

# 多性能指标权衡下光气候 III 区中小学普通教室遮阳采光系统优化研究

陈泉安<sup>1</sup>, 杜聿琛<sup>2</sup>, 韩世龙<sup>1</sup>

**摘要:** 提高教室中天然光的利用率有利于提高学生绩效、缓解疲劳、节约能源。本研究以改善光气候 III 区中小学教室光环境质量和降低夏季制冷能耗为目的, 选择郑州地区中小学作为研究对象, 对中小学普通教室遮阳采光系统进行设计和优化。研究选取 cEUI (cooling Energy Use Intense/制冷能耗强度)、DGI (Daylight Glare Index/日光眩光指数) 和 UDI (Useful Daylight Illuminance/有效采光照度百分比) 为目标参数, 并提取遮阳系统角度、宽度、间距、数量和偏移距离 5 个设计参数以及反光板角度、宽度、高度、偏移距离和反射率 5 个设计参数; 基于河南地区中小学普通教室的实测数据, 通过 Radiance 和 Energyplus 对教室的光环境、热环境以及制冷能耗进行模拟计算, 同时使用 Wallacei 的遗传算法进行优化迭代, 最终产生 2800 组模拟结果。研究进一步建立最优解方程, 并通过机器学习对结果进行归纳, 利用 python 平台调用随机森林算法, 进行敏感性分析, 得出遮阳构件各个参数影响的权重, 获得了适用于光气候 III 区中小学教室遮阳采光系统三个主要组件的性能影响规律和最佳设计参数。研究结果表明, 相比基础模型, 优化模型可有效提升教室内的光环境同时降低制冷能耗: 南向和北向教室 UDI 分别提升 17.97% 和 31.36%, cEUI 分别降低 3.41% 和 0.9%。DGI 分别降低 28.96% 和 8.57%。

**关键词:** 中小学教室; 遮阳采光; 性能模拟; 多目标优化; 机器学习

**Keywords:** Primary and Secondary School Classrooms; Shading and Daylighting; Performance Simulation; Multi-Objective Optimization; Machine Learning

## 引言

自然采光在中小学建筑设计中具有显著优势和深远意义。自然光有助于提升学生的身心健康、改善学习表现和注意力集中度, 且能够显著降低能源消耗, 实现建筑的可持续发展。河南的大部分区域都处于光气候 III 区, 拥有良好的光照资源。但目前河南地区中小学普通教室中天然光通常并未得到充分利用。由于绝大多数学校都没有设置遮阳措施, 普遍存在南向教室近窗区照度过高且眩光严重、北向教室远窗区照度不达标等问题。整体光环境质量有待改善, 这导致绝大多数学校日常上课时只能通过拉上窗帘采用人工照明来改善室内的光环境。相较于人工照明灯光, 自然采光的教室环境的光感更强、空间也更立体, 且自然光对青少年的身心健康具有不可忽视的影响。学生在良好的光环境中注意力容易集中、更有利于提高学习效率, 因此对普通教室遮阳采光的研究有着很强的现实意义。

<sup>1</sup> 陈泉安, 郑州大学, 正高级工程师

<sup>2</sup> 杜聿琛 (✉), 郑州大学, 761538005@qq.com

在既有建筑中, 遮阳采光系统的恰当使用可以依照建筑适宜不同天气日照特点, 为建筑引入更多的自然光、提高视觉舒适度、采光均匀度等, 一定程度上起到提升房间采光量的效果。常见的遮阳采光系统主要有反光板、采光百叶、棱镜系统、导光管系统以及各类遮阳系统等。Wong 在其研究中, 对建筑物中采光设计和实施进行了综述, 强调了采光系统在现代建筑中的重要性, 并探讨了不同采光技术的应用<sup>[1]</sup>。王语嫵与汪统岳通过参数化软件对不同光气候区办公楼的太阳能幕墙进行了多目标优化研究, 为太阳能立面的设计提供了科学依据<sup>[2]</sup>。李伟等人设计了具备太阳追踪功能的室内采光系统, 实验表明该系统能有效传输太阳光, 满足室内照明需求<sup>[3]</sup>。Lee 将反光板与三角棱镜结合, 提高了室内光线的均匀度和节能效果, 但建议在冬天时拆除棱镜片以避免阻挡光线<sup>[4]</sup>。Lim 将采光百叶窗与反光板组合应用, 将有效采光深度从窗口高度的 2.5 倍显著提高到 3.6 倍<sup>[5]</sup>。段旺等人利用计算机模拟技术研究了奥运中心区地下车库的导光管系统, 证实了其在改善地下空间采光和节能方面的显著效果<sup>[6]</sup>。张立诚等人基于“D/H”指标通过正交实验和遗传算法, 提出了一种快速选取山地住宅适宜遮阳采光系统的方法, 并通过模拟实验验证了其有效性<sup>[7]</sup>。总的来说, 遮阳采光系统的研究有着从采光设计到采光优化再到多目标的性能优化的趋势, 但研究极少涉及多目标的性能优化, 同时研究方向多为提升光环境质量, 缺乏对能耗的相关研究。

本文以此为切入点, 在实地调研的基础上提出组合式遮阳采光系统, 兼顾采光性能、防眩光以及节约能耗三方面因素, 可同时满足光气候III区普通教室在冬季北向等阴天时的采光需求和夏季南向等晴天时的遮阳需求, 并通过采光模拟软件对该系统各组件的最佳设计进行研究。

## 1 研究方法

本文主要研究工作流程为结合实地调研数据, 通过 Rhinoceros+Grasshopper 建立普通教室典型模型。选取遮阳板的宽度、间距、角度以及反光板的反射率、角度、高度等作为变量, 以性能模拟结果指标 UDI、CEUI、DGI 为结果导向。性能分析采用 ladybugtools 中的 HB-radiance 进行采光模拟分析以及 HB-energy 进行能耗分析。利用基于遗传算法的寻找最优解集的插件 Wallacei, 寻求 UDI 的最大值以及 CEUI、DGI 的最小值的遮阳采光方案解集, 之后采用 python 平台中的随机森林算法对解集进行处理, 得到每个变量对于每个目标值的影响趋势以及影响权重, 权衡最佳方案, 以指导方案的优化设计, 整体工作流程见图 1。

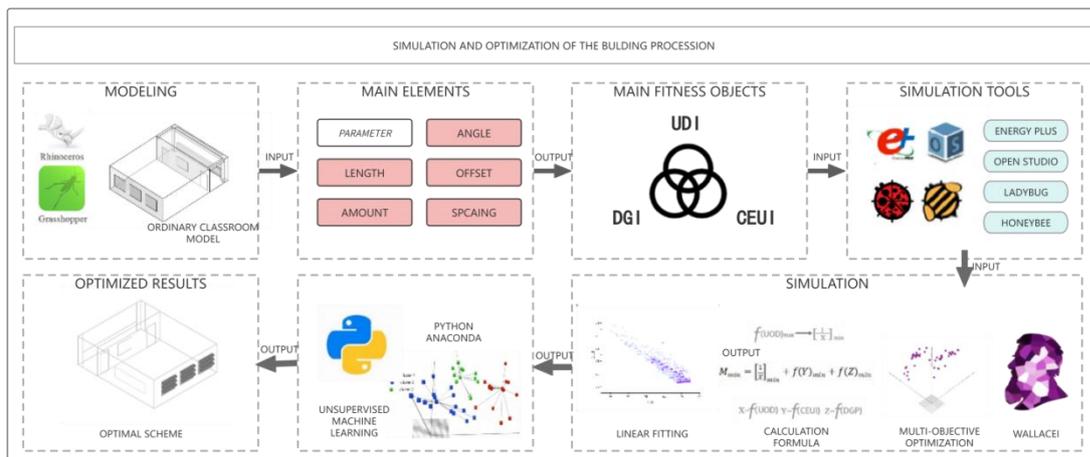


图 1: 研究工作流程图



北向教室则不建议布置遮阳措施。因此需采用性能高效、可行性高、可靠性强的采光系统与遮阳系统相结合，满足晴天、南向教室的遮阳需求和阴天、北向教室的采光需求。

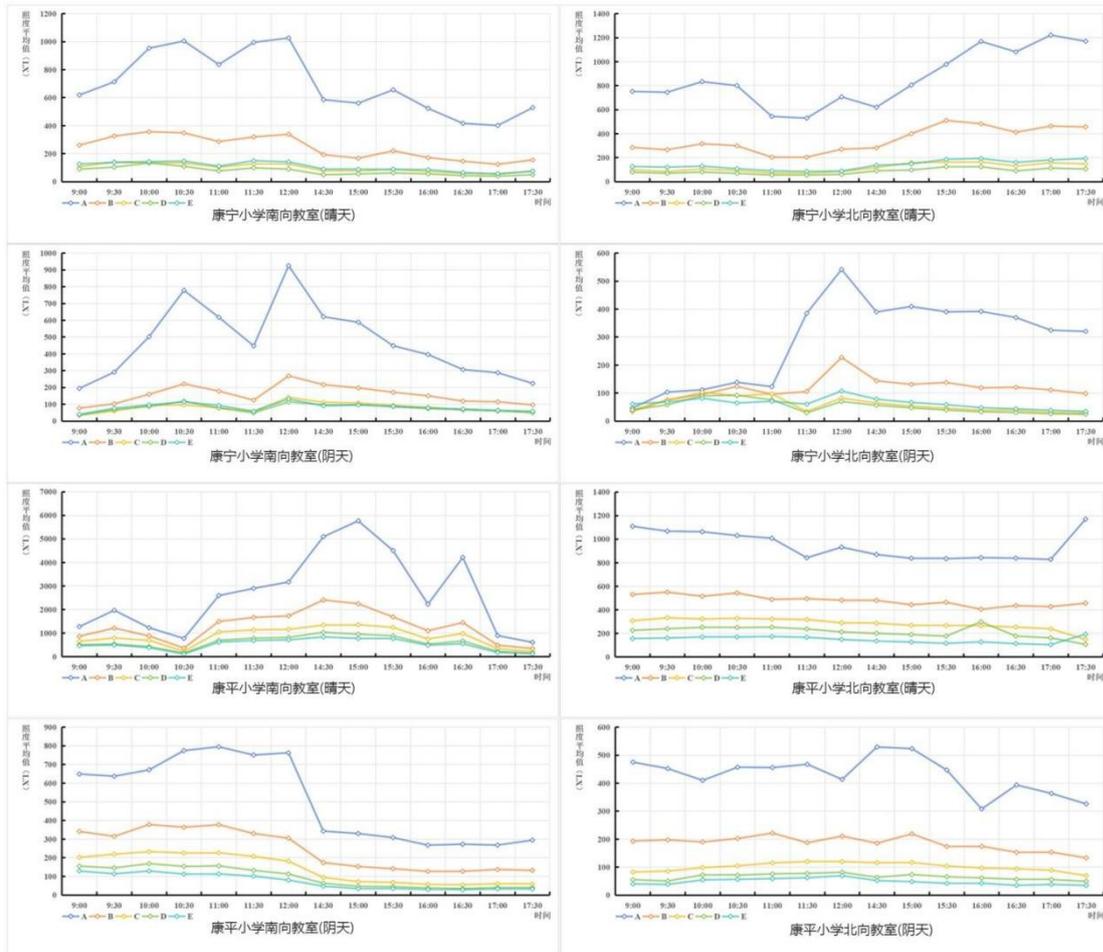


图 3： 各教室在进深方向一天内各时刻的照度值变化

## 2 遮阳采光系统优化设计

### 2.1 教室单元典型模型建立

经过对河南地区普通教室的数据分析得出调研学校普通教室的净开间取值为 7.5m-8.7m，众数为 8.7m。教室进深的数据范围为 6.9-7.8m，众数为 7.8m。教室净高的数据范围为 3.3-3.8m，众数为 3.6m。因此典型模型的形体参数为开间 8.7m、进深 7.8m、层高 3.6m。同样根据实际调研的数据汇总和分析建立典型模型，典型普通教室初始模型信息如下：外侧墙阳台高 1.1m、窗高 1.8m、窗墙比为 0.32、窗间距为 2.6m，走廊侧的阳台高 1.1m、窗高 1.4m、窗墙比为 0.17。同样的根据调研总结的出，走廊侧的开窗数量保持恒定，数量为 1。在此说明模型 A 和模型 B 初始参数除朝向不同外其他条件均保持一致。模型 A 为正南向教室，模型 B 为正北向教室，并建立实验初始模拟模型如图 4 所示。

### 2.2 原始模型性能

通过性能模拟平台对初始的模型 A 和模型 B 进行能耗和自然采光的模拟，结果如图表 2 所示。a 表示模型 A 有效照度百分比的分布其中为 41.36%，c 表示为夏至日模型 A 的鱼镜头渲染图，其

中窗洞口不舒适眩光指数 DGI 为 20.59。d 表示模型 B 有效照度百分比的分布其中为 42.51%，f 表示为夏至日模型 B 的鱼镜头渲染图，其中窗洞口不舒适眩光指数 DGI 为 20.64。在进行初始模拟后得到相应数据，能够为优化设计结果提供对比参考的数据，并且可以看出南向教室近窗区照度过高且眩光严重，北向教室远窗区照度偏低，模拟数据与教室实测反映出的结果基本一致。

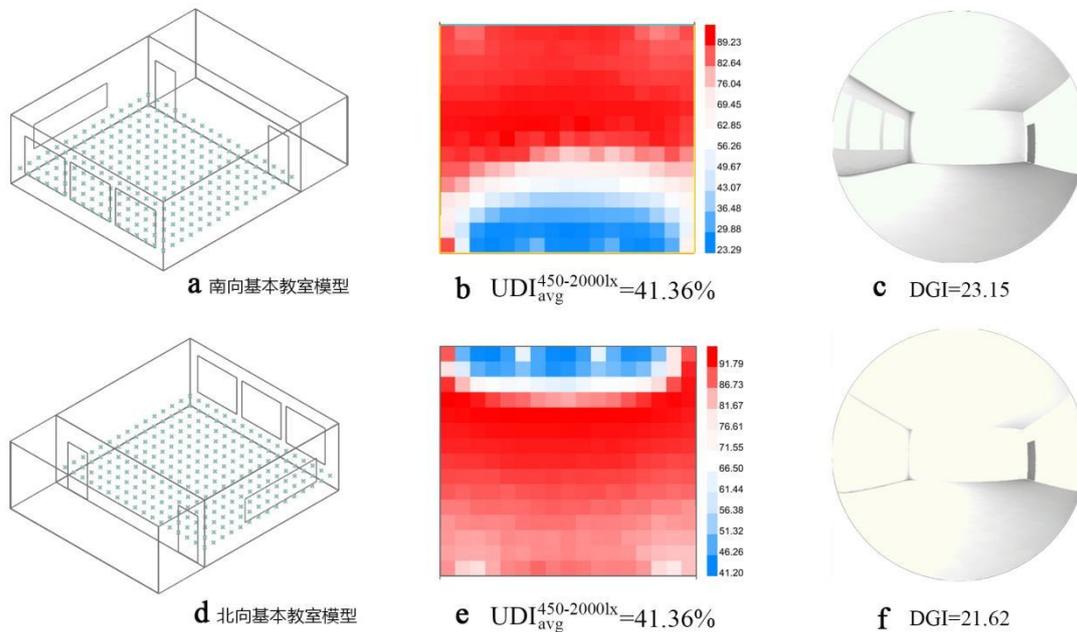


图 4： 典型教室初始模拟结果

## 2.3 解集分析和讨论

通过性能模拟平台对初始的模型 A 和模型 B 进行能耗和自然采光的模拟，结果如图表 2 所示。a 表示模型 A 有效照度百分比的分布为 41.36%，c 表示为夏至日模型 A 的鱼镜头渲染图，其中窗洞口不舒适眩光指数 DGI 为 20.59。d 表示模型 B 有效照度百分比的分布为 42.51%，f 表示为夏至日模型 B 的鱼镜头渲染图，其中窗洞口不舒适眩光指数 DGI 为 20.64。在进行初始模拟后得到相应数据，能够为优化设计结果提供对比参考的数据，并且可以看出南向教室近窗区照度过高且眩光严重，北向教室远窗区照度偏低，模拟数据与教室实测反映出的结果基本一致。

### 2.3.1 多目标优化参数设置

Wallacei 只能寻求优化目标的最小值，因此对于优化目标 UDI 求的值需要乘以-1。在能耗问题的评价中，因为郑州市的中小学普通教室采用的是集中供暖的方式，因此在能耗计算仅包含夏季制冷能耗，以单位建筑面积全年制冷能耗(kWh/m<sup>2</sup>)为指标。优化设计自变量对象描述和取值范围范围见表 2，Wallacei 参数设置见表 3。优化是在一台具有 12 核 2.80GHz 处理器和 16G 内存的计算机上进行的，计算大约需要 5 天。

表 2 优化算法设置及模拟次数（来源：笔者自绘）

精英主义	突变概率	突变率	交叉率	人口规模	迭代数	模拟时间
0.5	0.2	0.9	0.8	80	30	5 天

表 3 南向教室优化设计自变量对象描述和取值范围（来源：笔者自绘）

自变量	遮阳板角度	遮阳板宽度	遮阳板数量	遮阳板间距	遮阳板向外偏移距离	反光板角度	反光板长度	反光板高度	反光板反射率	反光板向外偏移距离
简称	SA	WS	NS <sub>1</sub>	SS	OS	RA	RL	RH	RR	OR
范围	-60-60	0.3-0.9	6-15	0.3-2.4	0-1.2	-45-45	0.3-0.9	1.8-2.2	0.6-0.9	0-1.2
单位	°	m	-	m	m	°	m	m	-	m
幅度	1	0.01	1	0.1	0.1	1	0.01	0.1	0.1	0.1

表 3 北向教室优化设计自变量对象描述和取值范围（来源：笔者自绘）

自变量	反光板角度	反光板长度	反光板高度	反光板反射率	反光板偏移距离
简称	RA	RL	RH	RR	OR
范围	-45-45	0.3-0.9	1.8-2.2	0.6-0.9	0-1.2
单位	°	m	m	-	m
幅度	1	0.01	0.1	0.1	0.1

### 2.3.2 多目标优化参数设置

模型 A 和模型 B 帕累托最优解的数量在 20-30 代左右基本保持稳定。模型 A 最终计算结果为 3961，模型 B 计算结果为 4118。如图所示，为模型 A 和模型 B 的非支配解集三维立体的可视化，其中 X 轴为 UDI、Y 轴为 CEUI、Z 轴为 DGI。a 与 b 分别为模型 A 和模型 B 的非支配解集三维可视化以及目标值两两之间的关系。由图我们可以明显的看出，无论是模型 A 还是模型 B 表现出的分布趋势基本一致。并且可以看到 UDI 与 CEUI、DGI 以及 CEUI 与 DGI 有着明显的线性关系，随着 UDI 增加 CEUI 与 DGI 都会增加，说明减少眩光和降低制冷能耗的同时也会影响室内的光照质量，UDI 与 CEUI 和 DGI 呈负相关。以下将模型 A 和模型 B 分开讨论其非支配解集和优化结果。

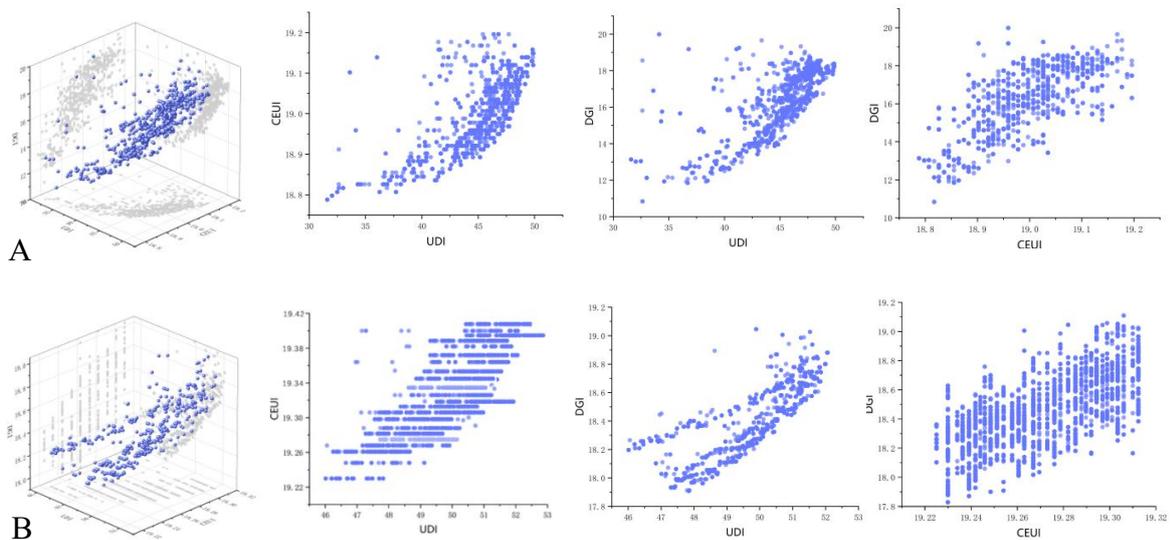


图 5：非支配解集可视化

### 2.3.3 帕累托解集

据统计模型 A 帕累托解集的共有 92，对模型 A 帕累托解集统计结果如表所示。其中 UDI 的值最高可达 49.89%，最小值为 40.40% 平均值为 46.02%，相对初始模拟数值提高了 7.52%。CEUI 最高值为 19.196KWh/m<sup>2</sup>，最低值为 18.845KWh/m<sup>2</sup>，平均值为 19.015KWh/m<sup>2</sup>，对比初始模拟数值最高可降低夏季制冷能耗 2.4%。DGI 的最大值为 19.66 最小值为 14.05，平均值为 16.69，对比初始模拟数据得出窗洞口不舒适眩光指数最高可降低 15.62%。

模型 B 帕累托解集的共有 86, 对模型 B 帕累托解集统计结果如表所示。其中 UDI 的值最高可达 52.06%, 最小值为 45.00%, 平均值为 49.56%, 相对初始模拟数值最高可提升 25.05%。CEUI 最高值为 19.405KWh/m<sup>2</sup>, 最低值为 19.225KWh/m<sup>2</sup>, 平均值为 19.27KWh/m<sup>2</sup>, 对比初始模拟数值最高可降低夏季制冷能耗 0.7%。DGI 的最大值为 19.42 最小值为 17.91, 平均值为 18.40, 对比初始模拟数据得出窗洞口不舒适眩光指数最高可降低 6.07%。由模拟分析的数据可以看出模型 A 和模型 B 的优化提升都很明显, 特别是对于以模型 A 为代表的教室, 该方法能够有效的提升教室的有效照度百分比和降低教室的不舒适眩光指数, 并且降低教室在使用过程中的空调制冷能耗。

表 1 郑州市典型普通教室初始模拟结果 (来源: 笔者自绘)

模型 数值	模型 A				模型 B			
	最小值	最大值	平均值	原始值	最小值	最大值	平均值	原始值
UDI(%)	40.40	49.89	46.02	42.29	45.00	52.06	49.56	39.63
CEUI(KWh/m <sup>2</sup> )	18.85	19.20	19.01	19.50	19.22	19.41	19.27	19.41
DGI	14.05	19.66	16.69	19.78	17.91	19.43	18.40	19.59

## 2.4 最佳方案分析和讨论

### 2.4.1 数据分析

Wallacei 只能寻求优化目标的最小值, 因此对于优化目标 UDI 求的值需要乘以-1。在能耗问题的评价中, 因为郑州市的中小学普通教室采用的是 min-max 标准化方法, 也被称极差标准化法。

$$X' = \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})}$$

其中X表示经过标准化之后的新数据, 对于原始数据, 经过处理之后, 变量的范围都满足  $0 \leq X' \leq 1$ , 并且为正值, 并保持数据的方向一致。

### 2.4.2 最佳方案选取

对于教室的技术衡量指标, 我们原则是寻求 UDI 的最大值、而 CEUI 和 DGI 在数值上尽可能的小, 因此我们可以将寻求 UDI 的最大值转化为 UDI 倒数的最小值, 最终我们就将目标转化为寻求 UDI 倒数、CEUI、DGI 三个指标的最小值, 因此结合三个方程我们可以得到一个新的方程:

$$M_{min} = \left[ \frac{1}{UDI} \right]_{min} + f(CEUI)_{min} + f(DGI)_{min}$$

如图表 6 所示, 通过方程计算之后得到模型 A 综合性能表现前三的设计方案, 可以看到三个方案的 UDI、CEUI、DGI 相比原始模型都有很高的提升。综上所述: 南向教室竖向遮阳采光系统最佳设计参数为, 遮阳板角度-5°, 遮阳板宽度 1.19m, 遮阳板数量 9 片, 遮阳板间距 0.6m, 遮阳板偏移距离 0.2m; 反光板角度-5°, 反光板高度 2.2m, 反光板反射率 0.7, 反光板偏移距离-0.1m。

表 5: 模型 A 方案信息统计

解集	SA	WS	NS	SS	OS	RA	RL	RH	RR	OR	UDI	CEUI	DGI
方案一	-5	1.19	9	0.6	0.2	-5	1.19	2.2	0.7	-0.1	45.73	18.93	15.03
方案二	-4	1.16	9	0.6	0.2	-4	1.16	2.2	0.7	-0.1	45.14	18.93	14.73
方案三	-1	1.19	9	0.6	0.2	-1	1.19	2.1	0.7	0.7	46.24	18.98	15.19

如表 6 所示, 通过方程计算之后得到模型 B 综合性能表现前三的设计方案, 可以看到三个方案的 UDI、CEUI、DGI 相比原始模型都有很高的提升, 虽然三个方案的三个指标均各有优势, 但方案一的综合表现为最佳。综上所述: 北向教室最佳设计参数为, 反光板角度 22°, 反光板高度 1.8m, 反光板反射率 0.8, 反光板偏移距离 0m。

表 6: 模型 B 方案信息统计

解集	RA	RL	RH	RR	OR	UDI	CEUI	DGI
方案一	22	0.86	1.8	0.8	0	49.39	19.25	18.15
方案二	21	0.88	1.8	0.7	0	49.30	19.25	18.15
方案三	19	0.9	1.8	0.8	0	49.50	19.25	18.22

研究表明采用多目标优化的方式能够有效的提升教室的各项指标，如图所示对比基础模型在帕累托解集中存在各具优势的设计方案（见图6）。但在真实的实践项目过程中方案的选择是由建筑师所决定的，因此如何帮助建筑师在众多的方案中选出综合表现最好的方案是至关重要的。为了更有效的研究各个自变量与因变量之间的关系，本文进行了以下分析。

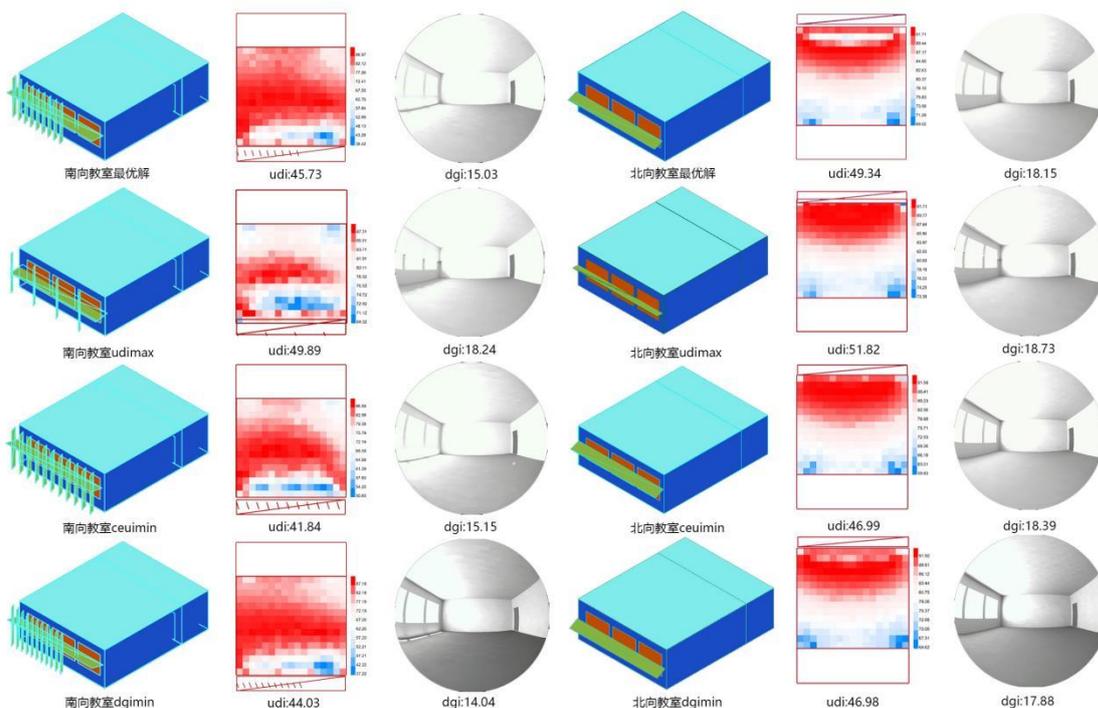


图6 模型迭代结果示意图

## 2.5 敏感性分析

### 2.5.1 敏感性分析工具与流程

在建筑设计的实践中，理解各设计参数对建筑性能影响的权重十分关键。为此，本文在Wallacei多目标优化的基础上，进一步探讨了遮阳构件各设计参数对教室光环境指标的影响权重，采用Python平台，调用随机森林算法进行敏感性分析，从而为设计决策提供量化的依据。将wallacei所优化出的参数和各个指标整理成数据集，保存成CSV格式，在Python平台中进行数据整理和清洗，将数据集划分为训练集和测试集，再通过sk-learn库调用随机森林算法训练模型；使用测试集进行预测，计算均方误差来评估模型，最后用matplotlib库进行特征重要性可视化。分析结果揭示了不同设计参数对教室内光环境指标采光均匀度（UOD）、环境能源使用强度（CEUI）和日照眩光指数（DGI）的影响权重。

在本研究中，首先定义了遮阳构件影响教室光环境的主要设计参数，包括遮阳构件的旋转角度、间距、长度、数量、间距和向外偏移距离。通过Python中的scikit-learn库调用随机森林算法训练模型，以此来处理多变量的非线性关系，并提供了一种量化特征影响的方法。

### 2.5.2 北向普通教室敏感性分析

针对 UDI 进行分析，反光板角度 (R-angle) 对其影响最为显著，其特征重要性值为 0.7615。这表明，北向教室的自然采光效果主要依赖于反光板角度的精细调整，而其他参数如反光板偏移距离 (R-OFFSET) 和高度 (R-HIGH) 的影响相对较小，但仍需合理配置以确保最佳光环境。

在针对 cEUI 的分析中，反光板宽度 (R-depth) 和偏移距离 (R-OFFSET) 是主要影响因素，特征重要性分别为 0.4804 和 0.3423。通过优化这些参数，可以在北向教室中有效降低制冷能耗，进而提升能源利用效率。这种调整不仅有助于减少冷却负荷，还能降低空调系统的运行压力，实现节能与舒适度的平衡。

针对 DGI 的分析表明，反光板角度 (R-angle) 是影响眩光的关键参数，特征重要性高达 0.8871。合理调整反光板角度可以显著减少眩光，提升教室内的视觉舒适度，减少眩光引发的不适感。在北向的教室里，这样的调节往往能够消除一些局部眩光，这些眩光可能由某些反射率较高的材料所造成。结合各项分析，北向教室的优化设计应重点关注反光板的角度、深度及偏移距离的调整。根据表 7，通过精细化配置这些关键参数，可以在改善光环境的同时有效降低能耗，从而全面提升教室的整体性能。

表 7 北向教室优化设计自变量对象敏感性分析结果 (来源: 笔者自绘)

自变量	反光板角度	反光板向外偏移距离	反光板高度	反光板长度	反光板反射率	决定系数
UDI	0.76	0.11	0.07	0.04	0.003	0.98467
cEUI	0.10	0.34	0.06	0.4	0.002	0.98515
DGI	0.88	0.04	0.04	0.01	0.000	0.99603

### 2.5.3 南向普通教室敏感性分析

针对 UDI 进行分析，遮阳板数量 (S-COUNT) 对其有决定性影响，其特征重要性值为 0.3594，对 UDI 影响最大。同时，遮阳板间距 (S-DIST BETWEEN) 和宽度 (S-DEPTH) 也对 UDI 有重要影响。增加遮阳板的数量并对其间距和深度进行精细化调整，能够增强教室的自然采光效果，同时可以优化光照的均匀性和分布，从而提升整体空间的视觉质量。

针对 cEUI 进行分析，反光板高度 (R-HIGH) 和偏移距离 (R-OFFSET) 是影响能耗的关键参数，特征重要性值分别为 0.3742 和 0.1879。其余参数影响和权重较小，仅对环境有略微的影响效果。通过对反光板高度和偏移距离为主的参数进行优化配置，可以显著减少冷却负荷，从而提升教室的能源利用效率。这种调整能够有望降低空调系统的运行压力，维持室内舒适度的同时实现更高的能源效率，同时更好的在维持室内舒适度的前提下实现更好的节能减排效果，达到低碳绿色的建筑目标。

针对 DGI 进行分析，遮阳板间距 (S-DIST BETWEEN) 对 DGI 的影响最大，特征重要性高达 0.5797。合理设计遮阳板的间距，可以显著降低眩光现象，改善教室内的视觉舒适度，减少因眩光引起的疲劳和不适。在综合考量遮阳板间距、反光板深度 (R-depth) 和角度 (R-angle) 也对 DGI 有着举足轻重的影响，其特征重要性分别为 0.2611 和 0.2510。通过调整反光板的深度和角度，能够在保持良好自然采光的同时，进一步降低能耗。因此，南向教室的遮阳系统优化设计应系统性地关注遮阳板的数量、间距，以及反光板的高度和角度。虽然单一参数可能在某一目标指标上表现突出，但在多目标优化框架中，需要综合考虑所有相关参数和目标的权衡。敏感性分析不仅限于识别最关键的参数，还进一步探究了各参数之间的交互作用，通过精准调整这些关键参数，不仅可以实现光环境的优化，还能有效控制眩光，并显著降低制冷能耗，最终达到教室空间的全面性能提升。



本研究从郑州市地区的特殊环境出发, 结合实际情况提取南北朝向模型, 对原始典型模型进行了基于遗传算法的外窗遮阳构件设计的多目标优化, 并对各个性能指标和变量因子进行多元线性方程的拟合、并通过大量的数据分析和帕累托方案的验证最终得出以下结论:

(1) 对于郑州地区, 南向教室最佳设计参数为, 遮阳构件角度为 $-5^{\circ}$ 、遮阳板宽度为 1.19、遮阳板数量为 9、遮阳板间距 0.6、遮阳板向外偏移距离为 0.2、反光板角度为 $-5^{\circ}$ 、反光板长度为 1.19、反光板高度 2.2、反光板反射率 70%、反光板向外偏移距离为 $-0.1\text{m}$ ; 北向教室最佳设计参数为反光板角度为 $22^{\circ}$ 、反光板长度为 0.86、反光板高度 1.8、反光板反射率 80%、反光板向外偏移距离为 0m。

(2) 基于遗传算法的多目标优化设计方法同样适用于光气候三区其余地区中小学的教室。对于北朝向的教室 UDI 的值最高可达 52.06%, 性能提升了 31.36%。CEUI 最低值为  $19.22\text{KWh}/\text{m}^2$ , 制冷能耗降低 0.9%。DGI 最小值为 17.91%, 窗洞口不舒适眩光指数最高可降低 8.57%; 对于南向的教室 UDI 的值最高为 49.89%, 最大有效提升了 17.97%。CEUI 最低值为  $18.85\text{KWh}/\text{m}^2$ 。最多降低制冷能耗 3.41%。DGI 最小值为 14.05, 窗洞口不舒适眩光指数最高可降低 28.96%。

(3) 郑州地区, 在权衡 UDI、CEUI、DGI 三个性能指标的情况下, 南向教室的遮阳优化设计中, 遮阳板的数量和间距, 以及反光板的高度和角度是关键参数。而在北向教室中, 反光板的角度、深度和偏移距离则对光环境和能耗有更显著的影响。在南向教室中, 优化设计应着重于通过增加遮阳板数量和调整间距来提高采光效果, 同时控制眩光和能耗。而在北向教室中, 由于自然光主要通过反射和折射进入室内, 因此反光板的角度、深度和位置调整对整体优化至关重要。

#### 4.参考文献

- [1] Wong, Ing Liang. A review of daylighting design and implementation in buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 07(17): 959-968..
- [2] 王语嫵,汪统岳.基于光气候区的办公楼太阳能幕墙多目标优化研究[J].照明工程学报,2023,34(06):75-81.DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2023.06.008
- [3] 李伟,黄媛媛,万宏强.具备太阳追踪功能的室内采光系统设计及实验[J].能源与节能,2021,(08):13-15+27.DOI:10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.08.003.
- [4] Lee,E. S.Advanced optical daylighting systems: Light shelves and light pipes[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1997-7-1.
- [5] Lee H,Seo J. Performance evaluation of external lightshelves by applying a prism sheet []. Energies, 202013(18): 4618.
- [6]段旺,宗复芑,林若慈,等.奥运中心区地下车库导光管系统[J].照明工程学报,2008,(03):1-7.
- [7]张立诚,严永红,李彤.山地住宅遮阳采光系统选取方法——以李子坝片区为例[J].建筑科学,2024,40(02):276-283.DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2024.02.32.
- [8]Zhu L, Wang B, Sun Y. Multi-objective optimization for energy consumption, daylighting and thermal comfort performance of rural tourism buildings in north China[J]. Building and Environment, 2020, 176: 106841.
- [9]Vincenzo costanzo Gianpiero-Evola-and-Luigi-Marletta. A Review of Daylighting Strategies in

Schools[J].

[10]Costanzo V, Evola G, Marletta L, et al. Application of climate based daylight modelling to the refurbishment of a school building in Sicily[J]. Sustainability, 2018, 10(8): 2653.

[12]Lakhdari K, Sriti L, Painter B. Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions[J]. Building and Environment, 2021, 204: 108173.