

基于 BIM 和日照分析的住宅策划方案楼栋布局优化技术研究

阮奕琛¹, 张建平¹, 何田丰¹, 林佳瑞¹

1 清华大学土木工程系, 北京, 100086

【摘要】日照分析是最常见的住宅绿色分析之一,也是住宅楼栋布局的重要参考。目前,针对日照时长的住宅楼栋布局优化多采取人工调整为主、分析计算为辅的方式。本研究提出了基于改进遗传算法的住宅楼栋布局优化算法。并借助 BIM 技术,实现了楼栋布置信息的自动提取及优化结果的自动集成。本研究基于上述技术研发了相应优化工具,并在中建地产西安开元壹号一期组团中测试应用。应用结果表明,该算法能较快收敛,经优化后的场地日照水平能得到较高的提升。

【关键词】BIM; 遗传算法; 日照分析; 住宅策划方案; 楼栋布局优化;

1 引言

随着社会经济的不断发展,人们的生活水平逐渐提高,环境问题日益凸显,绿色住宅的理念开始深入人心。住宅组团日照分析是最常见的住宅绿色分析之一,也是住宅小区策划方案楼栋布局的重要参考。我国《绿色建筑评价标准 GB/T 50378-2006^[1]》和《城市居住区规划设计规范 GB 50180》则针对不同建筑气候区划规定了^[2]日照标准日(大寒日或冬至日)的最小日照时数和有效日照时间带。目前,针对日照时长的住宅策划方案楼栋布局优化多采取人工调整为主、分析计算为辅的方式进行。设计人员需要依靠大量实际经验,借助日照分析软件的分析结果,手工调整住宅策划方案楼栋布局。

住宅策划方案楼栋布局属于布局问题(Layout Problems)的一种^[3],一般属于 NP 完全问题,传统的最优求解算法难以在合理的时间内完成计算任务。遗传算法(Genetic Algorithm)是一种通用的全局优化算法,其通过模拟生物进化过程,在的逐代优化中搜寻较优解,能有效解决 NP 完全问题,已经在许多学科中得到了广泛运用^[4]。

BIM 技术作为建筑信息化领域的最新技术集群,近年来在设计领域发展迅速。BIM 技术的关键优势之一即模型信息的集成与共享。在住宅策划阶段应用 BIM,可以实现住宅组团方案设计和日照分析公用一套模型数据,避免了重复建模问题,同时减少了可能存在的设计矛盾。然而,尽管 BIM 技术从技术上实现了设计与分析的数据互通,但基于分析结果自动优化设计方案的研究和应用却很少。BIM 作为富信息的建筑数据源,在设计与分析更深层次的集成上,仍有很大的研究与开发潜力。

本研究通过改进传统的遗传算法,提出了基于楼栋阴影矩阵的住宅小区建筑组团布局优化算法。通过借助 BIM 技术,实现了住宅策划方案楼栋布置信息的自动提取,以及日照分析优化结果的自动集成。同时,基于上述技术,本研究研发了支持任意数量多边形轮廓楼栋与任意大小矩形场地输入的布局优化工具,并在中建地产西安开元壹号一期组团中测试应用。

2 文献调研

张岚^[5]将建筑场地离散化,单位建筑场地拉伸形成的长方体矩形块作为形成最终建筑

【基金项目】 863 计划“基于全生命周期绿色住宅产品化数字开发技术研究和应用”(2013AA041307)

【作者简介】 阮奕琛(1994-),清华大学土木工程系本科生。E-mail: ryc12@mails.tsinghua.edu.cn

外形的基本元素,根据既有建筑的控制窗口,反推矩形块的最大高度,并以此形成建筑外形。该算法仅应用于在场地布置新建筑且新建筑对既有建筑产生遮挡的情况。

T Vermeulen^[6]等则是以遗传算法为基础,借助太阳辐射分析技术,探讨了城市建筑组团布局优化方法。该文献中算法将场地划分为有限方格,每个方格中放入一栋建筑,然后以方格作为该楼栋的边界约束,从而简化了约束条件。但该研究只能适用于矩形楼栋的离散坐标变化,且方格的划分方式较缺乏说服力。

Kämpf J H^[7]等利用改进遗传算法 MOO 算法与热辐射分析工具 RADIANCE,通过搜寻太阳辐射能与建筑总容积双重目标函数的非支配最优(非帕累托最优),构建了综合建筑形态、布局、高度等信息的建筑组团生成模型。但就布局算法而言,该研究限定建筑只能在给定的一维线路上分布,并不是真实的二维平面布局问题。

3 基于楼栋阴影矩阵与遗传算法的楼栋布局优化算法

3.1 优化问题描述

记场地上第 i 栋楼为 B_i ,其平面位置可由三个坐标唯一表示为 $\mathbf{p}_i(B_i) = (x_i, y_i, \varphi_i)$, x_i, y_i, φ_i 分别对应其 X、Y 方向的平动自由度和绕形心的转动自由度。考虑到建筑朝向通常由户型决定,不宜随意改变,在下文中均不考虑楼栋的转动自由度,于是 $\mathbf{p}_i(B_i) = (x_i, y_i)$ 。将 B_i 在场地平面上所占据的空间记为 $A_i(\mathbf{p}_i)$,相应地将场地范围记为 A_0 。

通过日照分析得到场地日照时长分布后, B_i 的日照情况可基于不同的适应度函数进行评价,显然它与场地上所有建筑的位置都有关,记为 $S_i = f_i(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots)$

布局方式还需要满足约束条件的限制,最基本的约束条件即楼栋不能超出场地及楼栋之间不能重叠:

$$\forall i \neq j \quad A_i(\mathbf{p}_i) \subset A_0, A_i(\mathbf{p}_i) \cap A_j(\mathbf{p}_j) = \emptyset$$

综上,日照优化的数学模型可以阐述为:

$$\begin{aligned} \max \sum_i S_i &= \sum_i f_i(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots) = f(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} A_i(\mathbf{p}_i) \subset A_0 \\ A_i(\mathbf{p}_i) \cap A_j(\mathbf{p}_j) = \emptyset \quad \forall i \neq j \\ \dots \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

在约束条件中也可以加入其它约束信息,如楼栋间距限制、楼栋对正要求等。

3.2 基于 BIM 的楼栋布置信息提取与预处理

日照分析及楼栋布置优化首先需要数据的支持。通过对比常用的住宅概念设计软件,本研究选用清华大学和中建地产有限公司合作研发的“住宅产品策划 BIM 系统(以下简称策划 BIM 系统)”作为优化的数据源。该系统全面应用 BIM 技术,实现了可视化、协同化的住宅策划阶段方案设计。同时,该系统集成了基于“棒影法”的快速平面日照分析功能,日照分析结果云图的方式显示。通过相应数据接口,上述分析结果也导出为日照矩阵的格式。

同时,考虑到遗传算法每次迭代均需要进行日照分析,频繁地调用日照分析将导致优化过程效率非常低。然而,楼栋的阴影形状在平移过程中不会发生改变。因此可以通过对每一个独立的楼栋计算其全天每一时刻的阴影矩阵的预处理,加速算法的速度:

- 1、对于移动的楼栋,根据楼栋位置,平移矩阵中为 0 的元素。
- 2、对每一时刻的所有建筑阴影矩阵每个对应元素取并运算。例如对于某时刻,每个建筑集合形成的阴影矩阵为 \mathbf{S}_i ,所有建筑形成的阴影矩阵 $\Delta \mathbf{S}$ 为:

$$\Delta S = \begin{bmatrix} \Delta S_{11} & \cdots & \Delta S_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta S_{1n} & \cdots & \Delta S_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bigcap_i S_{i11} & \cdots & \bigcap_i S_{im1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bigcap_i S_{i1n} & \cdots & \bigcap_i S_{imn} \end{bmatrix} = \bigcap_i S_i \quad (2)$$

3、对所有时刻的阴影矩阵做矩阵加运算，即最终阴影矩阵 S 为：

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{1n} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{time} \Delta S_{1a} & \cdots & \sum_{time} \Delta S_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{time} \Delta S_{1n} & \cdots & \sum_{time} \Delta S_{mn} \end{bmatrix} = \sum_{time} \Delta S \quad (3)$$

3.3 基于改进遗传算法的楼栋布置优化

1) 对象定义

为将遗传算法运用于该布局优化问题，需首先建立该问题与遗传算法抽象概念之间的联系。本算法的编码对象是待布置的建筑，基因表示建筑的一个自由度，具体定义方式见下表：

表 1 遗传算法对象定义

基因	某幢建筑的一个自由度
染色体	某个方案中的一幢建筑
个体	一个布局方案
种群	若干个布局方案的集合

2) 适应度函数

适应度函数应能评价布局方案的总体日照水平，而方案的日照水平应考虑方案中所有楼栋的日照情况。对特定楼栋，其日照情况评估可取其平面上各角点日照值的平均值，角点日照值可以根据角点坐标在日照分析结果中拾取。

若记 c_{ji} 为 B_i 的第 j 个角点， $S(c_{ji})$ 为该角点对应的日照值，则单个个体的适应度函数可以写成：

$$fitness = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \frac{S(c_{ji})}{m_i} \quad (4)$$

3) 选择算子

在保留最优个体的前提下，对剩余个体采用常规轮盘赌法进行筛选。

4) 突变算子

突变算子作用于基因上，使建筑坐标产生随机变换。为提高效率，突变数直接根据场地范围随机生成，减少了因突变结果不满足约束条件而导致的无效计算。

5) 交叉算子

交叉算子作用于两个个体的若干基因，使两个布局方案上的建筑坐标产生交流。例如，考虑只有两栋楼的情形：

布局 1: $\{p_1(B_1) = (1,2), p_2(B_2) = (10,20)\}$

布局 2: $\{p_1(B_1) = (3,4), p_2(B_2) = (30,40)\}$

将布局 1 中 B_1 的 Y 坐标与布局 2 中 B_2 的 X 坐标交换即得到新的布局方案：

布局 3: $\{p_1(B_1) = (1,30), p_2(B_2) = (10,20)\}$

布局 4: $\{p_1(B_1) = (3,4), p_2(B_2) = (2,40)\}$

6) 微移算子

为改良遗传算法局部搜寻能力较弱的缺陷，引入微移算子作用于染色体上帮助寻找局部最优。具体过程为：随机选择一栋楼，使其在其原位发生一个微小位移，位移的大小方位均随机确定。实例分析结果表明，微移算子的存在可以有效地帮助楼栋跳出相邻楼栋的阴影区，加快局部优化进程，事实上，微移算子也可以看成是一种特殊的突变算子^[2]。

7) 约束条件

布局方案需满足的最基本约束条件为：a)楼栋不得超出场地 b)楼栋之间不得重叠。本研究通过采用楼栋平面包围盒判定楼栋是否满足上述约束条件，即楼栋发生重叠的判据为：

$$\begin{cases} |X_1 - X_2| \leq \frac{1}{2}(a_1 + a_2) \\ |Y_1 - Y_2| \leq \frac{1}{2}(b_1 + b_2) \end{cases} \quad (5)$$

楼栋不超出矩形场地的条件为：

$$\begin{cases} X_{min} \leq X_i \pm \frac{1}{2}a_i \leq X_{max} \\ Y_{min} \leq Y_i \pm \frac{1}{2}b_i \leq Y_{max} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $(X_{min}, X_{max}), (Y_{min}, Y_{max})$ 为矩形场地范围。

由于楼栋形状大多不会过于复杂，且在优化过程中楼栋自然有相互散开的趋势，上述近似对算法本身不会有太多影响，但省去了复杂的判断过程，大大提高了效率。

8) 算法流程

算法的具体流程如图 6 所示：先通过突变算子由初始方案生成含 N 个个体的初始种群，然后经选择作用选出 M 个亲本，再以 p_C 的概率通过交叉运算得到 $Q = M \times C_E$ 个子代（称 C_E 为过度繁殖系数），这些子代经过突变和微移作用后再次经过选择作用得到下一代种群。当种群数达到世代上限 T_{max} 或经连续若干代后日照增长仍小于一定值时则可结束优化。同时为保证最优解性状不被破坏，在生成子代的过程中均保留亲本，且亲本不参与突变与微移运算：

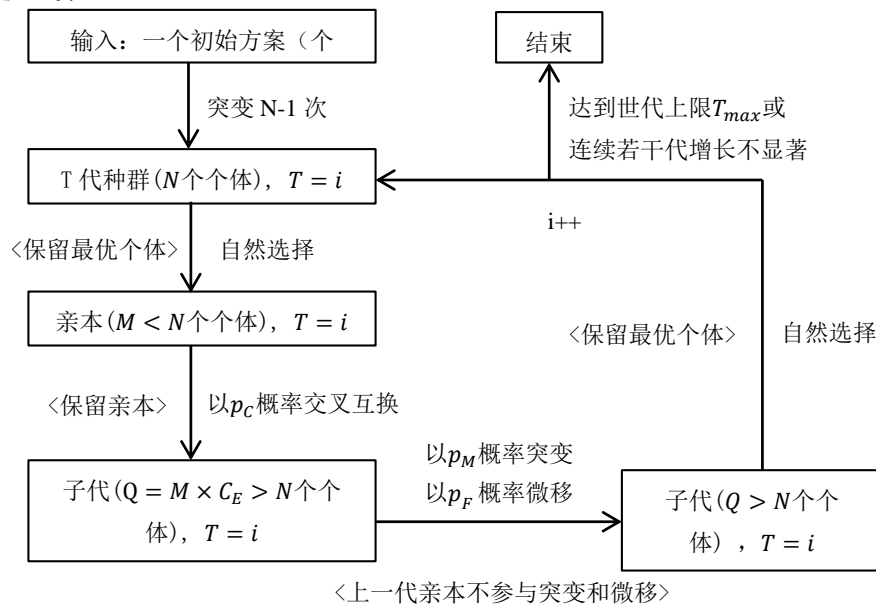


图 1 遗传算法流程图

3.4 基于 BIM 的优化结果集成

上述改进遗传算法的优化结果，可以通过之前研发的 BIM 数据交互接口集成回策划 BIM 系统。作为策划方案设计平台，该系统可以追踪每一栋楼的编号，并在图形平台上直观显示。同时，其日照分析结果也可以以云图的形式展示，便于设计人员比对优化前后的效果。具体效果请参见“实例验证与分析”一节。

4 实例验证与分析

基于上述技术，本研究基于清华大学与中建地产有限公司合作研发的住宅产品策划 BIM 系统研发了住宅策划布置方案自动优化工具。并以中建地产西安开元壹号一期住宅组团作为算例进行了算法的验证和分析。该项目包含 38 栋高度各异的住宅楼。

首先，策划 BIM 系统对项目中的每一栋楼都计算了每一时刻对应的阴影矩阵。同时，借助日照分析导出接口，将相应的阴影矩阵导入优化工具中。

优化过程中使用的具体参数见表 2。程序中还限制了若连续 500 代日照值未超过 0.5h 则停止优化，但此次优化中并未出现因此产生的提前终止。

表 2 算例参数

场地范围	$X=[400, 700]$, $Y=[-550, -50]$
种群规模 N	8
亲代数量 M	6
过度繁殖系数 C_E	2
交叉概率 p_C	0.6
突变概率 p_M	0.4
微调概率 p_F	0.8
世代上限 T_{max}	1000

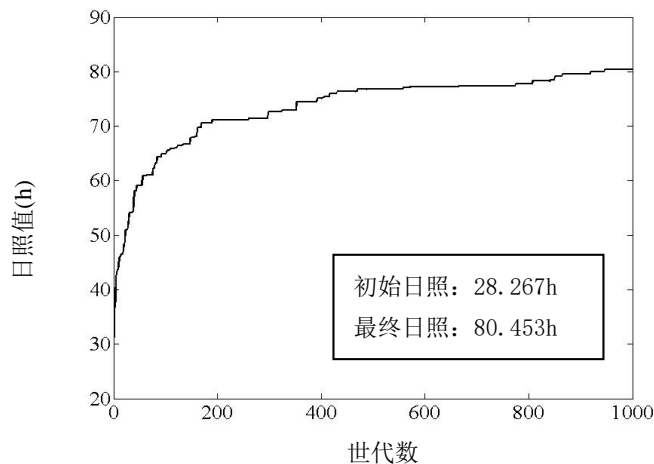


图 2 优化过程曲线*

*注：由于采用楼栋轮廓各角点日照时长平均值的方式计算楼栋的日照时长，所有楼栋背阴面也计入其中，因此与传统日照时长计算相比数值较低。此举主要考虑楼栋的房间布置及开窗情况未知的情况，以满足普遍应用的需求，并不影响优化结果。

可见，经 1000 代优化后，总日照值提高了近两倍，且在 200 代时就已完成超过了 80% 的收敛。从布局结果来看，楼栋经优化后实现了充分分散，分布位置较为均匀，这也与直观感觉相符。可见，该程序具有较好的优化效果和较高的优化效率。

上述结果通过集成接口集成至策划 BIM 系统中，即可追踪每栋楼调整的位置，并可用过云图可视化对比优化前后的日照分析结果。

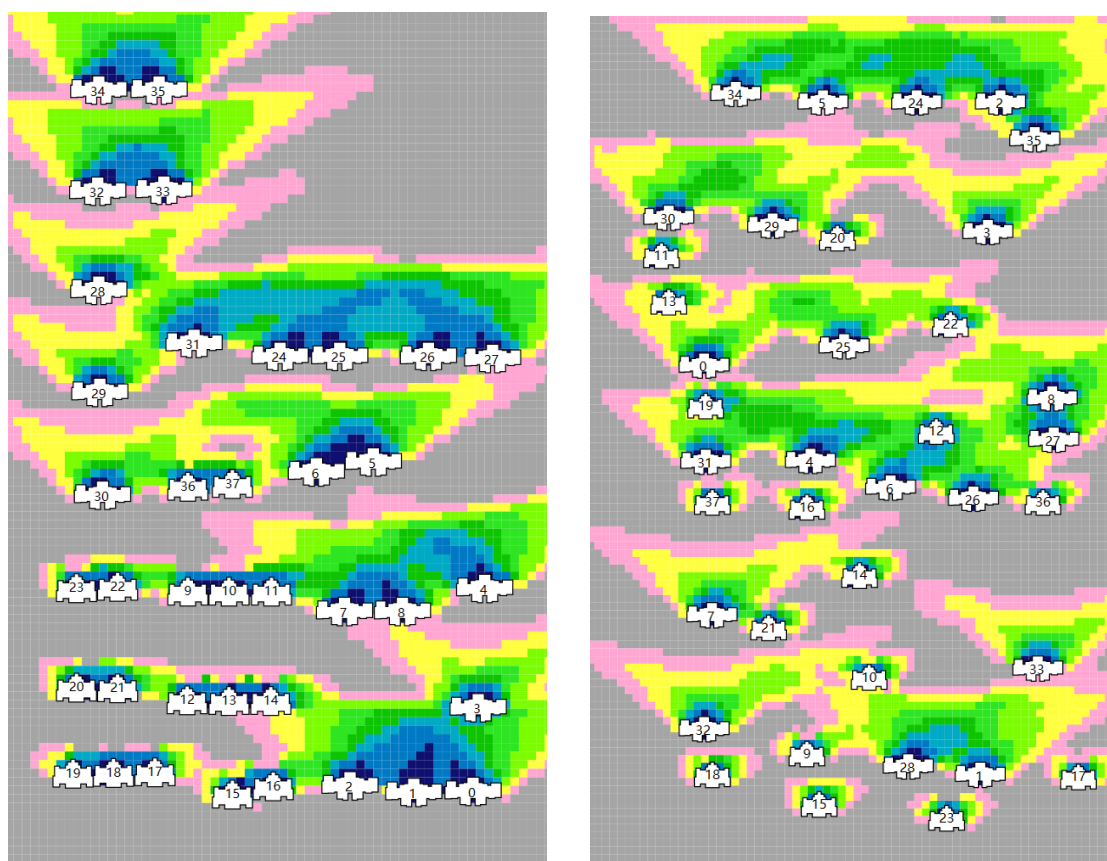


图3 优化前后住宅小区漏洞布置对照（左：优化前，右：优化后）

5 结论与展望

本研究通过改进传统的遗传算法，提出了基于楼栋阴影矩阵的住宅小区建筑组团布局优化算法，初步探索了针对日照时长的自动化住宅策划方案楼栋布局优化技术。同时借助 BIM 技术，实现了住宅策划方案楼栋布置信息的自动提取，以及日照分析优化结果的自动集成。本研究基于上述技术，研发了支持任意数量多边形轮廓楼栋与任意大小矩形场地输入的布局优化工具，并在中建地产西安开元壹号一期组团中测试应用。应用结果表明，该算法能较快收敛，经优化后的场地日照水平能得到较高的提升。

参考文献

- [1] GB/T 50378-2006. 绿色建筑评价标准[S]. 2006
- [2] GB 50180—93. 城市居住区规划设计规范[S]. 1994
- [3] 查建中, 唐晓君, 陆一平. 布局及布置设计问题求解自动化的理论与方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(8):705-712.
- [4] 席裕庚, 柴天佑, 恽为民. 遗传算法综述[J]. 控制理论与应用, 1996, (6):697-708.
- [5] 张岚. 遗传算法在日照约束下拟建建筑极限容积计算中的应用[D]. 河北工业大学, 2006.
- [6] Vermeulen T, Knopf-Lenoir C, Villon P, et al. Urban layout optimization framework to maximize direct solar irradiation[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2015, 51: 1-12.
- [7] Kämpf J H, Montavon M, Bunyesc J, et al. Optimisation of buildings' solar irradiation availability[J]. Solar energy, 2010, 84(4): 596-603.