基于光热耦合的气候适应性仿生建筑表皮性能优化设计研究

Optimization Design of Climate-Adaptive Biomimetic Building Skins Based on Optic-Thermal Coupling

崔传荣 | CUI Chuanrong 石峰 | SHI Feng 杨绚 | YANG Xuan 郑赟 | ZHENG Yun

中图分类号: TU201.5 文献标志码: A 文章编号: 1001-6740 (2024) 06-0045-14 DOI: 10.12285/jzs.20240529004

摘要:普通建筑表皮的构造设计和环境响应行为较单一,往往存在室内光热环境不舒适或能源消耗多等问题。气候适应性仿生建筑表皮作为一种仿生、动态、可变的智能建筑表皮系统,可通过学习模仿生物的适应性行为来进行形态、运动模式和性能上的优化设计。本文提出了一种气候适应性仿生建筑表皮性能优化设计流程,通过参数化模型构建、性能评价模拟与实测和多目标优化分析三个步骤,设计了一种以含羞草为原型的建筑表皮,并对其在三个典型气候条件下的光热环境性能进行了分析对比,实现了空间有效采光阈值提升50%以上,春分日眩光完全消除,冬至日节能16.67%。本研究以数字技术促进建筑节能,提升环境品质,推动实现"双碳"目标。

关键词:气候适应性、仿生建筑表皮、光热耦合、多目标优化

Abstract: The construction design and environmental response behaviors of conventional building skins are relatively simplistic and lack diversity. The Conventional building skin often suffers from issues such as discomfort in indoor optic-thermal environments or high energy consumption. Climate-adaptive biomimetic building skins represent a class of intelligent building envelope systems that are bionic, dynamically responsive, and capable of variable adjustment. It optimizes the design of the skin in terms of morphology, movement patterns, and performance by learning and imitating the adaptive behaviors of living organisms. This paper presents a performance optimization design process for climate-adaptive biomimetic building skins. It is divided into three steps: parametric model construction, performance evaluation simulation and measurement, and multi-objective optimization analysis. This paper designs a building skin prototyped after the sensitive plant (Mimosa pudica). The analysis and comparison of its optic-thermal performance under three typical climatic conditions were conducted. Spatial useful daylight illuminance has been improved by more than 50%, glare on the Vernal Equinox has been completely eliminated, and energy savings of 16.67% have been achieved on the Winter Solstice. This study leverages digital technology to promote energy conservation in buildings, enhance environmental quality, and contribute to the achievement of dual carbon targets.

Keywords: Climate-adaptive, Biomimetic building skins, Optic-thermal coupling, Multi-objective optimization

作者:

崔传荣,厦门大学建筑与土木工 程学院硕士研究生:

石峰(通讯作者),厦门大学建筑与土木工程学院教授,博士生导师,智慧低碳建筑技术福建省高校重点实验室主任;

杨绚,厦门大学建筑与土木工程 学院硕士研究生:

郑赟,上海大界机器人科技有限公司。

国家自然科学基金面上项目:基于表皮功能仿生的湿热地区建筑环境适应性设计研究(52078443);福建省自然科学基金项目;基于计算机视觉的湿热地区被动式建筑环境调节系统设计研究(2024J01004)。

录用日期: 2024-09

绪论

随着"双碳"目标的提出,绿色建筑的设计理念愈加被建筑师所重视,建筑与环境之间的关系也愈加备受关注,而作为建筑内部空间与外部环境之间的边界——表皮,则是创造舒

适健康建筑环境的关键之一。建筑在日常使用过程中的能源消耗,有近一半都与表皮的性能直接或间接相关^[1]。

生物在漫长的进化过程中,不断适应环境变化,产生了独特的生存策略,使得生物能够在不同的气候环境下,通过表皮调节自身状态,

以进行正常的生命活动。人们对此认为这些特性可以为建筑表皮提供新的设计思路,从而改变整体性能。但普通的建筑表皮构造设计和环境响应行为较单一,往往存在室内光热环境不舒适或能源消耗多等问题。随着仿生学的不断发展,生物的诸多优良特性被众多领域广泛结合利用,使得气候适应性生物表皮与建筑表皮间的结合也成为了一种可能^[2]。气候适应性仿生建筑表皮通过合理的设计可以响应环境变化,从而实现满足室内光热舒适的同时减少能源消耗的作用。

一、气候适应性仿生建筑表皮研究概况

气候适应性仿生建筑表皮是气候适应性建筑表皮 ^{[3][4]} 和仿生建筑表皮两者的结合 ^[5],指的是运用生物仿生学原理,从自然中演变而来的建筑表皮形式 ^[6]。气候适应性仿生建筑表皮的研究近年来逐渐受到关注(表 1),它通过模仿生物适应环境变化的适应性形态与行为,对建筑表皮的形态、运动模式和性能进行优化设计,实现功能上与美观上的提升 ^[7]。气候适应性仿生建筑表皮能够对室外光 ^[7~12]、热辐射 ^[13]、风 ^[9]、湿度 ^{[14][15]}等环境因素做出响应,充分利用环境资源的同时减少建筑能源消耗 ^{[6][8][13][16~18]},提升建筑室内光热环境舒适性 ^{[7][9~12][16][19]}。

Kuru^[7] 等从仙人掌的形态和其应对压力时调 节气孔开闭的生理适应行为中汲取灵感。设计了 一种用于教育建筑并改善其室内热环境的适应性 建筑表皮; Sheikh^[8] 等模仿酢浆草的物理和生理特 性,设计了一种适用于湿热地区高层玻璃幕墙建 筑的自适应建筑表皮,并模拟验证了其在降低能 耗和提升视觉热舒适度方面的有效性; Badarnah^[9] 等提出了一种类肺腔仿生建筑通风外壳,并通过 仿真模拟对比了其在不同情况下的气流和舒适度 差异; Simon^[10] 等利用建模和仿真技术揭示了三种 不同植物适应环境变化的运动原理, 并将受启发 得到的动力学结构应用于双曲面外墙的柔性遮阳 装置设计上; Steffen[14] 等研究了多种植物球果的 吸湿行为和运动模式,利用天然木材设计了一种 建筑表皮系统。并在全尺寸建筑中进行了实验研 究.. Peeks^[16] 等模仿大象皮肤研究了建筑表皮纹理 组合和深度等因素对于建筑热环境的影响,同时 考虑了其对于减少能源消耗的贡献。

一些气候适应性仿生建筑表皮研究案例

	一些气候1	直应性仍 生建现农及研究条例	衣丨
序号	灵感来源	表皮形态	表皮功能
1	仙人掌 [7]		光环境 热环境
2	酢浆草®		能耗 光环境
3	肺腔 ^凹		风环境 热舒适
4	天堂 鸟花 ^[10]		光环境 热环境
5	百合花 [10]	A SHAPPI	光环境热环境
6	昆虫 后翅 ^[11]		光环境 热环境
7	牵牛花 [12]	The state of the s	光环境 热环境
8	树叶 [13]		光环境能耗
9	植物 球果 ^[14]		吸湿性
10	冰草 种子 ^[15]		湿环境
11	大象 皮肤 ^[16]		热环境能耗
12	沙漠 蜗牛 ^[19]		热环境

综合看来,当前阶段气候适应性仿生建筑表皮的研究已有一定进展,但多为单一光环境或热环境的研究,或虽同时考虑了光、热性能,但对于光热耦合^[20] 的综合探究较少。因此本研究提出了一种基于光热耦合的气候适应性仿生建筑表皮,对其性能优化设计进行探索,以提高其在实际应用中的效果。

二、气候适应性仿生建筑表皮设计 流程

本文从仿生概念出发,于自然中寻找 表皮设计案例,综合考虑并选取与光、热 相关的气候适应性仿生建筑表皮形体与形 态设计变量和影响其适应气候的环境变量, 运用多目标优化的设计方法寻找表皮最佳 形体与形态,最终完成性能优化设计。

气候适应性仿生建筑表皮性能优化设计主要流程分为三个步骤,如图 1 所示。首先,构造参数化设计气候适应性仿生建筑表皮模型。其次,构建采光性能评价模型和能耗性能评价模型,选取优化目标并建造实物模型进行实测校准。最后,进行光热性能多目标优化设计,得到气候适应性仿生建筑表皮形体与形态,并进行光热性能评价。

在此设计流程中,使用 Rhinoceros 及其插件 Grasshopper 进行参数化建模; EnergyPlus 和 Radiance 是两个成熟的仿真引擎,分别用来进行热环境性能评估和光环境性能评估,同时用 Ladybug Tools 插件将参数化模型与仿真引擎进行连接;多目标优化过程使用 Wallacei 插件完成。

三、气候适应性仿生建筑表皮初步 形体设计

1. 生物表皮原型选取

折叶灌木含羞草的叶片与主叶脉间可 呈现 25°到 85°的夹角,叶片能在水平 和垂直两个方向上运动。当叶片受到刺激 时,向前旋转使夹角变小,同时在垂直方

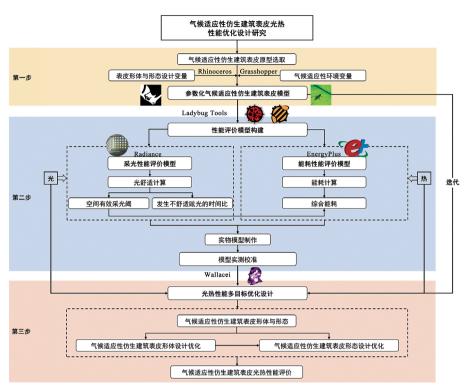


图 1: 气候适应性仿生建筑表皮性能优化设计流程

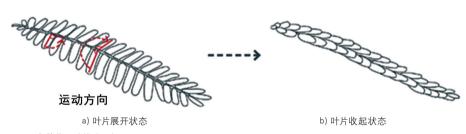


图 2: 含羞草运动模式图解

向上向内闭合(图 2)。这种运动模式的优点是叶片完全展开与完全闭合两种状态间的裸露面积相差非常大,当受到高温、强光等影响时,可以有效保护自己。同时,较大尺寸的叶片会增强植物对光的吸收,但不利于光线渗透到下方叶片上;多数量

因此,本文以含羞草适应气候变化的 运动模式和形态特征作为切入点,进行气 候适应性仿生建筑表皮性能优化设计。

较小尺寸的叶片反而更利于光线渗透。

2. 气候适应性仿生建筑表皮初步形体设计过程

通过对含羞草的分析,将其构造形式 简化为一根竖向杆件及两侧连接适当数量

和尺寸的平面板(遮阳板)。首先,为提高室内远窗处照度,优化室内采光均匀度,将最上面两块遮阳板沿自身长轴顺时针旋转 65°用作反光板;同时为避免运动过程中发生碰撞,将其余遮阳板沿自身长轴顺时针旋转 15°,增加面板间空隙的同时也增强了光线渗透;最后在遮阳板与竖向杆件连接处削去两个角,形成尖角形状,使得板条旋转更便捷。

选取遮阳板数量、遮阳板宽度、垂直旋转角度、水平旋转角度、室外空气温度和太阳辐射强度作为设计变量(表2),其中,室外空气温度和太阳辐射强度用来控制表皮启闭状态转换,遮阳板数量、遮阳板宽度、垂直旋转角度和水平旋转角度用来优化表皮形体与形态。气候适应

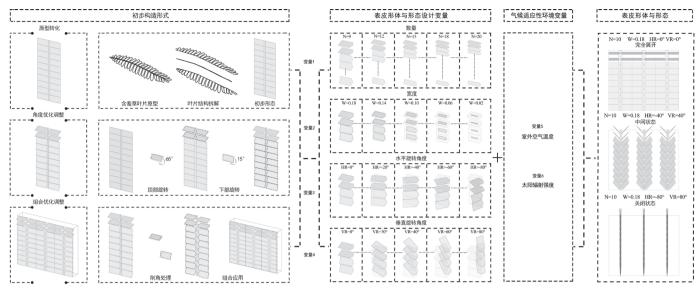


图 3: 气候适应性仿生建筑表皮初步形体设计过程

性仿生建筑表皮初步形体设计过程如图 3 所示。

四、气候适应性仿生建筑表皮性能 评价模型

1. 模型设置

选取春分日、夏至日和冬至日三个典型气候条件下每天 9:00 至 18:00 的气象数据,对气候适应性仿生建筑表皮进行季节优化与调控。

(1) 采光性能评价模型

Radiance 使用反向光线追踪算法和随机蒙特卡洛采样作为其核心算法,可精准模拟室内光环境状况^[21]。本文选用的采光性能评价指标为空间有效采光阈值(spatial useful daylight illuminance, sUDI)和发生不舒适眩光的时间比(percentage of time with discomfort glare probability, pDGP)。

sUDI 是基于空间有效采光照度计算的,它表示在设定照度范围内有效天然采光面积与总面积之比。本文选用的照度范围为 300~2000lx,时间百分比为 50%。计算公式见(1):

$$sUDI_{300\sim2000lx,50\%} = \frac{a_{UDI_{300\sim2000lx,\geqslant 50\%}}}{A} \times 100\%$$

设计变量

表 2

变量种类	初始值	取值范围	数值数量
遮阳板数量	14	[9, 20]	12
遮阳板宽度	0.95	[0.01, 0.2]	20
水平旋转角度	-40	[-80, 0]	17
垂直旋转角度	40	[0, 80]	17
室外空气温度	26.0	[22, 30]	17
太阳辐射强度	400	[200, 600]	17

建	44	室	ф	存	7#

表 3

负荷类型	单位	数值
人员密度	m²/ 人	8
照明功率密度	W/m²	15
设备功率密度	W/m²	15
人员散热量	W人	134
新风量	m³/h/ 人	30

$$\approx \frac{n_{UDI_{300\sim2000lx, \ge 50\%}}}{N} \times 100\%$$
 (1

其中, a 表示至少 50% 的时间、照度值在 300~2000lx 的面积, A 为总面积; n 表示至少 50% 时间、照度值在 300~2000lx 的测点数, N 为总测点数。

不舒适眩光概率是指人们受到日光照射而引起的视觉不舒适容忍度,本文通过 Radiance 渲染得到的 HDRI 图像来计算 DGP值,规定 DGP<0.35 为可接受范围 [22]。 pDGP的计算公式见(2):

$$pDGP_{<0.35} = \frac{t_{DGP_{<0.35}}}{T} \times 100\%$$
 (2)

其中, t表示 DGP<0.35 的时长, T为总时长。

(2) 能耗性能评价模型

EnergyPlus 使用了TRAP和DOE-2算法^[23],被广泛应用于建筑能源性能模拟。本文选用的能耗性能评价指标为综合能耗(energy use intensity, EUI)。其中,空调系统、人工照明系统和其他设备均使用电力作为能源,选用理想负荷空调系统作为室内人工冷热源,开启温度见图4;根据《民用建筑绿色性能计算标准》(JGJ/T449-2018),建筑室内负荷及其时间表设置分别见表3和图5。

根据《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015-2021) 计算空调制冷和制热用电量,计算公式见(3)、(4):

$$E_c = \frac{Q_c}{COP_c} \tag{3}$$

$$E_h = \frac{Q_h \varphi}{\eta q_1 q_2} \tag{4}$$

其中, E_c 、 E_h 分别为制冷和制热耗电量, Q_c 、 Q_h 分别为制冷和制热能耗, COP_c 为空调制冷性能系数, φ 表示天然气与标煤折算系数,取 1.21 kgce/m³; η 表示以煤气锅炉为热源的供暖系统综合效率,取 0.85; q_1 为标准天然气热值,取 9.87 kWh。

人工照明按照《建筑采光设计标准》 (GB50033-2013) 进行设定,满足办公室工作时间内工作平面照度不低于 450lx 的要求,即当照度 <450lx 时,开启人工照明。

EUI 的计算公式见 (5):

$$EUI = \frac{E_{lighting} + E_c + E_h}{A_{indeper}}$$
 (5)

其中, $E_{lighting}$ 为人工照明耗电量, A_{indoor} 为室内建筑面积,EUI 为全天工作时间单位面积总耗电量。

2. 实测校准

(1) 研究对象选取

本文所选研究对象为厦门市某五层办公楼中间层的一间南向办公室,房间尺寸为3.0m×6.0m×3.0m(宽×深×高),窗户尺寸2.1m×1.8m(宽×高),窗下边缘距地面0.9m高,窗墙比0.42,对其安装气候适应性仿生建筑表皮,进行性能实测与模拟(图6)。假设测试房间除暴露在室外条件下的南向维护结构外,其余边界条件均为绝热状态,围护结构构造和热工参数见表4~表6。

根据《采光测量方法》GB/T 5699-2017进行照度测点设置(图7),工作面测点间距为1.0m×1.0m, 距地面0.75m高。眩光测点距窗2.0m, 距地面高1.2m,代表面向窗户的受测者(图8)。

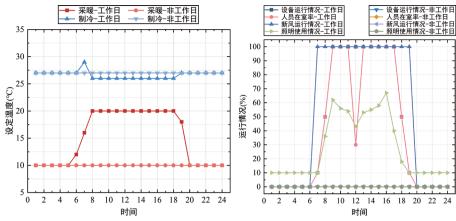
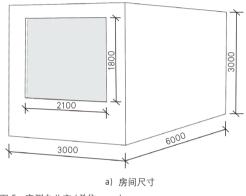


图 4: 空调系统开启温度设置

图 5: 负荷时间表设置



b) 表皮安装

图 6: 实测办公室 (单位: mm)

围护结构构造

表 4

构造	组成
外墙	5mm 石灰抹灰 +30mm 保温砂浆 +200mm 混凝土复合砌块 +20mm 水泥砂浆 +5mm 石灰抹灰
天花板	20mm 水泥砂浆 +100mm 混凝土板 +20mm 水泥砂浆
地板	20mm 水泥砂浆 +100mm 混凝土板 +20mm 水泥砂浆
外窗	6mm 单层普通透明玻璃

不透明材料热工参数

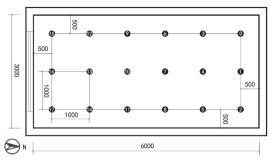
表 5

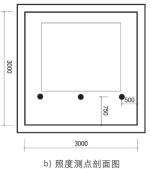
材料名称	导热系数 λ (W/m/K)	蓄热系数 S (W/m²/K)	密度 ρ (kg/m³)	比热容 C (J/kg/K)	
石灰抹灰	0.81	10.07	1600	1050	
保温砂浆	0.06	1.58	350	1050	
水泥砂浆	0.93	11.37	1800	1050	
混凝土复合砌块	0.31	4.39	900	1000	
混凝土板	1.74	17.20	2500	920	

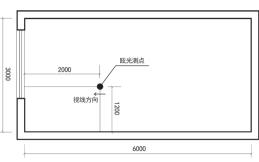
透明材料热工参数

表 6

导热系数 λ (W/m/k)	太阳光透射率	太阳光反射率	可见光透射率	可见光反射率
0.9	0.78	0.08	0.88	0.06







a) 照度测点平面图

图 7: 照度测点示意图 (单位: mm)

图 8: 眩光测点剖面示意图 (单位: mm)

(2) 校准模型设置

本研究于 2021 年 10 月 9 日至 2021 年 10 月 11 日进行气候适应性仿生建筑表皮光热效果实测,由于能耗实测较为复杂且存在一定误差,因此采用不开启人工冷热源情况下的室内空气温度来评价实测过程中表皮对室内热环境的影响。实验所用测量仪器见图 9 和表 7,实验期间室外环境参数通过国家气象信息中心获取。

综合考虑模型制作难易程度及安装等因素,用于实测验证的遮阳板数量为12片、遮阳板宽度为0.1m,水平旋转角度和垂直旋转角度均设置为40°,遮阳板材料特性见表8。实测过程中对室内空气温度和照度进行逐时测量与记录,温度校准点和照度校准点如图10所示。

为减小误差,每个校准点连续读取三组数据,然后取平均值。将实测结果与模拟结果进行对比,使用平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)评估模型准确性,见公式(6):

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right|$$
 (6)

其中 y_i 和 y'_i 为室内空气温度和照度的逐时实测值和模拟值, n 为两个数值的数量。 MRE 值越小代表误差越小,即实测值与模拟值越接近,模型准确度越高,最佳值为 0。

(3) 校准结果

图 11 和图 12 分别展示了安装有气候适应性仿生建筑表皮房间,实测和模拟的室内空气温度和照度情况。室内空气温度和照度的 MRE 分别为 1.69% 和 6.21%。因此,可认为模拟数据能够描述实验数据。

测量仪器参数

丰	
14	-/

测量参数	测量仪器		测量范围	精确度
照度	HD2102.1 高精度照度计	lx	_	± 0.05
温度	TEST-1365 温湿度计	°C	-20°C∼60°C	±0.5

遮阳板材料特性

表 8

 特性	单位	数值
厚度	mm	0.001
导热系数	(W/m/k)	0.9
太阳直射透过率	_	0
太阳直射反射率	_	0.7
太阳漫射透过率	_	0
太阳漫射反射率	_	0.7
红外半球发射率	_	0.63





a) HD2102.1高精度照度计

b) TEST-1365温湿度计

图 9: 测量仪器

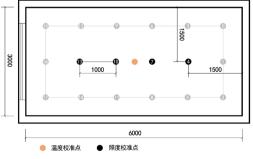


图 10: 温度校准点和照度校准点 (单位: mm)

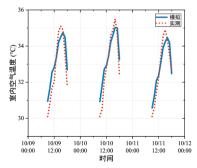


图 11: 室内空气温度的实测与模拟数据比较

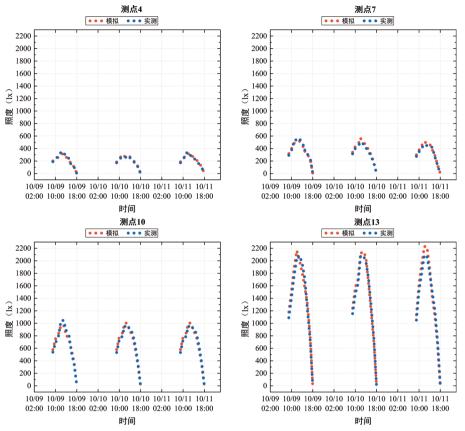


图 12: 照度的实测与模拟数据比较

五、光热性能多目标优化设计

1. 多目标优化工具选取及参数设置

多目标优化方法能够解决多目标寻优过程中可能会出现的预期极值化结果方向冲突问题。当前研究中,多目标优化已成为一种较常见的设计手段,在建筑表皮优化设计过程中被广泛应用^{[16], [24]~[31]}。它由帕累托(Pareto)提出,通过进行多次迭代,产生一系列非支配解,并从中权衡判断出最优解集,即帕累托前沿解集^[32]。

本文选用 Wallacei 作为优化工具,它是 Grasshopper 中最受欢迎的优化工具之一,被广泛应用于建筑领域;它采用多目标遗传算法 NSGA-II 作为核心算法,可以使每代的最优方案都遗传到下一代;其默认优化原则是寻找优化目标的最小值。Wallacei 中交叉概率、交叉分布指数和突变分布指数分别设为 0.9、20 和 20;种群规模为 50 个、种群代数为 40 代。

sUDI 最大化、pDGP 和 EUI 最小化的

解决方案是本研究所最期待的。本文建立了三个优化目标相等权重的目标函数^[33] [公式 (7)],用于对帕累托前沿解进行排序。该等式先对目标值进行归一化处理,再进行求和运算;但由于 pDGP 和 EUI 寻求的是最小值,因此对其取相反数。

$$y = (sUDI - sUDI_{min}) C_{1} + (7)$$

$$(pDGP - pDGP_{min}) C_{2} \times (-1) + (EUI_{i} - EUI_{min})$$

$$C_{3} \times (-1)$$

$$C_{1} = \frac{100}{sUDI_{max} - sUDI_{min}}$$

$$C_{2} = \frac{100}{pDGP_{max} - pDGP_{min}}$$

$$C_{3} = \frac{100}{EUI_{max} - EUI_{min}}$$

其中,i 为迭代结果,min 为优化目标最小值,max 为优化目标最大值。

2. 优化结果

本研究的多目标优化共分为两个阶段:首先进行气候适应性仿生建筑表皮形体设计优化,将春分日、夏至日和冬至日

三个典型气候条件作为整体,选取最优性能条件下的遮阳板数量和宽度;随后对各典型气候条件进行表皮形态设计优化,寻找表皮最优性能表现,确定相应设计变量参数。

为验证气候适应性仿生建筑表皮效果,选取普通遮阳百叶进行对比,其已被证明在室外空气温度≥ 23°C或太阳辐射强度≥ 250W/m² 时关闭,是较为节能的^[34]。

(1) 表皮形体设计优化结果

考虑表皮真实使用效果,基于前文确定的设计变量,对不同遮阳板数量下的遮阳板宽度进行约束。图 13 显示了表皮形体优化过程中的最佳 sUDI、pDGP 和 EUI的解决方案,以及使用目标函数 [公式(7)]获得的折衷相对最优解,表皮形体和详细参数见图 14、表 9。可以得出遮阳板数量为 12、宽度为 0.10m 时,表皮有最佳性能,因此选取此表皮形体方案用于第二阶段的多目标优化设计。

(2) 表皮形态设计优化结果

1)不同设计变量对单一优化目标的影响

分别对三个典型气候条件下的表皮形态进行多目标优化设计,图 15~图 17显示了表皮形态优化过程中,不同设计变量与单一优化目标间的关系。

图 15a) ~ 图 c) 为春分日情况。由 图 15a) 得, sUDI 与垂直旋转角度、水平 旋转角度间无明显趋势关系,垂直旋转角 度为-50°、-45°和-10°,水平旋转角度 为 45° 和 75° 时, sUDI 值可达 ≥ 50%。 随 着室外空气温度和太阳辐射强度的增大, sUDI 最大值整体呈先增大后减小的趋势, 27°C~27.5°C和 360~380W/m² 时, sUDI 可 达≥ 50%,表明室外环境参数对 sUDI 的 影响是复杂的,并存在最佳范围。由图 15b), 垂直旋转角度为-5°时眩光完全 消失; pDGP 随着水平旋转角度从 55°到 10°的减小而减小,在10°时为0,这表 明较大垂直旋转角度和较小水平旋转角度 有利于防止不舒适眩光的发生, 从而提升 视觉舒适度。室外空气温度和太阳辐射强 度与 pDGP 间无明显趋势关系,室外空气

1 3 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10				.,,,	
		sUDI 最佳值解	pDGP 最佳值解	EUI 最佳值解	折衷相对 最优解
设计	遮阳板数量	19	12	19	12
变量	遮阳板宽度 (m)	0.025	0.105	0.075	0.1
	sUDI _{300~2000lx, 50%} (%)	55.56	44.44	16.67	50
优化 目标	pDGP _{<0.35} (%)	36.67	3.33	13.33	13.33
	EUI (kWh/m²)	0.231	0.268	0.116	0.117
		-37.69	-9.92	0.79	66.78

各最优解方案的表皮形体设计参数

表 9

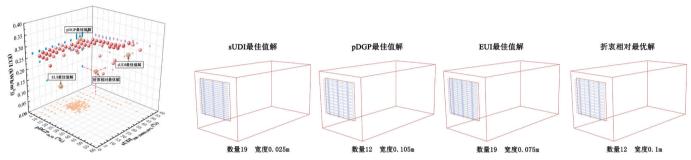


图 13. 表皮形体优化过程中的帕累托解 图 14. 各最优解方案的表皮形体设计

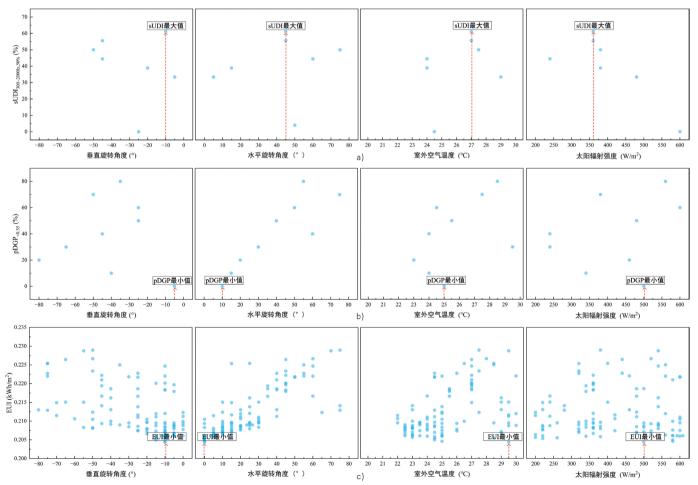


图 15: 不同设计变量与单一优化目标的影响 (春分)

室外空气温度和太阳辐射强度对 EUI 的影响并不显著,当室外空气温度为 29.5°C,太阳辐射强度为 500W/m² 时,EUI 有最小值。

图 16a)~c) 为夏至日情况。由图 16a)得,sUDI与各设计变量间均无明显线性关系,sUDI最大值为61.11%。此时垂直旋转角度接近设计变量的中间值,为-50°,水平旋转角度较大为70°,这表明适当的垂直旋转角度和较大的水平旋转角度有助于采光优化。室外空气温度和太阳辐射强度均处于较高值,为29.5°C和520W/m²,表明较高的环境参数值可能会提升室内采光效果。图 16b)显示,特定参数下,夏至日可实现全天无眩光,此时垂直旋转角度、水平旋转角度和太阳辐射强度均保持在较低水平,但室外空气温度较大,为29.5°C。这表明夏至日室外空气温度对眩光的影响更显著。由图 16c),垂

直旋转角度较大、水平旋转角度较小时, EUI 最小,且随着垂直旋转角度增大,不同角度下的最小 EUI 整体呈减小趋势;水平旋转角度则与之相反。室外空气温度在25.5°C~30°C时对 EUI 影响较大,太阳辐射强度对 EUI 的影响涉及各个辐射强度,并在560W/m²时 EUI 有最小值。

图 17a)~c) 为冬至日情况。由图 17a)得, sUDI最大值为 66.67%,此时垂直旋转角度为 -65°,水平旋转角度为 60°,表明在冬至日,较小的垂直旋转角度和较大的水平旋转角度对 sUDI更有利;室外空气温度和太阳辐射强度均处于中间值附近,这可能意味着冬至日适中的环境参数对于室内采光效果有积极的影响。图 17b)显示,pDGP最小值仍为 50%,表明冬至日眩光问题无法避免。但此时表皮形态并未接近完全关闭状态,表明通过进一步迭代优化,可能还有减少眩光的潜力。

由图 17c),冬至日水平旋转角度、室外空气温度和太阳辐射强度分别在 45°~75°、24.5°C~28.5°C和 380~600W/m²时相对集中,而垂直旋转角度分布较广,意味着垂直旋转角度对冬至日能耗的影响较大。各变量不同值下的 EUI 相差较大,最大值约为最小值的 2.5 倍。

2) 帕累托前沿解分析

图 18a)~c)显示了三个典型气候条件所有优化方案的帕累托前沿解分布,其中最优解应位于 sUDI-pDGP、sUDI-EUI 图的右下角以及 EUI-pDGP 图的左下角。

对于 sUDI-pDGP, 图 18a)1、18b)1显示,春分日和夏至日适当增大 sUDI值,仍能获得良好的 pDGP, 但当 sUDI 超过50%时,pDGP 急剧增大;图 18c)1表明冬至日较难实现 sUDI 与 pDGP 的平衡,至少有50%的时间存在眩光。因此,春分日和夏至日可通过适当减少气候适应

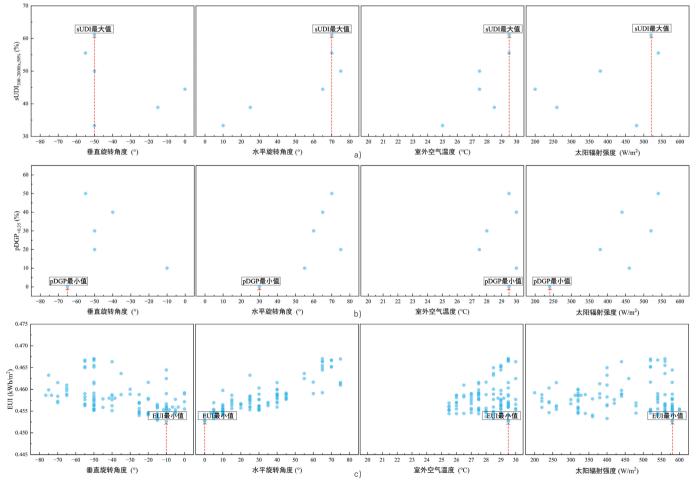


图 16: 不同设计变量与单一优化目标的影响 (夏至)

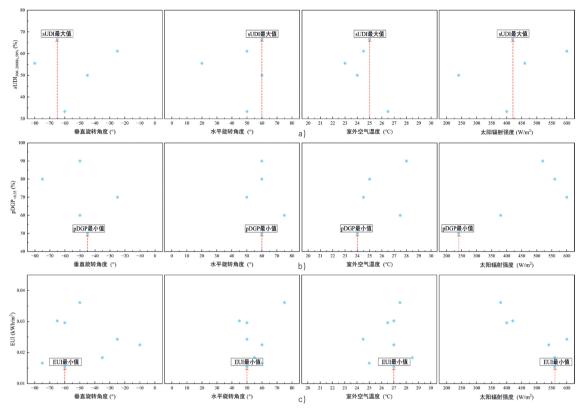


图 17: 不同设计变量与单一优化目标的影响 (冬至)

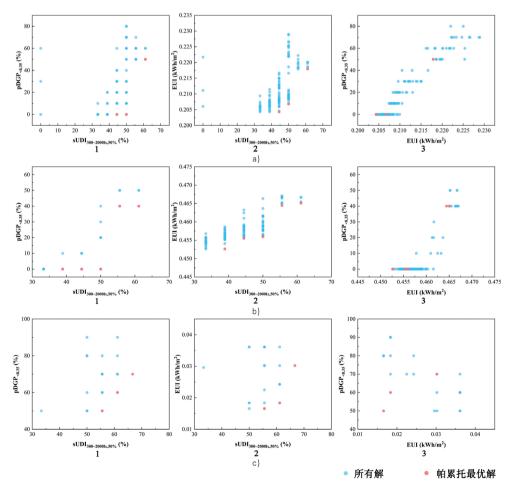


图 18: 全模拟过程中的帕累托前沿解

性仿生建筑表皮对窗户的遮挡面积和增大 环境参数值来提高 sUDI,而冬至日则可 能需要牺牲一部分自然采光以提升视觉舒 适度。

对于 sUDI-EUI,图 18a)2、图 18b)2 和图 18c)2 均显示,EUI 随 sUDI 的增加而增大,意味着提升自然采光均匀度时,可能会导致室内温度过高,进而增大建筑制冷能耗。值得注意的是,提升相同程度的 sUDI 时,夏至日的能耗增量最少。

对于 EUI-pDGP, 图 18a)3、图 18b) 3 和图 18c) 3 均显示, pDGP 随 EUI 的增加而增大, 这是因为减少气候适应性仿生建筑表皮对窗户的遮挡, 不仅会导致眩光,还会增大建筑制冷能耗。尽管三个典型气候条件均实现了最小能耗下的最小 pDGP,但冬至日仍不能完全避免眩光的发生。

图 19 显示了帕累托最优解中与表皮形态相关的设计变量的值分布。横坐标表

示每个变量的取值,纵坐标表示其在帕累 托最优解集中的频率。

由图 19a),春分日的帕累托最优解中,垂直旋转角度和水平旋转角度的值呈明显的集中分布趋势,垂直旋转角度为-10°和水平旋转角度为0°,分别在两个变量的所有最优解中占 90% 以上,这表明春分日的表皮形态最优解更倾向于较小的水平旋转角度和较大的垂直旋转角度。室外空气温度的优化解决方案集中分布在26.5°C~30°C,其中 29.5°C 占比最大;太阳辐射强度的优化解决方案较为分散,更倾向于 500W/m²。

由图 19b),夏至日的帕累托最优解中,最优解的垂直旋转角度也倾向于-10°,与春分日相同,水平旋转角度倾向于 30°,相较于春分日有所增大,这两个值均分别在对应变量中占比 98% 以上。最优解的室外空气温度主要集中在

28.5℃和 29℃,两个温度值共占比达 95%以上;太阳辐射强度最常见的最佳值范围为 560W/m²。

由图 19c),冬至日的帕累托最优解中,最优解的垂直旋转角度倾向于-65°和-60°,此时角度较小,因为冬至日太阳高度角低,易发生眩光,因此会受到一定影响。水平旋转角度中占比最大的解决方案为 50°,室外空气温度中占比最大的解决方案为 26°C~27°C;最优解的太阳辐射强度则主要集中在 420W/m² 和 440W/m²。

3) 最优解间的权衡对比

使用帕累托前沿解(图 20)可直观查看三个典型气候条件的最佳 sUDI、pDGP和 EUI 的解决方案,以及使用目标函数[公式(7)]获得的折衷相对最优解。表皮形态和详细参数见图 21、表 10。

基于四个最优解的比较,可以得出: 春分日,pDGP 和 EUI 的最优解与折衷相对

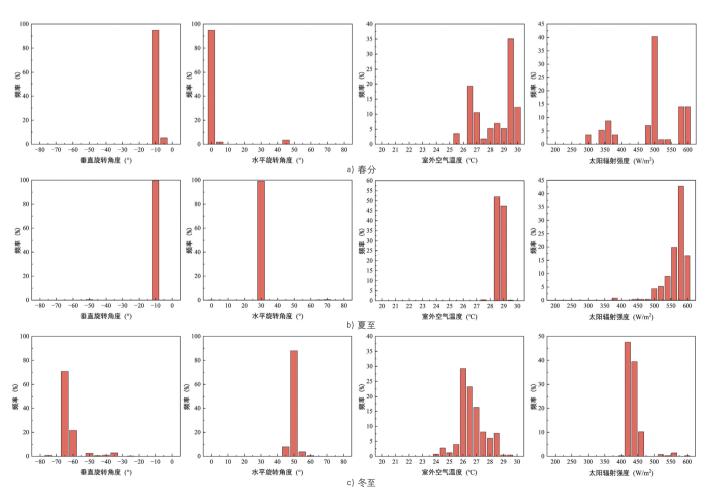


图 19: 帕累托最优解中与表皮形态相关的设计变量的分布频率

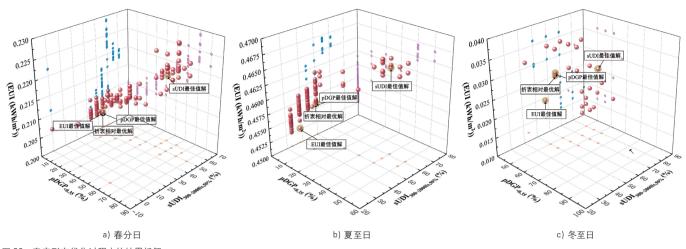
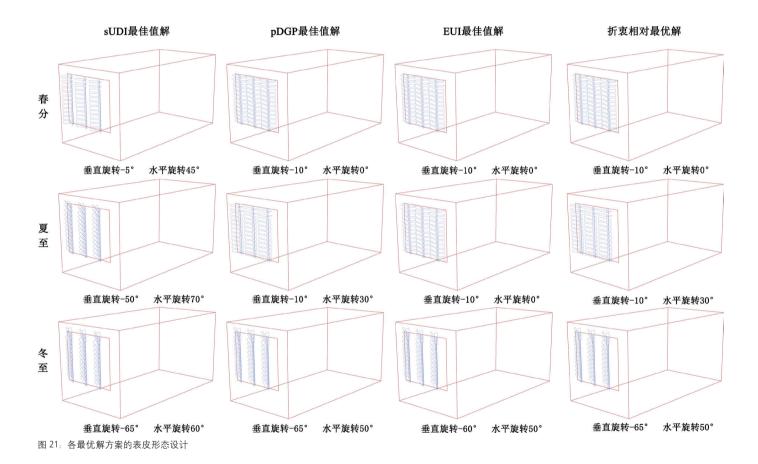


图 20: 表皮形态优化过程中的帕累托解



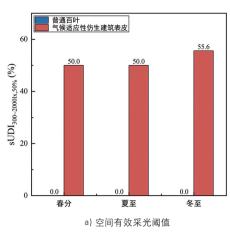
最优解相同。表明春分日可以同时实现防眩光和低能耗;然而 sUDI 最优解虽能将 sUDI 提升 16.67%,但却增加了 50% 的眩光时间和 6.86% 的能耗。夏至日的 pDGP 最优解与折衷相对最优解一致。EUI 最优解相较折衷相对最优解的能耗减少幅度较小,仅为 0.66%,且降低了 11.11% 的 sUDI。当追求 sUDI 最优解时,虽然 sUDI

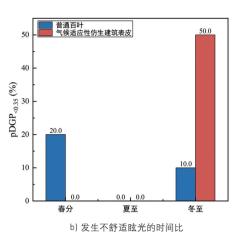
提升了11.11%,但却增加了40%的眩光时间以及1.97%的能耗。冬至日pDGP最优解也与折衷相对最优解相同。EUI最优解相较折衷相对最优解在能耗上有显著降低,达到了50%,但sUDI却降低了27.78%以及pDGP增加了20%。sUDI最优解提升了11.11%的sUDI,而且此时能耗并未增加,只增加了20%的眩光时间。

4) 综合对比分析

如图 22a),气候适应性仿生建筑表皮相较于普通遮阳百叶,三个典型气候条件的 sUDI 均有所提高,其中春分日和夏至日各提升了 50%,冬至日提升 55.6%,实现了较好的室内自然采光环境。

如图 22b),气候适应性仿生建筑表皮 在春分日无不舒适眩光发生,而普通遮阳





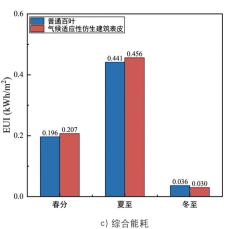


图 22: 性能对比

各最优解方案的表皮形态设计参数

表 10

六、结语

			sUDI 最佳值解	pDGP 最佳值解	EUI 最佳值解	折衷相对最优解
春分	设计变量	垂直旋转角度(°)	-5	-10	-10	-10
		水平旋转角度(°)	45	0	0	0
		室外空气温度 (°C)	25.5	29.5	29.5	29.5
		太阳辐射强度 (W/m²)	340	500	500	500
	优化 目标	sUDI _{300-2000k, 50%} (%)	61.11	44.44	44.44	44.44
		pDGP _{<0.35} (%)	50	0	0	0
		EUI (kWh/m²)	0.218	0.204	0.204	0.204
	у		-17.61	72.73	72.73	72.73
夏至	设计变量	垂直旋转角度(°)	-50	-10	-10	-10
		水平旋转角度(°)	70	30	0	30
		室外空气温度 (°C)	29	28.5	29.5	28.5
		太阳辐射强度 (W/m²)	600	560	520	560
	优化 目标	sUDI _{300-2000lx, 50%} (%)	61.11	50	38.89	50
		pDGP _{<0.35} (%)	40	0	0	0
		EUI (kWh/m²)	0.465	0.456	0.453	0.456
	у		17.16	59.25	20.00	59.25
冬至	设计变量	垂直旋转角度(°)	-65	-65	-60	-65
		水平旋转角度(°)	60	50	50	50
		室外空气温度 (°C)	25	26.5	27	26.5
		太阳辐射强度 (W/m²)	420	400	560	400
	优化 目标	sUDI _{300-2000k, 50%} (%)	66.67	55.56	27.78	55.56
		pDGP _{<0.35} (%)	70	50	70	50
		EUI (kWh/m²)	0.030	0.030	0.015	0.030
	у		46.77	68.33	-50.00	68.33

百叶存在 20% 的眩光时间。夏至日时,两 者效果相同,均为0。冬至日时,由于气 候适应性仿生建筑表皮关闭时并不能完全 遮蔽窗户, 且其在提升室内采光照度的同 时会进一步减少对窗户的遮蔽, 因此增加 了一定程度的眩光, 对此可通过进一步迭 代优化进行改善。

如图 22c), 气候适应性仿生建筑表皮 相较于普通遮阳百叶, 在春分日和夏至日 的综合能耗均有少量增加,其中春分日增 加 5.61%, 夏至日增加 3.40%; 但在冬至 日降低了 16.67%。

本文使用多目标优化的设计方法,模 拟分析并实测了一种气候适应性仿生建筑 表皮的光热性能。根据模拟结果、使用气 候适应性仿生建筑表皮不仅能改善室内光 环境, 还可以一定程度上减少建筑能耗。 相比普通遮阳百叶, sUDI 提升了 50% 以 上, 完全消除了春分日的眩光问题, 以及 冬至日节能 16.67%。虽然冬至日增大了 眩光时长, 以及春分日和夏至日能耗略有 增加,但后续可通过进一步迭代优化进行 改善。

本研究遵循建筑与自然融合的设计理 念, 利用仿生学原理探索新的建筑表皮形 式,丰富建筑立面形式,提升环境品质: 同时所提出的气候适应性仿生建筑表皮设 计流程有助于建筑方案设计初期的快速设 计、优化与选择,以满足不同环境条件下 的建筑需求。本研究对气候适应性仿生建 筑表皮进行了初步尝试,后续研究中还需 要综合分析不同因素的影响, 在实践中不 断探索和深化,形成更为完整的气候适应 性仿生建筑表皮设计流程体系。

参考文献

[1] 庄惟敏, 祁斌, 林波荣. 环境生态导向的建筑复合 表皮设计策略 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. [2] Al-Obaidi K M, Ismail M A, Hussein H, et al. Biomimetic building skins: An adaptive approach [J].

Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 1472-1491.
[3] 舒欣, 季元. 整合介入——气候适应性建筑表皮的设计过程研究[J],建筑师, 2013. (06): 12-19.

[4] 舒欣. 气候适应性建筑表皮的设计模式研究[J].建筑师, 2018 (06): 112-117.

[5] Hosseini S M, Mohammadi M, Rosemann A, et al. A morphological approach for kinetic facade design process to improve visual and thermal comfort: Review [J]. Building and Environment, 2019, 153: 186-204.

[6] Kuru A, Oldfield P, Bonser S, et al. Biomimetic adaptive building skins Energy and environmental regulation in buildings [J]. Energy and Buildings, 2019, 205: 109544.

[7] Kuru A, Oldfield P, Bonser S, et al. Performance prediction of biomimetic adaptive building skins: Integrating multifunctionality through a novel simulation framework [J]. Solar Energy, 2021, 224, 253-270

[8] Sheikh W T. Adaptive biomimetic facades: Enhancing energy efficiency of highly glazed buildings [J]. Frontiers of Architectural Research, 2019, 8 (3): 319-331.

[9] L. Badarnah U K, U. Knaack. A bio-inspired ventilating envelope optimized by air-flow simulations [C]. World Sustainable Building Conference 2008, 2008: 230-237.

[10] Schleicher S, Lienhard J, Poppinga S, et al. A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture [J]. Computer-Aided Design, 2015, 60: 105-117.

[11] Schieber G, Born L, Bergmann P, et al. Hindwings of insects as concept generator for hingeless foldable shading systems [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13 (1): 016012.

[12] Khelil S, Khelil A E, Zemmouri N. Raising the efficiency of deployable building facades with Biomimetics for hot and arid regions [C]. Architechture, Technology and Innovation 2020. "Smart Buildings, Smart Cities", 2020. 128-136.

[13] Badarnah L, Knaack U. Shading/energy generating skin inspired from natural systems [C]. SB08 - World Sustainable Building Conference 2008, 2008; 305-312.

[14] Reichert S, Menges A, Correa D. Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness [J]. Computer-Aided Design, 2015, 60: 50-69.

[15] Khosromanesh R, Asefi M. Form-finding mechanism derived from plant movement in response to environmental conditions for building envelopes [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101782.

[16] Peeks M, Badarnah L. Textured building facades: Utilizing morphological adaptations found in nature for evaporative cooling [J]. Biomimetics, 2021, 6 (2): 24.

[17] Webb M. Biomimetic building facades demonstrate potential to reduce energy consumption for different building typologies in different climate zones [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2022, 24 (2): 493-518.

[18] 石峰, 郑赟, 马用超. 气候适应性建筑表皮的仿生设计研究[J]. 南方建筑, 2023, (02): 22-32.

[19] Amin F A, Taleb H. Biomimicry approach to achieving thermal comfort in a hot climate [C]. Proceedings of SBE16 Dubai, 2016: 17-19.

[20] 原野, 郭彬彬, 徐宗武, 等. 建筑形体光热性能耦合设计——以寒冷地区高校教学楼建筑为例[J]. 建筑师, 2022

(02): 76-82.

[21] Compagnon D R. Radiance: A simulation tool for daylighting systems [R]. Cambridge, UK; Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Dept. of Architecture, Univ. of Cambridge, 1997. [22] Giovannini L, Favoino F, Verso V R M, et al. A Simplified Approach for the Annual and Spatial Evaluation of the Comfort Classes of Daylight Glare Using Vertical Illuminances [J]. Buildings, 2018, 8 (12): 171.

[23] Hong X Q, Lin J W, Yang X, et al. Comparative Analysis of the Daylight and Building-Energy Performance of a Double-Skin Facade System with Multisectional Shading Devices of Different Control Strategies [J]. Journal of Energy Engineering, 2022, 148 (3).

[24] Yang M-D, Lin M-D, Lin Y-H, et al. Multiobjective optimization design of green building envelope material using a non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 1255-1264.

[25] Eslamirad N, Mahdavinejad M, Assoc Comp M. Multi Objective Computing and Applying Expert System in Double Skin Facade system [C]. E-energy 18: Proceedings of the 9th ACM International Conference on Future Energy Systems, 2018: 459-461.

[26] Elmalky A M, Araji M T. Multi-objective problem of optimizing heat transfer and energy production in algal bioreactive facades [J]. Energy, 2023, 268: 126650.

[27] Elarga H, Dal Monte A, Andersen R K, et al. PV-PCM integration in glazed building. Co-simulation and genetic optimization study [J]. Building and Environment, 2017, 126; 161-175.

[28] Ding Y, Wei X T, Wang Q C. Optimization approach of passive cool skin technology application for the Building's exterior walls [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256; 120751.

[29] Ascione F. De Masi R F. de Rossi F. et al. Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study [J]. Applied Energy, 2016. 183: 938-957.

[30] 石峰, 朱雨洁, 刘江. 基于多目标优化的可变建筑反光构件设计研究[J]. 南方建筑, 2021 (06): 107-113.

[31] Liang X, Zhang H, Sun B X. Parametric design of photovoltaic louver integrated shading devices for west facade windows of office buildings in central China [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2024.

[32] 田一辛,黄琼. 建筑性能多目标优化设计方法及其应用——以遗传算法为例[J]. 新建筑, 2021 (05): 84-89.

[33] Konis K, Gamas A, Kensek K. Passive performance and building form: An optimization framework for early-stage design support [J]. Solar Energy, 2016, 125: 161-179.

[34] Van Moeseke G, Bruyère I, De Herde A. Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings [J]. Building and Environment, 2007, 42 (2): 784-793.

图表来源

表 1 中图片均引用自对应参考文献表 2~表 10 均为作者自绘图 1~图 22 均为作者自绘