

基于光照和热稳定性的建筑表皮优化研究

高翔

山东建筑大学建筑城规学院, 山东 济南

收稿日期: 2025年3月10日; 录用日期: 2025年4月4日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

在碳达峰、碳中和的时代背景下, 酒店建筑能耗较高, 是节能减碳的重要一环, 对碳中和具有重要意义。酒店建筑的表皮设计, 可以通过自遮阳等方式节约大量能源, 从而降低碳排放。基于以上思考, 文章构建了基于光照和热稳定性的建筑表皮优化流程, 旨在能够对建筑遮阳及采光之间的矛盾与冲突进行合理的取舍, 为相关建筑设计提供一定的启发。本研究以某酒店建筑的一间南向客房为例, 在Rhino平台构建参数化模型, 利用Honeybee和Ladybug两款插件, 对建筑进行采光模拟和辐射得热模拟, 同时采用Octopus进行多目标遗传算法优化, 得到了建筑表皮方案的24个相对优解, 并综合考虑采光与遮阳效果, 得到了建筑表皮的最终方案。

关键词

建筑设计, 数字技术, 多目标优化

Research on the Optimization of Building Skin Based on Light and Thermal Stability

Xiang Gao

School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

Received: Mar. 10th, 2025; accepted: Apr. 4th, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Under the background of carbon peak and carbon neutrality, the energy consumption of hotel buildings is high, which is an important part of energy saving and carbon reduction and is of great significance to carbon neutrality. The skin design of the hotel building can save a lot of energy by means of self-shading, thus reducing carbon emissions. Based on the above considerations, this paper constructs an optimization process of building skin based on light and thermal stability, aiming to make a reasonable choice between the contradiction and conflict between building shading and lighting

文章引用: 高翔. 基于光照和热稳定性的建筑表皮优化研究[J]. 设计, 2025, 10(2): 135-142.

DOI: [10.12677/design.2025.102015](https://doi.org/10.12677/design.2025.102015)

and provide some inspiration for related architectural design. In this study, a southbound room of a hotel building is taken as an example. A parametric model is constructed on the Rhino platform, and two plugins, Honeybee and Ladybug, are used. The daylighting simulation and radiation heat gain simulation of the building were carried out. At the same time, Octopus was used for multi-objective genetic algorithm optimization, and 24 relative optimal solutions of the building skin scheme were obtained. Considering the lighting and shading effects, the final scheme of the building skin was obtained.

Keywords

Architectural Design, Digital Technology, Multi-Objective Optimization

Copyright © 2025 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

随着国家 2030 碳达峰、2050 碳中和总体目标的提出[1] [2]，以及中国城镇化的高速发展，环境污染[3]、交通拥堵、人口过度集中等问题逐步凸显。在这种现实状况下，公共建筑的节能减排被推上了越发重要的位置，如何合理地进行建筑节能减碳，成为了建筑设计过程当中不可忽略的部分。酒店的建筑作为建筑行业中广泛存在的建筑类型，具有较大的节能减排潜力。酒店类建筑通常由标准化重复的客房部分，以及餐饮娱乐等休闲部分组成，客房部分的标准化设计，十分有利于建筑表皮节能减碳措施的推广。

随着计算机技术的日新月异[4]，计算机算力不断提高，各类建筑相关的性能模拟软件也不断完善，为设计师提供了可量化的建筑性能评价方式[5]。在传统建筑设计工作流程当中，流程往往为建筑设计、建筑性能模拟、修改设计、再次进行模拟，直到达到预定性能指标的循环往复式设计过程，在这种设计流程当中，设计师与计算机的交互方式是单向的，沟通效率较低，往往导致返工与重复劳动。同时我们必须认识到，建筑是一个复杂的系统，一处设计的更改往往牵一发而动全身，影响到建筑多个部分，甚至整体建筑的修改，建筑性能指标通常存在此消彼长的关系，单单通过人力无法达到设定条件下的相对优秀解。近些年来，基于数字化参数设计的单、多目标优化越发成熟[6]，通过构建参数化模型，设定一个或者多个性能目标，以及相应的参数变量，计算机就可以自动完成性能寻优，提供一系列的方案让设计师挑选，大大加速了性能模拟以及建筑优化的过程，避免陷入局部最优的局面。相关计算机优化方法，既可以作为建筑生成的一种途径，也成为了建筑评价的方法，为解决建筑造型、结构、性能问题提供了切实有效的途径。计算机与建筑师之间相辅相成，相互配合[7]，以更高效率完成建筑设计。

2. 文献综述

建筑相关性能模拟的研究，近年来开展得越发普遍。瞿燕[8]在 Grasshopper + Rhino 平台，通过 Honeybee + Wallacei 插件，将建筑采光系数与建筑全年冷热负荷作为优化目标，以一栋 25 层的典型办公建筑作为优化对象，将窗墙比、建筑外表面传热系数、屋顶传热系数等作为优化变量，进行了模拟实验，最后对性能指标赋予权重，按照不同的侧重选出了最优的设计方案，做出了合理决策。朱姝妍[9]梳理了相关优化算法的发展历程，以及相关优化算法应用于建筑的实践，总结了基于参数化设计的相关平台，以及对应插件，最后结合两个相关案例，提出了算法驱动的建筑思维主要流程，同时对建筑师以及计算机的关系进行了辩证思考。Kristoffer Negendahl [10]等人以 Big 事务所某未建成项目为例，考虑到专

门建筑外遮阳构件成本较高，通过建筑表皮形成自遮阳的被动式设计，尽可能地降低建筑能耗。他们通过提取建筑中的某一典型基本单元来代表整体建筑进行计算机性能模拟，大大加速了模拟过程，研究发现采光系数、能耗与成本之间，存在相互制约关系，最终结合建筑立面效果与建筑性能指标，确定了设计方案。张柏洲[11]通过自组织的生成设计手段对住区规划方法进行了探索，解决了居住区当中功能地块划分、建筑组团朝向选优、建筑与路网的关系等问题，在快速生成方案的同时，避免了与现行规范的冲突。

从以上先例研究可知，随着建筑学科与信息技术的融合程度不断提高，各种性能化设计、生成式设计层出不穷，为设计师带来了无与伦比的便利，但同时我们也必须意识到，受限于计算机的性能，在设计方案的过程当中仍然无法穷尽所有的限制条件，必须选择影响建筑性能的主要方面进行模拟，才能充分利用计算机算力，不断优化建筑设计方案。

3. 研究方法

3.1. 参数化模型

参数的概念，最早出现于数学学科当中，用来表达某特定对象的某一性质的量的多少，上世纪90年代，建筑师盖里等一批先锋设计师[12]，首先在建筑行业尝试了参数化的模型生成方法，参数化设计在建筑行业就此大放异彩。在本次研究中，以 Grasshopper + Rhino 为设计平台，通过“电池组”快速生成所需的建筑形体；不同于以往建筑平面与建筑形体之间单向的联系，参数化模型得益于“电池组”间清晰的形体生成逻辑，使建筑模型的生成能够做到“牵一发而动全身”，大大简化了修改模型的流程。

3.2. 建筑性能模拟工具

在本次研究中，采用了 Honeybee + Ladybug 两款犀牛参数化插件，分别作为建筑采光模拟和辐射模拟的软件。Honeybee 将犀牛 3D 模型连接到经过验证的模拟引擎，包括 EnergyPlus 和 Radiance [13]，可以进行详细的采光模拟及热力学的建模，并且将计算结果清晰地可视化显示在犀牛当中，对于室内光照度的研究，可以方便地自定义时间段进行模拟，大大加强了模拟的灵活程度。Ladybug 同样基于 Rhino 模型，可以进行建筑辐射分析以及阴影研究，可视化分析天气数据，包括风玫瑰图、焓湿图等。

3.3. 优化方法

本次研究采用了多目标遗传优化算法，利用了 Grasshopper 平台的插件 Octopus [14]。遗传算法借鉴了生物界优胜劣汰的进化法则，通过算法加速了获得最优解集的时间，其基本原理如下：首先在可选的参数范围之内随机生成一系列的参数组合，通过与建筑性能分析软件配合，获取特定参数组合的性能水平，在首代结果当中按照一定比例保留，对不保留的个体参数进行一定的变异，再次进行模拟，然后循环往复这个过程，不断获得更优的解，直到达到设定的目标代数。通过遗传算法获得的解并非唯一，而是能够获得一系列的相对优解，这些解集也被成为帕托累前沿解集，在获得解集之后，再按照一定标准进行筛选，就可以获得合适的方案。

4. 案例研究

4.1. 优化目标

在建筑日常使用的过程当中，建筑采光以及建筑室内温度的稳定性，两者很大程度上影响了建筑使用的舒适度，前者影响的是白天是否有足够的太阳照度来满足室内生活的需要，后者则体现了建筑对抗自然界环境影响的能力。

4.1.1. 采光系数

采光系数是指同一时刻，建筑室内给定平面上的一点与室外全阴天无遮挡地面上某一点光照度的比值，该比值越接近 1 代表室内光照条件越好。室内采光情况的优劣，可以通过多个维度进行改变，如可以加大采光面玻璃的比例使更多光线进入室内；控制房间进深使光线更容易进入到室内深处；采用白色涂料增加漫反射以此达到照亮室内的目的，同时还可以积极使用各类导光装置，或者在建筑外侧布置稳定的反光设施(一般为北侧相邻建筑物)。通过以上方法，可以很好地改善室内采光系数[15]。

在本次研究当中，通过改变外立面窗户高度、比例以及建筑阳台出挑的深度，从这两个维度来改变室内的光环境，进而影响室内平均采光系数。

4.1.2. 热稳定性

建筑热稳定性越强，建筑室内的温度变化就愈不明显[16]，可以拉平温度变化曲线，使温度尽可能地保持在人体舒适范围之内，从而减少各类空气调节装置的能源使用，是实现碳中和目标的关键一环。热稳定性取决于建筑整体的热惰性以及建筑得热量的多少。建筑稳定性可以从以下几个维度进行探讨，首先是建筑的气密性，气密性越好的建筑越不容易散失热量，在夏热冬冷地区，可以很好地避免热空气的流失，以及冷空气的侵入；其次，需要考虑建筑外围护结构的综合传热阻，建筑外侧界面热阻越大，热量就越不容易进入或离开建筑；最后，需要考虑建筑的得热量，建筑得热量越平均就越不容易引起建筑室内温度的变化。

本次研究主要考虑的是第三点，通过控制建筑外遮阳结构的出挑长度，改变建筑外表面获得太阳热量的多少，同时也是为了验证一直以来的思考，建筑结构上合理的出挑距离与建筑功能使用上合理的出挑距离，以及建筑性能上合理的出挑距离，他们三者之间是否具有关联性。

4.2. 研究对象

本次研究将场地选择在江苏南通，其地处中国华东地区，位于长江入海口北岸，属于亚热带季风气候区，气候夏热冬冷，夏季高温多雨，冬季寒冷少雨，雨热同期，冬季最低气温可达零度以下，需要兼顾冬季保温以及夏季隔热。研究对象以某酒店建筑的一间客房为例，之所以只对这一间客房进行模拟，其一是因为实际情况中客房的进深与开间是存在一定变化可能的，我们不可能穷尽所有可能的客房尺寸大小，只能选取一个特定的客房尺寸作为酒店类客房的代表；其二是因为这样可以大大加快模拟的速度，减少不必要的计算机性能负担。

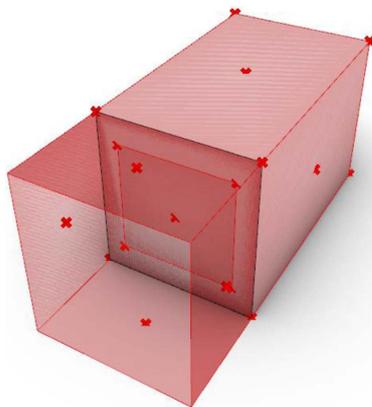


Figure 1. The initial model of the study

图 1. 研究初始模型

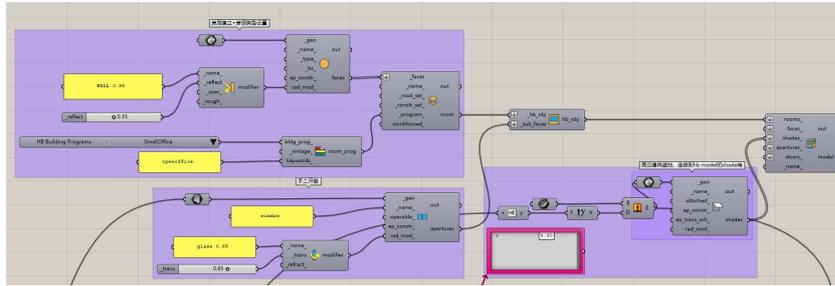


Figure 2. Honeybee model construction
图 2. Honeybee 模型构建

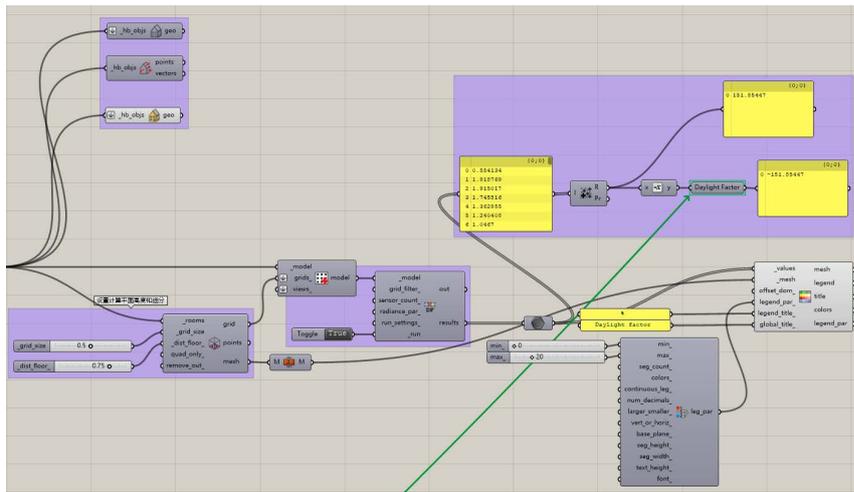


Figure 3. Honeybee parameter adjustment and result visualization
图 3. Honeybee 参数调整与结果可视化

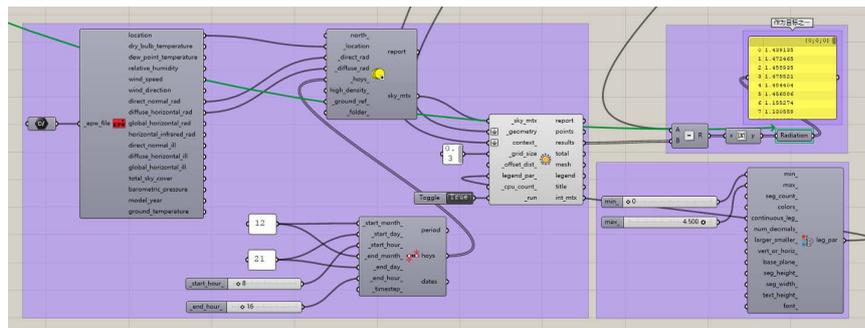


Figure 4. Ladybug parameter adjustment and result visualization
图 4. Ladybug 参数调整与结果可视化

客房朝向正南，见图 1，进深 6.5 m，面宽 3.9 m，房间净高 4.2 m，建筑外侧还具有一定进深的阳台，作为观景以及休闲之用，同时也是立面表皮效果的重要组成部分，阳台进深变化范围在 0~5 m 之间。建筑窗墙比被设定为 0.5，窗户距墙面正中央，窗户宽度变化范围为 1.95~3.9 m，窗户高度变化范围为 2.1~4.2 m。

通过改变阳台出挑深度以及建筑外窗的开窗形式，可以对建筑辐射得热以及室内采光效果形成影响。窗玻璃反射率设定为 0.35，见图 2；室内光照度模拟平面为离地 0.75 m，见图 3；模拟单元尺寸为 0.3 m ×

0.3 m，见图4。模拟结果以热力图的形式显示，越偏向红色采光越好，偏向蓝色则采光较差。在建筑辐射得热模拟当中，分为冬、夏进行两次模拟，夏季模拟日期为6月21日早上8点到下午16点，冬季模拟日期为12月21日早上8点到下午16点，计算日间8小时内客房南立面(窗户所在立面)总共收到的太阳辐射能量，单位为kwh。在获得冬、夏模拟结果之后，将两个结果相减，并取绝对值，以此反映建筑冬、夏获得太阳辐射总量的变化值，该数值越小越好，数字越小代表了建筑获得太阳辐射较为稳定，室内热稳定性较好。

在 Octopus 的设置当中，将优化目标 1 定为“建筑南向立面冬、夏季辐射得热量差值的绝对值(单位为 kwh)”，将优化目标 2 定为“建筑室内平均采光系数(单位为%)”；变量 1 为建筑外立面窗户的宽度，由于窗户面积一定，因此窗户高度也由此可以确定，该变量控制了窗户的长宽比例，也就改变了窗户与墙体和遮阳构件之间的相对位置，进而影响光线进入室内的量，变量 2 为建筑外立面阳台出挑长度，这个参数控制了建筑外立面的视觉效果以及光进入室内的量。

在设定完相关优化目标以及优化自变量之后，进入 Octopus 详细设置页面进行多目标遗传算法相关参数设置。将每代精英比例设定为 0.500，变异概率设定为 0.200，基因突变概率设定为 0.500，基因交叉概率设置为 0.800，种群数量设置为每代 20 个，代数 25 代，共计生成 500 个个体，选取 HypE Reduction 和 HypE Mutation 变异算法。值得注意的是，Octopus 默认对优化目标进行最小值求解，因此需要对目标为最大值的优化目标进行反转，在完成这一切设定之后，开始进行多目标遗传算法寻优模拟。

4.3. 研究结果

优化结果见图5，从图中我们可以看到，建筑室内光照度与冬、夏季辐射得热差值存在此消彼长的关系，室内光照度越好，冬、夏季辐射得热差值也就越大，二者存在互斥的关系。室内平均光照度变化范围为 0.63%~4.94%，见图6，随着外遮阳构件出挑大小的增加，室内平均光照度逐渐减小。由于控制了建筑外立面的窗墙比，在窗户面积一定的前提下，窗户的长宽比例可以一定程度上影响室内光照度，但就结果而言，这种变化带来的影响显然不足以抵消外遮阳构件出挑带来的室内照度降低。有趣的是，在经过迭代以后，窗户的长宽比逐渐趋于稳定，从帕托累前沿解集来看，窗户的宽度变化范围为 3.12~3.26 m，窗户高度变化范围为 2.52~2.62 m，整体变化不大，可以视为完成了收敛，寻找到了相对优秀的建筑外立面开窗尺寸与比例。

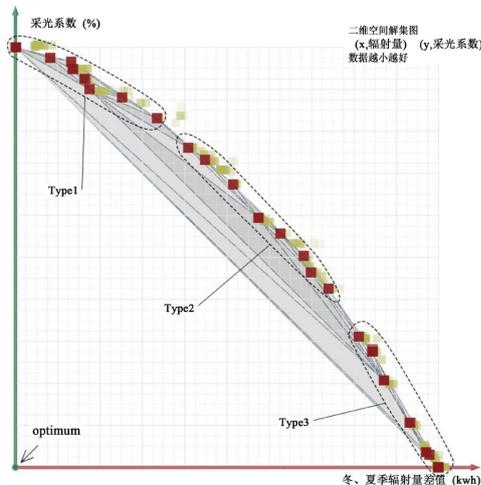


Figure 5. Multi-objective optimization solution set
图5. 多目标优化解集

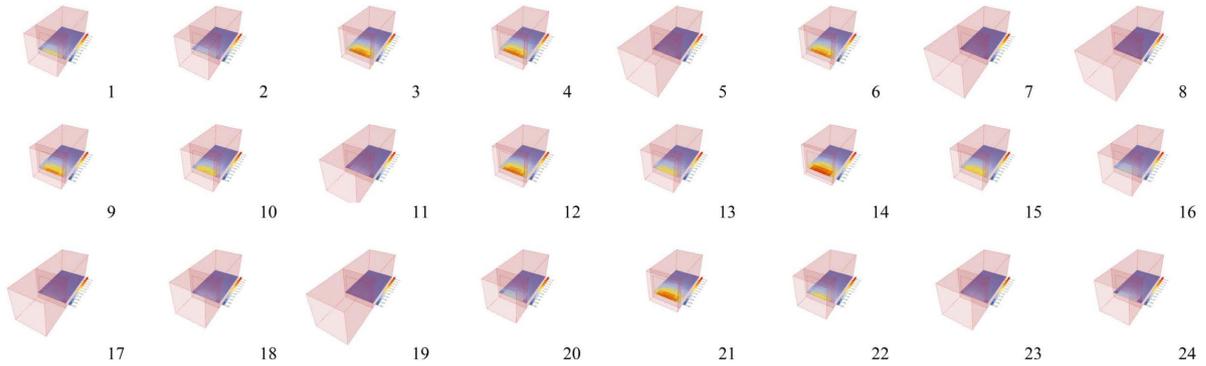


Figure 6. Visualization of daylight factor of frontier solution set
图 6. 前沿解集的室内采光系数可视化

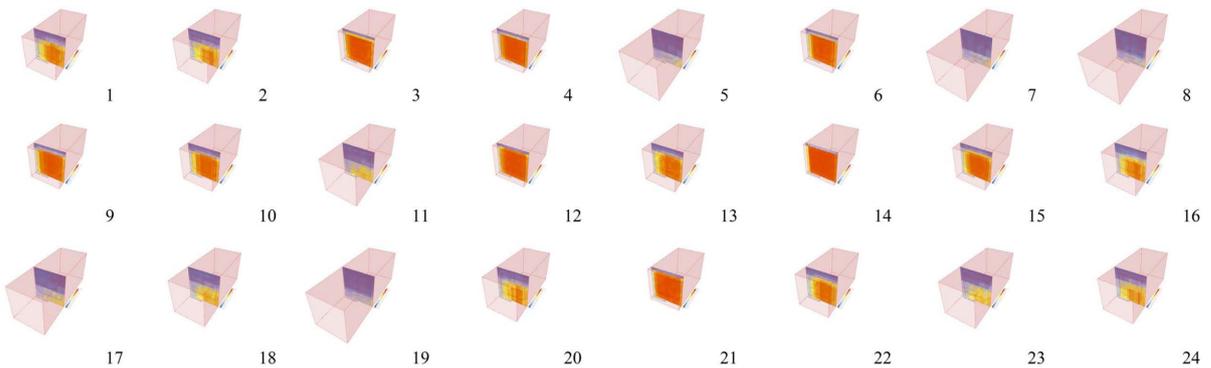


Figure 7. Visualization of radiation heat gain of frontier solution set
图 7. 前沿解集的辐射得热可视化

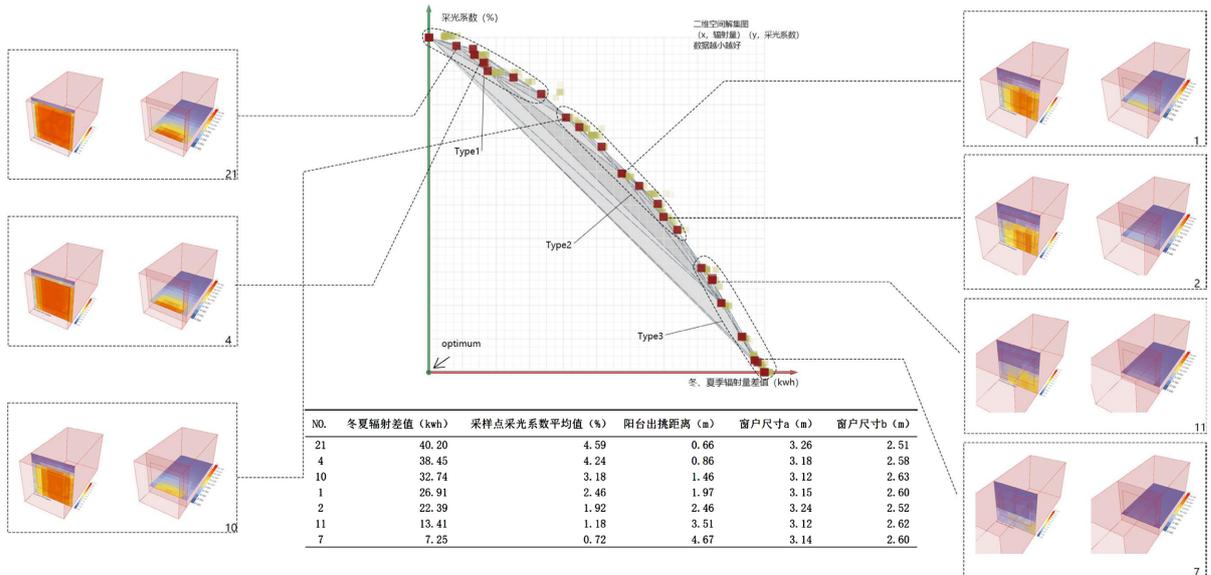


Figure 8. Typical solution display and corresponding parameters
图 8. 典型解展示与对应参数

冬、夏季辐射得热差值的变化范围为 7.24~40.2 kWh，但经过分析之后，这个数据可能并不具有代表

性,解集两端的模拟结果都较为极端,其中一侧偏向为极致的室内光照度,另一侧偏向为极致的室内热稳定性,见图7。在光照度优先的前提之下,室内冬、夏季辐射得热量都较大,且夏季相对于冬季获得了更多的太阳辐射,表现为冬、夏季辐射差值变大,导致了室内热稳定性相对不佳;在室内热稳定性优先的前提下,模拟又走向了另一个极端,通过较大的建筑遮阳构件出挑,使得冬季与夏季获得的太阳辐射都较少,从而达到室内热稳定性最佳的结果,但这显然是不可取的,超长的出挑使得室内光线昏暗、缺乏日照,不满足基本的使用需求。由此可见,虽然同为前沿解集,但过于极端的解法并不是我们所希望看到的,相对来说,位于解集中部的模拟结果,更能够代表现实情况,对采光以及辐射得热进行了更好的平衡。

以前沿解集中的一号为例(见图8),冬、夏季辐射得热差值为26.91 kWh,阳台出挑距离为1.97 m,室内采样点平均采光系数为2.46%,虽相较初始状态有所下降,但仍然在可接受的范围之内,窗户宽为3.15 m,窗户高为2.6 m,既保证了较好的室内光照度,也保证了较好的室内热稳定性,阳台出挑距离也在设计经验值的范围之内,整体造型较为协调,适合作为最终的建筑表皮设计方案。

5. 讨论与总结

本研究以某酒店建筑的客房为例,利用Grasshopper、Rhino平台以及插件Honeybee、Ladybug、Octopus,对室内光环境以及建筑物辐射得热水平进行了模拟,开展多目标模拟以及遗传算法优化,建立了一套综合考虑室内光环境最优与建筑热稳定性最好的参数化建筑性能模拟流程。通过将外立面窗墙比、阳台出挑长度、窗户长宽比作为设计变量,对建筑表皮方案进行组合求解,经过迭代之后,得出了最大程度上同时满足建筑采光最优和建筑热稳定性最优的建筑表皮设计方案。

参考文献

- [1] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.
- [2] 曹可心,邓羽. 可持续城市更新的时空演进路径及驱动机理研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2021, 40(11): 1942-1955.
- [3] 黄莘绒,管卫华,陈明星,胡昊宇. 长三角城市群城镇化与生态环境质量优化研究[J]. 地理科学, 2021, 41(1): 64-73.
- [4] 杨俊宴. 全数字化城市设计的理论范式探索[J]. 国际城市规划, 2018, 33(1): 7-21.
- [5] Swan, L.G. and Ugursal, V.I. (2009) Modeling of End-Use Energy Consumption in the Residential Sector: A Review of Modeling Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1819-1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>
- [6] 谢虎. 多目标因子约束下的建筑节能环保改造设计[J]. 能源与环保, 2022, 44(5): 125-130.
- [7] 李媛,阮洁. 参数化生成设计方法及其在建筑设计中的应用[J]. 华中建筑, 2016(5): 47-51.
- [8] 瞿燕,宋德萱. 基于参数化设计的夏热冬冷地区办公建筑多目标优化研究[J]. 建设科技, 2022(17): 15-18.
- [9] 朱姝妍,马辰龙,向科. 优化算法驱动的建筑生成设计实践研究[J]. 南方建筑, 2021(1): 7-14.
- [10] Negendahl, K. and Nielsen, T.R. (2015) Building Energy Optimization in the Early Design Stages: A Simplified Method. *Energy and Buildings*, 105, 88-99. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.087>
- [11] 张柏洲,李飏. 基于多智能体与最短路径算法的建筑空间布局初探——以住区生成设计为例[J]. 城市建筑, 2020, 17(27): 7-10, 20.
- [12] 何昕. 浪漫的当代都市画家——弗兰克·盖里创作思想与手法追寻[J]. 建筑学报, 1996(8): 57-61.
- [13] 储海龙,张宇宁,王坚. 基于CIE天空模型的室内自然光照度计算模型[J]. 光电子技术, 2018, 38(3): 167-171, 177.
- [14] 高源,池婧祎,罗书龙,胡可,袁景玉,岳晓鹏. 基于Octopus + Honeybee的天津乡村住宅被动式节能设计多目标优化技术框架[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(4): 488-497.
- [15] 全利,何荣,邱卓涛. 住宅起居室采光设计标准研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(8): 171-177.
- [16] 李涛,郭华,李慧斌,樊思恺. 新疆传统大空间建筑的夏季热环境实测分析[J]. 南方建筑, 2019(4): 66-71.