

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202102038



# 应用灰色关联改进 TOPSIS 法的双层 光伏外窗建筑采光与能耗性能评价

林成楷, 程远达, 杨晋明, 高峰, 秦智胜, 吴璠

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 为更好地评价双层光伏外窗建筑的采光与能耗性能,应用灰色关联改进 TOPSIS 法建立双层光伏外窗建筑采光与能耗的评价模型.以最小相对贴近度为评价标准,对不同的双层光伏外窗建筑设计方案进行优化.结果表明:所建立的模型可以较好地评价双层光伏外窗建筑的采光与能耗性能;由于双层光伏外窗建筑的采光质量与能耗性能存在差异,应同时从采光与能耗性能角度进行全面评价,并进行整体性优化.

**关键词:** 双层光伏外窗; 采光与能耗评价; 灰色关联分析; TOPSIS 法; 方案优化

**中图分类号:** TU 24      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2021)06-0792-08

## Daylighting and Energy Consumption Performance Evaluation of Double-Layer Photovoltaic Exterior Window Buildings Using Improved TOPSIS Method of Grey Relational

LIN Chengkai, CHENG Yuanda, YANG Jinming,  
GAO Feng, QIN Zhisheng, WU Fan

(School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to better evaluate the daylighting and energy consumption performance of double-layer photovoltaic exterior windows buildings, an evaluation model for the building using the improved TOPSIS method of gray correlation is established. With the minimum relative closeness as the evaluation criterion, the design schemes of different double-layer photovoltaic exterior windows are optimized. The results show that the established model can better evaluate the daylighting and energy consumption performance of double-layer photovoltaic exterior window buildings. Because the lighting quality and energy consumption performance of double-layer photovoltaic exterior window buildings are different, the daylighting and energy consumption performance should be both evaluated comprehensively and optimized as a whole.

**Keywords:** double-layer photovoltaic exterior window; daylighting and energy consumption evaluation; grey correlation analysis; TOPSIS method; plan optimization

随着各国经济的快速发展,世界能源需求量日益增长,社会能源问题日益突出.清华大学建筑节能研究中心<sup>[1]</sup>的研究表明,2018年,我国建筑能耗已经占到全社会总能耗的37%,并且这个数据近几年仍

**收稿日期:** 2021-02-26

**通信作者:** 程远达(1985-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事建筑节能与可再生能源利用的研究. E-mail: chengyuanda@tyut.edu.cn.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFD1100701-05);西部绿色建筑国家重点实验室开放课题基金资助项目(LSKF202011);山西省重点研发计划项目(201803D121105)

在不断上升,因此,发展节能建筑对降低总体能源消耗影响深远。由于外窗具有较高的传热系数,因此,减少外窗传热造成的建筑能耗是降低建筑总能耗的关键<sup>[2]</sup>。光伏(PV)外窗是一种新型节能窗户,不仅能满足基本功能,还能利用光伏组件的光电效应生产清洁电力,从而为建筑能源系统提供部分电能,缓解建筑实际用电负荷<sup>[3]</sup>。光伏外窗的逐步推广将对我国能源使用结构的改善和优化升级带来深远影响。

双层光伏外窗是光伏外窗中较有特色的一类,国内外许多学者对双层光伏外窗的应用效果及运行特性进行了多方面的研究。Kapsis 等<sup>[4]</sup>采用 Daysim 软件对不同透过率的半透明光伏外窗及其他类型光伏外窗的居室进行室内采光性能的全年动态模拟和研究,结果表明,当双层光伏外窗的外层采用透过率为 30% 的非晶硅光伏玻璃时,室内全年的自然采光状况基本达标,此时,全自然采光空间占比  $sDA_{300,50\%} = 1$ ,且眩光概率  $DGP = 5\%$ 。Moralejo-Vazquez 等<sup>[5]</sup>通过紫外线分光光度计对光伏外窗的光学性能进行实验研究,结果表明,通过调整光伏外窗的透过率可以实现采光质量与室内得热量相互协调,光伏系统与建筑能够高效率地进行集成。Yan 等<sup>[6]</sup>采用 Radiance 软件对双层玻璃窗间夹有不同朝向与角度的板条进行模拟研究,采用自然采光有效照度(UDI)、照度均匀度(UR)及 DGP 等指标进行采光环境评价,结果表明,带有透明条的双层玻璃窗有更好的采光性能,可以使得自然采光有效照度增加 47%~79%,还能有效地降低眩光概率。Cheng 等<sup>[7]</sup>对寒冷地区的半透明光伏外窗办公建筑的采光质量和节能潜力进行模拟研究,结果表明,当光伏外窗的安装朝向为南向、窗墙比为 40%~50%且透过率为 50%~60%时,采光良好,节能效果较好。何伟等<sup>[8]</sup>在合肥地区对空冷型双层光伏外窗、单层光伏外窗和中空型双层光伏外窗进行对比分析,结果表明,相比于其他两类窗户,空冷型双层光伏外窗可以有效减少夏季的室内冷负荷效果。黄启明<sup>[9]</sup>通过软件模拟的方法分析光伏外窗内的空腔间距对双层光伏通风窗的热性能及室内负荷的影响,结果表明,当空腔间距为 60~70 mm 时,双层光伏通风外窗烟囱效应最为显著,通风性能较为优良。

上述文献主要从采光和能耗特性角度对双层光伏外窗建筑进行研究,但主要针对局部改善或简单层级比较。目前尚未见到对双层光伏外窗采光和能耗特性进行整体评价的模型研究,而在实际工程应用中,双层光伏外窗设计方案选取是个典型的多目标优化问题,需要综合且科学地评估各方案。因此,本文选取双层光伏外窗建筑的采光性能、能耗水平、节能率 3 个主要评价指标做为多目标优化的研究对象,应用灰色关联改进 TOPSIS 法进行双层光伏外窗建筑采光与能耗性能评价。

## 1 双层光伏外窗建筑采光与能耗性能评价模型

### 1.1 现有评价指标

1.1.1 采光性能评价指标 室内采光性能评价指标主要分为静态评价指标与动态评价指标,其中,动态评价指标是对全年的室内自然光环境的时空分布规律进行整体评价,评价较为全面的。比较常见的室内采光性能动态评价指标主要有以下 2 个。

1) 自然采光有效照度。自然采光有效照度是工作平面照度的一个动态自然采光评价指标,表示照度区间出现的时间占比,即表示能有效利用自然采光的水平。100 lx 以下、100~2 000 lx 和 2 000 lx 以上的照度分别对应自然采光不足、自然采光可利用和自然采光量过高且有可能出现眩光 3 类情况。

2) 全自然采光空间占比。全自然采光空间占比指的是一年超过 50% 的时间,仅在自然光照射下就能达到标准照度值的计算点占空间所有的水平照度计算点的比例。可利用的自然采光照度阈值下限为 300 lx<sup>[10]</sup>。当  $sDA_{300,50\%} \geq 75\%$  时,认为自然采光质量非常理想;当  $sDA_{300,50\%} < 55\%$  时,认为自然采光质量较差;当  $55\% \leq sDA_{300,50\%} < 75\%$  时,认为自然采光质量是可以接受的。

高峰<sup>[11]</sup>针对光伏外窗与普通窗室内舒适照度阈值范围分别建立相对应的室内动态自然采光评价指标  $sUDI_{PV}$  和  $sUDI_{CC}$ 。该类指标不仅明确了采光有效区域占比对应的采光性能,还可区别眩光区域,因此,文中选取该指标作为双层光伏外窗建筑的采光性能评价指标。

1.1.2 建筑能耗性能评价指标 建筑净能耗( $Q_{net}$ )的计算公式为

$$Q_{net} = Q_{hea} + Q_{coo} + Q_{lig} + Q_{equ} - E_{PV}. \quad (1)$$

式(1)中: $Q_{hea}$ 为建筑采暖能耗,  $kW \cdot h \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$ ;  $Q_{coo}$ 为建筑制冷能耗,  $kW \cdot h \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$ ;  $Q_{lig}$ 为室

内照明能耗,  $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ;  $Q_{\text{equ}}$  为室内其他用电设备能耗,  $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ;  $E_{\text{pv}}$  为光伏发电量,  $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ .

为进一步分析双层光伏外窗的相对节能潜力,引入建筑节能率概念.建筑节能率指的是双层光伏外窗建筑与普通窗建筑的能耗差值除以普通窗建筑的能耗的比率.通过建筑节能率,可以客观地对比一个地区不同方案带来的建筑节能效果.因此,将建筑节能率作为建筑能耗性能的另一个评价指标.

### 1.2 采光与能耗性能评价模型

TOPSIS法是一种常用于有限方案的多目标决策分析方法,该方法主要借助决策问题的初步方案构建正理想解和负理想解,再以二者构建各个初步方案的相对距离,并进行排序,选出最佳方案.该方法可定量评价对象,已被广泛用于社会经济和工程技术等领域的决策中,但传统的TOPSIS法存在能体现方案间的差异性但不能体现相似性的局限性.统计数据量有限时,特别是对于较为无规律且波动的数据,难以保证决策结果的正确性<sup>[12]</sup>.

灰色关联分析(GRA)法是一种能使用全部数据,且能同等地处理各评价指标的分析方法,有效地避免主观因素及其他不可控因素对最终评价结果的影响<sup>[13]</sup>.因此,为改善传统TOPSIS法较难克服的缺点,引入灰色关联分析法.灰色关联分析法通过参考数列集合曲线和比较数列集合曲线的接近程度判断联系是否紧密,并用灰色关联度定量描述.该方法具有原始数据需求量少、运算简便、数据规律容易寻求等特点<sup>[14]</sup>.

多目标决策问题中,判断矩阵权重的确定也是一个核心问题,权重的确定方法主要有主观赋权法和客观赋权法两种.主观赋权法中的典型方法为专家调查法,客观赋权法的典型方法为熵值法.主观赋权法有较强的主观性,所得结果的可靠性较弱;客观赋权法利用指标值的信息量、相关关系或变异程度等确定权重,置信度较高.采光和建筑能耗性能皆为以客观性的物理量为基准的评价指标,为避免凭经验确定指标权重的主观性出现歧义,文中用客观赋权法中的熵值法进行赋权<sup>[15]</sup>.

综上所述,以初步获得的数据样本为基础,利用基于灰色关联改进TOPSIS法进行方案选优.

#### 1.2.1 结构 双层光伏外窗建筑采光与能耗性能评价模型,如图1所示.

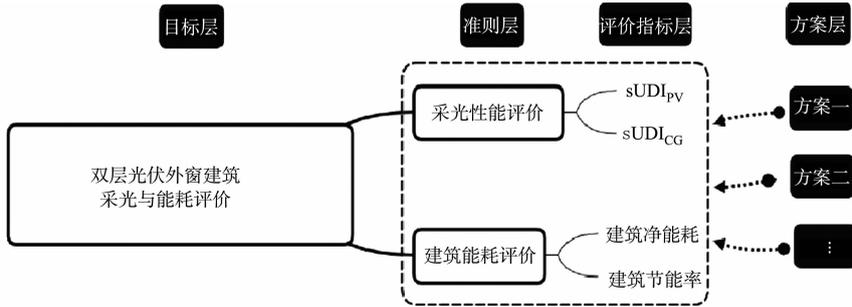


图1 双层光伏外窗建筑采光与能耗性能评价模型

Fig.1 Performance evaluation model of daylighting and energy consumption for double-layer photovoltaic exterior window buildings

评价模型由目标层、准则层、评价指标层及方案层构成.目标层即为双层光伏外窗建筑采光与能耗性能评价;准则层包括采光性能评价及建筑能耗性能评价两个方面.在一定前提下,各方案通过该评价模型可得到相对优劣关系.

#### 1.2.2 评价矩阵的构建 设双层光伏外窗的设计方案有 $n$ 个, $\mathbf{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ; 每个方案的评价指标有 $m$ 个 $\mathbf{E} = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ ; $x_{i,j}$ 为第 $j$ 个方案中第 $i$ 个指标的原始数值 ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ ), 则目标决策问题的原始矩阵 $\mathbf{X}$ 为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m,1} & x_{m,2} & \dots & x_{m,n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### 1.2.3 评价矩阵的标准化 为消除不同指标、不同量纲的影响,方便各指标间进行比较,需对不同性质

的指标采取不同标准化处理, 即将指标标准化为  $[0, 1]$  的数值.

有效益型指标 (指标值越大) 的无量纲标准化处理为

$$y_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min_i x_{i,j}}{\max_i x_{i,j} - \min_i x_{i,j}}. \quad (3)$$

成本型指标 (指标值越小) 的无量纲标准化处理为

$$y_{i,j} = \frac{\max_i x_{i,j} - x_{i,j}}{\max_i x_{i,j} - \min_i x_{i,j}}. \quad (4)$$

无量纲化后, 所有指标不仅全为区间  $[0, 1]$  的数值, 而且全化为效益型指标 (从数学意义上), 便于构建标准化评价矩阵.

1.2.4 基于熵值法的指标权重的计算 将标准化后的评价矩阵进行归一化, 即

$$f_{i,j} = \frac{1 + y_{i,j}}{\sum_{j=1}^n (1 + y_{i,j})}. \quad (5)$$

根据文献 [14] 所述的熵值计算方法, 第  $i$  个指标的熵值表达式为

$$h_i = - \left( \frac{1}{\ln n} \right) \sum_{j=1}^n (f_{i,j} \ln f_{i,j}). \quad (6)$$

利用熵值法对权重赋权, 权重  $\omega_i$  表达式为

$$\omega_i = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i}. \quad (7)$$

1.2.5 标准化矩阵的加权和理想解的确定 对标准化的评价矩阵加权进行处理, 即

$$z_{i,j} = \omega_i \times y_{i,j}, \quad (8)$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,n} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{m,1} & z_{m,2} & \cdots & z_{m,n} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

在矩阵  $Z$  中, 选取  $m$  个指标中的最理想值构成参考数列  $Z_0 = \{Z_{i,0} \mid i = 1, 2, \dots, m\}$ , 即  $Z_0 = \{Z_{1,0}, Z_{2,0}, \dots, Z_{m,0}\}$ , 这个参考序列即为理想解.

1.2.6 灰色关联系数矩阵的确定 计算第  $i$  个方案与理想解第  $j$  个指标的灰色关联系数  $\xi_{i,j}$ , 设  $Z_{i,0}$  与  $Z_{i,j}$  在第  $i$  项指标差的绝对值  $\Delta_{i,j} = |Z_{i,0} - Z_{i,j}|$ , 有

$$\xi_{i,j} = \frac{\min_i \min_j \Delta_{i,j} + p \max_i \max_j \Delta_{i,j}}{\Delta_{i,j} + p \max_i \max_j \Delta_{i,j}}. \quad (10)$$

式 (10) 中:  $p$  为分辨系数, 通常取值在  $[0, 1]$  内.  $p$  应充分体现关联度的整体性, 并具有抗干扰作用.

由式 (10) 可知:  $\xi_{i,j}$  与分辨系数  $p$  的值有关, 而  $p$  是独立于参考数列  $Z_0$  之外的一个常数, 一般情况下,  $p$  的取值为 0.5.

1.2.7 基于灰色关联矩阵的 TOPSIS 法的排序 以灰色关联系数  $\xi_{i,j}$  构造理想解模型, 确定正理想解和负理想解, 并以此为基础计算各方案的相对距离 [14-15].

正理想解由各方面最优的指标构成, 即

$$\xi_0^+ = \{(\max_{1 \leq i \leq m} \xi_{i,j}, j = 1, 2, 3, \dots, n)\}.$$

负理想解则是由各方面最劣指标构成, 即

$$\xi_0^- = \{(\min_{1 \leq i \leq m} \xi_{i,j}, j = 1, 2, 3, \dots, n)\}.$$

第  $j$  个方案到正理想解的距离为

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\xi_{i,j} - \xi_{0,j}^+)^2}, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (11)$$

第  $j$  个方案到到负理想解的距离为

$$\bar{d}_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\xi_{i,j} - \bar{\xi}_{0,j})^2}, \quad 1 \leq j \leq n. \quad (12)$$

通过每个方案到正理想解和负理想解的距离可计算各方案的相对贴适度  $C_{i,j}$ , 即

$$C_{i,j} = \frac{d_j^+}{d_j^+ + \bar{d}_j}. \quad (13)$$

按各方案的相对贴适度进行排序, 相对贴适度越小则方案越优, 从而得到最佳方案.

## 2 双层光伏外窗建筑综合性能评价

### 2.1 建筑模型构建与参数设置

综合考虑 GB 50189-2015《公共建筑节能设计标准》<sup>[16]</sup> 及 JGJ/67-2006《办公建筑设计规范》<sup>[17]</sup> 要求, 建立长×宽×高为 4 m×4 m×3 m 的办公建筑模型, 该模型与文献[11]中的模型相同, 窗户在南向墙上. 已有的研究表明, 我国多数地区采用透过率为 40%~60% 的光伏玻璃作为窗户时, 能够兼顾建筑节能与室内采光质量<sup>[18]</sup>.

双层光伏外窗结构的外层为 50% 光伏覆盖率的薄膜光伏组件, 内层为 5 mm 厚度普通玻璃, 中间为 20 mm 空气夹层. 中空光伏窗结构示意图, 如图 2 所示.

不同玻璃类型的光热特性参数, 如表 1 所示. 表 1 中:  $T_{vis}$  为可见光透过率;  $U$  为传热系数; SHGC 为太阳得热系数.

在软件模拟中, 建筑的天花板、地板、北向和西向墙面均假定为绝热壁面, 南向和东向壁面的热工参数设定则参照相关规定. 热工参数模拟设置, 如表 2 所示. 表 2 中:  $\rho$  为人员密度;  $\theta_s$  为夏季室内设计温度;  $\theta_w$  为冬季室内设计温度;  $P$  为照明功率;  $R_{EE}$  为制冷能效比; COP 为制热性能系数.

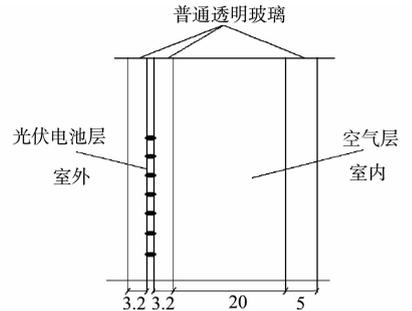


图 2 中空光伏窗结构示意图(单位:mm)  
Fig. 2 Structure of insulating photovoltaic windows structure (unit: mm)

表 1 不同玻璃类型的光热特性参数

Tab. 1 Photothermal characteristic parameters of different glass types

玻璃类型	$T_{vis}/\%$	$U$	SHGC
光伏组件	50.0	5.000	0.500
透明玻璃	89.0	5.613	0.861
双层光伏玻璃	46.5	2.452	0.454
双层玻璃	84.6	2.686	—

表 2 热工参数模拟设置

Tab. 2 Setting of thermal parameters simulation

项目	数值	项目	数值
$\rho/\text{人} \cdot \text{m}^{-2}$	4	$P/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	11
通风换气量 $/\text{m}^3 \cdot (\text{h} \cdot \text{人})^{-1}$	30	人员在室时间	9:00—17:00(工作日)
$\theta_s/^\circ\text{C}$	26	$\theta_w/^\circ\text{C}$	20
$R_{EE}$	3	COP	2.75

根据 JGJ/67-2006《办公建筑设计规范》<sup>[17]</sup> 中对办公房间室内侧窗采光的的规定, 采光口离地面的高度为 0.8 m, 并分别建立窗墙比为 20%, 30%, 40%, 50% 与 60% 的采光口. 参照 GB 50033-2013《建筑采光设计标准》<sup>[19]</sup> 有关规定, 采光分析平面距离地面高度为 0.75 m, 天花板、墙面和地面的反射率分别设定为 0.75, 0.60 和 0.30. 在软件模拟中, 使用自动控制中节能性最高的“人员传感器+连续调光+关灯”的控制策略, 在房间内设置人员传感器与照度传感器, 根据人员在房间内具体情况及各个测点照度实时值, 传感器能对人工照明的输出功率进行动态调节. 环控设备的制冷能效比和制热能效比在工作

状态中保持不变,设备工作状态仅与室内外环境参数有关。

根据评价指标  $sUDI_{PV}$  和  $sUDI_{CG}$ , 光伏外窗房间与普通玻璃房间的工作面自然采光最低照度分别设置为各自的视觉舒适阈值下限值 400, 450 lx<sup>[11]</sup>。采光质量评价分为非常理想、理想、可接受、不可接受 4 个评价级别。软件模拟参数设置和建筑模型与文献[11]一致,模型的验证过程也与文献[11]一致。

## 2.2 模拟工况

我国的气候多样性较为显著,不同区域的气候条件对光伏外窗建筑采光及能耗性能产生重要影响,因此,选取热工分区与太阳能资源都截然不同的四川省成都市和山西省太原市两个城市进行研究。成都市太阳能资源一般,最冷月平均温度为 0~10 ℃,年总辐射量 < 3 780 MJ · m<sup>-2</sup>,热工分区为夏热冬冷;太原市太阳能资源很丰富,最冷月平均温度为 0~-10 ℃,年总辐射量为 5 040~6 300 MJ · m<sup>-2</sup>,热工分区为寒冷。成都市全年的制冷和制热能耗都较高,且太阳能资源相对其他地区较为匮乏;太原市全年环控能耗以制热能耗为主,但太阳能资源较为充分。

分别设置成都市和太原市的建筑进深为 3, 4, 5, 6 m 四组对比工况,每组对比工况对应的建筑窗墙比分别为 20%, 30%, 40%, 50% 和 60%, 因此,两个城市共设置了 40 个工况。在上述条件下,对比和研究光伏外窗建筑与玻璃窗建筑的室内采光质量与建筑能耗。根据 GB 50176-2016《民用建筑热工设计规范》,成都市和太原市的南向、东向外墙传热系数分别设置为 0.600, 0.431 W · (m<sup>2</sup> · K)<sup>-1</sup>。

## 2.3 不同窗建筑采光和能耗性能评价原始数据

利用 Energyplus 和 Grasshopper 软件模拟建筑模型,所用气象参数来源于 Energyplus 的 CSWD 标准全年逐时气象数据。对于模拟所得的初步数据,先从室内采光质量和建筑净能耗两方面展开分析,将采光质量明显不理想及建筑净能耗明显过大的方案剔除,从而得到基本可行的设计方案,并根据节 1.1.1 确定的评价标准对各方案室采光质量进行评级。不同进深的光伏外窗建筑窗墙比优化(成都市),如表 3 所示。表 3 中:  $L$  为建筑进深;  $R_{w,w}$  为窗墙比;  $\eta_{PV}$  为室内  $sUDI_{PV}$  面积占比;  $Q_{net,PV}$  为光伏外窗建筑净能耗;  $Q_{net,CG}$  为普通玻璃窗建筑净能耗;  $\eta_0$  为建筑节能率。

由于与普通玻璃窗建筑工况相比,成都市模型建筑进深为 6 m 时的光伏窗室内  $sUDI_{PV}$  面积占比明显较小,采光质量均不佳,只有通过增大透过率加以改善,而文中的设计方案未涉及不同类别光伏窗材质,因此,不考虑成都市建筑进深为 6 m 的情况。

表 3 不同进深的光伏外窗建筑窗墙比优化(成都市)

Tab. 3 Window to wall ratio optimization of PV window buildings with different depths (Chengdu City)

$L/m$	$R_{w,w}/\%$	$\eta_{PV}/\%$	光伏外窗室内 采光质量	$Q_{net,PV}/$ $kW \cdot h \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$	$Q_{net,CG}/$ $kW \cdot h \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$	$\eta_0/\%$
3	40	77.6	非常理想	31.92	37.93	15.80
	50	71.0	可接受	30.49	39.33	22.40
4	50	78.7	非常理想	30.34	36.15	16.00
	60	73.5	可接受	29.48	36.82	19.90
5	60	57.8	可接受	29.32	35.41	17.20

不同进深的光伏外窗建筑窗墙比优化(太原市)如表 4 所示。

表 4 不同进深的光伏建筑窗墙比优化(太原市)

Tab. 4 Window to wall ratio optimization of PV window buildings with different depths (Taiyuan City)

$L/m$	$R_{w,w}/\%$	$\eta_{PV}/\%$	光伏外窗室内 采光质量	$Q_{net,PV}/$ $kW \cdot h \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$	$Q_{net,CG}/$ $kW \cdot h \cdot (m^2 \cdot a)^{-1}$	$\eta_0/\%$
3	30	80.0	非常理想	30.50	35.60	14.30
	40	71.0	可接受	28.40	37.50	24.00
4	40	78.7	非常理想	28.70	34.40	16.60
	60	61.8	可接受	25.30	37.30	32.00
5	50	76.6	非常理想	27.36	33.82	19.10
	60	70.0	可接受	26.00	34.80	25.30
6	60	75.0	非常理想	26.60	32.30	17.60

两个城市各自初步选出的设计方案的具体情况,如表 5 所示。

表5 设计方案的具体情况

Tab. 5 Details situation of design plan

城市	方案编号	L/m	R <sub>w,w</sub> /%	城市	方案编号	L/m	R <sub>w,w</sub> /%
成都市	1	3	40	太原市	1	3	30
	2	3	50		2	3	40
	3	4	50		3	4	40
	4	4	60		4	4	60
	5	5	60		5	5	50
					6	5	60
					7	6	60

## 2.4 评价过程与结果

以太原市为例进行评价分析,1) 原始指标值构建的原始矩阵  $\mathbf{X}$  为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 80.0 & 71.0 & 78.7 & 61.8 & 76.6 & 70.0 & 75.0 \\ 30.5 & 28.4 & 28.7 & 25.3 & 27.36 & 26.0 & 26.6 \\ 14.3 & 24.0 & 16.6 & 32.0 & 19.1 & 25.3 & 17.6 \end{bmatrix}.$$

2) 原始指标标准化构建的矩阵  $\mathbf{Y}$  为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0.505 & 0.929 & 0 & 0.813 & 0.451 & 0.725 \\ 0 & 0.404 & 0.346 & 1 & 0.604 & 0.865 & 0.750 \\ 0 & 0.548 & 0.130 & 1 & 0.271 & 0.621 & 0.186 \end{bmatrix}.$$

3) 归一化构建的矩阵  $\mathbf{y}$  为

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0.175 & 0.132 & 0.169 & 0.088 & 0.159 & 0.127 & 0.151 \\ 0.091 & 0.128 & 0.122 & 0.182 & 0.146 & 0.170 & 0.159 \\ 0.102 & 0.159 & 0.116 & 0.205 & 0.130 & 0.166 & 0.122 \end{bmatrix}.$$

4) 加权标准化矩阵  $\mathbf{Z}$  为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0.302 & 0.153 & 0.281 & 0 & 0.246 & 0.136 & 0.219 \\ 0 & 0.128 & 0.110 & 0.317 & 0.191 & 0.274 & 0.237 \\ 0 & 0.209 & 0.050 & 0.382 & 0.103 & 0.237 & 0.071 \end{bmatrix}.$$

5) 方案和理想解构建灰色关联矩阵  $\xi$  为

$$\xi = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.560 & 0.898 & 0.387 & 0.771 & 0.534 & 0.697 \\ 0.376 & 0.503 & 0.479 & 1.000 & 0.603 & 0.817 & 0.707 \\ 0.333 & 0.525 & 0.364 & 1.000 & 0.407 & 0.569 & 0.381 \end{bmatrix}.$$

6) 通过正负理想解距离计算相对贴近度矩阵  $\mathbf{C}_j$  为

$$\mathbf{C}_j = [0.60 \quad 0.74 \quad 0.61 \quad 0.40 \quad 0.62 \quad 0.60 \quad 0.62].$$

类似地,对成都市各个初步选出的设计方案用相同方法进行计算,成都市的贴近度为 0.75,0.62,0.49,0.51,0.65.

因此,在成都市,方案3的相对贴近度最小(0.49),最佳设计方案推荐采用建筑进深为3m,窗墙比为50%的设计方案;在太原市,方案4的相对贴近度最小(0.40),最佳设计方案推荐采用建筑进深为4m,窗墙比为60%的设计方案.

## 3 结束语

以已有的研究成果提出的采光环境动态评价指标 sUDI、建筑净能耗和建筑节能率等评价指标为基础,根据逼近理想解的排序法、灰色关联分析法、熵值法的原理,综合几种常用评价方法的优点,建立双层光伏外窗建筑采光与能耗性能评价模型.该评价模型为光伏外窗建筑设计方案优化提供了一条新的可行途径,具有便捷度高,适应性强等特点,能在工程实际情况及相关软件模拟的情况下进行实际应用.研究表明,在成都市,宜采用建筑的进深为3m,窗墙比为50%的设计方案;而在太原市,则推荐建

筑进深为 4 m,窗墙比为 60%的设计方案.

## 参考文献:

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑年度发展研究报告[R]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [2] 夏磊. 内置遮阳膜的中空玻璃窗热工性能[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [3] RADHI H. Energy analysis of façade-integrated photovoltaic systems applied to UAE commercial buildings[J]. *Solar Energy*,2010,84(12):2009-2021. DOI:10.1016/j.solener.2010.10.002.
- [4] KAPSIS K,DERMARIROS V,ATHIENITIS A K,*et al.* Daylight performance of perimeter office façades utilizing semi-transparent photovoltaic windows: A simulation study[J]. *Energy Procedia*,2015,78:334-339. DOI:10.1016/j.egypro.2015.11.657.
- [5] MORALEJO-VAZQUEZ F J,MARTIN-CHIVELET N,OLIVIERI L,*et al.* Luminous and solar characterization of PV modules for building integration[J]. *Energy and Buildings*,2015,103:326-337. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.06.067.
- [6] YAN Yisun,WU Yupeng,WILSON R,*et al.* Analysis of the daylight performance of a glazing system with parallel slat transparent insulation material (PS-TIM)[J]. *Energy and Buildings*,2017,139:616-633. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.01.001.
- [7] CHENG Yuanda,GAO Min,DONG Jiankai,*et al.* Investigation on the daylight and overall energy performance of semi-transparent photovoltaic facades in cold climatic regions of China[J]. *Applied Energy*,2018,232:517-526. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.10.006.
- [8] 何伟,张永煦,刘俊跃,等. 空冷型光伏双层窗在华东地区的热性能模拟分析[J]. *太阳能学报*,2009,30(11):1476-1480. DOI:10.3321/j.issn:0254-0096.2009.11.006.
- [9] 黄启明. 寒冷地区双层光伏通风窗热光性能研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [10] North American Lighting Council. IESLM-82-12: Approved method: Characterization of LED light engines and led lamps for electric properties as a function of temperature[S]. Washington D C:U. S. Standards Institution,2012.
- [11] 高峰. 双层光伏窗室内光环境与建筑能耗研究及优化[D]. 太原:太原理工大学,2020.
- [12] 张军,梁川. 基于灰色关联系数矩阵的 TOPSIS 模型在水环境质量评价中的应用[J]. *四川大学学报(工程科学版)*,2009,41(4):97-101.
- [13] 王砚羽,张卓,王正新. 基于灰色关联系数改进的加权 TOPSIS 法及其应用[J]. *华东经济管理*,2011,25(10):139-144. DOI:10.3969/j.issn.1007-5097.2011.10.034.
- [14] 王其荣,黄建. 综合评价方法之评价[J]. *统计与决策*,2006(11):137-138. DOI:10.3969/j.issn.1002-6487.2006.11.073.
- [15] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 办公建筑设计规范: JGJ 67—2006 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [18] 仇中柱,周天泰,李芑,等. 光伏窗太阳能发电量数值分析[J]. *华东电力*,2009,37(5):146-149. DOI:10.3969/j.issn.1001-9529.2009.05.036
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑采光设计规范: GB 50033—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [20] Lawrence Berkeley National Laboratory. Optics 6[EB/OL]. (2018-06-01)[2021-03-01]. [https:// windows. lbl. gov/software /Optics/optics. html](https://windows.lbl.gov/software/Optics/optics.html).
- [21] Lawrence Berkeley National Laboratory. WINDOW 7. 6[EB/OL]. (2018-06-01)[2021-03-01]. [https:// windows. lbl. Gov/software/window/window. html](https:// windows. lbl. Gov/software/window/window.html),2018-04-05.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范: GB 50176—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)