

DOI:10.11918/201904207

西安市办公建筑多目标优化设计

田一辛, 黄琼

(天津大学 建筑学院, 天津 300072)

摘要:为解决性能评价和形态设计脱节、负相关性能目标难以权衡优化的问题,采用整合性能模拟和遗传算法的方法优化西安市办公建筑设计.利用性能模拟实现建筑设计要素和建筑性能的统一,利用遗传算法实现多变量多目标的寻优,为方案决策提供数据支持.办公建筑性能优化设计框架遵循设计、模拟及评价、优化的逻辑搭建.制定应用于建筑形态、表皮和细部的性能优化设计,以朝向、面宽、窗墙比、遮阳方式、百叶宽度、百叶倾角等为变量,采用遗传算法实现以能耗和光性能为目标的建筑形态寻优.结果表明:以西安市某办公建筑为例,基于气候特征量化节能策略,被动太阳能得热的利用率最高;以建筑太阳辐射增益量为目标,形态寻优结果是办公楼南北向长轴布局、长宽比是1.4;建筑表皮设计以各朝向的窗墙比为变量,南向窗墙比为60%、其他朝向窗墙比是40%时,光热性能均优.进而优化外置遮阳百叶,寻优结果在建筑表皮优化的基础上,将总能耗降低3%、全年光暴露量降低36.5%、空间全天然采光时间百分比没有明显下降.

关键词:办公建筑;方案阶段;性能模拟;多目标优化;西安市

中图分类号: TU119

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)12-0185-07

Multi-objective optimization design for office buildings in Xi'an

TIAN Yixin, HUANG Qiong

(School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The integrated performance simulation and genetic algorithm were adopted to optimize the design of office buildings in Xi'an, aiming at solving the problems of performance evaluation and dislocation of form design as well as the difficulty in weighing the negative correlation performance goal. Performance simulation was used to achieve the unification of architectural design elements and building performance, and genetic algorithms were applied to optimize multi-variable and multi-objectives to provide data support for program decision making. The performance optimization design framework for office buildings was established according to the logic of design, simulation, evaluation, and optimization. The performance optimization design applied to each link was formulated. Taking orientation, surface width, window-wall ratio, shading method, louver width, and louver inclination angle as variables, the individual buildings, surfaces, and details were optimized. A genetic algorithm was adopted to realize the optimization of building shape so as to improve energy consumption and light performance. A case study of an office building in Xi'an show that based on the climate characteristic quantitative energy-saving strategy, the utilization rate of passive solar energy was the highest. Taking the solar radiation gain of buildings as the target, the shape optimization result was that the long axis of the office building was in the north-south direction and the length-width ratio was 1:4. In the design of building surfaces, the window-wall ratios in different directions were taken as variables, the window-wall ratio in the south direction was 60%, and those in other directions were 40%. The time, light, and heat performance were excellent, so the external sunshade louvers were further optimized. Optimization results show that on the basis of the optimization of building surfaces, the total energy consumption was reduced by 3%, and the annual light exposure was reduced by 36.5%, while the percentage of all-natural lighting time in the space was not significantly decreased.

Keywords: office building; conceptual stage; performance simulation; multi-objective optimization; Xi'an

2001—2017年,公共建筑的建设量约占中国新建建筑的1/3,公共建筑能耗占比达44%,办公建筑

在公共建筑中占比较大^[1].与20世纪80年代相比,当前公共建筑的建造水平和室内环境已有很大提高,因此建筑节能发展方向逐渐从措施导向转变为性能效果导向,GB/T51161—2016《民用建筑能耗标准》为性能导向打下了基础^[2].Lee等^[3]比较基于经验法则和性能模拟两类节能方法,得出前者设计偏线性,而后者能有效处理大量数据和非线性关系,提

收稿日期:2019-04-24

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0700201);

国家自然科学基金(51338006)

作者简介:田一辛(1986—),女,博士研究生

通信作者:黄琼,qhuang@tju.edu.cn

出应发展以性能为导向的设计方法. 节能设计标准的提高与数字技术的普及也促进了性能导向节能建筑设计的发展^[4].

建筑性能影响建筑形态, 伴随数字技术的发展将两者整合, 建筑性能还将成为影响建筑形态生成的重要因素^[5]. 性能导向下的设计过程通常被分为几何模型和性能模拟两部分^[6], 跨平台交互复杂且耗时, 造成模拟预测仅起到验证作用^[7]. 近年来, 参数化设计平台整合模拟技术的不断发展, 以参数化设计平台 Rhino/Grasshopper 的 Ladybug + Honeybee (以下简称 L + H) 最为突出. 南加州大学学者 Konis 等^[8]利用 L + H 研究办公建筑, 以能耗和光性能为目标优化建筑形态. Villamil^[9]设计的某研究中心, 以太阳辐射量和遮蔽过量直射光为目标优化建筑立面.

性能导向下的办公建筑节能设计是研究重点, 基于 L + H 平台进行耦合建筑光热性能的模拟, 本文利用正交实验法进行多变量多目标优化, 将性能模拟和优化整合到建筑方案设计流程中, 解决建筑性能与建筑形态关联不紧密的问题. 以西安市某办公建筑为例, 分析气候特征制定节能策略, 从建筑形态、表皮和细部三方面进行节能优化设计, 基于模拟的多目标优化有助于提高建筑师的设计效率和精度.

1 性能导向下的设计流程

建筑设计是分阶段的迭代过程, 方案设计处于初期, 随着设计进程的推进, 建筑能耗和性能可优化余地越来越小, 因此方案设计阶段是决定建筑节能效果的关键^[10-11]. 方案设计阶段有建筑信息不完整和方案变动频繁等特征, 如果建筑师构思了节能策略, 却无法快速获得性能评价, 会影响建筑师的工作效率和思维连续性. 在建筑方案设计过程中加入性能模拟, 可快速获得性能反馈, 加深建筑形式与性能关系的认识, 提高节能设计效率^[12].

参数化模型是运用计算机技术描述设计问题的规则, 从而生成多解及动态的方案, 优势是以一个模型对应一系列设计方案^[13]. 建筑性能模拟是通过计算机技术对环境进行仿真, 从而对其性能进行预测的方法^[12]. L + H 是在参数化设计平台整合风、光、能耗模拟引擎, 避免了重复建模和多平台交互, 实现了多性能的耦合计算^[14]. 利用 Grasshopper 平台的 TT Toolbox 记录优化过程的数据和方案模型, 将数据和模型信息传输至多目标优化平台 Design Explorer, 辅助建筑师制定设计决策.

性能优化设计遵循设计、模拟及评价、优化的逻辑(如图 1 所示). 建筑性能与形式关系紧密且错综复杂, 以层级的方式细化建筑性能设计. 依照单体设计、表皮设计、细部设计逐层展开, 分别以朝向、面宽、窗面积、遮阳百叶宽度、百叶倾角、百叶数量为变量. 建筑性能包括能耗、自然采光性能、热舒适度等, 且性能目标之间存在矛盾关系. 多目标优化算法擅长解决多变量多目标的寻优问题, 且寻优搜索范围较广. 利用多目标优化算法实现负相关性目标的共赢, 辅助建筑师制定设计决策.

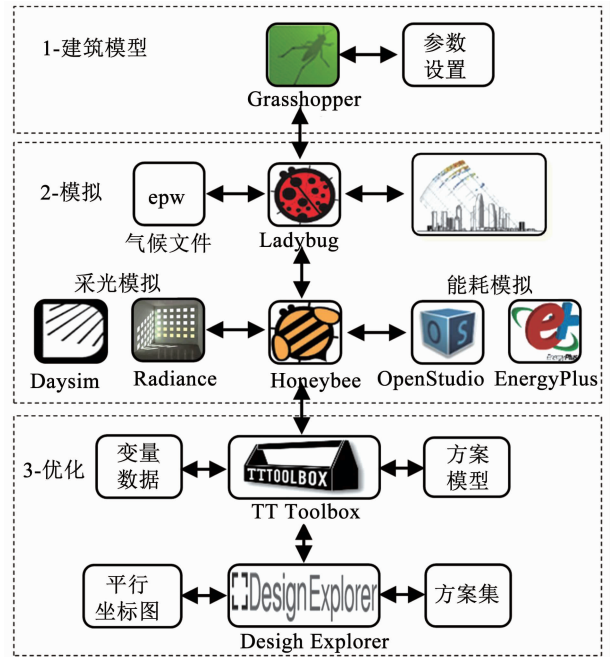


图 1 基于数字技术节能设计框架

Fig. 1 Digital technology-based energy-saving design framework

2 响应气候的设计策略

2.1 适应寒冷地区的节能设计策略

建筑与自然环境共生, 建筑节能设计响应当地气候环境. 利用 Ladybug 分析西安市的室外干球温度, 低于 18 °C 的小时数占全年的 59%, 温度高于 26 °C 的小时数占比为 15%, 以低温不舒适为主. 办公楼的使用时间是 8:00 ~ 18:00, 冬季最冷时段是集中在夜晚, 夏季的高温时段集中在白天, 因此西安市办公建筑设计要冬夏兼顾.

室外温度、日照和光环境引起办公空间温度起伏和照度变化, 因此需消耗能源维持办公空间的舒适度^[4]. 将气象数据导入 Ladybug, 量化被动设计策略的各月有效时间比, 适应西安市气候的被动设计策略依次为内部得热、被动太阳得热、蒸发冷却和夜间通风(如图 2、3 所示).

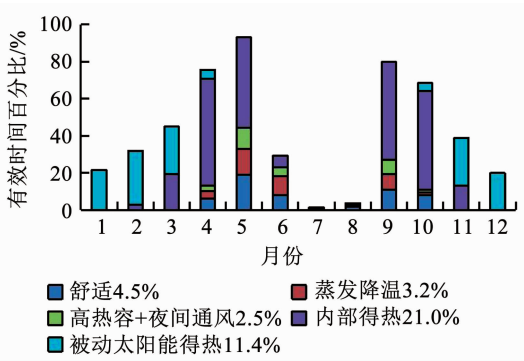


图 2 西安市被动策略各月有效时间比

Fig. 2 Monthly effective time ratio under passive strategy in Xi'an

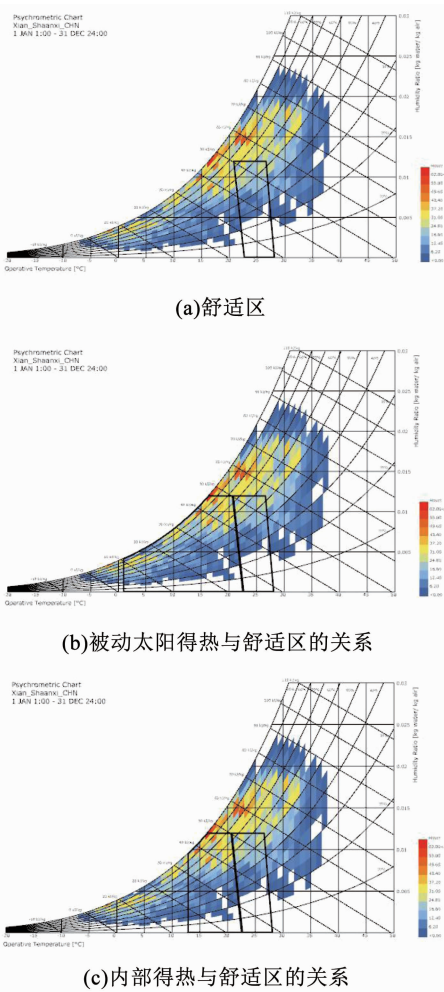


图 3 西安市气候设计分析图

Fig. 3 Analysis of climate design for Xi'an

Lodybug 根据气象数据计算出寒冷地区冬季太阳辐射量为 $234 \sim 316 \text{ Wh/m}^2$, 夏季太阳辐射量为 $551 \sim 629 \text{ Wh/m}^2$, 即光热同期, 太阳辐射得热在冬季利于节能, 在夏季则需控制, 因此被动太阳能策略有时效性, 遮阳设计可控制进入室内的太阳辐射量和阻挡直射光达到节能的目标. 因此, 适宜寒冷地区办公建筑的节能策略是被动太阳能得热和遮阳设计的组合.

2.2 对比寒冷地区、严寒地区、夏热冬冷地区的设计策略

对比寒冷地区(西安)、严寒地区(哈尔滨)、夏热冬冷地区(上海市)的适宜的节能策略(如图 4 所示), 被动太阳能得热和内部得热策略所占比例最高, 但其时效差异较大. 严寒地区是以低温不舒适为主, 夏季舒适度较好, 主要解决保温问题, 利用内部得热的时间长达 6 个月(4~10 月). 夏热冬冷地区春秋季舒适度较好, 除夏季之外都可利用内部得热,

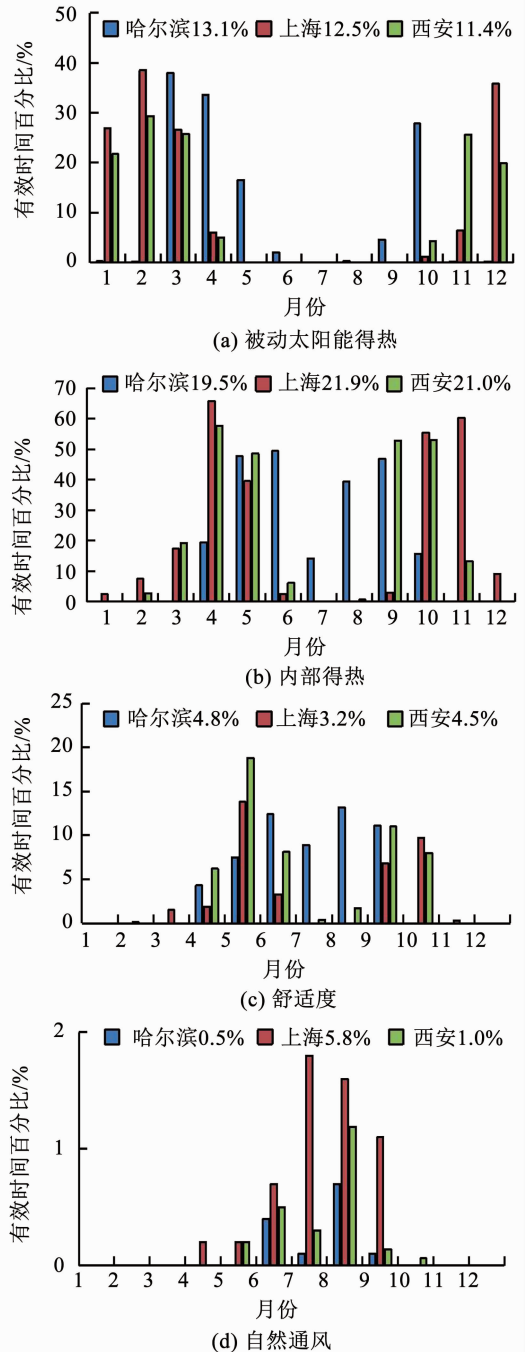


图 4 不同气候区代表城市适宜被动策略时间百分比

Fig. 4 Monthly effective time ratio under passive strategy in different climatic regions

利用被动太阳得热是春季和秋季. 寒冷地区春秋季节舒适度与夏热冬冷地区相似, 但冬夏季气候矛盾性比夏热冬冷地区和严寒地区严重. 寒冷地区的自然通风利用率低于夏热冬冷地区、高于严寒地区.

3 西安市某办公建筑多目标优化设计

3.1 西安市某办公建筑项目概况

西安市某办公楼项目的标准层面积为 $1\ 300\ m^2$ (面积上、下浮动 5%), 层数为 15 层, 总建筑面积小于 $2\ 万\ m^2$, 场地周边建筑以办公楼和住宅为主. 办公楼接收太阳辐射增益量从大至小依次是屋顶、南立面、东立面和西立面、北立面. 屋顶因无遮蔽, 太阳辐射得热量很高. 西安市的最佳朝向是南向, 场地南向建筑较低矮所以对建筑接受太阳辐射的影响较小, 场地西向的楼对项目有所遮挡所以得热量较低 (如图 5 所示). 接收日照时长从大至小依次是屋顶、南立面、西立面和东立面、北立面 (如图 6 所示).

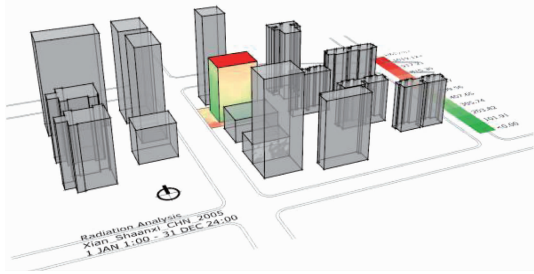


图 5 周边建筑对场地及建筑辐射强度的影响

Fig. 5 Effect of surrounding buildings on radiation intensity of site and building

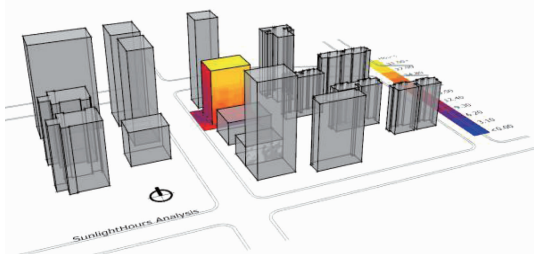


图 6 周边建筑对场地及建筑日照时间的影响

Fig. 6 Effect of surrounding buildings on daylight hours of site and building

建筑形态寻优是以建筑的太阳辐射增益量最大为目标, 根据太阳轨迹和周边建筑对场地的日照遮挡计算太阳辐射增益量, 约束条件是标准层面积小于等于 $1\ 300\ m^2$, 以朝向($0^\circ \sim 90^\circ$, 步长为 15°)和面宽 ($30 \sim 42\ m$, 步长为 $3\ m$)为变量. 建筑是 $42\ m \times 30\ m \times 60\ m$ 时太阳辐射增益量最大 ($1\ 515\ 800\ kWh/m^2 \cdot a$), 以公共建筑节能设计标准的典型办公建筑 (正方形) 为

基准模型 (太阳辐射增益量是 $1\ 466\ 100\ kWh/m^2 \cdot a$), 优化办公建筑比典型办公建筑的太阳辐射增益量提高了 3.4%.

3.2 办公建筑性能评价指标

低能耗办公建筑的设计目标是降低能耗且保证自然采光. 评价指标是分析性能和能耗的重要媒介和标准^[15], 本文选取空间全天然采光时间百分比、全年光暴露量为性能评价指标. 空间全天然采光时间百分比 (spatial daylight autonomy, sDA) 表示空间接受充足天然光的比例, 即空间水平照度计算点在一年中超过 50% 的时间仅在自然光照射下就达到 300 lx 的比值^[16], 该指标受气候、朝向、窗墙比、玻璃材料特性、房间特性的影响. 全年光暴露量 (annual sunlight exposure, ASE) 表示接受过多太阳直射的工作面面积百分比, 1 000 lx 以上的光照, 且全年时长大于 250 h 被认为是过多太阳直射, 会引起眩光或增加制冷能耗. 高性能光环境是自然采光充足且避免眩光, 因此 LEEDv4 和北美照明工程协会采用 sDA 和 ASE 作为光性能评价指标^[17]. 空间全天然采光时间百分比和全年光暴露量虽然是相对较新的动态自然采光性能评价指标, 因易于理解和分析, 实用性较强, 已广泛应用于工程实践中并获得认可^[15].

建筑能耗一般是单位面积的采暖、制冷、人工照明和设备能耗之和, 但设备能耗多根据面积和设备功率密度计算, 与建筑的光热性能无直接关联, 因此本文的建筑总能耗是采暖、制冷和照明能耗之和.

3.3 办公建筑性能模拟

办公建筑光性能模拟是采用 Radiance 为模拟引擎, 采用反向光线追踪, 气象数据采用 EnergyPlus 的 epw 格式数据. 光环境模拟是基于建筑几何模型 (周边环境、建筑物形体、功能布局)、天空模型、模拟时段、建筑材料光学属性、人工照明功率、网格尺寸等做计算. 光环境模拟输出的评价指标包括照度、空间全天然采光时间百分比、全年光暴露量、人工照明运行时间表等.

办公建筑能耗模拟是采用 EnergyPlus 为模拟引擎, 受周边环境、功能分区及相应负荷、人员在室率、人工照明运行时间、自然通风和 HVAC 等影响, 需要设置围护结构热工性能、照明、设备及人员工作时间等参数. 办公建筑围护结构热工参数设置见表 1, 在室率和其他相关参数参照 GB50189-2015《公共建筑节能设计标准》设置, 如照明功率密度设置为 $9\ W/m^2$, 人均建筑面积 $10\ m^2/人$, 办公建筑供暖区室内温度是 $20\ ^\circ C$, 空调区室内温度是 $26\ ^\circ C$.

表 1 模拟参数设置

Tab. 1 Settings of simulation parameters

外墙传热系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)	外窗传热系数/(W·(m ² ·K) ⁻¹)	外窗太阳得热系数	外窗可见光透射比	外窗透光度
0.4	1.3	0.3	0.11	0.6

单目标优化是以能耗或光性能为目标, 仅做能耗或光性能模拟. 多目标优化需兼顾能耗和光性能, 应采用耦合自然采光的能耗模型, 以便综合平衡光性能和能耗. 能耗模拟引擎 OpenStudio 集成 EnergyPlus 和 Radiance, 将室内自然采光的照明时间表用于能耗模拟. 以各朝向窗墙比均为 0.4 的办公建筑为例, 分别进行自然采光和能耗模拟(如图 7 所示), sDA 为 55.2%、ASE 为 49.1%, 总能耗是 98.3 kWh/m². 多目标优化采用耦合自然采光的能耗模拟, 光性能模拟结果无变化, 利用自然采光降低

总能耗, 总能耗降至 82.2 kWh/m²(降低 15.4%).

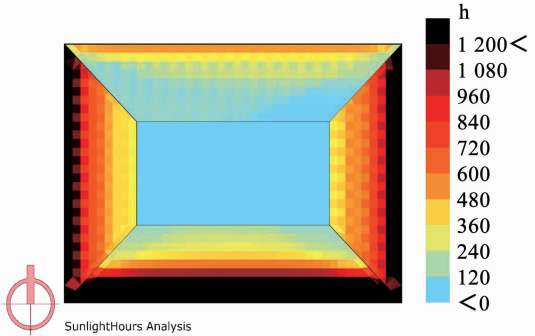
3.4 多目标优化

优化是使设计或决策尽可能有效的过程或方法, 建筑设计和研究中常用的优化方法有实验法、对比法、数学优化等. 遗传算法最初由 Holland 提出, 逐渐被应用于各个领域, 建筑界最早的应用可追溯至 1980 年^[18]. 遗传优化算法是在解空间中搜索相对最优解集, 根据解空间中不同方案呈现的性能水平, 在迭代运算过程中逐步剔除不利于性能改善的设计参数, 而将利于性能改善的设计参数保留入下一次迭代计算.

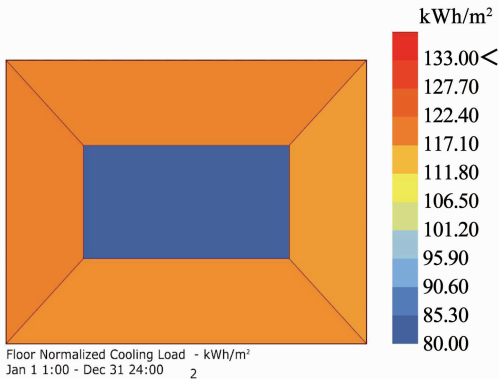
DesignExplorer(以下简称 DE)是采用正交试验法的多目标优化工具. 正交试验设计法是遗传算法的一种特例, 即它的初始种群固定、只使用定向变异参数、只进化一代. 利用 Grasshopper 的 TT Toolbox 编写程序, 记录正交实验的优化过程, 生成包含所有方案的设计变量、性能指标、形态信息的数据库文件. DE 将数据和模型信息以平行坐标图、图片等方式可视化, 便于建筑师直观设计变量和性能目标的关系(如图 8 所示), 为建筑师提供综合选择权.

窗设计不但影响建筑外观, 也是室内外传递能量最频繁的部位. 办公建筑各朝向接收日照和太阳辐射得热量的差异大, 各朝向适宜的窗面积不同, 因此表皮寻优以各朝向窗墙比为变量, 窗墙比值域是 0.4~0.8, 步长 0.2. 优化目标是总能耗、全年光暴露量、空间全天然采光时间百分. 通过观察 DE 的平行坐标轴, 窗墙比与 sDA 呈正比, 与 ASE 呈反比. 表皮优化方案是南向窗墙比为 0.6、其他朝向窗墙比为 0.4, 总能耗为 84.2 kWh/m², sDA 为 63.3%, ASE 为 52.4%.

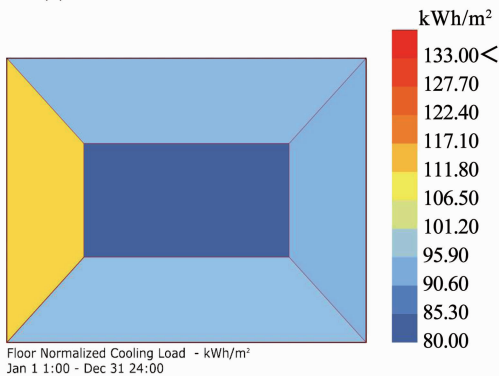
无遮阳的窗户在冬季会引入过量的太阳辐射和直射光, 造成温室效应且发生眩光的机率高, 夏季若因太阳辐射造成制冷能耗大于节省的照明能耗就得不偿失. 因此, 在细部设计阶段, 以室外遮阳百叶的叶片方向、宽度、数量、倾角为变量, 以总能耗和光性能为目标优化东、西、南向的室外遮阳百叶. 优化结果是 3 个朝向百叶数量均是 10、南向水平百叶宽 0.4 m、西向水平百叶宽 0.6 m、东向垂直百叶宽 0.6 m(倾角是 -30°)时, 总能耗是 81.9 kWh/m², sDA 为 49.7%, ASE 为 15.9%, 在之前窗墙比优化的基础上总能耗降低 3%, ASE 降低 36.5%, sDA 没有明显下降(如图 9 所示).



(a) 光性能模拟的全年光暴露量分布图



(b) 能耗模拟的区域能耗分布图



(c) 耦合自然采光的区域能耗分布图

图 7 性能模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of performance optimization results

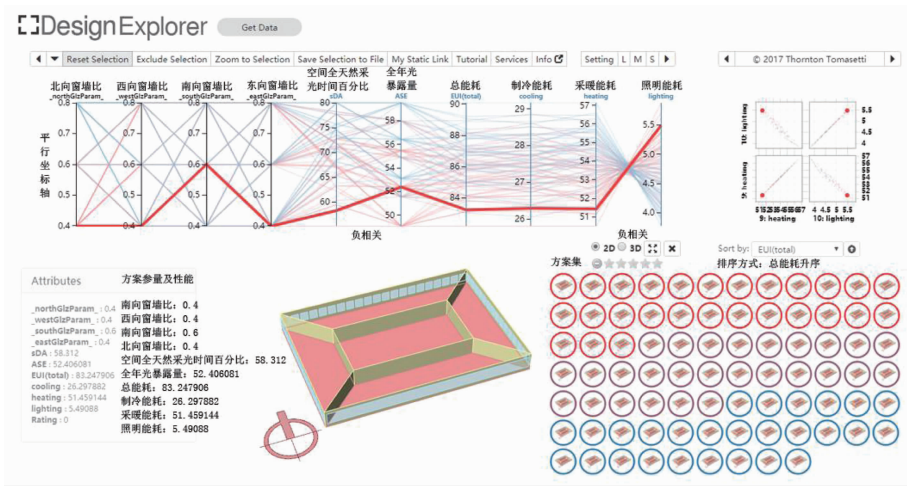


图 8 Design Explorer 展示所有方案及参与与性能之间的关联图

Fig. 8 Design Explorer shows all schemes and the associations between parameters and performance

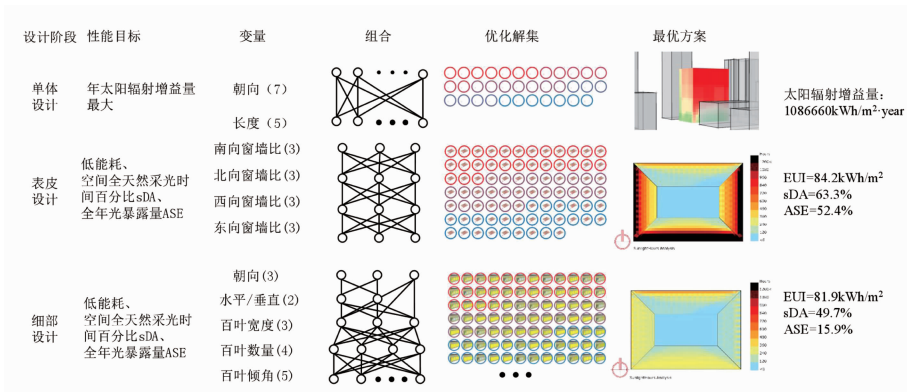


图 9 性能导向下的建筑形态生成

Fig. 9 Performance-oriented architectural form generation

4 结 论

1) 基于参数化设计平台 Rhino/Grasshopper 搭建办公建筑设计、模拟评价、优化的设计流程. 在方案阶段进行性能优化设计, 利用 L + H 做耦合光性能的能耗模拟, 为建筑师提供性能的及时反馈; 利用 DE 做多目标优化, 实现负相关性目标的共赢, 辅助建筑师制定设计决策.

2) 西安市气候虽然以低温不舒适为主, 但冬夏季气候矛盾性比夏热冬冷地区和严寒地区更严重, 因此该地区办公建筑设计要冬夏兼顾. 基于西安市气象数据量化被动设计策略, 适宜该地区的被动设计策略依次为内部得热、被动太阳得热、蒸发冷却和夜间通风.

3) 与典型正方形办公建筑相比, 形态优化获取的最优方案的太阳辐射增益量提高 3.4%. 多目标优化采用耦合自然采光的能耗模拟, 窗墙比和遮阳百叶优化设计有效平衡光性能和能耗. 遮阳百叶优化设计在窗墙比设计基础上将总能耗降低 3%, 全

年光暴露量降低了 36.5%, 空间全天采光时间百分比下降不明显.

参 考 文 献

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2019[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. 2019 Annual report on China building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019

[2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2018[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. 2018 Annual report on China building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018

[3] LEE K S, HAN K J, LEE J W. Feasibility study on parametric optimization of daylighting in building shading design[J]. Sustainability, 2016, 8(12): 1220. DOI: 10.3390/su8121220

[4] 孙澄, 韩尚松, 庄典. 性能驱动思维下的动态建筑信息建模技术研究[J]. 建筑学报, 2017, 87(8): 68
SUN Cheng, HAN Yunsong, ZHUANG Dian. A study of dynamic building information modeling techniques based on performance-driven thought[J]. Architectural Journal, 2017, 87(8): 68. DOI: 10.3969/j.issn.0529-1399.2017.08.012

- [5] 魏力恺, 弗兰克·彼佐尔德, 张颀. 形式追随性能——欧洲建筑数字技术研究启示[J]. 建筑学报, 2014, 52(8): 6
WEI Likai, PETZOLD F, ZHANG Qi. Form follows performance enlightened from architectural digital technology development in Europe[J]. Architectural Journal, 2014, 52(8): 6. DOI: 10.3969/j. issn. 0529 - 1399. 2014. 08. 002
- [6] OXMAN R. Performance-based design: Current practices and research issues[J]. International Journal of Architectural Computing, 2008, 6(1): 56. DOI: 10.1260/147807708784640090
- [7] ERCAN B, ELIAS-OZKAN S T. Performance-based parametric design explorations: A method for generating appropriate building components[J]. Design Studies, 2015, 38(1): 33. DOI: 10.1016/j. destud. 2015. 01. 001
- [8] KONIS K, SELKOWITZ S. Effectivedaylighting with high-performance facades[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978 - 3 - 319 - 39463 - 3
- [9] VILLAMIL A A G. Environmentally responsive building: Multi-objective optimization workflow for daylighting and thermal quality[D]. Los Angeles, CA: University of Southern California, 2014
- [10] 林波荣, 李紫薇. 面向设计初期的建筑节能优化方法[J]. 科学通报, 2016, 61(1): 113
LIN Borong, LI Ziwei. Building energy-saving approach in the early design stage[J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(1): 113. DOI: 10.1360/N972014 - 01379
- [11] 夏春海, 朱颖心. 面向建筑方案的节能设计研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(6): 6
XIA Chunhai, ZHU Yingxin. Study on energy-saving design for architecture scheme—Design program and tool [J]. Building Science, 2009, 25(6): 6. DOI: 10.3969/j. issn. 1002 - 8528. 2009. 06. 002
- [12] 吕帅, 徐卫国, 燕翔. 基于快速反馈的建筑方案数字设计方法研究[J]. 建筑学报, 2017, 84(5): 18
LÜ Shuai, XU Weiguo, YAN Xiang. A methodological study of architectural digital design based on rapid feedback [J]. Architectural Journal, 2017, 84(5): 18. DOI: 10.3969/j. issn. 0529 - 1399. 2017. 05. 004
- [13] 徐卫国. 参数化设计与算法生成[J]. 世界建筑, 2011, 52(6): 110
XU Weiguo. Parametric design and algorithm generating[J]. World Architectural, 2011, 52(6): 110. DOI: 10.16414/j. wa. 2011. 06. 016
- [14] ROUDSARI M S, PAK M. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design [C]//Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association. Chambéry, France: [s. n.], 2013
- [15] 云朋. 建筑光环境模拟[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
YUN Peng. Lighting environment simulation of building [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [16] HESCHONG L, MAHONE H. Daylight metrics. California Energy Commission [EB/OL]. (2012-02-02). <https://www.energy.ca.gov/2012publications/CEC-500-2012-053/CEC-500-2012-053.pdf>
- [17] Illuminating Engineering Society. Approved method: IES spatial daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE) [M]. New York: IES-Illuminating Engineering Society, 2013
- [18] 魏力恺, 张颀, 黄琼, 等. 建筑的计算性综合[J]. 建筑学报, 2013, 42(10): 100
WEI Likai, ZHANG Qi, HUANG Qiong, et al. Computational synthesis of architecture [J]. Architectural Journal, 2013, 42(10): 100. DOI: 10.3969/j. issn. 0529 - 1399. 2013. 10. 017

(编辑 张红)