

面向碳排—舒适度—经济性多目标优化的藏式民居院落空间改造策略研究

A Study on the Spatial Transformation Strategy of Tibetan Residential Compound Towards Multi-objective Optimisation of Carbon Emission-Comfort-Economy

徐峰 | XU Feng 白云峰 | BAI Yunfeng 杨清欣 | YANG Qingxin 黄丽娟 | HUANG Lijuan
罗喜红 | LUO Xihong 温宝华 | WEN Baohua

中图分类号: TU208 文献标志码: A 文章编号: 1001-6740 (2024) 06-0059-07 DOI: 10.12285/jzs.20240526001

摘要: 藏式民居是我国民居瑰宝的重要组成部分, 具有典型的高原特色, 蕴含了历史悠久的藏族文化。随着西藏地区现代化进程的推进, 当地居民对居住环境的需求也日益提高。传统藏式民居院落空间难以满足居民的热舒适需求, 造成了不必要的能源消耗和温室气体排放。为此, 本研究选取西藏自治区山南市藏式民居为研究对象, 针对其院落空间开展低碳改造研究。以碳排放量、室内热舒适和经济性为优化目标, 建立建筑性能模拟与反向传播人工神经网络 (BPNN) 及遗传算法 (NSGA-II) 结合的多目标优化框架, 探讨不同院落封闭改造策略的性能差异并识别特定宅形下的最优改造策略。优化结果显示, 与未进行封闭改造的场景相比, 最优策略可实现 60.76% 的碳排放减少以及 6.86% 的热舒适度提升。研究结果证实了在建筑低碳改造过程中引入人工智能技术的必要性和有效性, 为藏式民居的现代化改造提供参考, 为促进藏区建筑可持续发展作出贡献。

关键词: 人工神经网络、多目标优化、藏式民居、人工智能、低碳改造

Abstract: Tibetan-style residential houses represent a significant aspect of China's residential heritage, exhibiting typical plateau characteristics and a long history of Tibetan culture. With the advancement of modernisation in Tibet, the demand of local residents for a comfortable living environment is also increasing. However, the traditional Tibetan residential compound space is unable to meet the thermal comfort needs of residents, resulting in unnecessary energy consumption and greenhouse gas emissions. Consequently, this study selects Tibetan-style residential houses in Shannan City, Tibet Autonomous Region, as the research object and carries out a low-carbon renovation study for their courtyard spaces. A multi-objective optimisation framework combining building performance simulation with back-propagation artificial neural network (BPNN) and genetic algorithm (NSGA-II) was established to explore the performance differences between different courtyard closure retrofit strategies and identify the optimal retrofit strategy for a specific house shape, with the optimisation objectives of carbon emission, indoor thermal comfort and economy. The optimisation results demonstrate that the optimal strategy achieves a 60.76% reduction in carbon emissions and a 6.86% improvement in thermal comfort compared to the unenclosed scenario. These findings substantiate the necessity and efficacy of integrating AI technology into the process of low-carbon retrofitting of buildings, providing a reference for the modernisation of Tibetan houses and contributing to the advancement of sustainable development in Tibetan areas.

Keywords: Artificial neural network, Multi-objective optimisation, Tibetan houses, Artificial intelligence, Low-carbon retrofit

作者:

徐峰, 湖南大学建筑与规划学院院长, 教授, 博士生导师;
白云峰, 湖南大学建筑与规划学院博士研究生;
杨清欣, 湖南大学建筑与规划学院硕士研究生;
黄丽娟, 湖南大学建筑与规划学院硕士研究生;
罗喜红, 湖南大学建筑与规划学院硕士研究生;
温宝华 (通讯作者), 湖南大学建筑与规划学院副教授, 硕士生导师。

国家自然科学基金青年项目 (52108010), 湖南省重点研发计划 (2024AQ2011)

录用日期: 2024-08

一、引言

西藏地区幅员辽阔，文化深厚，其悠久灿烂的历史文化和独特的高原性气候孕育了藏式民居独特的民族风格和地域特色^[1]。山南地区与拉萨接壤，是藏族文化的发祥地^[2]，其民居以木、砖、石为主要建材^[3]，是藏式民居的重要组成部分。当地民居普遍层高较低，多为一层或两层的平坝式碉房^[3]。室内以佛堂和堂屋为核心功能空间^[4]，平面组织多为“回”字形布局，以庭院为中心，环绕布置各种方形居室^[5]。

传统藏式民居中，庭院扮演着重要角色。作为与功能房间紧密相连的室外空间，庭院承担着储藏、晾晒、牲畜圈养等生产性功能^[6]，提供防御外敌、空间分隔、通风采光等生活便利^[7]，并能够通过植物种植改善微气候，提供防风防沙等生态功能^[8]。经过数千年的演进，庭院已是藏民生活中不可或缺的部分。随着现代化的推进，藏式民居的庭院被赋予了新的功能，如商铺出租、民宿客厅等。经调研发现，山南地区大量院落式民居采取了封闭措施，将原有开敞庭院用透光或非透光材料进行封闭，从而提升室内环境质量，满足居住需求（图1）。

随着西藏地区的经济发展和居民收入水平提升，当地居民对居住环境的需求也日益提高。传统藏式民居难以满足居民的热舒适需求，造成了不必要的能源消耗和温室气体排放^[9]。过往研究表明，得益于西藏地区丰富的太阳能资源，附加阳光间^{[9][10]}、特朗勃墙^[11]、半室外空间^[12]等被动式技术的综合应用可实现建筑54%~90.45%的节能降碳效果^[9~12]。与附加阳光间类似，院落封闭将院落空间转变为蓄热体，通过强化建筑对太阳能的利用提升院落和室内温度，从而提升冬季室内热舒适性并减少采暖能耗与温室气体^[13]。然而，这一措施相较于阳光间，在蓄热量和空间功能上更为复杂，这意味着它可能在提高蓄热效率的同时，也可能带来夏季过热和通风不良等潜在问题。



图1：院落封闭现象

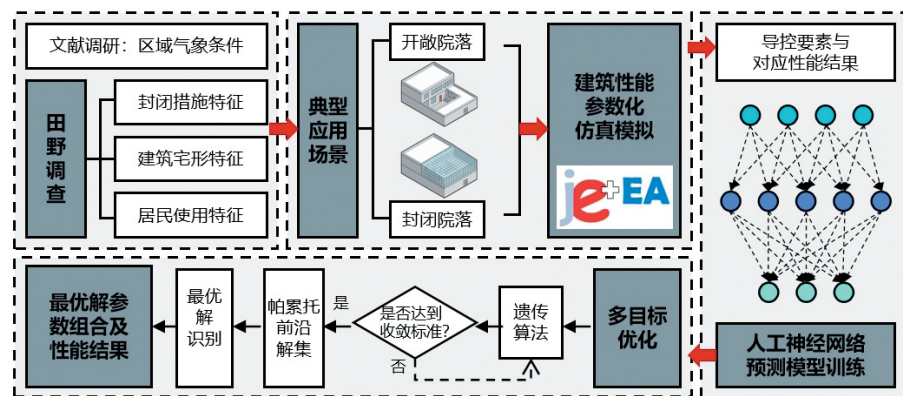


图2：研究技术路线

目前山南地区蔚然成风的院落封闭现象多为自发形成，缺乏科学介入。为强化节能减排效果并平衡院落封闭带来的系统性影响，本文以山南地区院落封闭现象为研究对象，对该院落空间改造措施的降碳效果及相关影响进行量化分析，通过多目标优化识别特定宅型下的参数最优解。本研究的结果将为西藏传统民居的现代化改造提供理论依据和实践指导，为科学推进藏式民居的可持续发展作出贡献。

二、研究方法

本文研究技术路线如图2所示。首先，提取当地典型民居宅形与院落封闭方式，构建建筑原型。设定优化目标、明确优化变量参数后，通过分层抽样进行建筑性能参数化模拟。基于BPNN神经网络构建变量参数与输出结果的映射关系，随后采用NSGA-II遗传算法，针对碳排放、热舒适性、经济性三个目标进行多目标优化

(Multi-objective Optimization, MOO)，识别帕累托前沿解与最优解。

1. 宅形原型识别与模型建立

本文选择西藏自治区山南市作为研究区域，山南地区幅员面积达7599.40km²，平均海拔为3700m，总人口31.8万人。山南地区属高原温带半干旱季风气候，气温年差小日差大，年平均气温在6.4℃，极端最高气温为32.6℃、最低气温为零下33.7℃。太阳辐射较强，年平均日照时数约为2838小时。

以当地某民居为原型构建基准封闭场景。该民居位于山南市乃东区萨热社区，现有常住居民2人，建筑占地面积141.25m²，庭院66.25m²，局部二层，层高3.0m，建筑几何特征见图3。

当地民居采用300mm加气混凝土砖构筑内外墙体，建筑构造特征见表1。原型建筑采用包围式玻璃顶进行院落封闭，

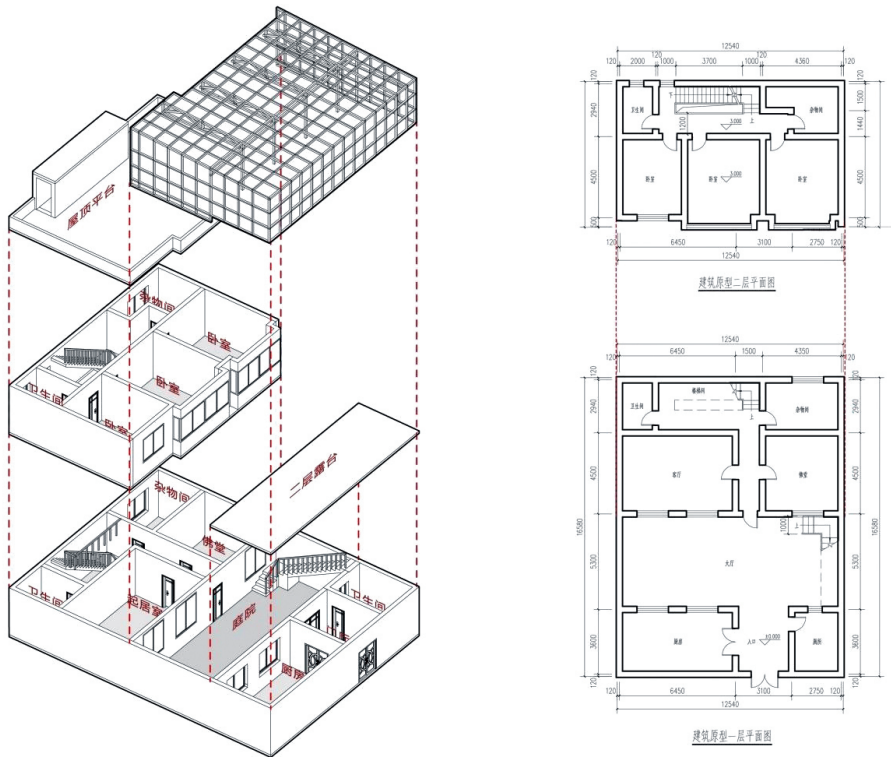


图 3：建筑几何特征

建筑围护结构特征梳理			表 1
围护结构要素	构造特征	传热系数 (U 值) (W/m ² · K)	透光率
外墙	5mm 外砖饰面 + 抹灰 + 300mm 加气混凝土砖 + 抹灰	0.54	/
内墙	5mm 外砖饰面 + 抹灰 + 300mm 加气混凝土砖 + 抹灰	0.54	/
楼板	120mm 混凝土板 + 内外抹灰 + 5mm 外砖饰面	1.20	/
门	金属门	2.72	/
内窗	单层窗	5.89	0.86
院落封闭顶窗	双玻夹胶单层 Low-E 玻璃	1.5	0.39
院落封闭侧窗	6mm 单层玻璃	5.36	0.82

以该建筑封闭模式及封闭参数构建基准场景。

2. 优化目标设定

(1) 碳排放目标

运行阶段碳排放量 C_m 根据《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366—2019，不考虑绿地碳汇和可再生能源的情况下，计算公式如下：

$$C_m = \sum_{i=1}^n (E_i E F_i) \times y \tag{1}$$

式中， C_m 为建筑运行阶段碳排放量

(kgCO_2)， i 为建筑消耗终端能源类型，本例中为电力。 E_i 为建筑第 i 类能源年消耗量， $E F_i$ 为第 i 类能源的碳排放因子，西藏地区电网排放因子取 $0.1229 (\text{kgCO}_2/\text{kWh})$ [14]。 y 为建筑设计寿命，取 30 年。

(2) 热舒适目标

热舒适目标计算公式如下，取各房间占用时间不符合 ASHRAE-55 中自适应舒适度的 80% 可接受性限值小时数的总和。

$$\text{TDT} = \sum_{i=1}^n M_{wi} \tag{2}$$

式中，TDT 代表全年 80% 热不适小时数，单位为小时； M_{wi} 表示第 i 个房间 80% 热

不适小时数，单位为小时。

(3) 初投资目标

本例中，市场价格为包含材料、设备、人力成本的综合价格，因此初投资成本计算公式如下：

$$C_{\text{means}} = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i \tag{3}$$

式中， C_{means} 代表改造初投资，单位为元； A_i 表示第 i 个主要材料用量， P_i 表示第 i 个主要材料的单位价格。

3. 建筑性能动态模拟

在性能模拟软件 DesignBuilder 中构建开敞和封闭建筑原型并进行开敞和基准场景仿真模拟。DesignBuilder 软件以目前最成熟的建筑性能仿真软件之一 Energyplus 为内核，能准确模拟建筑物的温湿度、能耗、内外表面温度等诸多参数，被广泛应用于新建及改造建筑性能研究 [15]。

基于笔者实地调研，建筑内人员及设备参数设定见表 2。由于缺少山南地区天气数据，选取 EnergyPlus 提供的拉萨典型气象年数据作为天气输入。当前西藏地区居民普遍只进行日间采暖，考虑到当地居民对房屋热舒适需求的日渐提升，本文采取冬季日间与夜间结合的采暖设定方式，以探讨需求提升后原有民居的适应能力。对开敞场景及原有基准场景进行全年性能模拟，获取对应建筑性能及初投资成本。

变量参数包括措施高度、顶窗及侧窗遮阳网透光率、冬夏庭院通风率及顶窗和侧窗玻璃选材。其中，措施高度指玻璃顶部距建筑二层屋顶垂直距离，遮阳网设置时间为 7 月 1 日至 9 月 1 日。连续型及离散型变量参数设置见表 3、表 4，共得到 5.12×10^{12} 种不同的参数组合。为减少批量模拟带来的时间与算力消耗，将院落封闭后的建筑模型及天气文件导出至参数化模拟平台 jEPlus 中进行动态模拟，进而获取不同封闭场景的建筑运行碳排放、室内热环境质量及所需经济成本。通过拉丁超立方抽样法 (Latin hypercube sampling, LHS) 对各类技术参数进行分层随机抽样

并执行性能模拟，获得封闭场景参数组合及对应目标结果的样本数据 500 个。

4. 人工神经网络训练

相较于 EnergyPlus 等基于热工学的物理驱动模型，数据驱动模型可根据历史数据找到独立参数和目标变量之间的数学联系，能节省大量时间和算力成本。常用模型包括多元线性回归（MLR）模型、人工神经网络（ANN）以及支持向量机（SVM）模型等。本文采用人工神经网络中的反向传播神经网络（Back propagation neural network，BPNN）构建输入参数与输出性能结果的映射关系，实现多元不同导控要素组合下的建筑性能预测^[16]。

基于 Matlab 中的人工神经网络拟合程序，使用动态模拟使用的变量参数和模拟得到的对应碳排放、热不适小时数及初投资成本结果分别作为原始输入数据，以 70%：15%：15% 的比例进行训练、验证和测试。设置隐藏层数为 10 来增加模型的深度，以提取和学习数据中的复杂特征。采用贝叶斯正则化算法进行人工神经网络的训练，以其提高泛化性能和避免过度拟合。得到碳排放及热不适小时数训练结果如图 4 所示。其中回归值 R 代表预测输出和目标输出之间的相关性，R 值越接近 1，表示预测和实际数据之间的关系越密切。初投资成本为已知计算值，因而 R 值为 1。碳排放及热不适时长 R 值均高于 0.99，实现了较好的拟合效果，模型具有良好泛化能力。

5. 多目标寻优

通过人工神经网络与遗传算法的结合，探索不同区域中导控要素的最优组合和院落封闭体系的最优性能。基于 Matlab 平台，利用 NSGA- II 遗传算法进行多目标寻优并形成帕累托前沿解集^[17]。该算法其具有优化非线性、离散决策变量和目标函数的能力，同时能加速收敛并使解有序，被应用于能源和建筑的各个领域。

人员及设备参数设置 表 2

房间	人数	人员活动时间	采暖时间	采暖设定温度	设备 COP
卧室	2	21：00~9：00	11 月 1 日~5 月 1 日，21：00~9：00	18	0.85
客厅	2	9：00~21：00	11 月 1 日~5 月 1 日，9：00~21：00	18	0.85
佛堂	1	7：00~7：30；18：30~19：00	/	/	/
起居	1	7：30~8：00；18：00~18：30	11 月 1 日~5 月 1 日，9：00~21：00	18	0.85
院落	1	19：00~21：00	/	/	/

连续型变量参数设置 表 3

编号	参数	单位	范围	步长
P1	措施高度	m	0.00-1.00	0.01
P2	顶窗遮阳网透光率	/	0.10-0.90	0.01
P3	侧窗遮阳网透光率	/	0.10-0.90	0.01
P4	冬季庭院通风率	ACH	0.01-3.00	0.01
P5	夏季庭院通风率	ACH	3.00-6.00	0.01

离散型变量参数设置 表 4

编号	玻璃位置	玻璃种类	U 值 (W/m ² · K)	SHGC	可见光透射率	价格 (元/m ²)
P6	侧窗	6mm 单层玻璃	5.36	0.82	0.86	120
		6mm+9A+6mm 双层玻璃	2.60	0.66	0.80	160
		三层玻璃窗	0.61	0.50	0.72	180
		Low-E 玻璃窗	1.15	0.31	0.43	220
P7	顶窗	双玻夹胶单层 Low-E 玻璃	1.5	0.36	0.39	400
		双玻夹胶双层 Low-E 玻璃	1.41	0.37	0.40	420

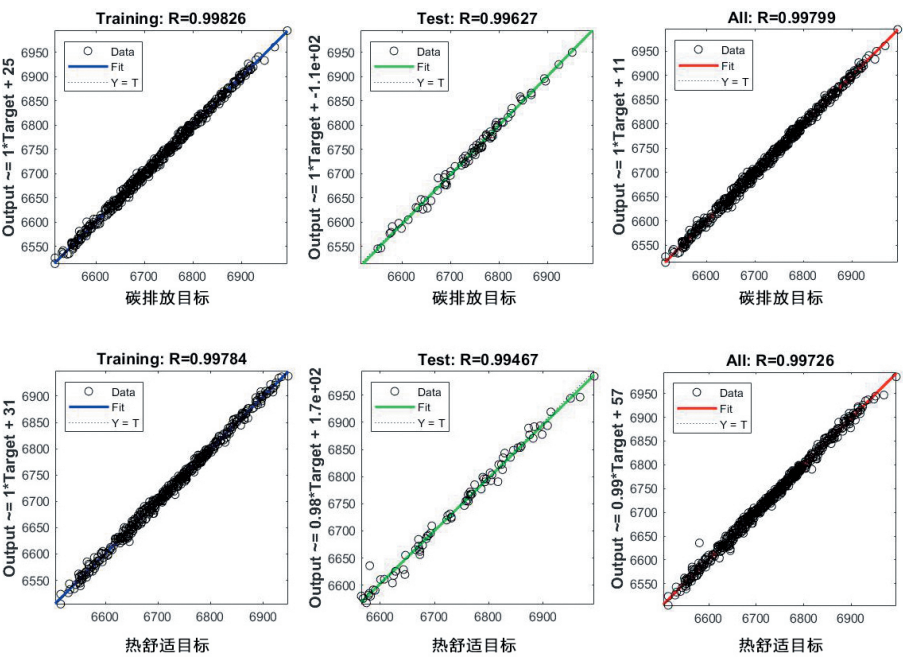


图 4：人工神经网络训练结果

遗传算法设置上，设置种群大小为100，帕累托分数为0.35，函数容差为1e-5，最大代数为5000。随后，通过乌托邦点法^[18]识别不同封闭措施应用场景中的最优解。识别最佳设计变量集在图像中最接近最小化目标函数的理想点，即乌托邦点，所有帕累托前沿解集中距离乌托邦点最近的点被认为是三目标同等权重下的最优解（图5）^[19]。通过最优解识别，为不同场景提供导控要素的参数优化配置和要素组合策略。

三、研究结果

1. 开敞及基准建筑性能结果

得到开敞及基准建筑室内全年日均空气温度见图6。山南地区全年气温较低，开敞场景由于接收利用太阳能，冬季较室外温度提升约5℃~7℃，夏季开敞场景室内温度维持与外界接近，温度凉爽舒适。得益于山南地区稳定且丰富的太阳能资源，基准封闭场景全年温度较外界高出约15℃，冬季室内日均温度维持在10℃以上，有较好的热舒适性能。然而，夏季日均温度达到最高35℃，存在夏季过热风险。

开敞及封闭场景模拟得全年建筑性能结果见表5。由于冬季室内温度较高，减少了采暖能源消耗，基准场景实现了一定降碳效果，证实了当地普遍采用的院落封闭措施的有效性。然而由于夏季过于闷热，基准场景热不适时长较开敞场景反而有所增加，亟需科学介入以提升室内热舒适性并进一步强化降碳效果。

2. 封闭建筑优化结果

遗传算法程序迭代1476代后满足精度要求，达到收敛。共计算数据147600组，得到最终帕累托解35个，计算时间仅约15分钟，较白盒模拟节省大量时间及算力。以碳排放为x轴，热不适小时数为y轴，初投资成本为z轴绘制迭代

过程中每一代前沿解集及最终帕累托解集如图7。历代帕累托解集组成了一个由远至近逐渐逼近原点的点云，体现了遗传算法寻优的有效性。由于初投资成本仅受选材及措施高度影响，整体图形在z轴有明显分段。碳排放量和热不适时长数值连续并向原点逼近，且点云z轴数值与x、y轴数值成反比，体现了建筑改

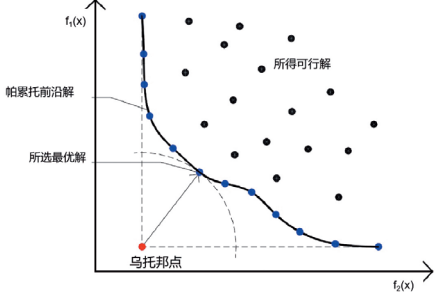


图5：帕累托解集及乌托邦点法示意

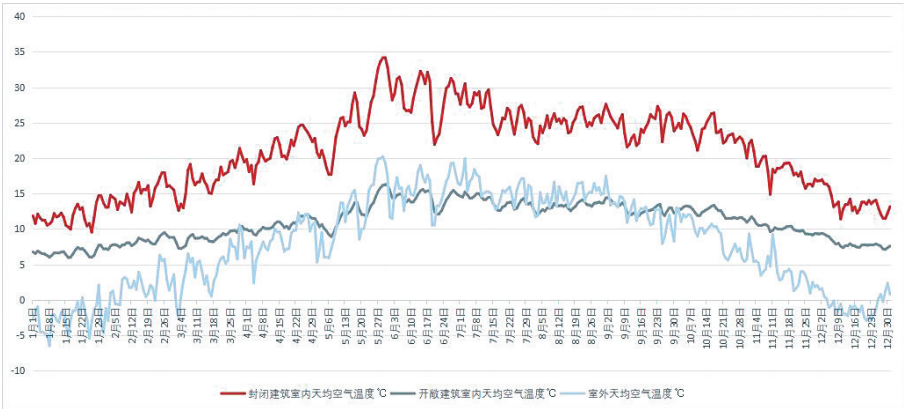


图6：开敞及封闭场景室内全年日均空气温度

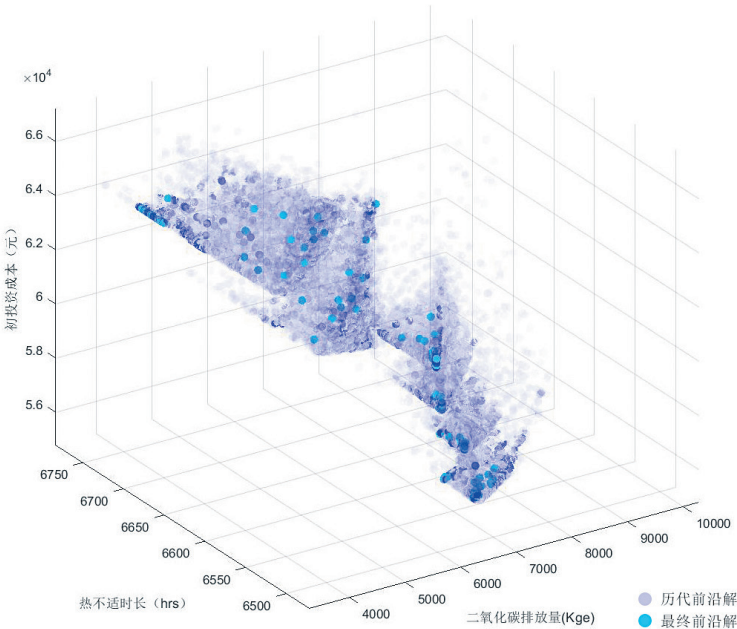


图7：帕累托前沿解集

开敞及基准建筑性能结果				表 5
目标	单位	开敞场景结果	基准场景结果	
碳排放量	kgCO ₂ e	17098.65769	10225.59954	
80% 热不适小时数	hrs	6983.50	7017.50	
初投资成本	元	/	58244.4	

造中碳排放与热舒适、建筑性能与经济成本的矛盾性。

3. 院落封闭最优解识别

基于乌托邦点法识别乌托邦点及帕累托前沿解至乌托邦点距离如图 8 所示。最

终于识别最优解参数及性能见表 6。最优解中，顶窗选型为双玻夹胶单层 Low-E 玻璃，侧窗选型为 6mm 单层玻璃，均具有透光性良好、造价较低的特点。措施高度与基准场景相近，顶窗夏季部分遮蔽太阳光（透光率 0.46），侧窗夏季尽可能遮蔽太阳光（透光率 0.1）。庭院通风策略

上，冬季减少庭院通风以加强室内保温效果，夏季保证室内外通风良好，加强空气流通。

将开敞场景、基准场景以及多目标优化所得最优场景的建筑性能与初投资成本进行对比分析（图 9）得，无论是基准场景还是最优场景都展现了显著的减碳潜力。与传统的开敞式庭院相比，基准封闭场景在运行期间的碳排放量降低了 40.20%，而最优场景进一步将碳排放量削减至 60.76%，显现出当地院落封闭措施在环境可持续性方面的显著效益。

热舒适方面，基准场景在夏季由于庭院过热而导致室内温度升高，相比于开敞场景，热不适小时数增加约 0.49%。而最优场景引入了适当的遮阳措施和通风策略，在夏季提升了室内的热舒适度和空气流动性，最终相比于开放式场景热舒适性提升了 6.86%。

在经济层面，最佳场景相较于基准场景初始投资成本增加约 1783 元人民币，这一成本提升比例约为 3.1%。鉴于优化后所带来的环境效益及运行成本的降低，这一成本增加处于可接受范围。

整体而言，多目标优化得到的最优场景在初投资成本仅增加 3.1% 的前提下，较原有基准场景在碳减排和热舒适性上分别达到了 20.56% 和 7.05% 的性能改善增幅，最终较开敞场景实现了 60.76% 和 6.86% 的碳减排和热舒适提升优化效果。

四、策略与建议

(1) 合理选材，明确核心要素。

在建筑设计领域，选材不仅关乎建筑的美观和功能实现，而且直接关联到能源效率与成本控制。特别是在院落建筑的封闭改造中，合理的材料选择显得尤为关键。经过对比不同材料的性能表明，选择透光性优良且成本较低的顶窗和侧窗材料，能有效提高建筑的整体能效及室内热舒适性。这种材料选择策略，不仅降低了初期投资成本，还有助于长期的能耗节省和碳排放量降低。

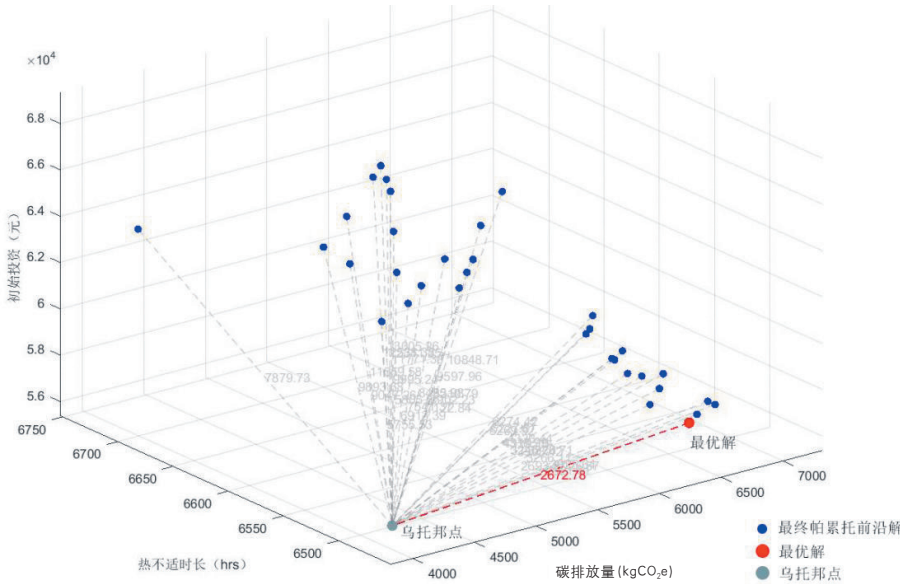


图 8：乌托邦点法识别最优解

最优解参数组合及性能表现				表 6
最优解结果	参数及目标	单位	数值	
最优解参数	措施高度	m	0.06	
	顶窗遮阳网透光率	/	0.46	
	侧窗遮阳网透光率	/	0.1	
	冬季庭院通风率	ACH	0.01	
	夏季庭院通风率	ACH	5.31	
	顶窗选型	双玻夹胶单层 Low-E 玻璃		
	侧窗选型	6mm 单层玻璃		
最优解图示				
最优解性能	碳排放量	kgCO ₂ e	6708.79	
	80% 热不适小时数	hrs	6504.47	
	初投资成本	元	60072.384	

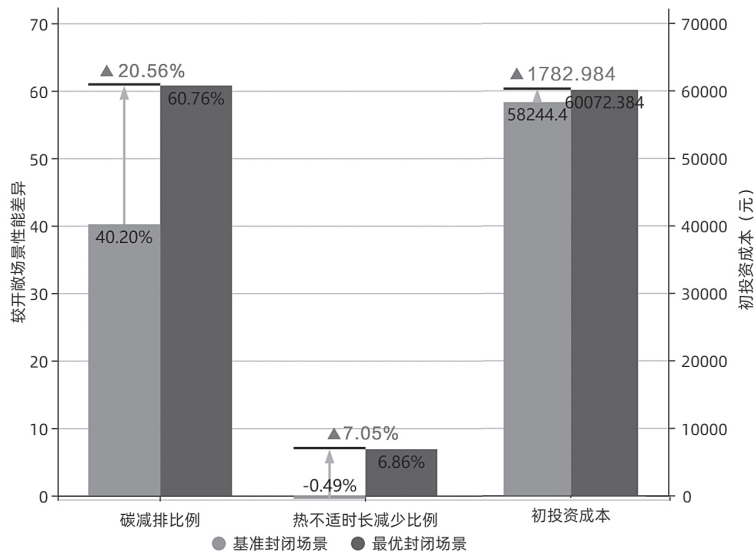


图 9：基准及最优场景较开敞场景建筑性能及初投资成本差异

(2) 系统改造，完善配套措施。

在日照时间长且太阳能资源丰富的山南地区，直接使用玻璃材料封闭院落将导致室内热环境恶化。因此，建议季节性采用遮阳措施，以减少建筑夏季得热量。通风方面，在不影响室内空气质量的前提下，冬季减少外界通风有利于热量留存，减少不必要热量消耗。此外，宜配置可开启的窗扇，从而增强夏季室内外的空气流通，确保室内环境凉爽舒适。

(3) 一宅一策，细化改造设计。

对于不同的宅形、气候条件及居民用能习惯，应进行材料选择与参数组合的针对性优化设计。通过这种针对性精细化设计，可以更有效地提升建筑改造的能效。房屋改造措施往往改造成本较高、使用时间较长，前期进行精细化设计可在后续房屋使用年限中提升居住舒适性并减少能源消耗与温室气体排放，为居民福祉与环境保护提供有力帮助。

(4) 全面考虑，减少负面影响。

院落的封闭改造对原有建筑产生了系统性的影响。在考虑建筑能效的同时，还应考虑到室内环境、经济成本等多方面因素。因此，宜在改造前进行系统性考虑，以减少改造措施可能带来的不利影响。通过全面分析和评估，可以确保改造措施在提高能效和居住舒适度的同时，也保持了建筑的安全性和环境友好性。

五、结论

以藏式民居为代表的建筑改造过程涉及大量参数变量，而碳排、舒适性、经济性等多目标又蕴含错综复杂的内在关联，而新兴的人工智能技术为解决既有建筑多目标优化提供了可能性。本文结合人工神经网络与 NSGA- II 遗传算法，针对山南地区藏式民居院落封闭改造措施进行多目标寻优，从 5.12 万亿种参数组合中，累计计算 147600 个可行解，输出 35 个帕累托前沿解并从中识别最优解。所得最优解较原有基准场景在碳减排和热舒适性上分别实现 20.56% 和 7.05% 的性能增幅，较开敞场景实现了 60.76% 和 6.86% 的碳减排和热舒适提升优化效果。研究结果证实了利用人工智能技术辅助既有建筑改造决策的有效性和可靠性，所构建研究框架适用于其他类型的民居改造设计。研究为山南地区藏式民居的低碳改造提供了理论依据和实践指导，也为类似气候和建筑类型的区域提供了可借鉴的优化方式。

参考文献

[1] 徐宗威. 西藏传统建筑导则[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
[2] 易娜, 黄居正. 雪域建筑——西藏山南之旅[J]. 建

筑师, 2006, (4): 115-120.
[3] 筱洲. 西藏传统民居略述[J]. 西藏研究, 1997, (1): 117-125.
[4] 胡滨, 杜平. 观念与空间关联性的消解与重构——拉萨地区乡村藏式民居的变迁研究[J]. 城市建筑, 2021, 18 (7): 84-90.
[5] 李文东. 西藏山南地区传统民居结构及装饰特征研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
[6] 胡滨. 空间模式连接传统与当下的方法研究——以藏式乡村民居为例[J]. 建筑学报, 2023, (5): 74-81.
[7] 李珊珊, 何泉, 杨柳, 等. 藏东康区民居建筑气候适应性研究[J]. 建筑节能, 2014, 42 (2): 65-68, 94.
[8] 陈蔚, 萧依山. 西藏林芝地区传统民居建筑特征研究——以工布地区碉房为例[J]. 建筑学报, 2015, (51): 134-139.
[9] 李恩, 杨柳, 刘加平. 拉萨市附加阳光间式住宅建筑被动式优化设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48 (2): 258-264.
[10] 成辉, 肖榆川, 李欣, 等. 拉萨居住建筑空间模式与室内热环境的关系研究[J]. 工业建筑, 2020, 50 (7): 113-119.
[11] Yanfeng Liu, Zuoxiang Yu, Cong Song, et al. Heating load reduction characteristics of passive solar buildings in Tibet, China[J]. Building Simulation, 2022, 15 (6): 975-994.
[12] Li En, Zhu Jiangkun. Parametric analysis of the mechanism of creating indoor thermal environment in traditional houses in Lhasa[J]. Building and Environment, 2022, 207: 108510.
[13] Wen Baohua, Yang Qingxin, Xu Feng, 等. Phenomenon of courtyards being roofed and its significance for building energy efficiency[J]. Energy and Buildings, 2023, 295: 113282.
[14] Changsu Song, Lu Liu, Chaofan Xian, et al. Analysis of Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Herder Households: A County-Scale Investigation of the Sanjiangyuan Region on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Atmosphere, 2023, 14 (12): 1800.
[15] 李建凯, 王海英, 张峰鸣, 等. 冬季室内热环境控制对热舒适及能耗的影响研究[J]. 建筑科学, 2023, 39 (8): 40-50.
[16] 朱姝妍, 马辰龙, 向科, 等. 面向方案阶段能耗主导的建筑性能快速优化方法[J]. 建筑师, 2021, (6): 69-76.
[17] 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, (2): 76-82.
[18] Ascione Fabrizio, Bianco Nicola, De stasio Claudio 等. A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance[J]. Energy and Buildings, 2015, 88: 78-90.
[19] AT Nguyen, S Reiter, P Rigo. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis[J]. Applied Energy, 2014, 113: 1043-1058.

图表来源

作者自绘