

建筑结构优化设计研究综述

崔容¹, 李宇杰²

¹河北工程大学, 河北 邯郸

²邯郸城市发展投资集团有限公司, 河北 邯郸

收稿日期: 2022年9月25日; 录用日期: 2022年10月15日; 发布日期: 2022年10月26日

摘要

多次地震灾害表明, 建筑结构的安全性和经济性成为社会关注点。结构优化设计的合理性对建筑结构的安全性具有重要意义。本文首先对结构优化层次进行简单论述, 其次总结了按受力体系对建筑结构进行分类后各结构类型、优缺点以及应用范围, 最后对智能算法在框架结构、剪力墙结构、桁架结构优化设计中的应用研究进行介绍, 为智能算法在更多领域的结构优化的应用提供参考。

关键词

建筑, 结构优化, 智能算法

A Review of the Research on Optimal Design of Building Structures

Rong Cui¹, Yujie Li²

¹Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Handan City Development Investment Group Co., Ltd., Handan Hebei

Received: Sep. 25th, 2022; accepted: Oct. 15th, 2022; published: Oct. 26th, 2022

Abstract

Many earthquake disasters show that the safety and economy of building structures become the concern of society. The rationality of structural optimization design is of great significance to the safety of building structures. In this paper, firstly, the structure optimization level is briefly discussed. Secondly, it summarizes the structure types, advantages and disadvantages and application scope after classifying the building structure according to the stress system. Finally, the application of intelligent algorithms in the optimization design of frame structure, shear wall structure and truss structure are introduced, so as to provide a reference for the application of intelli-

文章引用: 崔容, 李宇杰. 建筑结构优化设计研究综述[J]. 土木工程, 2022, 11(10): 1120-1127.

DOI: 10.12677/hjce.2022.1110124

gent algorithms in more fields of structural optimization.

Keywords

Building Construction, Structure Optimization, Intelligent Algorithm

Copyright © 2022 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

工程结构优化设计最早采用的是基于直觉的准则法, 根据工程经验和力学概念预先建立某种准则, 经过相应的迭代, 得到满足准则的设计方案作为问题的最优解, 但该方法缺乏理论依据。1960年, Schmit [1]将数学规划引入到优化算法中, 但该方法受工程规模限制, 计算效率低。传统的建筑结构优化方法受人为主观因素较大, 对于复杂的结构优化不仅费时费力, 得到的优化结果也不太理想。该方法已逐渐不能满足装配式建筑行业的发展需要[2]。随着科学技术的发展, 智能优化算法的出现, 为人们解决结构优化问题提供了新思路, 自动建模优化分析减少了主观因素的影响, 能有效提高结构优化设计效率。运用优化算法进行优化设计越来越受到不同领域学者们的重视, 特别是在建筑结构优化问题方面[3]。当前建筑结构优化设计过程仍存在性能分析不足、外部抗剪力与内部刚度相矛盾的问题, 基于此, 探讨建筑结构优化设计至关重要[4]。

结构优化设计属于一种离散变量的优化设计问题, 结构优化的目的是在满足结构稳定性的要求下, 对结构做出最安全经济的设计。以所需要满足的要求作为约束条件, 以截面尺寸或者结构外形等作为设计变量, 以结构性能指标或者造价作为目标函数, 建立可进行最终优化的数学模型, 运用智能算法对数学模型进行求解。实践证明, 工程结构优化设计可以有效提高设计水平与工程质量, 优化后的设计方案降低了造价成本。

2. 结构优化层次

2.1. 尺寸优化

尺寸优化是对结构各组成构件的截面尺寸进行优化, 以达到降低结构重量或降低造价成本的目的。设计变量可以是杆的横截面积、板的厚度等, 目前尺寸优化已经比较成熟。

2.2. 形状优化

形状优化通过调整结构内外边界的形状以此达到改善结构性能的目的, 主要对杆系结构和连续体结构进行优化设计, 设计变量可以是结构外形或者边界节点集。

2.3. 拓扑优化

拓扑优化重点对连续体结构和离散结构进行拓扑优化, 主要是通过对材料分布进行拓扑优化以此得到最优分布方案的目的, 主要包括变密度法、渐进结构法和均质法三大类。

3. 建筑结构优化设计

常见的建筑结构有框架结构、剪力墙结构、桁架结构。根据不同的划分标准, 可将建筑建构划分为

好几种类型。按照结构的受力体系进行划分, 划分后的建筑结构类型的优缺点、应用范围及其代表性建筑如表 1 所示。

Table 1. Building structure type
表 1. 建筑结构类型

建筑结构类型	优点	缺点	应用范围	代表性建筑
砌体结构	耐火性和耐久性好, 价格低廉	抗震性能差, 抗压性能差	民用建筑中的基础、内外墙等	长城、西安大雁塔
混合结构	可加强承重性能和抗震性能	工期长, 抗折性差	住宅、办公楼等民用建筑	国家大剧院
框架结构	自重轻, 布置灵活, 整体性好	节点应力集中, 侧向刚度小	应用范围广泛, 住宅、办公、商业建筑均可采用	央视新大楼
框剪结构	自重轻, 利于抗震	节点应力集中, 横向刚度小	高层办公和公共建筑	上海联谊大厦
剪力墙结构	整体性好, 侧向刚度大	结构延性差	高层建筑	东京歌剧院
框筒结构	耐久性好, 耐火性好, 可模性好	自重大, 抗裂性差	超高层建筑	世界贸易中心
筒中筒结构	整体性好, 抗震性好	防火差	高层与超高层民用建筑	新宿住友大厦
桁架结构	刚度大, 几何特性好, 施工简单	承载能力有限, 变形差	大跨度的厂房、展览馆和桥梁等公共建筑	上海大剧院
网架结构	刚度大, 稳定性好	节点用钢量较大, 制作安装较平面结构复杂	体育馆、展览馆、候车厅等	上海体育馆
悬索结构	施工方便, 自重小, 节省材料	稳定性差	大跨度体育馆、展览馆和桥梁等	北京工人体育馆
膜结构	新颖美观, 自重轻, 工期短	耐久性差, 隔热差	大型体育馆, 会展中心, 购物中心	杭州银泰广场膜结构雨棚

3.1. 框架结构优化

框架结构是混凝土建筑中的一种常用的结构形式, 由于其传力明确、布置灵活而被广泛应用。近年来, 已有大量学者对框架结构进行智能优化设计研究。王学兵[5]采用遗传算法对槽门框架结构进行优化, 减轻了槽门框架的自重。Gholizadeh [6]采用蝙蝠算法对钢框架结构进行优化, 通过优化结构尺寸, 降低了框架结构的总质量。何嘉年[7]采用遗传算法对半刚性连接钢框架结构体系进行优化设计, 提高了结构优化设计的效率, 并且使结构构件更能充分发挥作用。楼善治[8]等人采用自适应遗传算法对混凝土框架结构进行优化设计提高了构件尺寸优化效率, 降低了造价成本, 优化过程中整体结构的造价下降曲线如图 1 所示。

杨鏊[9]等人与何浩祥[10]等人分别采用混合智能算法对弯剪型框架结构和框架结构进行优化设计, 均提高了计算效率, 为均匀变形的结构优化设计提供了参考。ÇARBAŞ [11]和李沛豪[12]分别采用生物地理学的优化算法和改进粒子群算法对钢框架结构进行优化, 前者有效降低了钢框架结构的材料总成本, 后者表明改进后的粒子群算法可应用于钢框架抗震优化设计。Gholizadeh [13]基于改进的海豚回声定位算法对钢框架的抗震布局进行优化, 发现在布局优化过程的结构配置比纯尺寸优化所获得结构配置轻约 10%。朱朝艳[14]等在强度约束、构造约束等约束条件下, 应用改进的遗传算法对框架结构进行优化, 结果表明, 可有效降低框架结构的总造价, 应用于框架结构的优化设计中效果良好, 为建筑结构优化设计

提供了一种新思路。对上述学者所进行的框架结构优化设计进行分析总结, 如表 2 所示。

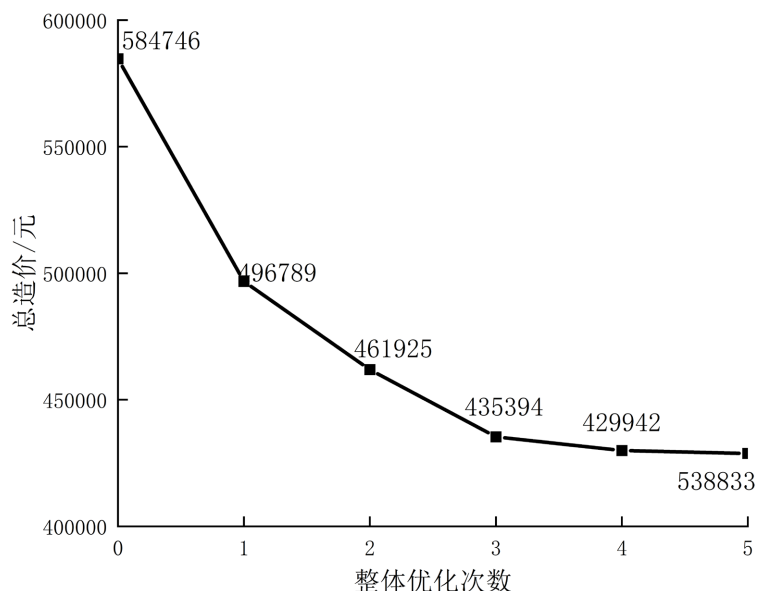


Figure 1. Cost curve of structural optimization process

图 1. 结构优化过程造价曲线

Table 2. Optimum design of frame structure

表 2. 框架结构优化设计

框架结构	优化方式	优化结果
槽门框架	结构尺寸优化	减轻了结构自重
钢框架	抗震布局优化、尺寸优化	降低材料成本, 提高构件尺寸优化效率
混凝土框架	构件尺寸优化	有效降低框架结构总造价
弯剪型框架	截面尺寸分布优化	可提高计算优化效率

综上所述, 各学者对框架结构进行智能优化设计, 运用智能算法相比于常规的设计方法可以有效提高设计效率, 可减轻结构的总质量和降低材料的总成本。并且优化后的效果良好。虽在框架结构工程中应用算法进行优化设计的研究较多, 但运用智能算法对框架结构抗震优化设计的研究较少。

3.2. 剪力墙结构优化设计

剪力墙结构具有很好的承载力和整体性, 在高层建筑中得到广泛应用。胡佳俊[15]通过改进自适应遗传算法与有限元软件相结合的方法对剪力墙结构进行延性性能优化设计, 确定了优化参数, 使结构具有了优秀的延性。Saedi [16]通过改进海豚回声定位算法来实现对剪力墙结构优化设计, 此方法使得剪力墙结构重量减轻了 10%。林树宏[17]通过改进遗传算法对钢板剪力墙结构进行优化, 降低了常规布置方案结构的自重, 材料性能得到最大限度的利用 Kaveh [18]采用三种典型的智能算法对钢板剪力墙的尺寸和性能进行优化设计, 结果表明优化效果良好。黄韵兴[19]基于改进的遗传优化算法以结构位移为目标函数对钢板剪力墙进行优化, 对优化后的剪力墙进行试验研究, 结果表明, 可有效提高剪力墙结构体系的承载力和耗能能力等。Talatahari [20]基于量子带电系统搜索算法对高层建筑剪力墙布局进行优化设计, 以高层建筑的总成本为目标函数, 考虑了结构和建筑要求, 可有效减少高层建筑的总成本。卢巧玲[21]通过微粒

群优化算法对剪力墙位置进行优化, 为降低抗震体系的动态反应, 满足抗震要求, 具有理论意义, 优化后最佳位模态图如图 2 所示。

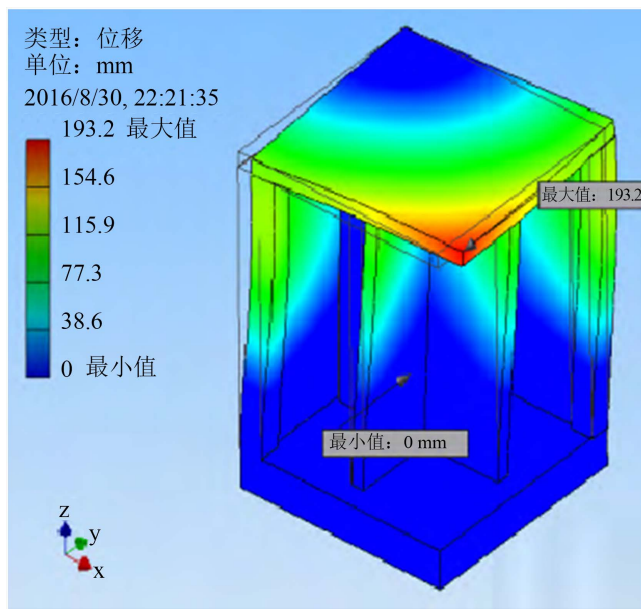


Figure 2. Optimum position F1 = 147.81 Hz modal diagram
图 2. 最佳位 F1 = 147.81 Hz 模态图

李彬[22]对剪力墙结构中的剪力墙布置优化进行研究, 通过改进的遗传算法以剪力墙总长度最小为目标函数进行剪力墙结构布置优化搜索, 研究表明, 优化后的方案满足结构规范并能取得良好的经济效果。对学者们所进行的剪力墙结构优化设计分析总结如表 3 所示。

Table 3. Optimal design of shear wall structure
表 3. 剪力墙结构优化设计

剪力墙结构	优化方式	优化结果
剪力墙	结构布置优化	减轻了结构自重
钢板剪力墙	结构尺寸和性能优化	降低结构自重, 提高提高结构力学性能
高层建筑剪力墙	布局优化设计	有效减少高层建筑成本

综上所述, 对剪力墙结构进行优化设计时, 主要对参数进行优化或者通过优化来减轻结构的自重, 使材料性能得到最大限度的应用。基于优化算法对剪力墙结构的优化设计研究比较少, 运用优化算法对剪力墙结构抗震优化设计时, 相应目标函数中的参数确定尚需进一步挖掘和完善。

3.3. 桁架结构优化设计

桁架结构简单, 布置比较灵活, 能够承载多方向的荷载, 被广泛应用于多种领域。目前对运用智能算法对桁架进行优化设计的研究越来越多, 李梦欢[23]采用智能算法与人工神经网络技术相结合的方法对平面桁架结构和空间桁架结构进行截面优化, 结果表明此方法可大大节省计算耗时, 且能稳定收敛, 具有很好的适用性。覃俊霖[24]提出一种改进的布谷鸟搜索算法用于优化桁架尺寸问题, 并且可在尺寸优化基础上转化为形状优化, 优化结果表明, 该方法可以有效解决桁架结构的尺寸优化问题和形状优化问题。

Baghlani [25]提出一种与萤火虫算法杂交的新型可行边界搜索技术,是一种桁架结构尺寸中的约束处理技术,可快速得出桁架结构重量优化方案。Jalili [26]提出一种迁移和差分演化相结合的策略算法,对多频率约束桁架结构进行优化设计,基于基准桁架设计实例与现有优化技术进行比较,验证了该方法的有效性。Kaveh [27]采用入侵杂草优化算法和洗牌蛙跳算法的高效混合优化算法对桁架截面尺寸进行优化设计,该方法得到了收敛更好的解决方案,并且减少了结构分析数量。百丽丽[28]、李沛豪[29]、康俊涛[30]和王宇沿[31]运用不同的优化算法分别对静定 13 杆桁架结构、52 杆桁架结构、600 杆圆顶状空间桁架结构和 1410 杆双层网壳桁架结构进行优化设计,以结构取得最小重量为优化目标,桁架截面面积为优化变量,验证了算法对于桁架结构优化设计的适用性,由此说明不论是 13 杆桁架还是大规模的桁架结构优化算法都适用。1410 杆双层网壳桁架结构如图 3 所示。

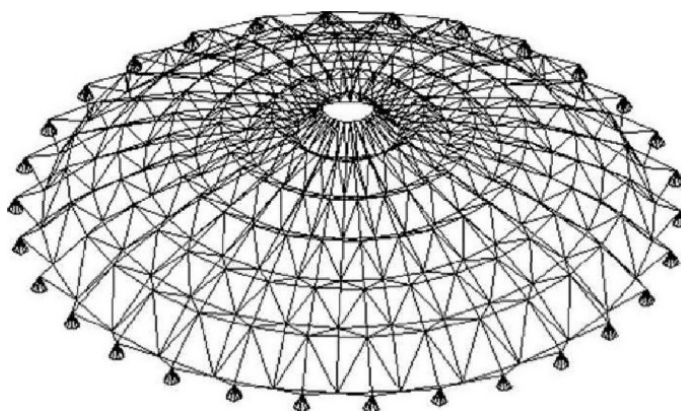


Figure 3. 1410 pole double-layer lattice shell truss structure
图 3. 1410 杆双层网壳桁架结构

对学者们所进行的桁架结构进行优化设计分析总结如表 4 所示。

Table 4. Truss optimization design
表 4. 桁架优化设计

桁架结构	优化方式	优化结果
平面、空间桁架	截面尺寸优化	节约时间,提高优化效率,具有很好适用性
基准桁架结构	桁架截面尺寸	有效减少结构分析数量,验证算法有效性
大规模桁架结构	桁架截面面积	有效减少高层建筑成本

综上所述,对桁架结构进行优化设计主要围绕桁架尺寸进行优化,各学者通过运用不同的智能算法或与对算法进行改进、组合等,可以很好的解决桁架尺寸优化的问题,验证了算法的适用性。同时也可以快速有效的得出重量优化方案,减轻桁架自身重量,验证了算法的有效性。目前运用智能算法对桁架尺寸进行优化的研究比较多,而对桁架进行形状优化的研究比较少,因此后续应深入对桁架形状优化领域的研究。

4. 结论

近年来,我国多次发生不同等级的地震,对建筑结构的安全性能要求不断提高,结构设计是否合理对建筑结构的整体可靠性起着至关重要的作用。运用智能优化算法对结构进行优化设计,可以有效提高结构设计效率,减少人为因素对优化结果的影响。对于复杂的结构进行优化,传统的智能算法有时不能

达到很好的优化效果, 可对优化算法进行改进、组合或者与有限元软件相结合。研究高效的结构优化方法对建筑行业的发展具有重要的意义, 本文介绍了智能算法在框架结构、剪力墙结构、桁架结构优化设计的应用, 为智能算法在更多领域的结构优化的应用提供参考。

基金项目

河北省自然科学基金资助项目(E2020402079); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2019114)。

参考文献

- [1] Schmit, L.A. (1960) Structural Design by Systematic Synthesis. *Proceeding of the 2nd Conference on Electronic Computation*, New York, September, 105-132.
- [2] 秦佳俊, 谭平, 尚继英, 等. 模块化钢框架单元新型盒式连接节点及其设计方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(3): 37-43.
- [3] 叶青. 桁架结构的优化设计方法研究综述[J]. 黑龙江科技信息, 2014(17): 204+50.
- [4] 马强. 建筑结构设计优化方法及应用探讨[J]. 技术与市场, 2022, 29(3): 120-121.
- [5] 王学兵, 张慧鹏, 王亚辉, 尚力阳, 张智勇. 基于 BP 神经网络与遗传算法的槽门框架结构优化设计[J]. 技术与市场, 2022, 29(8): 1-5.
- [6] Gholizadeh, S. and Shahrezaei, A.M. (2015) Optimal Placement of Steel Plate Shear Walls for Steel Frames by Bat Algorithm. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **24**, 1-18. <https://doi.org/10.1002/tal.1151>
- [7] 何嘉年, 王湛. 半刚性连接钢框架结构体系优化设计[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 98-103.
- [8] 楼善治, 张海静. 一种高效的混凝土框架结构优化设计方法[J]. 结构工程师, 2021, 37(3): 213-219.
- [9] 杨鉴, 江峰. 基于混合智能算法的弯剪型框架结构抗震优化设计[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(4): 94-96.
- [10] 何浩祥, 王文涛, 吴山. 基于均匀变形和混合智能算法的框架结构抗震优化设计[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 113-121.
- [11] Çarbaş, S. (2017) Optimum Structural Design of Spatial Steel Frames via Biogeography-Based Optimization. *Neural Computing and Applications*, **28**, 1525-1539. <https://doi.org/10.1007/s00521-015-2167-6>
- [12] 李沛豪, 李东, 刘崇奇. 基于改进粒子群优化算法的钢框架抗震优化设计[J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(6): 666-671.
- [13] Gholizadeh, S. and Poorhoseini, H. (2016) Seismic Layout Optimization of Steel Braced Frames by an Improved Dolphin Echolocation Algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **54**, 1011-1029. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1461-y>
- [14] 朱朝艳, 刘露旭, 唐永鑫, 刑婕思. 改进遗传算法在框架结构优化设计中的应用[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2016, 36(3): 168-170+174.
- [15] 胡佳俊. 基于自适应遗传算法的开缝钢板剪力墙优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [16] Saedi Daryan, A., Salari, M., Farhoudi, N., et al. (2021) Seismic Design Optimization of Steel Frames with Steel Shear Wall System Using Modified Dolphin Algorithm. *International Journal of Steel Structures*, **21**, 771-786. <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00472-3>
- [17] 林树宏. 钢框架-钢板剪力墙结构体系优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [18] Kaveh, A. and Dadras Eslamlou, A. (2020) Optimal Seismic Design of Steel Plate Shear Walls Using CBO and ECBO Algorithms. In: *Metaheuristic Optimization Algorithms in Civil Engineering: New Applications*, Studies in Computational Intelligence, Vol. 900, Springer, Cham, 181-217. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45473-9_9
- [19] 黄韵兴. 四边连接梯形波纹钢板剪力墙优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [20] Talatahari, S. and Rabiei, M. (2020) Shear Wall Layout Optimization of Tall Buildings Using Quantum Charged System Search. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **14**, 1131-1151. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0660-1>
- [21] 卢巧玲, 张涛. 基于能量准则的框架剪力墙结构优化设计研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 10-13.
- [22] 李彬. 高层建筑剪力墙结构中剪力墙布置优化研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- [23] 李梦欢. 神经网络结合智能算法在结构优化中的应用[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2016.

-
- [24] 覃俊霖. 改进的布谷鸟搜索算法及其在桁架结构优化中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2020.
- [25] Baghlani, A. and Makiabadi, M.H. (2014) Weight Optimization of Truss Structures by a New Feasible Boundary Search Technique Hybridized with Firefly Algorithm. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18**, 1105-1118. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0438-x>
- [26] Jalili, S. and Hosseinzadeh, Y. (2019) Combining Migration and Differential Evolution Strategies for Optimum Design of Truss Structures with Dynamic Constraints. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **43**, 289-312. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0165-5>
- [27] Kaveh, A., Talatahari, S. and Khodadadi, N. (2020) Hybrid Invasive Weed Optimization-Shuffled Frog-Leaping Algorithm for Optimal Design of Truss Structures. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, **44**, 405-420. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00280-0>
- [28] 白丽丽, 姜封国, 周玉明, 曾泉. 基于改进鲸鱼算法的结构可靠性优化设计[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-6. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20211421>, 2022-09-22.
- [29] 李沛豪, 李东. 基于改进粒子群算法的桁架结构优化设计[J]. 空间结构, 2018, 24(4): 16-22.
- [30] 康俊涛, 邹立, 曹鸿猷, 张亚州. 基于樽海鞘群算法的桁架结构优化设计[J]. 空间结构, 2020, 26(3): 51-58+83.
- [31] 王宇沿. 改良的快速群搜索优化算法及其在大规模桁架结构优化设计中的应用[J]. 建筑监督检测与造价, 2017, 10(5): 43-50.