

遗传算法及热舒适驱动的高校教学区形态多目标优化设计

黄海静¹, 孙玥², 荆萱³, 申越⁴

摘要: 高等教育模式升级促使集群化教学建筑、开放性外部环境、多元化公共空间成为高校教学区的主要特征, 基于室外热舒适的形态优化成为营造舒适教学区环境的关键。随着计算机模拟技术及算法领域的突破, 参数化建模、计算性模拟与遗传算法技术为区域空间形态优化提供科学依据。本文基于典型高校教学区形态调研与热环境实测分析结果, 利用 Rhinoceros 与 Grasshopper 参数化建模平台构建教学区形态几何模型, 采用 Butterfly 和 Honeybee 对风、热环境模拟数据进行 UTCI 耦合分析, 结合重庆全年气候特征与遗传算法插件 Wallacei, 使用非支配分类遗传算法 NSGA-II 构建多目标优化模型并计算。进而基于教学区形态与室外热舒适的相关性分析, 提出高校教学区形态优化与环境热舒适改善建议。

关键词: 多目标优化; 遗传算法技术; 高校教学区; 室外热舒适; 形态参数

Keywords: Multi-objective Optimization; Genetic Algorithm Techniques; University Teaching Area; Outdoor Thermal Comfort; Morphological Parameters

资助项目情况: 重庆市研究生教育教学改革研究重点项目 (yjg222001)

引言

中国高等教育模式已从注重量的增长逐步转向质的提升, 集群化教学建筑、开放性外部环境、多元化公共空间成为高校教学区的主要特征。教学区是大学教育的主要空间和物质载体, 舒适友好的室外公共空间有助于学生的全面发展[1], 基于室外热舒适的形态优化成为营造舒适教学区环境的关键。近年来, 相关学者开始关注校园形态与热舒适关系以及室外环境热舒适优化问题[2], 研究方法涵盖问卷调查、环境实测、仿真模拟等[3-6]。智东怡等通过改变空间尺度、建筑朝向和建筑围合形式, 利用模拟实验提出基于室外热舒适的组团形态设计策略[7]; 李坤明等研究建筑布局形态对夏季室外热环境的改善作用, 得出南北西三面围合式布局有利于全天热岛强度降低[8]; 陈光研究了广州地区底层架空对教育建筑组团室外热环境影响, 认为随着架空率的增大, 室外热环境明显改善[9]。然而, 集群化教学区的构成形态及室外环境较单体教学楼更为复杂, 单一形态要素与室外热舒适的关联性无法准确描述教学区整体形态对外部环境的热效应。

随着科技的发展与实际研究的需要, 计算机技术结合相应数学模型的模拟仿真方法应运而生, Ecotect、OpenFOARM、ENVI-met、Ladybug & Honeybee、Eddy3D 等室外物理环境模拟软件相继被

¹ 黄海静, 重庆大学建筑与城规学院, 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 教授, 博士生导师

² 孙玥 (✉), 重庆大学建筑与城规学院, 无, 1776563745@qq.com

³ 荆萱, 重庆大学建筑与城规学院, 无

⁴ 申越, 重庆大学建筑与城规学院, 无

应用在热舒适研究领域，为区域空间形态优化提供科学依据。本文以重庆高校集群式教学区为研究对象，运用参数化软件仿真模拟与遗传算法构建多目标优化设计流程，以环境舒适指标驱动建筑形态优化生成，为提升重庆高校教学区的室外热舒适提供参考。

1 热舒适导向的多目标优化设计流程

热舒适导向的多目标优化设计是指以提升室外环境热舒适为目的，采用环境性能模拟工具对不同要素构成的室外环境热舒适进行模拟评估，结合遗传算法探寻多要素目标综合最优的形态设计方法，优化流程包括确定参数、构建模型、优化计算及结果分析四步(图 1)。第一步，确定热舒适导向的方案优化目标及相关参数，参数包括用于描述建筑形态的形态参数以及为简化计算而设置的约束参数两类；第二步，基于 Rhino 结合 Grasshopper 平台，构建参数化几何模型、环境性能模拟模型、遗传算法优化模型；第三步，借用遗传算法插件 Wallacei 模拟自然界的进化过程，实现自动寻优；第四步，分析优化过程中产生的数据，评估各目标的相互关系、平均水平、影响因素并判断可信度，直至目标完成。该设计流程能有效降低优化过程中人工操作的任务量，大幅提升模拟计算效率，为扩大研究范围、提高研究全面性与结论精确性提供了可能。

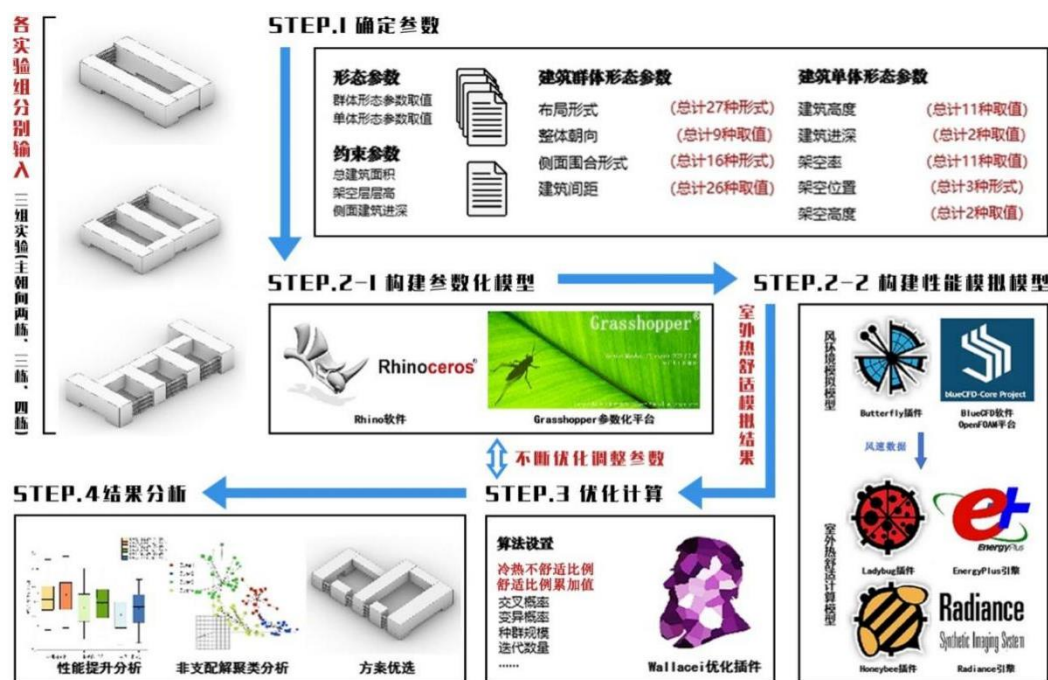


图 1 优化设计流程（图片来源：作者自绘）

2 高校教学区模型设计与构建

对重庆地区 9 所高校 34 个教学区的形态构成要素调研分析发现，重庆高校教学区建设规模多为 15000-25000 m²。在群体形态要素上，教学区平面形式以围合式居多，以南向为主朝向，建筑栋数以 2-4 栋为主，建筑间距大多在 25-35m 之间；在单体形态要素上，教学楼长度集中在 34-200m，教学单元进深集中在 7.5-12m，建筑高度受层数及层高影响，层数普遍为 5 层，层高多为 3.9-5.1m。教学区室外空间可分为庭院空间、边缘空间、主朝向架空空间、侧面架空空间四类。教学楼底层架空情况分为主要朝向教学楼架空、侧面建筑底层架空两项；主朝向教学楼架空多以 1-2 层为主，侧面架空采用

整层架空或部分架空兼做通行功能或入口空间。上述调研结果为后文构建重庆高校教学区形态参数化模型参数的设定与取值奠定基础。

2.1 参数化几何模型

(1) 优化参数确定

基于前期调研结果，研究按照主朝向教学楼数量，划分为2栋、3栋、4栋三个实验组展开研究，根据建筑群体形态要素和建筑单体形态要素设置“形态参数”。其中，建筑群体形态参数包括布局形式、整体朝向、侧面围合形式、建筑间距；建筑单体形态参数包括建筑平面尺寸、架空情况。同时，为提高优化实验探索范围的可控性和整体优化效率，按调研数据取中间值，以总建筑面积 20000 m²、架空层层高 4.5m、侧面建筑进深 11m（教学单元 8m+走廊 3m）三个取值作为“约束参数”。

(2) 参数化模型生成

在对重庆高校教学区的形态分析中发现，由于建筑规模差距极大，相同的形态参数取值也可能会导致截然不同的结果。为此，研究利用 Grasshopper 平台构建了具有代表性与普遍实用性的参数化几何模型（图 2），以“约束参数”为基础，通过调节“形态参数”生成一系列满足重庆高校教学区形态值域的几何模型。

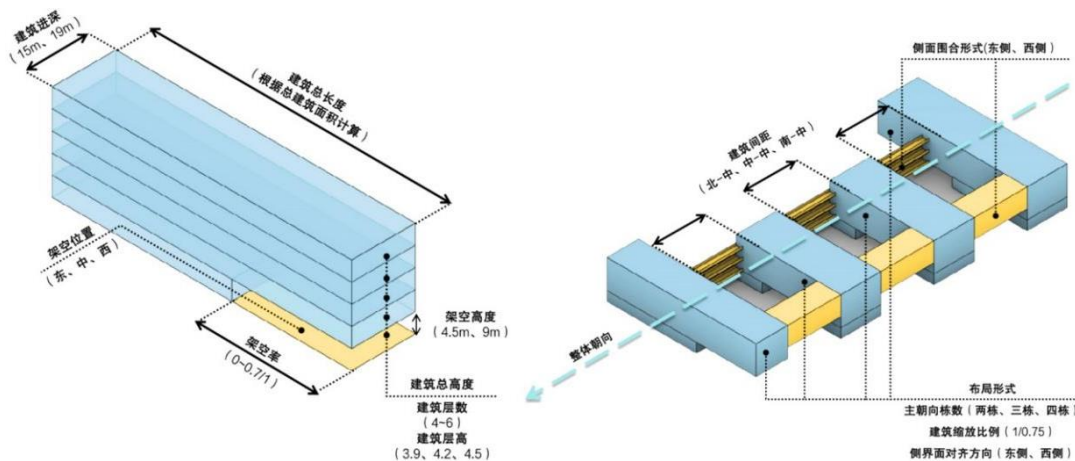


图 2 参数化几何模型（图片来源：作者自绘）

2.2 环境性能模拟模型

(1) 前期实验设置

在参数化几何模型接入 Grasshopper 平台环境性能软件进行模拟之前，需确定数据测点、气候参数和模拟时间的前期实验设置。根据教学区室外空间使用功能需求与热舒适研究需要，在教学区庭院空间、边缘空间、主朝向架空空间、侧面架空空间分别布置测点，并综合考虑优化效率与模拟质量，设置测点间距为 3m，高度为行人高度 1.5m。气候参数来自《中国建筑热环境分析专用气象数据库》中沙坪坝站的地面实测数据，模拟时间以高校上课时间段为依据，设置为全年的 8 时-21 时。

(2) 模拟模型构建

环境性能模拟需建立专门的测试平面、确定模拟范围并保证模型精度。考虑 UTCI（通用热气候指数）适用于各种气候类型、地理条件、季节下的室外热环境评价，尤其是在气候参数和生理调节关联分析方面优越性突出，参照 UTCI 热舒适评价 10 级分类标准，本研究将 26°C 以上定义为热不舒适区间，9°C~26°C 评价为舒适区间，低于 9°C 归纳为冷不舒适区间。为保证 Butterfly 及 Honeybee 对模

拟数据进行 UTCI 耦合计算的准确性，风热环境测点由 ladybug generate point grid 产生，依据前期实验数据在测试平面设置两个核心参数，即测试平面的高度（行人高度 1.5m）、测试网格大小（3m*3m）；根据前期调研设置一般教学楼室内表面材质参数，即反射系数 0.2 的混凝土地面、反射系数 0.75 的大白粉刷墙面；最后，将实验模型输入到 Honeybee 内置的 UTCI 运算器（图 3），结合已设定的温度、相对湿度、风速及 MRT¹⁾ 数据，建构室外热舒适模拟模型。

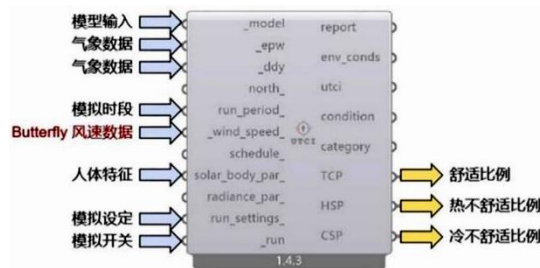


图 3 UTCI 耦合计算模块（图片来源：作者自绘）

（3）模拟精度验证

为保证模拟结果的准确，需对仿真研究中的模拟结果进行验证。研究选择庭院空间和架空空间两测点 1.5m 处的 UTCI 数值与对应地点的模拟值进行对比。由于建筑界面材质及其反射率、周边树木等环境参数难以完全反映多样复杂的真实情况，所以实测值与模拟值存在结果一定偏差。针对上述误差，选取均方根误差与平均绝对误差百分比作为误差分析指标，当 RMSE²⁾ 值小于 1.6、MAPE³⁾ 值小于 5%，即可认为精度满足要求。表 1 显示两测点的两个时段对应的均方根误差与误差均满足条件，证明了 UTCI 耦合计算的准确性，同时也验证了基于 Butterfly 进行风环境模拟的可靠度。

表 1 测点 UTCI 模拟值与实测值的 RMSE 与 MAPE 对比

测试时段	测点位置	实测 UTCI	模拟 UTCI	RMSE<1.6	MAPE<5%
		平均值 (°C)	平均值 (°C)		
9 月 30 日	庭院测点	31.62	32.42	1.31	4.54
	架空测点	30.66	31.03	1.05	3.64
11 月 5 日	庭院测点	21.00	21.32	1.30	4.50
	架空测点	20.57	20.38	0.64	2.21

2.3 遗传算法优化模型

多目标优化由 Pareto 提出，用于多参量参数系统性探究[10]。在对多目标优化问题展开求解时，会出现多个满足所有目标的可行解，但很难将所有目标同时达到最优状态，因而需在此基础上进行多性能目标权衡，尽最大可能所有目标达到最优状态解，即非支配解⁴⁾（Pareto 最优解）。非支配解不存在优劣之分，只存在不同性能的平衡差异。设计者可以根据关注的性能重点不同，从中挑选相应的最优设计解，以此作为建筑形态设计的指导依据。

（1）优化目标确定

根据 Nazarian 等学者提出 OTCA 的概念[11]，即在缺少遮阳设备或额外冷却设备的情况下，室外空间维持适当热舒适度的能力。本文借用 OTCA 的概念，结合重庆气候特征情况与全年室外热舒适评

价要求，提出高校教学区形态优化目标：①降低“全年热不舒适比例”；②降低“全年冷不舒适比例”；③提高“全年舒适比例累加值”。其中，“全年热不舒适比例”和“全年冷不舒适比例”指全年尺度下，各测点处于热不舒适和冷不舒适时段占总模拟时间的百分比的平均值；“全年舒适比例累加值”指各测点处于舒适时段占总模拟时间的百分比的总和。即：对于给定的某一测点来说，热不舒适比例+冷不舒适比例+舒适比例累加值=1。由于单一的降低热不舒适和冷不舒适比例，并不能保证教学区的整体舒适时间增加，因此需要加入提高“全年舒适比例累加值”作为优化目标。

(2) 优化算法设置

本文利用遗传算法插件 Wallacei for Grasshopper 作为优化平台（图 4）进行多目标优化研究，该软件采用 NSGA-II 多目标遗传算法⁵⁾ 解决多目标优化求解问题及参数化设计。将初始建筑形态的相关参数导入算法模型中，根据输出值对其模拟性能作出评估，输出性能结果与初始性能目标之间的比对分析主要通过遗传算法完成。如果两者匹配，则将计算结果输出；如果不相匹配，在遗传算法的驱动下会构建新型的建筑物形态模型，对其进行多轮迭代运算并最终得到非支配解集。实验的优化参量为“全年热不舒适比例”、“全年冷不舒适比例”、“全年舒适比例累加值”，旨在提高区域内全年室外热舒适水平及达标面积。由于 Wallacei 以趋小为默认优化方向，因此需要对“全年舒适比例累加值”取负值。最终，优化程序同时连接优化目标与参量，利用调整参量模拟的方式优化目标数值。

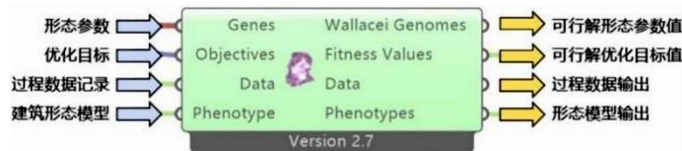


图 4 遗传算法插件 Wallacei 计算模块（图片来源：作者自绘）

3 算法寻优结果及分析

3.1 整体优化结果分析

通过 Wallacei 软件提供的功能插件进行三组实验的迭代优化趋势分析（图 5），结合模型及实测结果，调整优化热舒适模拟模型，控制单次模拟时长在 5~7 分钟。并利用遗传算法对优化模型进行充分迭代，当三组实验分别迭代至 26、32、33 代时，优化目标值收敛至稳定状态。由上至下分别是主朝向 2 栋、3 栋、4 栋时的优化实验结果，由左至右依次为“全年热不舒适比例”、“全年冷不舒适比例”、“全年舒适比例累加值”的标准差变化趋势。由图可见，随着优化进程的推进，“全年热不舒适比例”逐渐降低，“全年冷不舒适比例”与“全年舒适比累加值”逐渐增加。计算时，由于“全年热不舒适比例”与“全年冷不舒适比例”呈负相关，但“全年热不舒适比例”的降幅大于“全年冷不舒适比例”的增幅，因而整体趋势朝向更优的状态发展，且三个目标在后期都逐步进入稳定波动阶段。综上，算法设计阶段的参数设置合理，具有较高可信度。

进一步对实验组各目标优化结果作统计分析，三个实验组室外热舒适的综合表现结果为：①主朝向栋数越多“全年热不舒适比例”越低；②主朝向 3 栋、4 栋实验组的“全年冷不舒适比例”较其他组更低；③主朝向 4 栋实验组的“全年舒适比例累加值”最大，主朝向 3 栋实验组的整体表现最差。

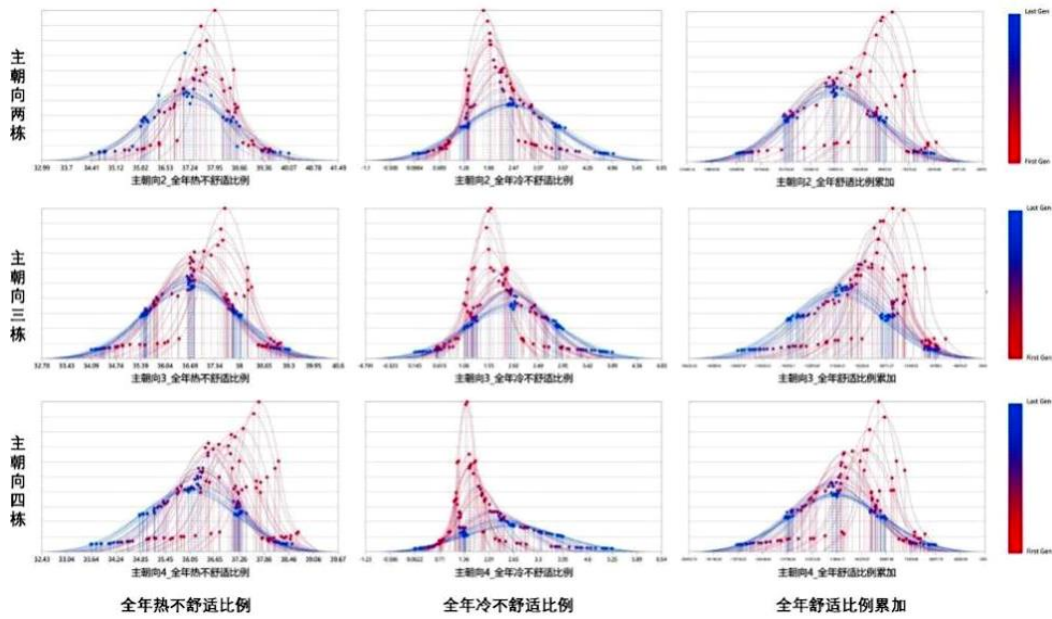


图5 优化目标迭代变化趋势（图片来源：作者自绘）

3.2 室外空间差异性分析

为研究不同类型室外空间的热舒适差异，对优化过程中各个测点模拟计算的统计数据分类筛选，分别从降低“全年热不舒适比例”和“全年冷不舒适比例”，提高“全年舒适比例累加值”三个优化目标的角度分析四类室外空间热舒适差异性。如图6所示，不同类型室外空间之间、同类型不同朝向的室外空间热舒适表现存在明显差异：四类室外空间的室外热舒适度都主要受“全年热不舒适比例”影响。庭院空间热舒适差异性源自主朝向建筑尺度、数量所形成的阴影区面积的影响；边缘空间热舒适差异性受日照时间和建筑朝向导致的通风情况的影响；主朝向架空空间和侧面架空空间热舒适差异性都与教学区通风情况、太阳辐射情况和架空形式相关。

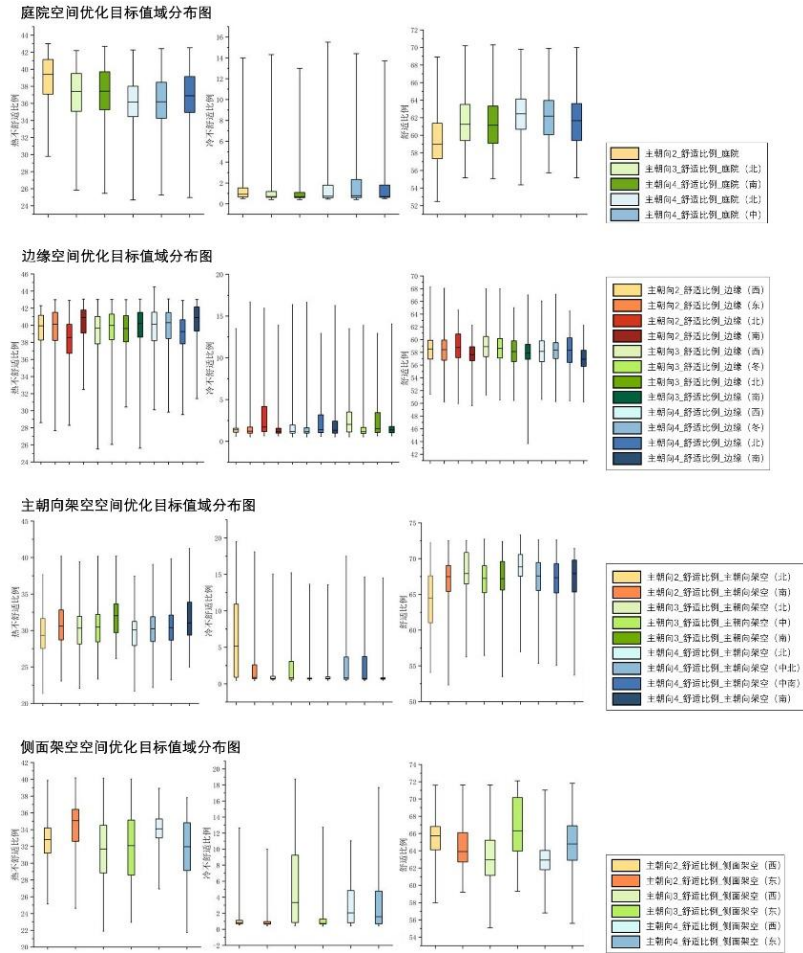


图 6 四类室外空间优化目标值域分布图（图片来源：作者自绘）

3.3 非支配解集分析

对整个优化过程出现的可行解、非支配解的控制性形态因子差异进行对比分析，得到各类形态参数可行解与非支配解的值域分布规律（图 7）。从性能提升分析可知，各实验组非支配解的室外热舒适性能均有较明显提升，总体优于可行解。对于“建筑群体形态参数”，非支配解的布局形式分为北部建筑长、短两类；整体朝向以南向、南偏西向为主；侧面围合形式中连廊、底层架空、底两层架空三种形式出现频率较高；建筑间距整体趋向于取“较大值”。对于“建筑单体形态参数”，非支配解的建筑长度倾向于取“中间值”，建筑进深趋向于 15m；整体建筑高度分布呈现北部高、南侧低的情况；架空情况上，大部分方案的架空率都达到了设定的上限值，除主朝向 3 栋北侧和 4 栋南侧外，其余各实验组架空层层数都倾向于底部架空 2 层，其中北部建筑底层架空位置大部分为中部，但在南偏西的整体朝向下，东侧架空能够最大程度利用环境风降低架空层热不舒适比例，提升整体区域舒适度。

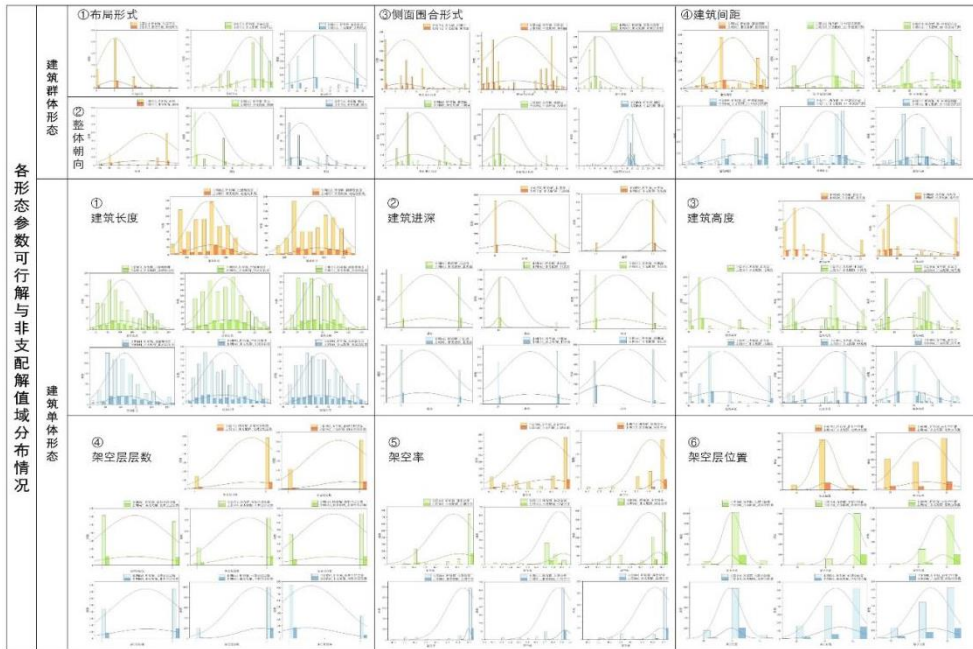


图 7 各形态参数可行解与非支配解值域分布情况图 (图片来源: 作者自绘)

4 基于室外热舒适的教学区形态优化建议

通过遗传算法优化分析, 明确了各形态参数在非支配解集中的分布规律和具体值域的取值范围。在此基础上, 需对形态参数与优化目标作相关性分析, 确定与热舒适相关性高的参数, 再结合各类型空间特征及热舒适差异性分析, 提出重庆高校教学区形态优化设计建议。

4.1 形态参数与热舒适目标相关性分析

为直观反映实验组内部各变量与室外热舒适目标的相关程度, 绘制相关系数热力图 (图 8)。分析可见, 各实验组的形态参数与降低“全年热不舒适比例”和“全年冷不舒适比例”、提高“全年舒适比例累加值”三个优化目标的相关性差异明显。其中, 与“全年热不舒适比例”高相关性的参数排序: 建筑长度、架空率、建筑高度; 与“全年冷不舒适比例”高相关性的参数排序: 整体朝向、架空率、架空层数; 与“全年舒适比例累加值”高相关性的参数排序: 建筑长度、建筑高度、建筑间距、架空层数、侧面围合形式、建筑进深。相关性分析结果可为教学区形态的参数取值提供参考。



图 8 各实验组形态参数与优化目标的相关系数热力图 (图片来源: 作者自绘)

4.2 重庆高校教学区形态优化设计建议

基于重庆高校教学区的气候条件、功能要求、场地限制及形态特点，依据非支配解集值域取值和相关性参数取值，提出教学楼形态设计建议如下：

1) 不同主朝向教学楼栋数营造的教学区室外空间热舒适性差异明显。在总面积限定的前提下，主朝向4栋教学楼的室外热舒适性最优，在场地条件合适时建议优先考虑；

2) 不同主朝向教学楼栋数的形态参数取值偏向各有不同，主要与引导气流能力、阴影区覆盖面积及室外空间面积有关。其中布局形式、整体朝向、侧面围合形式及架空情况都是影响场地风环境的关键因素，在重庆低风速的背景下，其具体取值应以加强场地通风为主要目标；

3) “全年热不舒适比例”是重庆地区教学区室外热舒适性的主要控制因素，且受到形态因素影响的敏感性最高。场地受限时，建议优先选择“热不舒适比例”显著降低的教学楼形态方案。

此外，综合教学区舒适优化结果提出整体表现均衡的方案建议（图9），该方案在保证冷、热不舒适比例处于中间水平的前提下，可提供更多处于舒适情况的空间供师生日常活动交流。

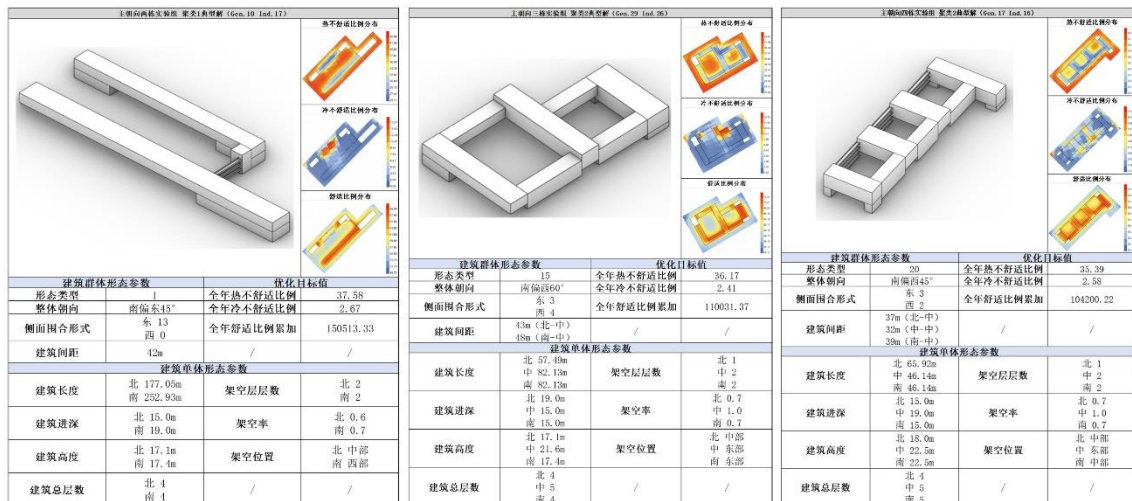


图9 教学区形态优化方案（图片来源：作者自绘）

结语

本文基于重庆高校教学区形态构成要素调研，以教学区全年室外热舒适提升为目标导向，借助Rhino & Grasshopper 参数化平台、Ladybug & Honeybee 插件、Butterfly 风环境模拟等软件，建立“确定参数—构建模型—优化计算—结果分析”多目标优化设计流程；进而构建参数化几何模型、环境性能模拟模型以及遗传算法优化模型，基于数字模型及遗传算法展开教学区形态优化分析，综合热舒适优化结果提出高校教学区形态设计建议。“参数化建模+计算性模拟+遗传算法”的多目标优化设计方法，不仅能为教学区形态优化、环境热舒适改善提供全面指导，还能缩短方案调整时间、提高模拟计算和设计效率，体现了计算机模拟及算法技术在建筑设计领域的应用潜力。

参考文献

- [1] 李玲. 重庆市中心城区高校教学区户外学习空间优化研究[D]. 西南大学, 2021.
- [2] Mangiarotti, Anna, Paoletti, 等. A Model for Programming Design Interventions Aimed at Reducing Thermal Discomfort in Urban Open Spaces: A Case Study on the Politecnico di Milano Campus[J]. JOURNAL OF GREEN BUILDING, 2008, 3(4): 119-129.
- [3] 王巧雯, 汪磊磊. 基于室外风环境 CFD 模拟的住宅小区设计策略[J]. 新建筑, 2018, (05): 69-71.
- [4] 屈张. 美国大学校园规划设计漫谈: 以加州大学伯克利分校和哈佛大学为例[J]. 住区, 2017, (04): 126-131.
- [5] 周逸湖, 宋泽方. 高等学校建筑规划与环境设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994: 743-748.
- [6] Westerberg Sandberg-m, L U-Claesson. Catchment area—a new approach to urban windiness. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate[C], 2003: 5149-5161.
- [7] 智东怡. 基于室外热舒适的寒地高校教学楼组团设计策略研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [8] 李坤明, 张华静, 赵立华. 寒冷地区高校校园不同室外空间形态下的热环境长时间尺度测析[J]. 建筑科学, 2020, 36(08): 43-49.
- [9] 陈光. 广州地区底层架空对教育建筑组团室外热环境影响[D]. 华南理工大学, 2012.
- [10] Ehr Gott M. Vilfredo Pareto and multi-objective optimization[J]. Doc. math, 2012, 8: 447-453.
- [11] Nazarian N, Acero J A, Norford L. Outdoor thermal comfort autonomy: Performance metrics for climate-conscious urban design[J]. Building and Environment, 2019, 155: 145-160.

文后注释

- 1) MRT: 平均辐射温度, 是指环境四周表面对人体辐射作用的平均温度。
- 2) RMSE: 是一种常用的测量数值之间差异的量度, 均方根差的数值常为模型预测的量或是被观察到的估计量。
- 3) MAPE: 是一种常用的评估指标, 用于衡量预测结果与实际观测值之间的误差百分比。在进行预测模型评估时, 使用 MAPE 指标可以帮助我们了解预测结果与真实值之间的相对误差程度。
- 4) 非支配解: 多目标优化过程中, 在无法在改进任何目标函数的同时不削弱至少一个其他目标函数状态下得到的解, 该解被称作非支配解或 Pareto 最优解, 该解的集合被称作非支配解集或 Pareto 最优解集。
- 5) NSGA-II 算法: NSGA-II 是最流行的多目标遗传算法之一, 它降低了非劣排序遗传算法的复杂性, 具有运行速度快, 解集的收敛性好的优点, 成为其他多目标优化算法性能的基准。

图表来源

- 1) 图 1: 作者自绘
- 2) 图 2: 作者自绘
- 3) 图 3: 作者自绘
- 4) 图 4: 作者自绘
- 5) 图 5: 作者自绘
- 6) 图 6: 作者自绘
- 7) 图 7: 作者自绘
- 8) 图 8: 作者自绘
- 9) 图 9: 作者自绘