基于萤火虫算法的多层建筑物公共设施利用优化设计

李晓英，陈巧慧，万 乐

（湖北工业大学 工业设计学院，武汉 430000）

摘 要：多层建筑物的空间通常有限，如何在有限的空间内合理布局公共设施，满足不同用户群体的需求是一个挑战，为此，本文提出一种基于萤火虫算法的多层建筑物公共设施利用优化设计方法。将使用效率最大化、公平最大化以及覆盖范围最大化作为优化目标，建立公共设施利用优化模型，采用萤火虫算法获取模型最优解，以此实现多层建筑物公共设施利用优化设计。实验结果表明，本文方法具有较高的使用效率、公平性及覆盖范围，说明该方法的规划结果能确保公共资源得到合理利用，服务能惠及目标人群，并且能覆盖尽可能广泛的地理区域。

关键词：多层建筑物；公共设施利用优化；萤火虫算法；使用效率；覆盖范围

中图分类号：TU984 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)08-2651-06

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240781

Optimization design of multi story building public facilities utilization based on firefly algorithm

LI Xiao-ying，CHEN Qiao-hui，WAN Le

（*School of Hubei University of Technology Industrial Design*，*Wuhan* 430000，*China*）

Abstract：The space of multi story buildings is usually limited，and how to reasonably layout public facilities within the limited space to meet the needs of different user groups is a challenge. Therefore，this paper proposes an optimization design method for the utilization of public facilities in multi story buildings based on firefly algorithm. Establishing a public facility utilization optimization model with the optimization objectives of maximizing efficiency，fairness，and coverage，and using firefly algorithm to obtain the optimal solution of the model，in order to achieve the optimization design of public facility utilization in multi story buildings. The experimental results show that the proposed method has high efficiency，fairness，and coverage，indicating that the planning results of this method can ensure the rational utilization of public resources，benefit the target population，and cover the widest possible geographical area.

Key words：multi story buildings；optimization of public facility utilization；firefly algorithm；efficiency of use；coverage range

收稿日期：2024-07-15.

基金项目：国家自然科学基金项目(51605352)；湖北工业大学研究生专项项目(校2020048)；教育部产学合作协同育人基金项目(202002255007).

作者简介：李晓英(1973-)，女，教授，博士. 研究方向：交互与信息产品设计，用户研究与体验设计，人机工程设计应用. E-mail：c15981977897@126.com

0 引 言

随着高层建筑的普及,公共设施如电梯、楼梯间、走廊、停车场、休闲区域等的有效利用和管理成为提高建筑整体效率和居住舒适度的关键因素[1]。传统的公共设施设计往往侧重于满足基本功能需求,而忽视了空间的多功能性、灵活性以及与用户行为的互动性[2]。因此,研究如何通过科学的设计方法优化公共设施的布局和使用效率,不仅能够提升建筑物的经济性和环境友好性,还能增强用户体验,满足现代社会对高效、智能、可持续建筑环境的需求。

当前研究者们致力于通过结构优化设计来提升多层建筑公共设施的利用率和效率。翟石艳等[3]建立最优供需分配模型,为需求者分配设施服务,在此基础上,对空间可达性指标展开计算,获得用户需求与服务设施的空间分布情况,考虑设施服务能力展开公共设施优化设计。该方法考虑用户需求和行为模式,有助于设计更符合用户期望的公共设施布局,但是公共设施的覆盖范围较小,不能满足居民需求。王海亮等[4]将空间形态参数设置在传统可达性模型中,建立可达性改进模型,将最小化建设成本与最大化步行可达性作为目标,建立公共设施布局优化模型,通过NS-GA-Ⅱ算法获取模型最优解,以此实现优化设计。由于最小化建设成本与最大化步行可达性两个目标之间可能存在冲突,导致该方法的优化效果较差。王馨曼等[5]针对公共设施短缺、功能局限及设计同质化等挑战,从整体性提升、互动性增强与复合性功能融合3个维度出发,深入探索公共设施优化方法。通过剖析公共设施与使用者基本需求之间的紧密关联,构建一个既满足多样化需求又促进互动的公共设施体系。该方法从使用者的角度出发,能够更准确地识别使用者的多样化需求,提升公共设施的满意度。但是,其没有考虑出行路径长度因素,导致公共设施使用效率较低。陈伟旋等[6]运用PSPL(公共空间与公共生活)调研法,分析研究区域内人流量的时段变化,并调查使用人群对现有空间的评价与潜在需求。基于时空特征分析,提出折叠式与模块化相结合的设施优化设计策略。该方法能降低空间利用的冗余度,但是规划后公共设施的可达性不佳,不能有效提高设施或服务的便捷程度。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于萤火虫算法的多层建筑物公共设施利用优化设计方法。

1 多层建筑物公共设施利用优化模型

对多层建筑物公共设施展开利用优化设计的主要目的是提高公共设施的服务质量与使用效率,满足居民的日常需求[7-8]。因此,将使用效率最大化、公平最大化和覆盖范围最大化作为优化目标,构建多层建筑物公共设施利用优化模型,以此实现多层建筑公共设施的优化利用。

1.1 使用效率最大化

计算公共设施j被需求点i选择的概率g_{ij}:

$$g_{ij}=\frac{D_j f_{ij}}{\sum_{j\in A} D_j f_{ij}} \tag{1}$$

式中:D_j为公共设施j产生的吸引力;f_{ij}为公共设施j与需求点i之间的距离;A为被选中的公共设施构成的集合。

设l_{ij}代表需求点i对公共设施j的需求量,其表达式如下:

$$l_{ij}=F_i g_{ij} \tag{2}$$

式中:F_i为需求点i对应的需求规模。

将公共设施j与需求点i之间的距离f_{ij}以及需求量l_{ij}作为依据,确定需求者到公共设施的出行距离$G(A)$,将最小化出行距离$G(A)$作为优化目标,以此实现使用效率的最大化:

$$\min G(A)=\sum_i \sum_{j\in A} f_{ij} l_{ij} \tag{3}$$

1.2 公平最大化

设施优化设计的公平性可以通过最小化不同需求点至公共设施可达性差异的程度来评估,设S_i代表可达性得分,则公平最大化表达式如下:

$$H=\min \sum_{i=1}^{m} (S_i-s)^2 \tag{4}$$

式中:s为可达性加权平均值,表达式如下:

$$s=\sum_{i=1}^{m} \frac{F_i S_i}{F}=\frac{D}{F} \tag{5}$$

式中:m为需求点在研究区域内的实际数量;F为总需求规模;D为总供给规模。

由于供需点之间的距离衰减效应以及供需点规模等因素都会对公共设施空间的可达性产生影

响,综合考虑上述因素,对可达性得分S_i展开计算:

$$S_i=\left[\sum_{j=1}^{n}D_j h(f_{ij})\right]/\left[\sum_{k=1}^{m}h(f_{ij})\right] \tag{6}$$

式中:n为公共设施的数量;$h(f_{ij})$为距离衰减函数,其表达式如下:

$$h(f_{ij})=\begin{cases}f_{ij}^{-\chi}, f_{ij}\leqslant f_0\\ 0, f_{ij}>f_0\end{cases} \tag{7}$$

式中:f_0为服务半径。

通过式(4)最大化公共设施的公平性,以此提高居民满意度。

1.3　覆盖范围最大化

为了最大化公共设施的服务范围,确保尽可能广泛地覆盖各需求点,设定覆盖范围最大化优化目标:

$$\max(Z)=\sum_{a=1}^{n}W_a U_b \tag{8}$$

式中:W_a为需求点到公共设施的综合布局指数;U_b为变量,当U_b的值为1时,表明公共设施的有效服务半径覆盖了需求点b,U_b的值为0时,表明公共设施的有效服务半径没有覆盖需求点b。

通过式(8)最大化公共设施的覆盖范围,以此提高服务质量。

综合考虑上述优化目标,构建多层建筑物公共设施利用优化模型如下:

$$\Phi=\begin{cases}\min G(A)=\sum_{i}\sum_{j\in A}f_{ij}l_{ij}\\ H=\min\sum_{i=1}^{m}(S_i-s)^2\\ \max(Z)=\sum_{a=1}^{n}W_a U_b\end{cases} \tag{9}$$

2　基于萤火虫算法的优化设计

采用萤火虫算法[9-11]求解如式(9)所示的优化模型Φ,以此实现多层建筑物公共设施的优化利用。

在模型求解过程中引入鲍威尔方法(Powell方法),它是一种用于无约束优化问题的直接搜索方法,通过逐步构建和改进一个共轭方向集来寻找函数的最小值点。在每次求解时首先采用萤火虫算法对优化模型的最优解展开全局搜索,以此生成新种群。然后,随机为新种群中的萤火虫个体分配数值$r\in(0,1)$,设置局部搜索概率$p\in(0,1)$,当$r<p$时,萤火虫此时的位置即为优化模型Φ的初始解,再展开Powell局部优化。

采用萤火虫算法实现多层建筑物公共设施优化利用的具体过程如下:

(1)初始化处理萤火虫算法的参数,随机在公共设施优化利用模型Φ的搜索空间内生成N个点$x_i(t)$。

(2)设定萤火虫个体在模型求解过程中的邻居集合为$N_i(t)$,$P_{ij}(t)$代表t时刻第i只萤火虫向其邻居集合$N_i(t)$中第j只萤火虫移动的概率$P_{ij}(t)$,计算公式如下:

$$P_{ij}(t)=[z_i(t)-z_j(t)]/\sum_{k\in N_i(t)}[z_k(t)-z_i(t)] \tag{10}$$

将移动概率$P_{ij}(t)$作为依据,引入轮盘法确定萤火虫在邻居集合内的移动方向,并对萤火虫的位置$x_i(t+1)$展开更新:

$$x_i(t+1)=x_i(t)+\frac{[x_j(t)-x_i(t)]l}{\|x_j(t)-x_i(t)\|} \tag{11}$$

式中:l为移动步长。

(3)设置邻域阈值n_t,在$t+1$时刻对萤火虫在公共设施优化利用模型Φ解空间中的动态决策范围$r_d^i(t+1)$展开计算:

$$r_d^i(t+1)=\min\{r_s,\max\{r_d^i(t)+\delta(n_t-|N_i(t)|)\}\} \tag{12}$$

式中:r_s为感知范围;δ为邻域变化率。

(4)对全部萤火虫在当前模型Φ求解过程中的适应度值$f(x_i)$展开计算,将最优位置以及该位置处的模型解记录在公告板中。

(5)如果当前萤火虫求解模型Φ的次数$t\leqslant 3T/4$时,返回步骤(2)中,否则进入下一步,其中T为最大迭代次数。

(6)针对全部萤火虫个体,通过随机的方式生成数值r,当$r<p$时,将萤火虫当前所处的位置作为优化模型Φ的初始值,并对其展开Powell局部优化,并记录当前群体在模型Φ求解过程中的最优位置以及获取的最优解。如果当前获得的最优位置以及模型Φ最优解优于公告板中的最优位置和最优解,对公告板状态展开更新,否则不更新。

(7)判断模型求解次数是否达到T,如果达到输出公告板中的最优解,否则$t=t+1$,并返回步骤(2)中。

3 实验与分析

为验证基于萤火虫算法的多层建筑物公共设施利用优化设计方法的整体有效性,对其展开测试。测试过程中的实验场地选取具有代表性的多层建筑物,并以儿童公共娱乐设施为例,儿童公共娱乐设施是专为儿童设计的户外或室内空间,旨在提供安全、有趣且富有教育意义的活动环境,以促进儿童的身体发展、社交技能和创造力。

在测试过程中设置基于萤火虫算法的多层建筑物公共设施利用优化设计方法的相关参数,如表1所示。

表1 算法参数设置

Table 1 Algorithm parameter settings

参 数	数值
萤火虫数量/个	100
光强吸收系数	1
步长因子	0.2
最大吸引度	2
步长下降因子	0.98
最大迭代次数	100

选取萤火虫算法、最优供需分配方法以及PSPL调研法展开多层建筑物公共设施利用优化设计,通过可达性、覆盖范围以及使用效率3个方面测试上述方法的设计效果。可达性是指儿童能够轻松到达并使用娱乐设施的程度;覆盖范围涉及设施服务的儿童人口数量和区域;使用效率关注设施的实际使用情况。综合这3个方面的分析,可以为儿童公共娱乐设施的优化设计提供科学依据,确保设施既能满足儿童的娱乐需求,又能实现资源的有效利用和社会公平。

3.1 可达性

选取基尼系数Gini作为评价指标,基尼系数越大表示公共设施的分配越不公平,即某些区域或群体对公共设施的可达性远低于其他区域或群体,存在明显的利用不平等。基尼系数越小表示公共设施的分配越公平,即不同区域或群体对公共设施的可达性较为均衡,利用不平等程度较低。表达式如下:

$$\mathrm{Gini}=\frac{\sum_{i,j}^{n}|A_i-A_j|}{2n^2\bar{A}} \tag{13}$$

式中:$\bar{A}$为人口加权平均值;A_i、A_j为需求点的可达性。

通过式(13)计算3种方法的基尼系数,结果如图1所示。

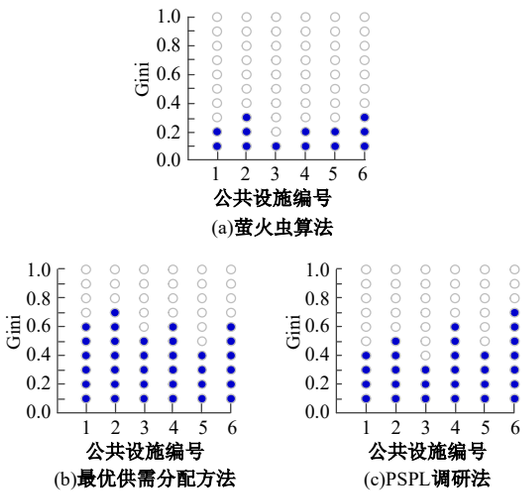

图1 基尼系数

Fig. 1 Gini coefficient

通过上述测试结果可知,经过本文方法优化后,公共设施的基尼系数均较低,表明公共设施的可达性较好,提高了设施布局的公平性。这是因为本文方法提出了一种多目标优化框架,将使用效率最大化、公平最大化以及覆盖范围最大化同时作为优化目标。这种综合考虑多个维度的优化方法,相较于传统单一目标优化,能更全面地满足多层建筑物公共设施布局的需求,确保优化结果既高效又公平,同时具有广泛的覆盖范围。

3.2 覆盖范围

选取一固定区域,采用上述方法展开公共设施优化布局,测试公共设施的覆盖范围,结果如下:分析图2可知,在优化设计中,本文方法充分考虑了用户的需求,通过合理的公共设施布局,确保服务能够惠及目标人群,满足用户群体的使用需求。因此,在相同区域内,本文方法优化设计后的公共设施覆盖面积相对较大,最优供需分配方法以及PSPL调研法优化设计后的公共设施覆盖面积相对较小。由此可知,本文方法优化设计后的公共设施可满足更多需求点的需求。

3.3 使用效率

通过出行路径长度测试公共设施优化设计后的使用效率,出行路径长度越短,使用效率越高,测试结果如下:

分析表2中的数据可知,经过本文方法优化设计后,居民到不同公共设施的出行路径均低于最优供需分配方法以及PSPL调研法的出行路

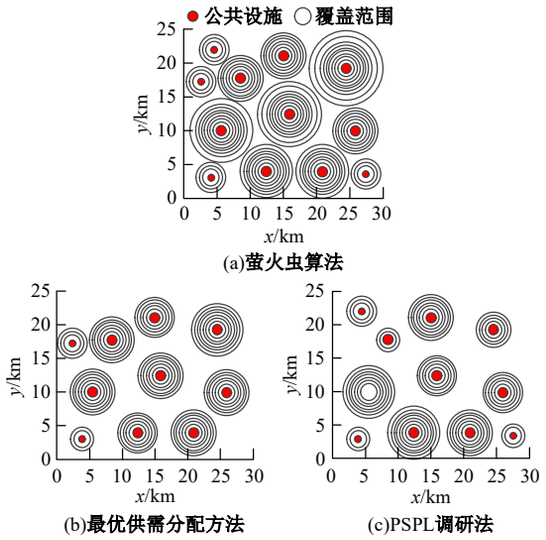

图 2　覆盖范围

Fig. 2　Coverage range

表 2　使用效率

Table 2　Usage efficiency

公共设施编号	出行路径/m		
	萤火虫算法	最优供需分配方法	PSPL 调研法
1	3 215	6 254	5 618
2	3 156	4 315	5 584
3	3 078	5 629	6 305
4	3 629	6 035	6 145
5	3 451	6 157	5 831

径,由此可知,本文方法优化设计后的公共设施具有更高的使用效率。这是因为本文方法将萤火虫算法应用于多层建筑物公共设施利用优化设计中,萤火虫算法通过模拟自然界中萤火虫的发光和吸引行为来寻找最优解,具有全局搜索能力强、算法参数少、易于实现等优点,将其应用于此领域,能够有效解决复杂布局问题,提高求解效率,从而缩短用户的出行距离。

4　结束语

随着城市化进程的加速,多层建筑物成为现代城市空间的重要组成部分,不仅承载着居住、办公等功能,还是城市文化、社交活动的重要载体。其中,公共设施作为多层建筑物的重要组成部分,其设计合理性直接对居民的生活质量产生影响。针对目前优化设计方法存在的问题,本文提出基于萤火虫算法的多层建筑物公共设施利用优化设计方法,该方法从多个目标展开优化设计,建立公共设施利用优化模型,结合萤火虫算法实现模型求解,经验证,该方法具有良好的优化设计效果。

参考文献:

[1] 张金萍, 林丹, 周向丽, 等. 基于改进3SFCA的乡村地区公共医疗设施空间可达性与公平性评价——以海口市为例[J]. 地理科学进展, 2022, 41(4): 636-647.
Zhang Jin-ping, Lin Dan, Zhou Xiang-li, et al. Spatial accessibility and equality of public medical facilities in rural areas based on the improved 3SFCA: a case of Haikou City[J]. Progress in Geography, 2022, 41(4): 636-647.

[2] 许妍. 农村公共设施设计与优化[J]. 包装工程, 2022, 43(20): 343-346.
Xu Yan. Design and optimization of rural public facilities[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(20): 343-346.

[3] 翟石艳, 何新新, 孔云峰, 等. 基于最优供需分配的公共设施空间可达性分析[J]. 地理学报, 2022, 77(4): 1028-1038.
Zhai Shi-yan, He Xin-xin, Kong Yun-feng, et al. Measuring the spatial accessibility of public services by optimal supply-demand allocation[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(4): 1028-1038.

[4] 王海亮, 黎佳, 罗维, 等. 基于步行可达性的高铁站公交设施布局优化[J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(4): 65-70.
Wang Hai-liang, Li Jia, Luo Wei, et al. Optimization of bus facilities layout at high speed rail stations based on pedestrian accessibility[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2023, 40(4): 65-70.

[5] 王馨曼, 杜守帅. 基于使用者角度的旅游乡村公共设施优化研究[J]. 包装工程,2021, 42(24): 382-388.
Wang Xin-man, Du Shou-shuai. Optimization of tourism and rural public facilities based on user perspective[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(24): 382-388.

[6] 陈伟旋, 张言灏, 叶昌东. 基于PSPL调研法的广州地铁五山站外部空间环境中的休憩设施优化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 215-219.
Chen Wei-xuan, Zhang Yan-hao, Ye Chang-dong. Optimization design of rest facilities in the external space of Guangzhou metro Wushan station based on PSPL survey[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 215-219.

[7] 陈阳, 张琳琳, 马仁锋, 等. 城市绿色空间可达性与居民分布的空间匹配与影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 9971-9980.
Chen Yang, Zhang Lin-lin, Ma Ren-feng, et al.

Spatial match between urban residents′ distribution and green space accessibility and its driving force[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 9971-9980.

[8] 赵嘉, 陈丹丹, 肖人彬, 等. 一种基于最大最小策略和非均匀变异的萤火虫算法[J]. 智能系统学报, 2022, 17(1): 116-130.
Zhao Jia, Chen Dan-dan, Xiao Ren-bin, et al. A heterogeneous variation firefly algorithm with maximin strategy[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2022, 17(1): 116-130.

[9] 王文川, 徐雷, 徐冬梅. 阴阳萤火虫算法及其在全局优化问题中的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(1): 64-75.
Wang Wen-chuan, Xu Lei, Xu Dong-mei. Yin-yang firefly algorithm and a research on its application in global optimization problems[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(1): 64-75.

[10] 赵嘉, 陈文平, 肖人彬, 等. 面向多峰优化问题的自主学习萤火虫算法[J]. 控制与决策, 2022, 37(8): 1971-1980.
Zhao Jia, Chen Wen-ping, Xiao Ren-bin, et al. Firefly algorithm based on self-learning for multi-peak optimization problem[J]. Control and Decision, 2022, 37(8): 1971-1980.

[11] 赵俭辉, 陆一鸣, 蔡波. 改进遗传与萤火虫算法的多星多目标任务规划[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 57-63.
Zhao Jian-hui, Lu Yi-ming, Cai Bo. Multi-satellite and multi-objective mission scheduling based on improved genetic and firefly algorithms[J]. Computer Simulation, 2023, 40(4): 57-63.