

基于参数化的云南合院式民居气候适应性研究

——以通海柏式民居为例

姜茂, 赵晔璇, 吕雪东, 吴多鹏, 雷锦瑶
云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明 650000
DOI:10.61369/UAID.2024090009

摘要 : 本文以云南通海柏式民居为研究对象, 运用参数化设计方法探讨了合院式民居的气候适应性。通过实地调研和文献分析, 总结了柏式民居的典型特征和空间布局。利用 Rhino 与 Grasshopper 软件构建了参数化模型, 并结合 EnergyPlus 进行热环境模拟分析。研究从建筑朝向、院落尺度、屋顶形式、开窗比例等方面对民居进行参数化优化, 评估了不同设计参数对室内热舒适性的影响。结果表明, 合理的朝向和院落比例可有效改善夏季通风效果; 坡屋顶与适当的屋檐出挑长度能够减少太阳辐射得热; 南北向较大的开窗比有利于自然通风。基于模拟结果, 提出了适合当地气候特征的合院式民居优化设计策略。本研究为传统民居的气候适应性评估和改造提供了新的技术路径, 对于传统建筑遗产的保护与传承具有重要意义。

关键词 : 参数化设计; 合院式民居; 气候适应性; 热环境模拟; 通海柏式民居

Research on Climate Adaptability of Yunnan Courtyard style Residential Buildings Based on Parameterization – A Case Study of Tonghai Cypress style Residential Buildings

Jiang Mao, Zhao Yexuan, Lv Xuedong, Wu Duopeng, Lei Jinyao
School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650000

Abstract : This article takes the Tonghai cypress style residential buildings, Yunnan as the research object, and uses parametric design methods to explore the climate adaptability of courtyard style residential buildings. Through field research and literature analysis, the typical characteristics and spatial layout of cypress style residential buildings have been summarized. A parametric model was constructed using Rhino and Grasshopper software, and thermal environment simulation analysis was conducted using EnergyPlus. The study conducted parametric optimization of residential buildings from aspects such as building orientation, courtyard scale, roof form, and window ratio, and evaluated the impact of different design parameters on indoor thermal comfort. The results indicate that a reasonable orientation and courtyard ratio can effectively improve the ventilation effect in summer; Sloping roofs and appropriate overhanging lengths of eaves can reduce solar radiation heat gain; A larger north-south window is more conducive to natural ventilation. Based on simulation results, an optimized design strategy for courtyard style residential buildings suitable for local climate characteristics was proposed. This study provides a new technological path for the climate adaptation assessment and renovation of traditional residential buildings, which is of great significance for the protection and inheritance of traditional architectural heritage.

Keywords : parametric design; courtyard style residential buildings; climate adaptability; thermal environment simulation; Tonghai cypress style residential buildings

引言

中国传统民居承载着地域文化, 包含丰富的生态智慧和气候适应性设计方法, 云南因其独特的地理与气候条件, 发展出风格鲜明的合院式民居, 其中通海柏式民居尤为典型。随着可持续建筑理念的推广, 传统民居的气候适应策略再次引起学术界关注, 过去的研究多依赖定性描述和经验总结, 缺乏系统化的量化分析, 难以准确衡量其性能及作用机制。

参数化设计是一种新兴的建筑设计手段。本研究选取云南通海柏式民居作为对象,利用 Rhino 和 Grasshopper 等工具构建数字化模型,通过热环境模拟评估其气候适应表现,并分析不同建筑参数对室内热环境的影响规律。研究的目的是提炼传统民居中的气候适应设计策略,为现代气候响应型建筑和传统民居的保护更新提供科学支持。

一、研究方法与数据

(一)研究对象选取

对于云南合院式民居基本型的选取,有三个原因:第一,柏氏民居保存状况良好,完整保留了云南“一颗印”合院民居的核心特征,能清晰展现传统建造技术;第二,通海柏氏民居的空间尺度、围护结构(如夯土墙厚度、瓦屋面坡度)以及开窗比例等参数易于测量并进行数字化建模,借助 Grasshopper 等软件,能够模拟热环境、通风效率等指标;第三,通海县作为历史文化名城,其传统民居面临保护与现代化改造的矛盾。通过参数化分析明确其气候适应性优势,可为既有建筑改造提供科学依据,平衡遗产保护与居住舒适性需求。

(二)参数化模型构建

本研究利用 Rhinoceros 7.0 和 Grasshopper 平台,结合实地测量数据与历史文献资料,构建了通海柏式民居的参数化模型。

模型验证使用实测数据比对的方法,将生成的参数化模型与实际建筑样本进行比较,涉及几何尺寸、空间布局以及材料构造等方面。结果显示,参数化模型的主要几何尺寸与实测数据之间的平均误差不超过 5%,空间布局的吻合率达到 92%。这表明模型能够准确体现通海柏式民居的形态特点和构造方式,通过这一参数化模型,传统民居的几何形态得以数字化呈现,为后续气候适应性评估提供了可靠的依据。

(三)气候适应性评价指标体系

气候适应性主要包含四个方面,分别是热环境、湿度环境、风环境和光环境的适应能力,在本研究中主要围护结构热工性能、自然通风效果评估、日照与遮阳进行研究。

(四)数据采集与处理

研究团队在通海地区开展了数据采集工作。现场测量使用了多种专业设备,包括温湿度数据记录仪(HOBO U12-012)、热舒适测量仪(Testo 480)以及三杯式风速风向仪。这些设备按照 ISO 7726 标准布置测点,确保了室内热环境参数的精确记录,此外,红外热像仪(FLIR E75)被用来捕捉建筑表面在不同时间点的温度分布,以评估围护结构的热性能表现。

原始测量数据先经过异常值检测与剔除,接着进行数据插补和时间序列平滑处理,以保证数据质量。气象数据使用了中国典型气象年数据(CSWD)中通海地区的逐时气象信息。材料的物理参数通过实验室测试和文献数据获取,为围护结构热工性能评估提供了基础,所有数据经 Python 脚本处理后,按照 EnergyPlus 和 Ladybug 工具的数据格式要求完成整合,为后续的参数化模拟分析提供了完整且准确的数据支持^[1]。

二、通海柏式民居气候适应性分析

(一)建筑形态与布局特征

通海柏式民居采用“一颗印”的合院布局,体现为“一进四围多进深”的空间结构。天井的设计既满足了房间的采光和通风需求,又减少了大面积开放空间可能带来的强烈阳光照射和热辐射问题^[2]。

柏氏民居的平面尺寸 12.15 米 × 19.56 米,接近方形,天井面积占总面积的 15%~25%,大小为 6.30 米 × 6.50 米,堂屋的进深是 5.6 米,面宽为 7~10 米,东西厢房的进深为 3.9 米,面宽则是 6.3 米,门厅的进深为 5.2 米,房间开间尺寸以 3.9 米为主。

柏氏民居在垂直尺度上二层,室内净高通常在 3.0 到 3.8 米之间,台基高度设计为 0.6 至 1.2 米,既能防潮,又提升了视觉效果,屋檐出挑深度为 0.9 到 1.5 米,坡屋顶的坡度一般控制在 25° 到 35° 之间。

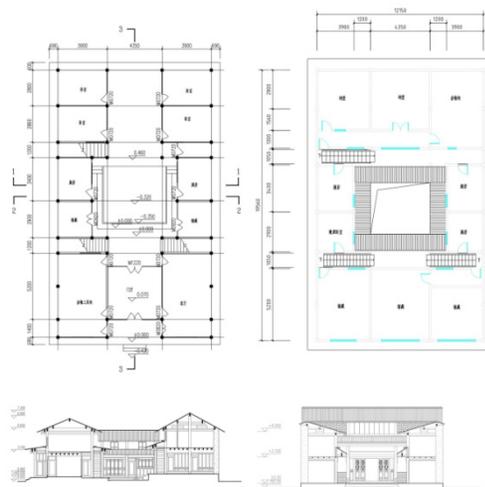


图 1 柏式民居数据图

(二)围护结构热工性能

通海柏式民居的围护结构使用了木石混合的构造体系,这种设计表现出优异的热工性能,经过现场检测与实验室分析,得到了主要构件的热工参数,这些数据表明,其围护结构在热稳定性方面表现突出,并且能够很好地适应当地气候条件^[3]。

柏式民居的外墙使用 370~420mm 厚的实心黏土砖,平均传热系数为 1.60W/m²·K,热阻约为 0.65m²·K/W,热惰性指数达到 3.8,这种结构具备良好的热缓冲性能。根据实测数据,夏季外墙室内外表面温差可达 6.8°C,显著减少了热量传递至室内,屋顶则采用小青瓦、草泥和木檩条组成的多层复合结构,有效降低了夏季太阳辐射带来的热负荷^[4]。

门窗主要使用木材制作,开窗比例被控制在合理区间,南北向

为20-25%,东西向为10-15%。通过采用可调节的遮阳设计,在保证采光和通风的前提下,避免了成为明显的热量流失点,地面构造结合了石板或砖铺装与夯土的方式,形成高热容蓄热体,实测数据显示,地面温度全天的变化幅度小于2.5°C,为室内提供了稳定的热环境。

(三)自然通风效果评估

结合CFD模拟与现场测量,对通海柏式民居的自然通风效果进行了评估,通过参数化模型,可以控制变量,研究不同院落布局、开窗比例以及通风路径的影响,进而分析其自然通风机制和实际效果。

表1通海柏式民居自然通风效果评估结果

评估参数	夏季(6-8月)	过渡季(4-5月、9-10月)	冬季(11-3月)	全年平均
平均室内风速(m/s)	0.32-0.75	0.25-0.58	0.08-0.22	0.22-0.52
通风换气次数(ACH)	4.8-7.2	3.5-5.3	1.2-2.5	3.2-5.0
温度降低效应(°C)	2.3-3.6	1.8-2.7	0.3-0.8	1.5-2.4
自然通风有效时间(h)	1825-2102	1452-1690	435-612	3712-4404
通风均匀性系数	0.65-0.78	0.58-0.72	0.42-0.55	0.55-0.68

通海柏式民居通过“院落-厅堂-天井”的布局形成了高效的通风系统,夏季,院落空间因热压效应与周围窗户的穿堂风相互配合,使室内换气率达到4.8-7.2次/小时,平均风速保持在0.32-0.75m/s,这一风速范围符合人体舒适度要求。研究表明,院落的宽深比为0.8-1.2、进深比为1.5-2.5时,能显著提升通风效果,经过参数调整发现,当院落宽高比为0.75,主要窗户朝南北向布置,且南向开窗率达到25%时,自然通风效果达到最佳状态。

评估结果表明,柏式民居的自然通风设计全年可有效利用3712至4404小时,占全年时间的42%-50%,显著降低了人工调节的必要性^[5]。

(四)日照与遮阳策略

通海柏式民居体现了精巧的日照和遮阳设计方法,通过参数化模拟分析,对其阳光获取与控制能力进行了量化评估,结果表明,这种民居对当地的光热环境有很好的适应性。

柏式民居运用了“冬取暖、夏避热”的日照设计思路,南向立面设置了2至2.5米深的屋檐,构建出一套季节性遮阳系统,数据显示,夏至日正午时,南向立面的遮阳率可达78.5%,阻挡了强烈的阳光,而冬至日正午时,这一区域的日照获取率却能达到85.3%,充分利用了冬季的太阳辐射热量,东西向窗户的开窗率被控制在10%-15%之间,并通过木格栅和可调节遮阳板等手段,减少了夏季早晚时段的不利光照影响^[6]。

天井空间的设计非常精巧,其尺寸和比例经过精确控制,宽深比大约在0.85到1.05之间,这样的设计让冬季阳光可以深入室内,而夏季阳光则主要集中在天井的上部区域,模拟分析显示,当天井宽度处于4.5到5.5米时,冬夏季阳光进入室内的深度差异最大,达到2.8到3.5米,这正好是通海柏式民居天井的典型尺寸范围。院

落中种植的落叶乔木提供了随季节变化的自然遮阳效果,夏季树荫覆盖率可达35%到45%,而冬季则下降到10%以下,与建筑本身的遮阳系统相辅相成。

柏式民居通过精心设计的日照与遮阳方法,能够随季节变化自动调整室内的光热条件,全年日照时数保持在1350到1580小时之间。

三、参数化优化设计探讨

(一)多目标优化模型构建

本研究找出影响通海柏式民居气候适应性的四因素:建筑朝向、院落尺度比例、屋顶形式构造、窗户比例位置,识别出关键影响因素后,构建了一个多目标优化模型。该模型包含三个核心目标:实现热舒适度的最大化、优化自然通风性能以及平衡日照的获取与控制。热舒适度的评估基于自适应热舒适模型。通风性能的优化则通过分析院落和室内空间的气流速度及分布均匀性来完成。在日照控制方面,模型注重冬季太阳得热与夏季遮阳需求之间的协调,并采用季节性日照调节效率指标进行评价。

优化模型的约束条件涵盖设计参数的合理范围、建筑传统形态的保持需求以及实际工程中的可行性因素,其数学表达形式如下:

$$MaxF(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]$$

x表示设计参数向量,涵盖朝向角度、院落比例、屋顶坡度、屋檐长度以及开窗比等要素, f_1 、 f_2 和 f_3 分别对应三个优化目标函数,研究选用了NSGA-II(非支配排序遗传算法II)作为核心优化方法。

(二)优化方案生成与评价

本研究通过多目标优化模型,提出了一系列通海柏式民居的优化设计方案,优化过程中进行了100代迭代,每代包含100个个体,最终得到一组帕累托最优解,从这些解中筛选出三类典型方案,分别是热舒适优先型、通风优先型和综合平衡型,热舒适优先型方案调整了建筑的关键参数,包括南偏东22°的朝向、院落宽深比1:1.3、屋顶坡度42°、屋檐出挑1.1米,以及南北向开窗比分别为0.3和0.28。在云南通海地区的典型气象年数据下,该方案模拟显示年舒适时间比例达到76.3%,相比基准模型提高了21.7%^[7]。

性能评估显示,优化方案在夏季通风和冬季保温方面效果显著,2022年的现场验证数据显示,在夏季典型日,综合平衡型方案让室内最高温度比室外低3.2°C,比基准模型多降0.9°C。冬季典型日中,室内平均温度比室外高2.8°C,比基准模型提升0.7°C,这说明参数化优化设计能有效增强传统民居对气候的适应能力^[8]。

四、结论

云南通海柏式民居是本研究的案例,通过参数化设计方法探讨了合院式民居对气候的适应性及优化策略。研究使用Rhino和Grasshopper构建参数化模拟平台,并结合EnergyPlus进行热环境分析,确定了影响民居气候适应性的四个重要因素:建筑朝向、

院落比例、屋顶形式以及开窗方式。结果表明,在当地气候条件下,南偏东15-30°的朝向、1:1.2到1:1.5的院落宽深比、约40°的屋顶坡度配合1米左右的屋檐出挑,以及南北向0.3左右的开窗比例是最优配置。基于这些发现,研究提出了一个多目标优化模型,并生成了三类典型优化方案。优化后的设计在年舒适时间比

例、通风效率和日照调节方面均优于基准模型,最优方案使室内年舒适时间比例提升了约21.7%。这项研究为通海柏式民居的保护与更新提供了科学依据。它还推动了传统建筑智慧与现代技术的结合。

参考文献

- [1] 杨真静. 白族传统合院民居立体缓冲空间对室内热环境影响研究 [J]. 建筑技艺, 2022.
- [2] 杨大禹. 云南民居 [M]. 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] 张娜娜, 付瑶, 肖轶. 云南传统民居被动式适应气候的原生态设计浅析 [C]. 第十五届中国民居学术会议论文集, 2007.
- [4] 刘晶晶. 云南“一颗印”民居的演变与发展探析 [D]. 昆明理工大学, 2008.
- [5] 陈伯齐. 南方城市住宅平面组合、层数与群组布局问题——从适应气候角度探讨 [J]. 建筑学报, 1963(8):6-11.
- [6] 张鑫. 传统合院式民居空间模式与地域气候的关联性研究 [D]. 东南大学, 2022.
- [7] 何美婷, 李麟学. 基于气候适应性的传统合院式乡土建筑热力学原型研究 [J]. 建筑与文化, 2023 (8).
- [8] 赵慧勇. 合院式民居在云南的发展演变探析 [D]. 昆明理工大学, 2005.