

节能导向的建筑空间布局自动生成与优化研究

黄佩莹², 沈鹏元^{1*}

¹ 清华大学深圳国际研究生院, 未来人居研究院, 518055, 中国

² 中建海龙科技有限公司, 518055, 中国

摘要: 本论文旨在探索节能导向的建筑空间布局的自动生成与优化方法。为此, 本研究开发了一套三维空间布局自动生成方法, 结合了多目标进化算法和能耗模拟, 实现了三维空间布局的自动化生成和评估, 以寻找并优化符合建筑实用性要求、同时具备较低能耗的节能建筑功能空间布局方案。在案例研究中, 我们以深圳一栋高层办公建筑为例, 通过本研究的方法生成了7368个方案并提供了优化后的空间布局方案的可视化参考, 验证了该方法的有效性。实验结果发现固定建筑轮廓和围护结构下的空间布局对建筑能耗存在影响, 提出的方法最高达到了5.5%的节能效果。相比传统正向工作流程的能耗预测方法, 该方法基于逆向工作流程能够更高效地搜索出全局最优的节能解决方案, 适用于多层的建筑功能排布设计, 具有更佳的泛用性和适用性。

关键词: 绿色建筑; 计算性设计; 建筑节能; 建筑空间布局; 自动化设计; 生成式设计; 进化算法

Keywords: green building, computational design, functional layout, automated design, generative design, evolutionary algorithm

引言

根据联合国环境规划署对的数据显示^[1], 2020年全球建筑运行能耗占全球能耗的比例为30%, 随着人们对居住和工作环境需求的提升, 建筑能耗也在不断增加。早期设计对建筑能源性能影响显著, 超过40%的节能潜力来自于早期设计阶段^[2]。为了减少碳排放, 实现碳中和目标, 节能建筑设计至关重要。目前, 节能导向设计的研究主要关注建筑形式和外立面性能, 而对空间布局与能源性能的关系的研究仍相对不足。较多研究已经证实建筑轮廓与建筑性能相关^[3-5], 与此同时固定建筑轮廓下的功能排布也会影响整体的建筑能源性能^[6-10]。作为早期设计中的一环, 如何进行节能导向的建筑空间布局设计是一个值得研究的问题。本文讨论的空间布局指的是在固定的维护结构、空调系统下的功能空间规划和排布方式。具体来说是从节能的角度出发, 探讨空间布局对建筑能耗的影响, 并研究如何在建筑设计中通过在固定建筑轮廓下优化各功能空间的排布来提升建筑的能源效率。

1 文献综述

近年来, 随着计算机技术发展, 除了基础的性能模拟分析, 基于建筑性能的自动化建筑设计方法也被提出, 其中的逆向工作流由于其广泛地搜索最优解的能力, 在早期的建筑设计参考问题求解研究中显得更具潜力。Michalek^[11, 12]基于数学规划的方法探索了空间布局的自动生成, 通过控制不同空间的位置, 墙壁之间的距离和窗户的大小, 使生成平面满足最小供暖制冷需求、最小照明成本等标准; Rodrigues^[13, 14]等人以单层和双层住宅作为研究案例, 通过遗传算法和随机爬山技术优化了自动生成的空间布局, 并结合了热舒适性得分对生成方案进行评分; Yair Schwartz^[15]等人结合热性能分析开发了一种自动化生成基于矩形的小型住宅平面布局的算法; Jingyu Zhang^[16]等人探讨了在绿色住宅建筑的早期设计阶段, 通过参数化优化实现建筑能耗效率、采光、通风和热舒适性的潜力, 并以北京一住宅建筑

项为研究案例通过选择 27 个设计参数进行优化，并提供了性能敏感度分析以指导设计决策。两项适用于高层办公建筑：Yi^[17, 18]等人以空间填充曲线的方式设计了一个高层办公空间自动生成的算法，将建筑热性能模拟与模拟退火算法相结合，开发了一种优化热分区和空间布局的方法；Du^[19]等人开发了一种高层办公建筑的平面生成算法，并结合能耗模拟研究了不同平面布局之间的能耗需求差距。还有两项可适用于公共建筑：Ipek Gürsel Dino^[20, 21]等人利用进化算法开发了一套工具，可以根据面积需求生成三维平面布局，并与 EnergyPlus 联动结合开窗方式和大小进行能耗模拟和采光性能评估；Halawa^[22]等人在文中提出了一种用于门诊平面布局设计的数学模型，优化目标是最大化的自然采光和最小化的患者步行距离。该模型考虑了自然采光约束、POD 结构、空间旋转等因素。但该研究中的自然采光数据是在平面布局优化前进行模拟获得的，没有考虑平面空间布局变化对整体自然采光的影响。

然而至今关于绿色性能导向的空间布局自动生成与优化的研究数量较少，且各项研究具有其局限性。大部分研究只能适用于某种特定的建筑类型，并且以住宅建筑居多^[11-15, 18, 19]，对于其他建筑类型的研究较少。而在泛用性更强的空间布局生成及优化研究中，有的方法生成的平面布局空间实用性较差^[19]，或是能耗评估方法准确性不足^[18, 22]等。另外还存在缺乏自动化流程^[18, 19]和模拟运算耗时过长^[19]等情况。该领域研究面临的主要挑战包括以下几方面。首先，方法与应用对象的匹配性问题。现有方法多适用于单层平面设计，而忽略了多层建筑整体功能排布的复杂性，难以全面考虑多层建筑的能耗影响。其次，计算性设计思维中的绿色性能优化忽视了建筑设计中的实际需求，导致模拟的最优解在实践中可能不适用。最后，尽管计算机运算能力提高，硬件成本下降，但用户仍需在有限的资源和时间内完成运算，确保方法的可用性。为解决这些问题，需开发适用于多层建筑的整体功能排布方法，考虑实际建筑需求，优化绿色性能设计，并在有限资源和时间内实现有效运算。

2 节能导向的空间布局生成与优化流程

本研究基于自动化设计中的逆向 workflow 构建了一套节能导向的建筑空间布局生成与优化框架（图 1），旨在于庞大的搜索空间中筛选出节能且符合使用要求的整体空间布局方案，整体框架流程在 Rhino-Grasshopper 平台中实现。三维功能排布算法模块是本文的核心，它负责根据预设的规则和参数生成多样化的建筑布局方案。该模块通过 rhino-grasshopper 和 python 自编程程序联动实现建筑功能的自动化排布和建筑模型的创建，被封装至 grasshopper 中以实现与整个工作流的集成。其次是结合建筑适用性评分和建筑能耗模拟的方案优化。其中建筑适用性评分在三维功能排布算法模块中计算得出，建筑能耗数据则通过 honeybee 进行能耗模拟获得，然后使用 Octopus 工具给予进化算法进行多目标优化。最后，结果聚类模块利用 k-means 算法^[23]对优化结果进行分类，以便于设计者进行分析和选择。该模块的编写采用了 Python 语言，并与 Grasshopper 中的部分组件相结合，共同完成优化结果的聚类 and 可视化工作。

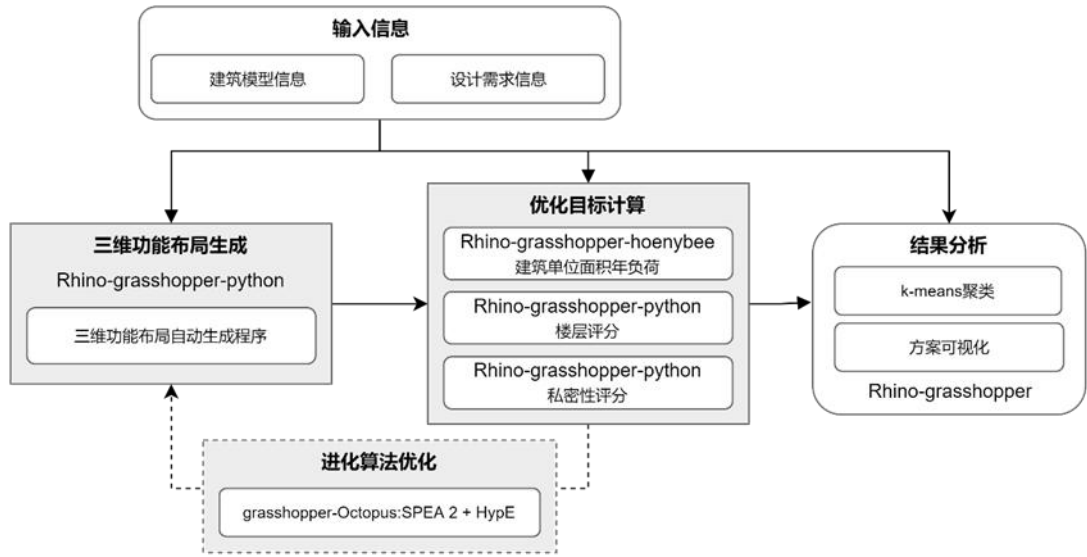


图 1 节能导向的建筑功能布局生成与优化框架

3 空间布局生成与优化方法

3.1 空间布局表达方式

本研究的空间布局采用了网格系统的表示方式，与建筑的柱网设计对应。很多以网格系统表示的空间布局必须符合正交网格的规则，因此会导致生成的方案泛用性太低，只适用于一些理想的简单几何造型的建筑方案^[18, 20]。而在本研究中，通过建立理想三维网格模型再将其投影到不规则三维建筑模型的方式，使该方法能适用于一定复杂度以内的不规则建筑形体，提高了其泛用性和适用性。

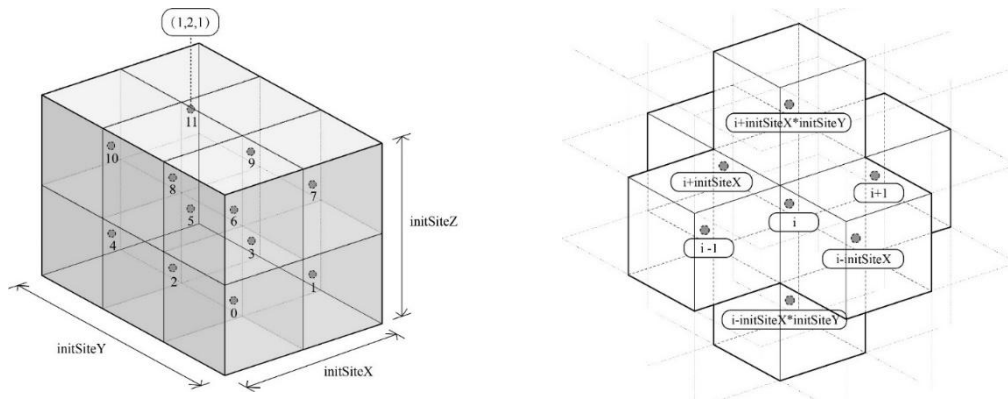


图 2 理想网格模型与其相邻空间单元

3.2 空间布局生成方式

三维空间布局生成模块需要输入两组参数（图 3 左），一组是包含使用者需求的关于各个分区具体方案信息的固定参数（表 1），用于定义方案生成的需求和生成的结束条件。另一组是关于生成过程的规则参数（表 2），是可变参数，用于生成不同的方案结果。

表 1 方案信息参数

方案信息参数	参数名称	必要输入	参数描述
各功能区名称	<i>zone</i>	是	该参数用于区分不同的功能区域,作为每个区域的索引。
各功能区面积	<i>area_demand</i>	是	该参数是各功能面积的需求,用于作为每个功能区域生长结束的条件。
各功能区面积容差	<i>area_tolerance</i>	否	该参数用于设定各个功能区域的面积容差,默认为 0.9,即达到要求的 90%该方案被视为合理的输出方案
各功能区规定楼层	<i>floor</i>	否	该参数用于将某些功能区域限定在指定的楼层排布,若无规定所处楼层则默认该功能空间可分配到任意楼层。
垂直交通核的数量	<i>vt_count</i>	否	两项参数用于生成垂直交通核区域。如果不输入该参数,则会跳过垂直交通区域生成的步骤。
垂直交通面积占比	<i>vt_percentage</i>	否	

表 2 生成规则参数

生成规则参数	参数名称	参数描述
各功能区的起始单元	<i>start_unit</i>	该参数影响了每个功能区域的开始生长位置。
各功能区各方向的生长步长	<i>step_len</i>	该参数影响了每个功能区域在东南西北上下六个方向的比例。
各功能区各方向的生长顺序	<i>direction</i>	该参数决定了每个功能在东南西北上下六个方向的生长顺序。
垂直交通核首层平面的起始单元	<i>vt_start_unit</i>	当使用者启用核心筒生成模块时需要此参数。核心筒的起始单元选择被限制在首层的最小投影面中,以此确保垂直交通能到达所有楼层。
垂直交通核首层平面各方向生长步长	<i>vt_step_len</i>	当使用者启用核心筒生成模块时需要此参数。该参数影响了核心筒首层平面的水平方向比例。
垂直交通核首层平面方向的生长顺序	<i>vt_direction</i>	当使用者启用核心筒生成模块时需要此参数。该参数决定了核心筒首层平面在水平上各个方向的生长顺序。

三维空间布局算法的设计考虑了各功能空间的面积需求和区域连通性的问题。在该算法中,所谓的"生长"是指将空置的邻近空间单元改变为与该空间单元相同的状态(图 3),以增加某个实体区域的面积。具体的实现过程使用 Python 编写。这个布局生成方法的实现依赖于在不同的生成规则参数引导下相邻空间单元的状态变化。该方法通过合理的起始单

元分配和连续的生长以及填充过程，可以快速有效地生成具有规定面积和布局特征的三维空间布局。

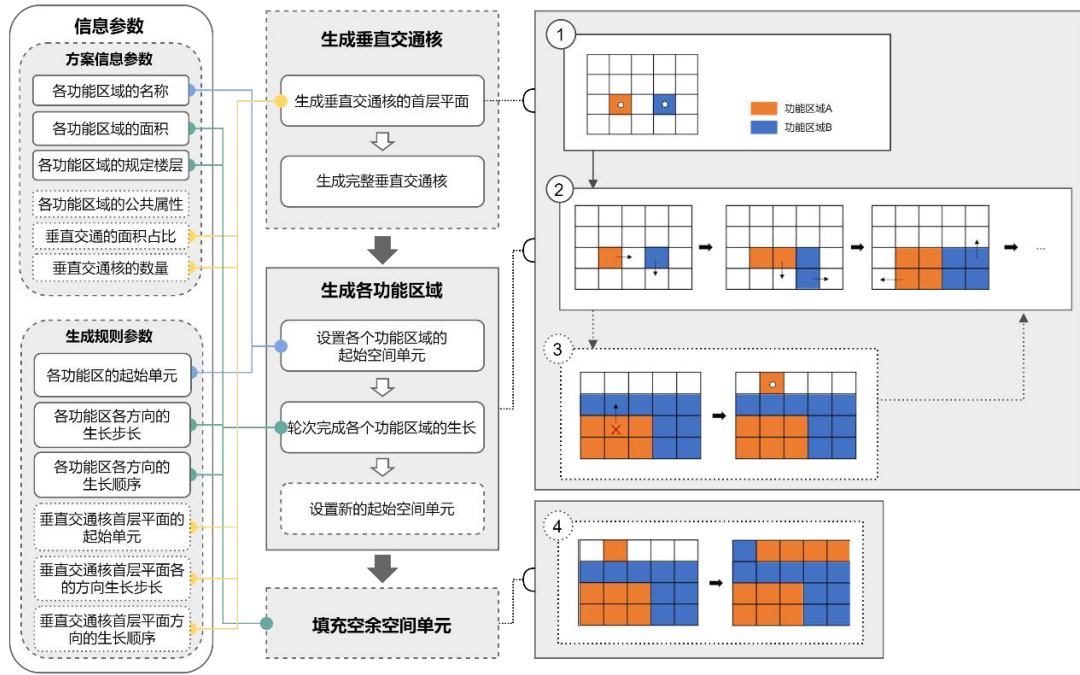


图 3 生成逻辑示意图

3.3 空间布局多目标优化

在本研究中布局的优化旨在寻求符合建筑使用要求的建筑能源性能最佳解。为了达到该优化目标，多目标进化算法^[24]被应用于进行该问题的研究。在工具平台的选择上，本研究采用了 grasshopper 平台上的插件 Octopus^[25, 26]。

3.3.1 决策变量

本问题的决策变量为相同环境，功能和规定面积下的空间布局方式。用于进化算法的基因参数总共有三组，与生成规则参数相对应，每组参数对应一个空间布局方案。空间布局方案图像和生成规则参数对应着遗传算法中的表现性和基因型。使用生成规则参数而非空间布局图像本身作为基因型的优势是，能够用较少的基因参数数量进行优化的同时能解决空间布局单元之间的连续性问题。另外，由于原参数非连续且取值范围均不相同，因此在该环节中，对所有基因变量进行线性映射，将其均匀映射到 $[0, 1]$ 区间内，使得每个基因的取值范围一致，避免了取值范围不匹配的问题。

3.3.2 优化目标

- 单位建筑面积年负荷

本研究采用了建筑单位面积年负荷 $E_{annualLoad}$ 用于评价建筑方案的能源效率，单位为 $kW \cdot h/(m^2)$ 。建筑单位面积年负荷是指建筑物在一年内消耗的能源总量与建筑物的总建筑面积之比，包括建筑供暖能耗，制冷能耗，采光能耗和设备能耗（公式 1）。模拟工具选择了以 EnergyPlus 为核心的 Honeybee 插件。

$$E_{annualLoad} = Q_{heating} + Q_{cooling} + Q_{lighting} + Q_{equipment} \quad \text{公式 1}$$

- 楼层评分

本项评分旨在评估多层建筑的空间布局方案的楼层排布合理性。使用者可以根据需求对指定的功能设定为靠高楼层排布或者靠低楼层排布，三维空间布局生成模块会根据需求计算出楼层评分以供评估和优化（公式 3）。评分越接近于 1 代表越不符合设定的楼层需求，而越趋于 0 则代表楼层排布更合理。最后使用加权平均分计算方法通过给评分更大的值分配更大的权重（公式 2），从而减少过于不合理的排布结果。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i^3}{\sum_{i=1}^n S_i^2} \quad \text{公式 2}$$

$$S_f = \begin{cases} \frac{F - F_z}{F - 1}, & \text{if } D_f = h \\ \frac{F_z}{F - 1}, & \text{if } D_f = l \end{cases} \quad \text{公式 3}$$

S_f : 该功能平面区域的楼层评分;

F : 建筑的地上总层数;

F_z : 功能区所在楼层数;

D_f : 功能区的层高需求设置，需排布在高楼层时为 h ，需排布于低楼层时为 l 。

- 私密性评分

私密性评分参考了空间句法中的连接性概念，它反映了功能区域在整体建筑中与其他区域邻近排布的合理性，从而评估该功能区域的私密性程度^[27, 28]。连接性指的是一个节点与其他节点相连的节点数之和，用于描述和分析不同空间元素之间的连接、关系和可达性。在本项评分中，每一个功能平面区域被视为一个独立的空间元素，其连接度为其邻近的功能种类数量，邻近的功能种类越多，连接度越高。当某一功能被设定为私密区域，三维功能生成模块则会根据其对应的匹配功能计算器私密性评分（公式 4）。对于每一个具有私密性需求的功能平面区域，本环节会统计与不匹配的相邻功能数量，从而计算其私密性分数，越趋近于 0 则说明该功能区域的私密性越好。同样的最后方案的整体私密性评分采用了加权平均分计算的方式处理（公式 2），以减少优化中过于不合理的方案。

$$S_p = \frac{\sum_{i=1}^{C_a} \begin{cases} 0, & \text{if } Fu_i \text{ in } Fu_m \\ 1, & \text{if } Fu_i \text{ not in } Fu_m \end{cases}}{C_f - C_m - 1} \quad \text{公式 4}$$

S_p : 该功能平面区域的私密性评分;

Fu_i : 邻近平面区域的功能;

Fu_m : 与该功能配套的功能;

C_a : 与该功能平面区域相邻的其他平面区域的数量;

C_f : 所有功能种类的数量;

C_m : 与该功能配套的功能种类的数量。

3.3.3 结果聚类

结果聚类模块采用了 k-means 聚类算法^[23]对生成的帕累托前沿解^[29]方案进行聚类分析, 聚类的依据是这些解的优化目标相似度, 本模块由 python 编写。通过对生成的帕累托前沿解方案进行 k-means 聚类分析, 可以显著简化决策过程, 使使用者能够快速找到具有代表性的优化方案。

聚类过程完成后, 在 Grasshopper 的可视化模块中对每个簇中建筑单位面积年负荷最低的方案进行详细的可视化展示。可视化展示的内容包括各个方案的各层平面图、建筑能耗相关数据、建筑分区模型以及建筑能耗模型示意图等。通过这些直观的图像和数据, 为建筑师提供直接且易于理解的设计参考。

4 案例研究

4.1 案例实验设置

本研究以中国广东省深圳市的一座综合高层办公建筑为例进行三维布局生成测试, 评估生成的建筑布局方案的节能和实用效果, 验证本文方法框架的有效性。案例建筑共 19 层, 总建筑面积 19400 m², 建筑形体和待排布功能区域如图 4 所示, 其各个功能区域的基础参数基础信息如表 3 所示。本实验采用传统照明设计, 照明负荷仅与建筑面积相关。本项目采用了深圳市的经典气象年数据进行模拟分析。该建筑正立面与后立面的窗墙比被设定为 30%, 侧立面的窗墙比为 50%。通过三维功能排布模块与 honeybee 模块的联动, 程序根据预设的窗墙比参数自动建立建筑的围护结构, 从而实现建筑能耗模型的自动构建 (图 5)。所有能耗模拟参数信息在 Rhino-grasshopper 的 honeybee-energy 相应模块中被输入, 结合能耗模拟模型为建筑能耗的模拟和评估做准备。

表 3 各个功能区的基础参数基础信息

功能名称	人均占有 建筑面积 (m ² /人)	电气设备 功率密度 (W/m ²)	照明功率 密度值 (W/m ²)	楼层设置
单元式办公室	10	15	8	/
开放式办公室	8	15	8	/
研发室	15	20	8	/
会议室	10	12	12	/
商业	15	12	12	低
交通	8	8	8	/
食堂	8	15	12	低
宿舍	25	15	6	高

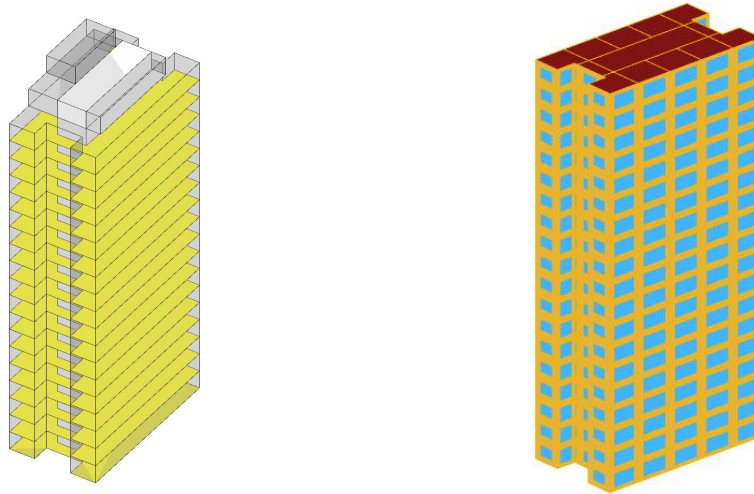


图 4 建筑形体和待排布功能区域

商业和食堂功能被设置为靠近低楼层排布，以获得更好的交通可达性，宿舍被设置为靠近高楼层排布以减少来自其他功能干扰。商业与食堂被设置为公共的区域，也就是说在私密性评分中并不会计算这两个区域的相关评分。宿舍被设置为独立的私密区域，且没有关联功能，即宿舍功能被期望排布在完全独立的区域。单元式办公室，开放式办公室，研发室，会议室被设置为相互关联的功能组团，当它们邻近排布且没有其他邻近功能时对应的方案将获得更高的私密性评分。对应模块会根据这些设置计算分析不同的空间布局方案的楼层评分和私密性评分，以评价方案合理性。

进化算法中设置的种群大小为 50。精英策略通过保留适应度高的个体并直接传递给下一代，有助于保留最佳解，从而提高算法的性能。考虑到精英个体数量太多会导致多样性过少而陷入局部最优解，因此在本研究中精英个体设置的比例为 10%。变异操作是为了增加搜索空间的多样性，避免陷入局部最优解。突变率和变异概率选择了 30%，这意味着每一代中有少数个体会执行变异操作以增加多样性。本实验以最大迭代次数 100 作为优化的终止条件，以避免不必要的计算。

4.2 优化结果分析

本次实验经历 80 次迭代计算后总共生成了 7368 个历史解和 28 个非支配解，从 1 代到 80 代的所有历史解和帕累托前沿曲面如图 6 所示。表 4 展示了所有历史解的目标参数范围和最大降低幅度。所有历史解的建筑单位面积年负荷范围在 $253.3 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2)$ 到 $268.08 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2)$ 之间，相差 $14.78 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2)$ ，最大降幅为 5.51%，其中制冷负荷的减少起到了主要作用。在 80 次的迭代计算过程中，每一代的建筑单位面积年负荷的平均值从初始的 $261.89 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2)$ 一直下降至第 80 代的 $258.3 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2)$ 。建筑单位面积年负荷的最小值也从第一代的 $258.33 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2)$ 开始下降到第 75 代下降至最低值 $253.3 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2)$ 。

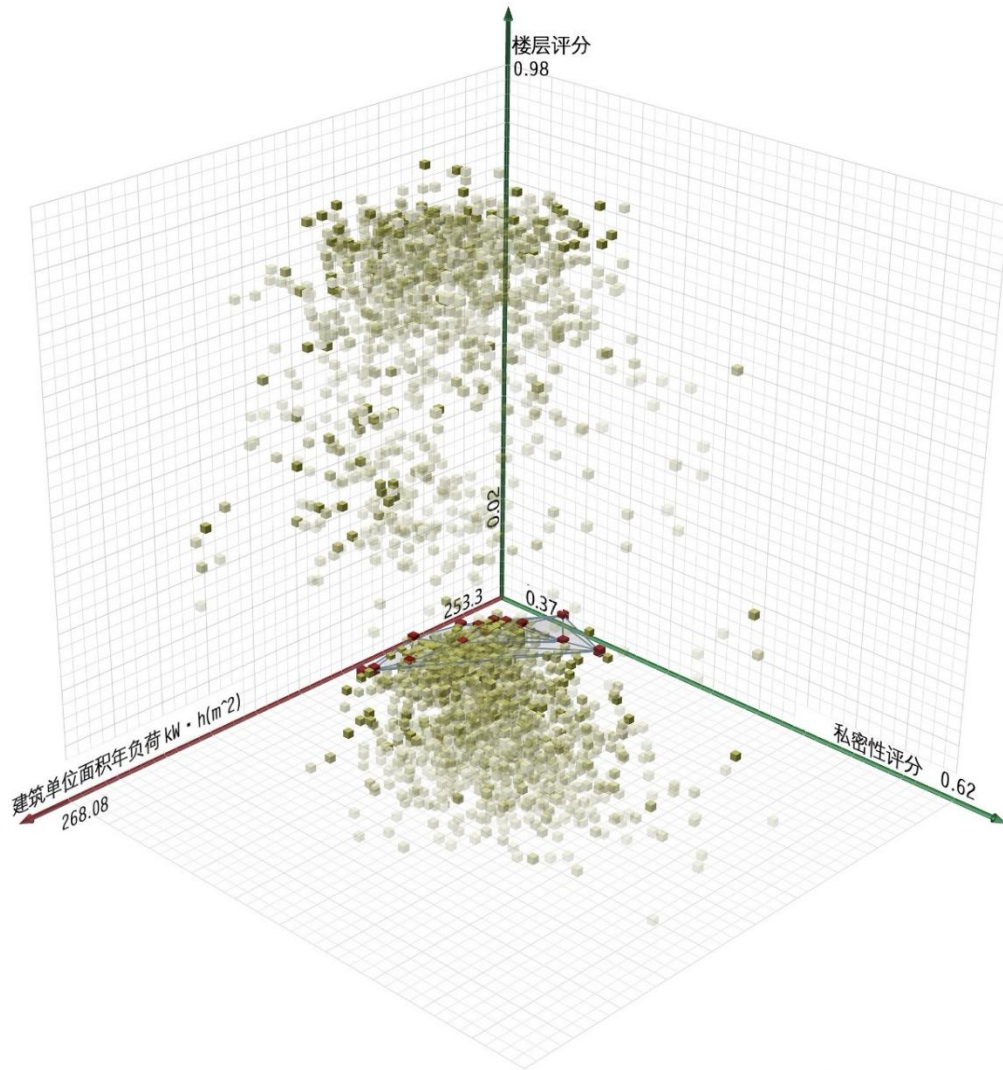


图 6 优化结果

表 4 所有历史解参数范围

参数名称	参数描述	最小值	最大值	差值	最大降幅%
$E_{annualLoad}$	单位建筑面积年负荷	253.30	268.08	14.78	5.51
$S_{private}$	私密性评分	0.37	0.62	0.25	40.32
S_{floor}	楼层评分	0.02	0.98	0.96	97.96
$E_{cooling}$	制冷负荷	187.21	201.33	14.12	7.01
$E_{heating}$	采暖负荷	0.14	0.90	0.76	84.44
E_{light}	灯光负荷	25.41	26.92	1.51	5.61
$E_{equipment}$	设备负荷	36.02	37.64	1.62	4.30

本实验设置了三簇聚类，将实验结果的 28 个帕累托前沿解被划分为了三类，每一簇中建筑单位面积年负荷最低的方案被选出进行可视化展示（表 5，图 7）。三个方案在功能分布合理性方面都表现较为优秀。食堂餐饮与配套商业排布于低楼层，而宿舍区域集中排布

于顶层部分，它们的楼层评分均接近于 0。优化过程中考虑了相邻功能的匹配性，三个方案的私密性评分在所有历史解中也呈现较好的分数。

表 5 聚类结果方案详细信息

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
建筑能耗 $kW \cdot h/(m^2)$	253.30	257.59	255.85
私密性评分	0.41	0.39	0.39
楼层评分	0.04	0.02	0.02
制冷负荷 $kW \cdot h/(m^2)$	187.21	190.60	189.31
采暖负荷 $kW \cdot h/(m^2)$	0.74	0.77	0.73
灯光负荷 $kW \cdot h/(m^2)$	25.72	25.62	25.76
设备负荷 $kW \cdot h/(m^2)$	36.45	37.10	36.91

分区示意

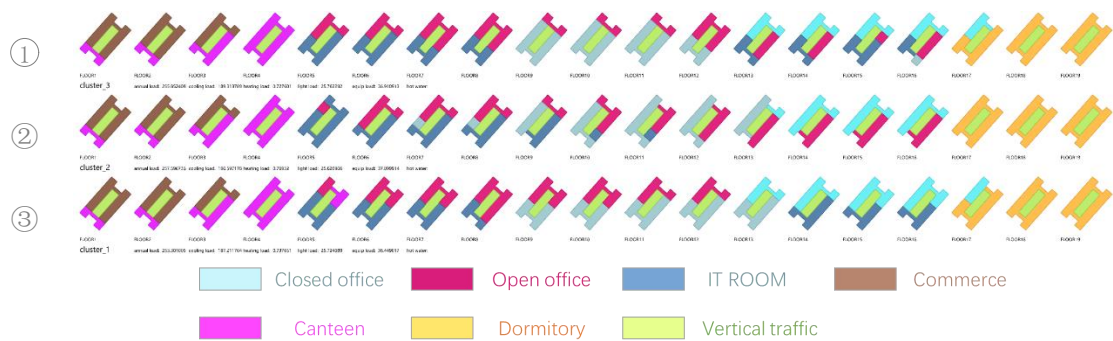
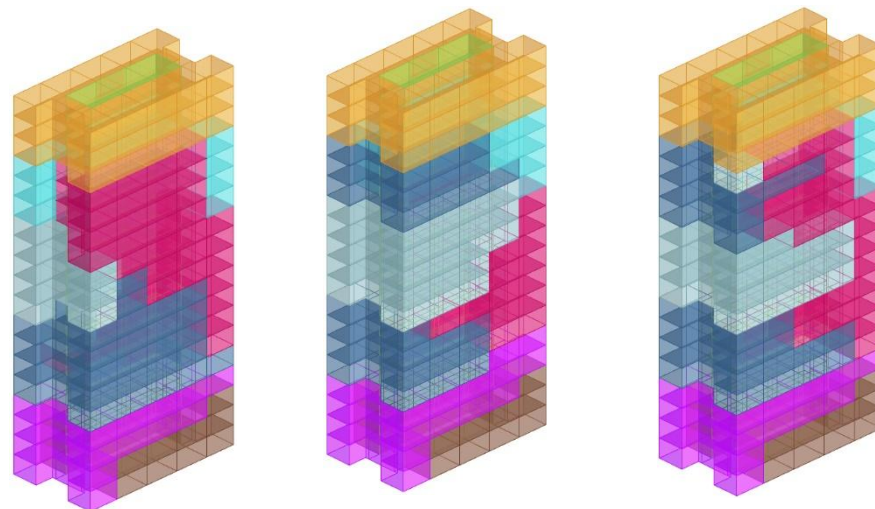


图 7 功能分区方案平面示意图

5 结论与展望

本研究基于计算性设计探索了早期建筑设计中的节能优化可能性，主要关注于固定轮廓下建筑空间布局对建筑能耗的影响。基于逆向工作流程，我们成功开发了一个三维空间分配算法工具，利用多目标进化算法，实现了自动生成三维空间布局并进行能耗模拟评估的自动化流程，集成于 Rhino-grasshopper 平台中。该方法具有广泛适用性，并结合了合理的几何约束和空间句法原理，保证了布局方案的适用性和节能性。通过案例研究发现，在固定的建筑形体轮廓和围护结构下，空间布局对建筑能耗存在影响，本文提出的方法最大达到了 5.5% 的节能效果。该节能导向的空间布局生成和优化方法能有效地生成符合要求的建筑功能方案，并且能提供可视化图表以供设计师参考。该方法未来还可以进一步探索更详细的建筑空间布局因素，以及在不同气候条件下的影响效果等。

参考文献

- [1] IEA. International Energy Agency [M]. 2022.
- [2] HEMSATH T L. CONCEPTUAL ENERGY MODELING FOR ARCHITECTURE, PLANNING AND DESIGN: IMPACT OF USING BUILDING PERFORMANCE SIMULATION IN EARLY DESIGN STAGES [J]. 3th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013,
- [3] KHEIRI F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 92(897-920).
- [4] PACHECO R, ORDÓÑEZ J, MARTÍNEZ G. Energy efficient design of building: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3559-73.
- [5] HEMSATH T L, ALAGHEBAND BANDHOSSEINI K. Sensitivity analysis evaluating basic building geometry's effect on energy use [J]. Renewable Energy, 2015, 76(526-38).
- [6] DU T, JANSEN S, TURRIN M, et al. Effects of Architectural Space Layouts on Energy Performance: A Review [J]. Sustainability, 2020, 12(5):
- [7] DU T, JANSEN S, TURRIN M, et al. Effect of space layouts on the energy performance of office buildings in three climates [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39(
- [8] FILBERT MUSAU K S. Space Planning and Energy Efficiency in Office Buildings: The Role of Spatial and Temporal Diversity [J]. Architectural Science Review, 2008, 15.2): 133-45.
- [9] 何成. 基于低能耗目标的建筑功能布局研究 [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2015,
- [10] LATHA H, PATIL S, KINI P G. Influence of architectural space layout and building perimeter on the energy performance of buildings: A systematic literature review [J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2022, 14(3): 431-74.
- [11] MICHALEK J, PAPALAMBROS P. Interactive design optimization of architectural layouts [J]. Engineering Optimization, 2002, 34(5): 485-501.
- [12] MICHALEK J, CHOUDHARY R, PAPALAMBROS P. Architectural layout design optimization [J]. Engineering Optimization, 2002, 34(5): 461-84.
- [13] RODRIGUES E, GASPAR A R, GOMES Á. An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 2: Validation and performance tests [J]. Computer-Aided Design, 2013, 45(5): 898-910.
- [14] RODRIGUES E, GASPAR A R, GOMES Á. Automated approach for design generation and thermal assessment of alternative floor plans [J]. Energy and Buildings, 2014, 81(170-81).
- [15] SCHWARTZ Y, RASLAN R, KOROLIJA I, et al. Integrated Building Performance Optimisation: Coupling Parametric Thermal Simulation Optimisation and Generative Spatial Design Programming [M]. Proceedings of Building Simulation 2017: 15th Conference of IBPSA. 2017.
- [16] ZHANG J, LIU N, WANG S. A parametric approach for performance optimization of residential building design in Beijing [J]. Build Simul, 2019, 13(2): 223-35.

- [17] YI H. PERFORMANCE BASED ARCHITECTURAL DESIGN OPTIMIZATION [J]. 2014,
- [18] YI H. User-driven automation for optimal thermal-zone layout during space programming phases [J]. *Architectural Science Review*, 2015, 59(4): 279-306.
- [19] DU T, TURRIN M, JANSEN S, et al. Relationship Analysis and Optimisation of Space Layout to Improve the Energy Performance of Office Buildings [J]. *Energies*, 2022, 15(4):
- [20] DINO I G, ÜÇOLUK G. An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration [J]. *Automation in Construction*, 2016, 69(131-50).
- [21] DINO I G, ÜÇOLUK G. Multiobjective Design Optimization of Building Space Layout, Energy, and Daylighting Performance [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(5):
- [22] HALAWA F, MADATHIL S C, KHASAWNEH M T. Multi-objective unequal area pod-structured healthcare facility layout problem with daylight requirements [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 162(
- [23] AHMED M, SERAJ R, ISLAM S M S. The k-means Algorithm: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation [J]. *Electronics*, 2020, 9(8):
- [24] COELLO C A C, LAMONT G B, VELDHUIZEN D A V. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems* [M]. 2007.
- [25] TOUTOU A, FIKRY M, MOHAMED W. The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, 57(4): 3595-608.
- [26] MANNI M, LOBACCARO G, LOLLI N, et al. Parametric Design to Maximize Solar Irradiation and Minimize the Embodied GHG Emissions for a ZEB in Nordic and Mediterranean Climate Zones [J]. *Energies*, 2020, 13(18):
- [27] NOURIAN P. *Graph Theoretical Methods for Design and Analysis of Spatial Configurations* [D]. <http://abe.tudelft.nl>; Technische Universiteit Delft, 2016.
- [28] TAO Y, QIANG S, NING L. The Voids May Become Useful: An Application if Space Syntax in Commercial Building Design [J]. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 2015,
- [29] SATO Y, IZUI K, YAMADA T, et al. Pareto frontier exploration in multiobjective topology optimization using adaptive weighting and point selection schemes [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 55(2): 409-22.