基于能耗和光热性能的关中窄院民居多目标优化研究

李秋毫 李瑞 霍明启 朱涵琳 阎阳（通讯作者）

河北建筑工程学院，河北张家口，075000；

摘要：针对关中窄院民居在现代使用条件下面临的运行能耗偏高、热舒适不足及采光质量不稳定等问题，以典型关中窄院民居为研究对象，构建 Grasshopper 参数化模型，采用 Wallacei 内置 NSGA-II 算法生成 30 代、每代 40 个体的多目标优化样本，并基于加权 TOPSIS 法对全部 1200 个模拟方案进行综合排序。研究选取单位面积年能耗（EUI）、全年热不舒适时长（DDH）和有效日光照度（UDI）作为评价指标，以窗台高度、南北向窗墙比、闷顶高度、遮阳板外挑深度、围护结构传热系数等 10 项设计变量作为优化对象。结果表明，关中窄院民居的能耗、热舒适与采光之间存在显著权衡关系。与基准建筑相比，综合最优方案的 EUI 降低 8.84%，DDH 降低 25.38%，UDI 提高 4.23%。研究结果可为关中窄院民居绿色更新与新建设计提供量化参考。

关键词：关中窄院民居；多目标优化；TOPSIS

DOI：10.69979/3029-2727.26.05.048

引言

关中地区属我国寒冷地区，冬寒夏热。传统民居长期适应地域气候，形成地方特色空间组织方式，窄院民居是代表性类型，面宽窄、进深大、院落狭长，建筑沿纵深布置，院落是生活空间核心和调节光热风环境的媒介。随着居住需求和设备运行方式改变，关中窄院民居在现代使用中面临能耗高、热舒适不足、采光不稳定等问题，在保留地域原型特征基础上协调建筑能耗、热舒适与采光表现，成为传统民居绿色更新研究重要议题。

已有研究主要从外窗参数、围护结构和窄院环境三个层面展开。张嘉辉等利用多目标优化分析关中民居外窗参数对采光、热舒适和能耗的耦合作用，指出南北向窗墙比、窗台高度和遮阳参数是影响建筑综合性能的重要因素[1]。朱轶韵等采用正交试验识别围护保温与窗墙比对节能效果的影响，提出强化外墙与屋面热工性能、控制南北向开窗比例的综合策略[2]。席鸿等从窄院空间风环境出发，揭示院落尺度、门窗组织和围护性能变化对夏季通风和热舒适的影响规律[3]。崔晓晨则从原型研究角度总结了关中庭院的气候适应特征，为窄院民居参数化抽象提供了方法基础[4]。总体而言，现有研究为关中传统民居绿色优化提供了较好基础，但针对“窄院空间原型—围护热工性能—光热环境协同优化”的整合研究仍相对不足。

基于此，本文以关中窄院民居为研究对象，提取典型原型特征构建参数化模型，利用 Wallacei 内置 NSGA - II 算法生成多目标优化样本，用加权 TOPSIS 法对 1200 个模拟方案综合排序。研究以单位面积年能耗（EUI）、全年热不舒适时长（DDH）和有效日光照度（UDI）为评价目标，以窗台高度等 10 项设计变量为优化对象，旨在识别兼顾节能、热舒适和采光质量的综合优选参数组合，为关中窄院民居绿色更新与新建设计提供量化依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象与参数化模型

本文研究关中典型窄院民居，该民居院落狭长、建筑沿纵深布置、围合界面强，其建筑性能受开窗、围护结构、院落原型及空间组织方式影响。为保证研究对象有明确地域性和原型指向，本文保留窄院民居基本空间特征并进行参数化抽象，在 Grasshopper 平台建立可用于多目标优化迭代的基准模型。建模时重点保留空间深度、南北向开口关系、闷顶空间特征及围护热工边界，将主要设计参数嵌入控制逻辑，为后续模拟与优化提供统一数据接口。与一般体块模型相比，该模型更强调窄院空间原型对建筑光、热和能耗表现的约束作用。

1.2 设计变量与目标函数

为兼顾空间形态、开口组织与围护热工性能，本文共设置 10 项设计变量，分别为窗台高度、北向窗墙比、

南向窗墙比、闷顶高度、遮阳板外挑深度、外墙传热系数、屋顶传热系数、外窗传热系数、外墙保温厚度和屋顶保温厚度。本文选取单位面积年能耗（EUI）、全年热不舒适时长（Discomfort Duration Hours, DDH）和有效日光照度（UDI）作为优化目标。三个指标分别从节能性、热舒适性和光环境质量三方面反映关中窄院民居的综合性能。

表 1　优化变量与目标函数设定

类别	参数	符号	范围	单位
变量	窗台高度	Hs	0.80–1.20	m
变量	北向窗墙比	WWR-N	0.10–0.30	
变量	南向窗墙比	WWR-S	0.30–0.50	
变量	闷顶高度	Hm	0.30–2.00	m
变量	遮阳板外挑深度	Sd	0.00–0.30	m
变量	外墙传热系数	Kw	0.10–0.40	W/(m²·K)
变量	屋顶传热系数	Kr	0.30–0.50	W/(m²·K)
变量	外窗传热系数	Uw	2.30–2.60	W/(m²·K)
变量	外墙保温厚度	Tw	0.02–0.15	m
变量	屋顶保温厚度	Tr	0.02–0.15	m
目标	单位面积年能耗	EUI		kWh/(m²·a)
目标	全年热不舒适时长	DDH	—	h
目标	有效日光照度	UDI	—	%

1.3 基于 TOPSIS 的综合评价方法

为进一步识别多目标优化中的综合优选方案，本文采用 TOPSIS 法对 1200 个模拟样本进行综合评价。结合研究重点，邀请 6 位长期从事建筑设计、建筑技术及绿色建筑研究的专家对 EUI、DDH 和 UDI 的重要性进行评分，并以平均值确定其权重，最终分别取 0.40、0.35 和 0.25。其中，EUI 和 DDH 为成本型指标，取值越小越优；UDI 为效益型指标，取值越大越优。由于 UDI 在优化输出中以负值形式参与计算，本文先将其乘以-1 恢复为正向 UDI，再参与后续 TOPSIS 计算。

2 结果与分析

2.1 样本目标分布特征

基于 1200 个模拟样本统计，单位面积年能耗（EUI）为 125.798 - 145.169 kWh/(m² ・a)，全年热不舒适时长（DDH）为 5570.367 - 7071.107 h，有效日光照度（UDI）为 67.078% - 76.899%。总体分布上，三项目标难在同一方案达最优，说明关中窄院民居节能性、热舒适性与采光质量间有协同与制约关系。从样本趋势看，EUI 与 DDH 降低依赖围护热工性能和克制的开窗参数，UDI 提高与采光开口和自然光进入量相关。这表明，窄院原型下采光改善需与围护性能、遮阳参数及空间形态协调。因窄院纵深大、围合性强，光热环境表现依赖多变量协同，而非某一设计变量极端取值。

2.2 TOPSIS 综合最优方案识别

最优方案的参数组合为：窗台高度 1.10 m、北向窗墙比 0.16、南向窗墙比 0.30、闷顶高度 0.30 m、遮阳板外挑深度 0.01 m、外墙传热系数 0.10 W/(m²·K)、屋顶传热系数 0.31 W/(m²·K)、外窗传热系数 2.32 W/(m²·K)、外墙保温厚度 0.15 m、屋顶保温厚度 0.04 m。对应目标值分别为 EUI 125.80 kWh/(m²·a)、DDH 5610.52 h 和 UDI 74.00%。

与基准建筑相比，综合最优方案的 EUI 降幅为 8.84%；DDH 降幅为 25.38%；UDI 增幅为 4.23%。结果表明，在窄院空间原型约束下，通过合理控制开窗、加强围护热工性能并协调遮阳参数，能够在维持采光水平的同时显著改善热环境和建筑能耗表现。

表 2 TOPSIS 综合排序前 5 位方案

序号	Hs	WWR-N	WWR-S	AH	Sd	Kw	Kr	Uw	Tw	Tr	EUI	DDH	UDI	排名
1083	1.1	0.16	0.3	0.3	0.01	0.1	0.31	2.32	0.15	0.04	125.798	5610.519	74	1
1116	1.1	0.16	0.3	0.3	0.01	0.1	0.31	2.32	0.15	0.04	125.798	5610.519	74	2
1142	1.1	0.16	0.3	0.3	0.01	0.1	0.31	2.32	0.15	0.04	125.798	5610.519	74	3
1177	1.1	0.16	0.3	0.3	0.01	0.1	0.31	2.32	0.15	0.04	125.798	5610.519	74	4
953	1.1	0.16	0.3	0.3	0.01	0.1	0.33	2.33	0.13	0.02	126.522	5605.396	74.1	5

2.3 关键参数分布规律

从 TOPSIS 排序前列方案的参数分布可知，窗台高度集中在 1.10 m，南向窗墙比集中于 0.30，这表明在窄院原型条件下，适度控制主采光面开口比例利于实现节能、热舒适和采光的综合平衡。北向窗墙比集中于 0.15－0.17，说明适中的北向采光可在改善 UDI 的同时控制热损失和不舒适时长。在围护结构方面，外墙传热系数接近下限，屋顶传热系数多在 0.31－0.36 W/(m²·K)范围，这显示提高围护热工性能对降低 EUI 和 DDH 更直接。外窗传热系数集中在 2.30－2.33 W/(m²·K)区间，表明外窗热工性能仍是窄院民居综合优化的关键因素。外墙保温厚度多接近上限，屋顶保温厚度集中于 0.04－0.05 m，反映出围护强化对优化结果的贡献较明显。

3 结论

本文得到以下结论：

关中窄院民居的单位面积年能耗（EUI）、全年热不舒适时长（DDH）和有效日光照度（UDI）之间存在明显的协同与制约关系。

（2）通过设置窗台高度、南北向窗墙比、闷顶高度、遮阳板外挑深度、围护传热系数及附加保温厚度等 10 项变量，并结合 NSGA-II 进行多目标寻优，可较为完整地描述关中窄院民居在不同参数组合下的性能变化特征。

（3）最优参数组合对应的 EUI、DDH 和 UDI 分别为 125.80 kWh/(m²·a)、5610.52 h 和 74.00%。

（4）与基准建筑相比，综合最优方案的 EUI 降低 8.84%，DDH 降低 25.38%，UDI 提高 4.23%，表明在关中窄院原型约束下，通过合理协调开窗参数、围护热工性能和附加保温厚度，能够有效提升建筑综合环境性能。

参考文献

[1]张嘉辉,韩玮霄,马召熙,等.基于多目标优化法的关中民居外窗设计参数研究[J/OL].西安理工大学学报,1-11[2026-03-20].https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250314.1720.006.

[2]朱轶韵,陈习习,马召熙,等.基于多因素正交实验的关中民居节能优化分析[J].西安理工大学学报,2024,40(02):151-159.DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.02.001.

[3]席鸿,汝雯欣,马召熙,等.关中窄院生态民居空间风环境优化分析[J].西部人居环境学刊,2025,40(02):58-65.DOI:10.13791/j.cnki.hsfwest.20231102001.

[4]崔晓晨.关中庭院的气候适应原型研究[D].西安建筑科技大学,2024.DOI:10.27393/d.cnki.gxazu.2024.001299.

作者简介：李秋毫（1999.08.04-），男，汉族，河南周口，硕士，研究方向:建筑设计及理论；

李瑞（2000.08.06-），女，汉族，山西吕梁，硕士，研究方向：建筑设计及其理论；

霍明启（2001.12.05-），男，汉族，河北邢台，硕士，研究方向：建筑历史与理论；

朱涵琳（2001.04.27-），女，汉族，河南商丘，硕士，研究方向：建筑历史与理论；

通信作者：阎阳（1978-），女，汉族，副教授，研究方向：建筑设计及其理论、建筑遗产保护。

基金：河北建筑工程学院创新基金，课题“基于多目标优化的关中地区民居建筑闷顶空间设计研究（XY2026058）”