分间距为 200 mm,四肢箍及框架柱截面尺寸为 500 mm²。建筑空间结构构件的弹性模量为 250 GPa,密度为 8 545 kg/m³。建筑空间结构各构件分别采用同型钢。结构梁、柱的屈服强度分别是 450 MPa 和 425 MPa。在 Intel(R)Core(TM)i5-2520M CPU、6 GB 内存、Win7 系统的实验环境下编写改进的粒子群多目标种群优化算法的 MATLAB 主程序,以结构位移为性能指标,对该建筑空间结构进行抗震分析。

采用编写的种群优化程序对算例进行 20 次优化测试,测试结果如图 2 所示。建筑空间结构抗震性能最佳优化设计方案及其优化后的结果如表 1 所列。表 1 中, W 表示不同算法, G -PSO 表示改进粒子群算法, C 表示初始设计, J 表示构件组, K 表示最优成本(元), g 表示标准差(元), D 表示平均迭代次数(次), P 表示 Pushover 分析次数(次)。

从图 2 和表 1 中给出的优化结果可以看出,改进的粒子群算法相比文献[5]中的 ACO 算法,在求解质量上有小幅度提升,建设成本大幅度减少。改进粒子群算法在第 3 次测试过程中获取的最优解方

案需要 26 210 元,该数值是初始设计方案所需成本的 57.9%,比文献[5]中 ACO 和文献[6]中 NSGA-II 的优化结果分别节省了 2 444 和 4 044 元。表 1 给出的标准差结果也表明改进后的粒子群算法的稳定性也较为理想。

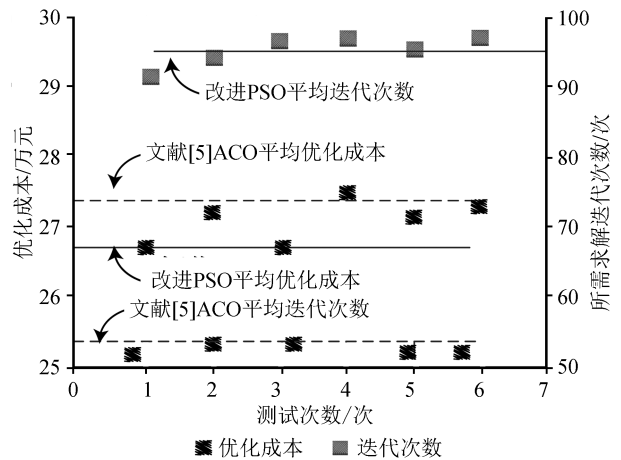


图 2 改进粒子群算法的优化测试结果

Fig.2 Optimization test results of improved particle swarm algorithm

表 1 改进粒子群算法优化结果与初始设计对比

Table 1 Comparison between optimization results and initial design of improved particle swarm optimization algorithm

W	K/元	g/元	D/次	P/次
C	45 210	-	-	-
G-PSO	26 210	741	135	854
NSGA-II	28 654	789	70	4 500
ACO	30 254	1 524	145	6 452

分别采用改进粒子群算法和文献[5]中 ACO 算法以及文献[6]中的 NSGA-II 算法进行迭代次数(次)和 Pushover 分析次数(次)对比,对比结果如图 3 所示。

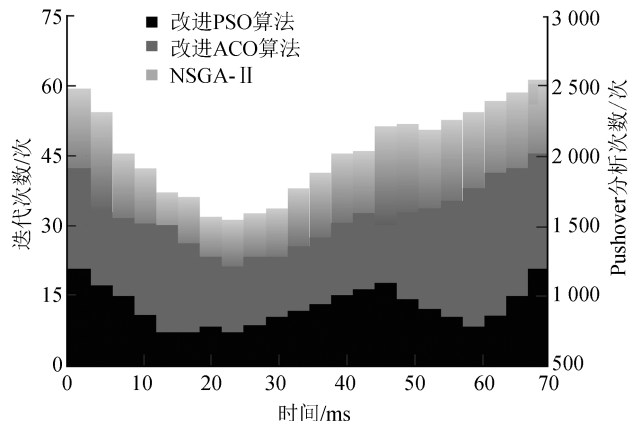


图 3 优化迭代过程

Fig.3 Optimized iterative process

分析图 3 可知,改进的粒子群算法、文献[5]中 ACO 算法、文献[6]中的 NSGA-II 算法平均迭代次数分别为 8 次、28 次、45 次。从 Pushover 次数上看,改进粒子群算法的分析次数也是最低,这说明改进粒子群算法计算量较低,同时验证了其在寻优速率上的卓越优势。

图 4 给出改进粒子群算法、文献[5]中 ACO 算法、文献[6]中的 NSGA-II 算法在求解获得最佳优化结果时的迭代曲线。

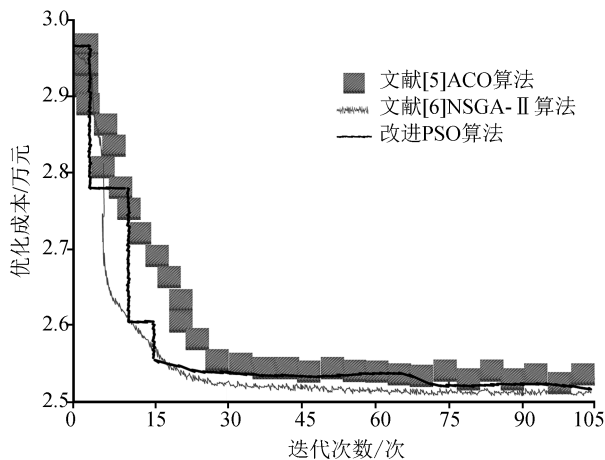


图 4 成本优化曲线

Fig.4 Cost optimized curve

从图 4 中可以看出,改进粒子群算法通过采用精英选取策略更新外部档案中的个体,优化成本也从 29 800 元下降 15.7%,到第 30 次迭代时求得最优解 25 120 元。这说明改进粒子群算法在节省建筑空间抗震优化设计成本和求解效率上具有积极作用,可以减少优化成本。

表 2 给出改进粒子群算法优化后建筑空间结构的抗震性能水平。

表 2 优化结果的抗震性能对比

Table 2 Comparison between seismic performance of optimized results

算法	顶层位移/cm		层间位移角/%	
	AC	BK	AC	BK
性能要求	4.85	6.25	1.25	6.00
改进 PSO 算法	3.58	4.24	0.65	3.58
改进 ACO 算法	4.25	7.25	0.89	4.25
NSGA-II 算法	4.35	7.85	0.88	5.27

分析表 2 可知,改进粒子群算法在各项性能等级状态下的位移性能指标均在最大允许值区间内,且小于文献[5]中 ACO 算法和文献[6]中的 NSGA-II 算法优化结果的位移值。可以看出该优化结果的设计方案不仅节省成本,其抗震性能也更优越。

通过上述实验验证,改进粒子群算法的建筑空间结构优化设计,相较于当前设计对建筑空间结构的优化,具有稳定性能好、寻优质量高、优化成本低、抗震性能高的特点。

4 结论

构建了建筑空间结构抗震优化,采用改进粒子群算法对该优化进行求解,获得如下结论:

(1) 改进粒子群算法通过引入精英学习策略增加了种群多样性,增加了外部档案在存储种群最优解的同时实现了个体之间最优解搜索信息的共享,在提升搜索效率以及最优解搜寻上起到了明显的作用。

(2) 在实际算例中的成功应用验证了改进粒子群算法在建筑空间结构抗震优化设计中的综合有效性,证明了其可行性。

改进粒子群算法的建筑空间结构优化设计,考虑建筑结构的抗震性,并在抗震性能约束下解决了当前优化设计难以满足建筑空间设计者和用户对建筑空间结构安全性及多目标种群优化的难题。

参考文献(References)

- [1] 王智勇,李纯,黄亚平,等.城市密集区生态空间识别、选择及结构优化研究[J].规划师,2017,33(5):106-113.
WANG Zhiyong, LI Chun, HUANG Yaping, et al. Identification, Selection and Structural Optimization of Ecological Space in Urban Agglomeration Region[J]. Planners, 2017, 33(5): 106-113.
- [2] 闫星宇,陈志华,大森博司,等.基于弹塑性分析的空间桁架结构的承载力优化分析[J].工业建筑,2017,47(5):122-131.
YAN Xingyu, CHEN Zhihua, OHMORI Hiroshi, et al. Optimized Analysis for Bearing Capacity of Space Trussstructure Based on Elastic-plastic Analysis Method[J]. Industrial Construction, 2017, 47(5): 122-131.
- [3] 李丽娟,梁靖昌.改进的多目标启发式粒子群算法及其在桁架结构设计中的应用[J].建筑科学与工程学报,2016,33(6):37-43.
LI Lijuan, LIANG Jingchang. Improved Multi-objective Heuristic Particle Swarm Optimizer and Its Application in Truss Structural Design[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(6): 37-43.
- [4] 山如黛,刘冠男,夏晓东,等.基于遗传算法的围护结构优化设计研究[J].建筑技术,2018,49(2):145-148.
SHAN Ruzhen, LIU Guannan, XIA Xiaodong, et al. Research on Optimization Design of Envelope Structure Based on Genetic Algorithm[J]. Architecture Technology, 2018, 49(2): 145-148.
- [5] 李沛豪,刘崇奇.基于改进蚁群算法的结构抗震优化设计[J].空间结构,2017,23(2):42-47.

Mine, 2011(6):1-5.

- [15] 徐颖, 陈建平, 左昌群. 武当群片岩隧道剪切型纵向裂缝破坏机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2950-2957.
- XU Ying, CHEN Jianping, ZUO Cangqun. Shear Type Longitudinal Cracks Failure Mechanism in Wudang Group of Schist Tunnel [J]. Journal of Central South University (Sci-

ence Edition), 2013, 44(7): 2950-2957.

- [16] 洪敏, 李少华, 王英达, 等. 梁柱节点刚度对 Y 形偏心支撑半刚接钢框架抗震性能的影响[J]. 地震研究, 2016, 39(1): 79-84.
- HONG Min, LI Shaohua, WANG Yingda, et al. Effects of Stiffness of Beam-column Connection on the Seismic Performance of Semi-rigid Steel Frame with Y-shaped Eccentric Brace [J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(1): 79-84.

(上接第 1235 页)

LI Peihao, LIU Chongqi. Seismic Optimal Design of Structure Based on Improved Ant Colony Algorithm [J]. Spatial Structures, 2017, 23(2): 42-47.

- [6] 储迅易, 杨海霞, 吴志锋. 基于 NSGA-II 的网架结构多目标抗震优化[J]. 建筑科学, 2016, 32(5): 27-33.
- CHU Xunyi, YANG Haixia, WU Zhifeng. Multi-objective Seismic Optimization of Steel Grid Structures with NSGA-II [J]. Building Science, 2016, 32(5): 27-33.
- [7] 陈树勋, 韦齐峰, 黄锦成, 等. 利用导重法进行结构轻量化设计[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 179-187.
- CHEN Shuxun, WEI Qifeng, HUANG Jincheng, et al. Lightweight Design with Weighted Method [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 179-187.
- [8] 胡文博, 翟希梅, 姜洪斌. 预制装配式钢筋混凝土一体化剪力墙抗震性能研究及构造方案优化[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 1-10.

HU Wenbo, ZHAI Ximei, JIANG Hongbin. Study on Seismic Performance and Construction Measures Optimization of Pre-cast Fabricated RC Integration Shear Wall [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 1-10.

- [9] 郭震, 朱飞, 王永超, 等. 钢框架短肢组合钢板剪力墙结构优化分析[J]. 建筑钢结构进展, 2017, 19(4): 36-42.
- GUO Zhen, ZHU Fei, WANG Yongchao, et al. Optimization Analysis on Steel Frame with Short-limb Steel Plate Composite Shear Wall [J]. Progress in Steel Building Structures, 2017, 19(4): 36-42.
- [10] 丛苏莉. 多维地震作用下钢筋混凝土建筑结构的抗连续倒塌仿真分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(1): 41-47.
- CONG Suli. Simulation and Analysis of the Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures under Multidimensional Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(1): 41-47.