

# 徽州传统民居冬季室内热环境改善研究

龚城,余梦琦,李翌,程车智,黄志甲

(安徽工业大学建筑工程学院,安徽马鞍山243032)

**摘要:**对徽州传统民居的天井、围护结构提出了改造方案,并用TRNSYS软件对改造后民居的冬季室内热环境进行模拟分析,发现仅增加围护结构的保温性能,室内热环境并未得到明显改善;在此基础上提高天井的气密性,冬季室内平均气温比原来提高了3.0~4.0℃,且冬季舒适时间占比最高达到了33%,室内热环境改善效果明显。

**关键词:**徽州传统民居;冬季;热环境;围护结构;天井

**中图分类号:**TU 113.4 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2017.02.014

## Research on Indoor Thermal Environment Improvement of Huizhou Traditional Dwellings

GONG Cheng, ZHANG Yang, LI Zhao, CHENG Chezhi, HUANG Zhijia

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

**Abstract:** In order to improve the indoor thermal environment in Huizhou traditional dwellings, a patio and building envelope retrofit scheme is proposed, and the indoor thermal environment in winter is simulated by TRNSYS. It is found that the indoor thermal environment is slightly improved if only the insulating performance of building envelope is strengthened. However, indoor temperature can be increased by 3.0–4.0 °C compared to that of the original building. In addition, the probability of indoor temperature at comfortable zone is achieved over 33%, therefore, the improvement of indoor thermal environment is obviously based on the proposed building envelope retrofit scheme.

**Key words:** Huizhou traditional dwellings; winter; thermal environment; building envelope; patio

徽州传统民居作为地域性建筑的突出代表,其独特的建筑特色及深谙自然环境的被动设计,发展延续至今,无不体现出古人智慧与创造性;但随着人们生活水平迅速提高,对建筑的功能提出了更高的要求。近年来,在缓解我国不断加剧的能源紧张局势、保护我国传统建筑文化、提倡绿色舒适居住环境的背景下,对传统民居热环境的研究成为了众多学者的重要课题,其研究内容主要有三个方面:其一,传统民居室内热环境分析研究,主要对传统民居的夏季<sup>[1]</sup>、冬季<sup>[2]</sup>和过渡季<sup>[3]</sup>室内热环境进行测试,并对其特点和成因进行分析,从而为传统民居的发展和改善提供基础数据资料;其二,传统民居气候适应性研究,即发掘特殊地域气候下,隐藏于民居建筑中的被动设计<sup>[4]</sup>,并对民居气候适应性特征及室内外热环境形成原因进行分析<sup>[5-6]</sup>;其三,传统民居的改善与优化研究,主要借助软件分析传统民居天井<sup>[7]</sup>、围护结构<sup>[8]</sup>等对室内热环境的影响规律,从而为民居改造提供建议。目前,国内学者对传统民居室内热环境特点及形成规律的研究颇为丰富,而对热环境的改善措施研究较少。

收稿日期:2017-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51478001)

作者简介:龚城(1991—),男,安徽六安人,硕士生,研究方向为建筑节能。

通信作者:黄志甲(1963—),男,安徽安庆人,博士,教授,研究方向为建筑节能。

本文本着既有的建筑改造思想,考虑到实际改造的可行性,对一典型徽州传统民居的天井和围护结构提出可行性改造方案,并用 TRNSYS 软件对改造后的室内热环境进行模拟,对改善效果进行分析。

## 1 研究对象

选取安徽宣城市泾县查济村一传统古民居为研究对象(图1)。南北外墙均有  $1.14\text{ m} \times 2.06\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)的木外门,无其他窗洞,外墙均为空斗砖墙结构,外粉石灰;屋顶为双坡青瓦屋面,其中,厅堂屋顶、天井屋檐内饰有望板,其它区域屋顶则无望板;厅堂地面为砂石混凝土,厢房地面为  $30\text{ mm}$  厚杉木板,木板下为  $400\text{ mm}$  高架空地垄;厅堂、厢房与南外墙围合形成天井,天井开口尺寸为  $14.40\text{ m} \times 0.60\text{ m}$ 。

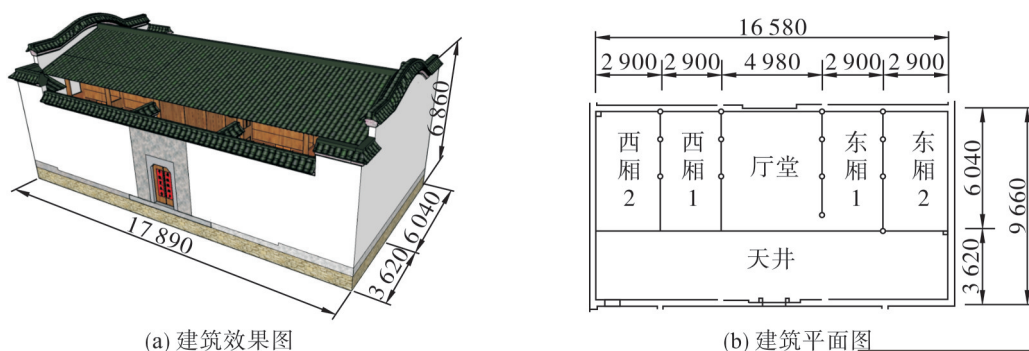


图1 建筑效果图及平面图(单位,mm)

Fig. 1 Architectural renderings and layout(nuit, mm)

## 2 系统模型的建立与校核

### 2.1 模型建立

TRNSYS 中建筑模型非可视化,其建模原理即在定义区域内添加各种围护结构(类型、面积、方向、相邻区域、门窗)、内热源(种类、大小、时间控制)、通风/渗透量(风量、送风温度、时间控制)。

由实测得出,厅堂和厢房门关闭工况下,厅堂、厢房、天井换气次数分别为  $10.1, 2.5, 25\text{ 次/h}^{[9]}$ 。室内无采暖设备,室内热源根据调查实际情况设定。

在 TRNSYS 平台,建筑模型作为系统模块之一,须配合其它模块才可组成完整系统,本系统采用的模块有气象模块、辐射计算模块、空气热物性计算模块,有效天空温度生成模块、结果输出模块以及建筑模块,原始建筑系统仿真模型见图2。

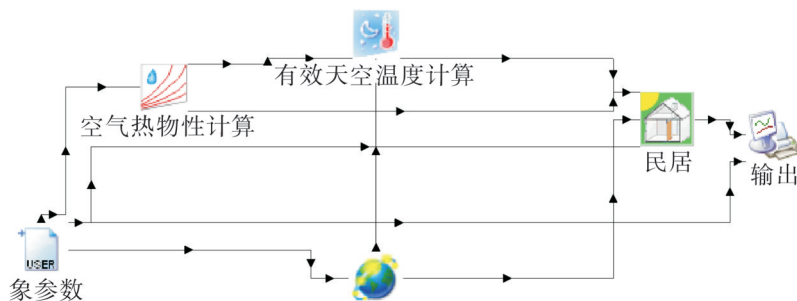


图2 系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of system

### 2.2 模型校核

为验证建立民居 TRNSYS 系统模型的准确性,对模拟厅堂、厢房气温与实测室温进行了比较,模型室外干球温度选择当地实测冬季室外气温(2015年12月1日0:00—2016年2月29日23:00,  $1\text{ h}$ 时间间隔),太阳辐射参数则选用屯溪地区典型气象年气象数据。图3,4所示分别为冬季厅堂、厢房模拟与实测的逐时气温。

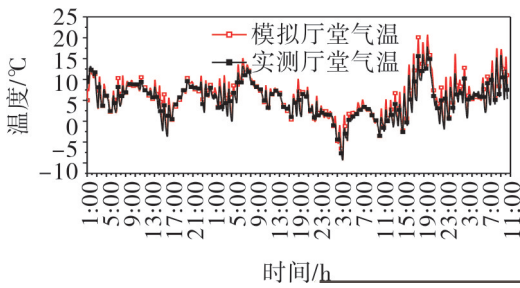


图3 冬季厅堂模拟与实测逐时气温比较

Fig. 3 Comparison of simulated and measured hall temperature in winter

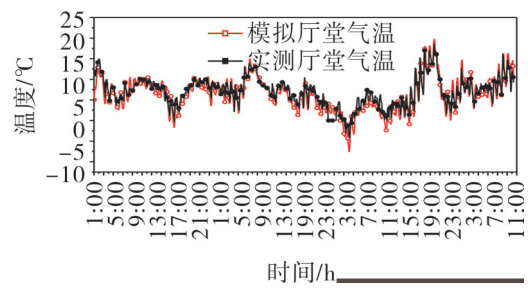


图4 冬季厢房模拟与实测逐时气温比较

Fig. 4 Comparison of simulated and measured living room temperature in winter

模拟发现厅堂、厢房模拟与实测平均温度差分别为 0.5, -0.6 °C, 均方根误差分别为 22.05%, 23.10%(表1)。根据美国采暖、制冷与空调工程师学会(ASHRAE)推荐均方根误差 CV(RMSE)最大不超过 25%, 而厅堂、厢房均方根误差均在 25%以内, 且模拟与实测的温度均差在±1.0 °C 以内, 所以原模型可以替代实际建筑, 后文模拟优化均是对原模型的参数改动, 并与原模型对比分析。

表1 室内模拟与实测气温误差比较

Tab. 1 Comparison of simulated and measured indoor temperature

位置	平均温度/°C		温度均差/°C	CV(RMSE)/%
	模拟	实测		
厅堂	5.7	5.2	0.5	22.05
厢房	6.4	7.0	-0.6	23.10

### 3 民居优化改造

#### 3.1 围护结构优化改造

##### 3.1.1 屋面改造方案

传统民居穿斗式屋架结构, 承重体为梁柱, 使得屋面较轻, 瓦屋面直接与室内接触, 且没有特别的保温措施, 调研发现, 新徽派民居多为混凝土浇筑重型屋面, 上覆彩瓦, 内饰望板, 其保温性能优于传统屋面。本文对屋顶的改造主要是将原结构的黏土层改为混凝土找平, 下设保温层, 对于既有建筑屋面翻修易于实现, 且在原结构的基础上, 减轻屋面重量。改造屋面结构见图5, 其传热系数为 0.54 W/(m<sup>2</sup>·K), 符合《安徽省居住建筑节能设计标准》(DB341466—2011)对屋面传热系数限值 0.6 W/(m<sup>2</sup>·K) 的要求。

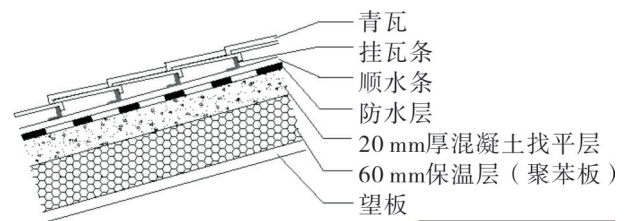


图5 改造屋面结构

Fig. 5 Structure of reconstructed roof

##### 3.1.2 外墙改造方案

徽州传统民居外墙采用黏土烧制的青砖砌筑, 且多砌成 280~500 mm 厚空斗砖墙, 内填碎砖、石等边角料, 总传热系数约为 1.37 W/(m<sup>2</sup>·K), 高于《安徽省居住建筑节能设计标准》(DB341466—2011)标准 1.0 W/(m<sup>2</sup>·K) 的限值。本着既有建筑节能改造思想, 对外墙改造, 在原空斗外墙的基础上加外保温结构(图6), 总传热系数为 0.58 W/(m<sup>2</sup>·K), 加外保温既有利于保障室内的热稳定性, 也提高了建筑结构的耐久性, 而且由于密实厚重的墙体结构层在室内一侧, 有利于阻止水蒸气进入墙体形成内部冷凝<sup>[10]</sup>。

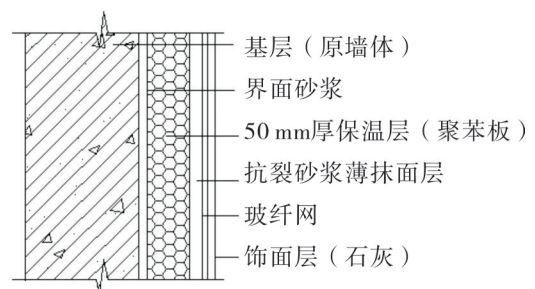


图6 改造外墙结构

Fig. 6 Structure of reconstructed external wall

### 3.1.3 模拟分析

改造屋顶和墙体结构后,模拟分析发现,除厢房平均气温提高了0.6℃外,厅堂、天井平均气温与原来相比,无明显提升(图7)。

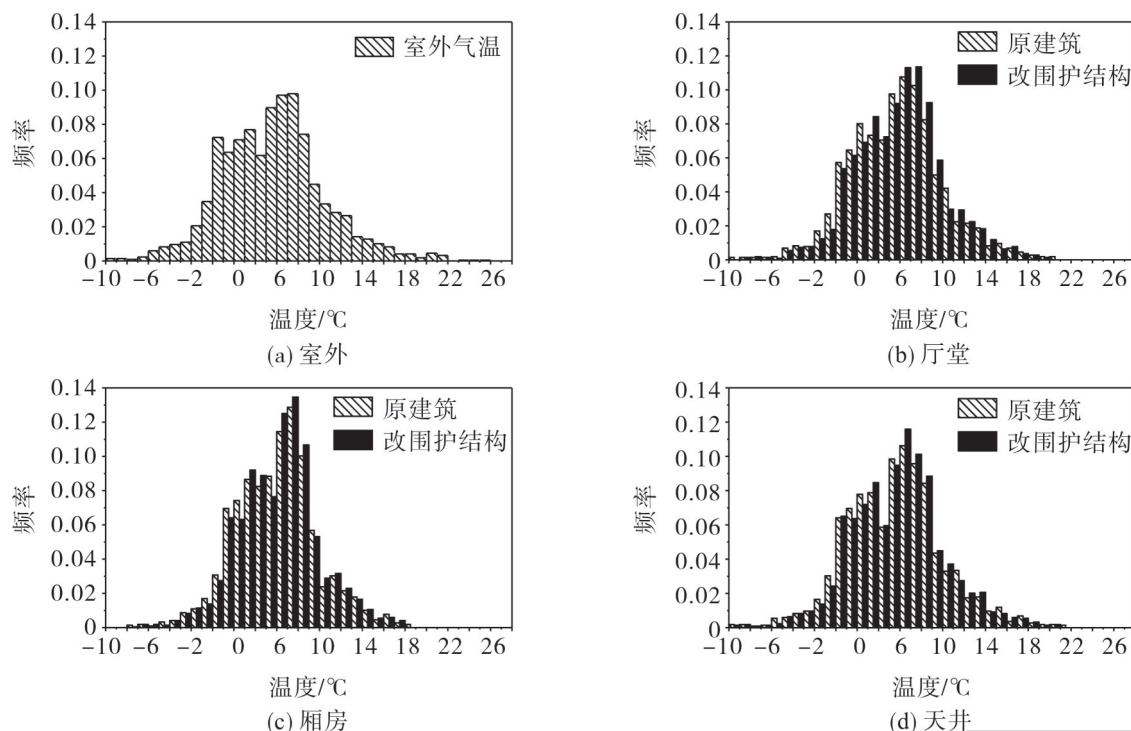


图7 改围护结构前后室内外气温分布对比

Fig. 7 Air temperature distribution before and after changing external wall

根据李俊鹤等<sup>[1]</sup>提出的夏热冬冷地区人的舒适中性温度和室外平均空气温度线性关系

$$T_n = 10.092 + 0.60T_m \quad (1)$$

式中: $T_n$ 为中性温度(中性温即人体热感觉最适中时的温度,理论上即预测平均投票PMV=0时的温度),℃; $T_m$ 为室外平均温度,℃。

结合实测冬季室外平均气温(5.6℃),计算出当地舒适中性温度为13.5℃。ASHRAE给出:80%人对室内热环境感到满意的室温约在( $T_n - 2.2$ ℃,  $T_n + 2.5$ ℃)范围内,即在11.3~16.0℃之间。改造屋顶和外墙后,厅堂、厢房、气温大于11.3℃(舒适温度)的时间占整个冬季时间比分别为9.98%,10.00%,10.02%,相比原建筑分别增加了0.48%,0.40%,0.30%,总体室内热环境改善并不明显。整个冬季期间,室内外热量流动并非单向,即通过围护结构,室内既有得热,也有失热,此时仅仅增加围护结构保温性能,虽维持了室温,但也阻碍了室外的热量向室内传递;造成虽强化了围护结构保温性能,但室内热环境仍得不到明显改善。

## 3.2 天井的优化改造

### 3.2.1 天井改造方案

经实地考察,徽州传统民居天井通风对冬季室内热环境影响明显,且考虑到既有建筑改造的可行性,本章将原民居天井改造为玻璃开合式天井,以提高建筑气密性。按照《屋面工程技术规范》(GB50345—2012)对玻璃采光顶玻璃要求,选择普通白玻铝框中空玻璃(参数见表2),其传热系数符合《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—1993)对钢铝框双层窗传热系数不应高于3.0 W/(m<sup>2</sup>·K)的要求。

表2 中空玻璃性能指标<sup>[12]</sup>

Tab. 2 Performance indicators of insulating glass<sup>[12]</sup>

中空玻璃	可见光透射比	太阳光总透射比	遮阳系数	传热系数/(W·m <sup>2</sup> ·K <sup>-1</sup> )
6 mm(透明)+12 mm(空气)+6 mm(透明)	0.71	0.75	0.86	2.8

在原民居上安装开合式天井,对于普通民居较易实现,且不影响建筑总体外观,天井上空玻璃面积为 $8.64\text{ m}^2$ ,其坡度与前屋面坡度相同( $20^\circ$ ),玻璃上端搭接于屋檐下,便于排走雨水,玻璃模块可开启,方便调节室内通风,其示意图见图8。

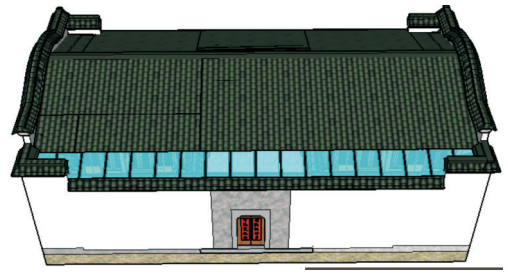


图8 开合式天井安装效果图

Fig. 8 Installation effect diagram of retractable patio

### 3.2.2 系统设置

#### 1) 系统原理

在TRNSYS系统下模拟开合式天井(图9),即在原系统下,添加天窗模块,该模块接收来自辐射计算

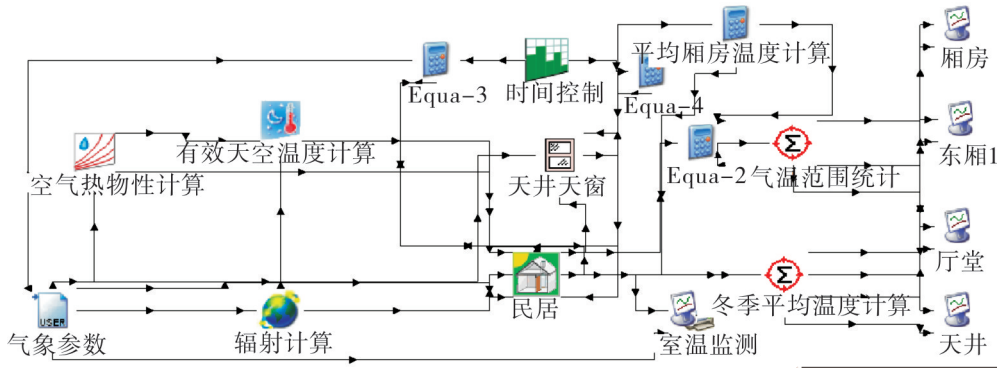


图9 改造天井系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of reconstructed patio system

模块的太阳辐射和来自气象模块的室外气温,并根据设置的玻璃面积、传热系数、太阳光总透过比,可等效模拟计算天井得失热,并将计算所得玻璃传热量和太阳辐射得热量传递给建筑模块。

#### 2) 通风设置

在加设开合式天井后,由于厢房、厅堂与天井相邻,存在气流交换,故对室内通风进行简化假设:即厢房、厅堂与天井相互通风,通风量分别为 $438.0, 2\ 293.3\text{ m}^3/\text{h}$ ;当天井天窗关闭时,天井与室外通风量为 $0\text{ m}^3/\text{h}$ ;当天井天窗开启时,由实测数据计算知,天井与室外通风量为 $6\ 531.8\text{ m}^3/\text{h}$ 。

#### 3) 控制设置

本文对该民居冬季室内外气温做过测试,并对冬季每日相同时刻气温做平均计算,得到室外、厅堂、厢房、天井日平均气温变化曲线(图10),发现自然通风下,白天10:00—18:00时间段内室外气温普遍高于室内,而在夜间则相反,所以为了充分利用白天室外高温,对天井的开启设置时间控制,在假设无雨雪天气下,为避免频繁开启带来的人为不便或机械耗电,统一冬季每天10:00—18:00开启天井天窗。

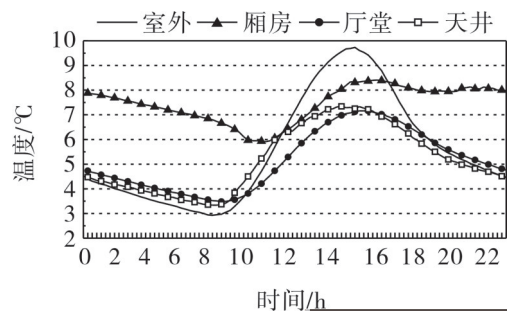


图10 冬季民居室内外日平均气温变化曲线

Fig. 10 Daily average temperature curves of indoor and outdoor dwellings in winter

### 3.2.3 模拟分析

图11为安装开合式天井前后民居室内外气温模拟结果。由图11可知:冬季室外平均气温为 $5.6\text{ }^\circ\text{C}$ ,原民居厅堂、厢房平均温度分别为 $5.7, 6.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,安装开合式天井后,厅堂、厢房平均气温相比原建筑分别增加了 $2.6, 2.0\text{ }^\circ\text{C}$ ;天井平均气温也由原来的 $5.6\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $8.5\text{ }^\circ\text{C}$ ;且原建筑厅堂、厢房、天井舒适时间占比分别为 $9.50\%, 9.60\%, 9.90\%$ ,而改造天井后舒适时间占比分别增加到了 $24.03\%, 23.80\%, 22.50\%$ ,热环境改善效果较明显。

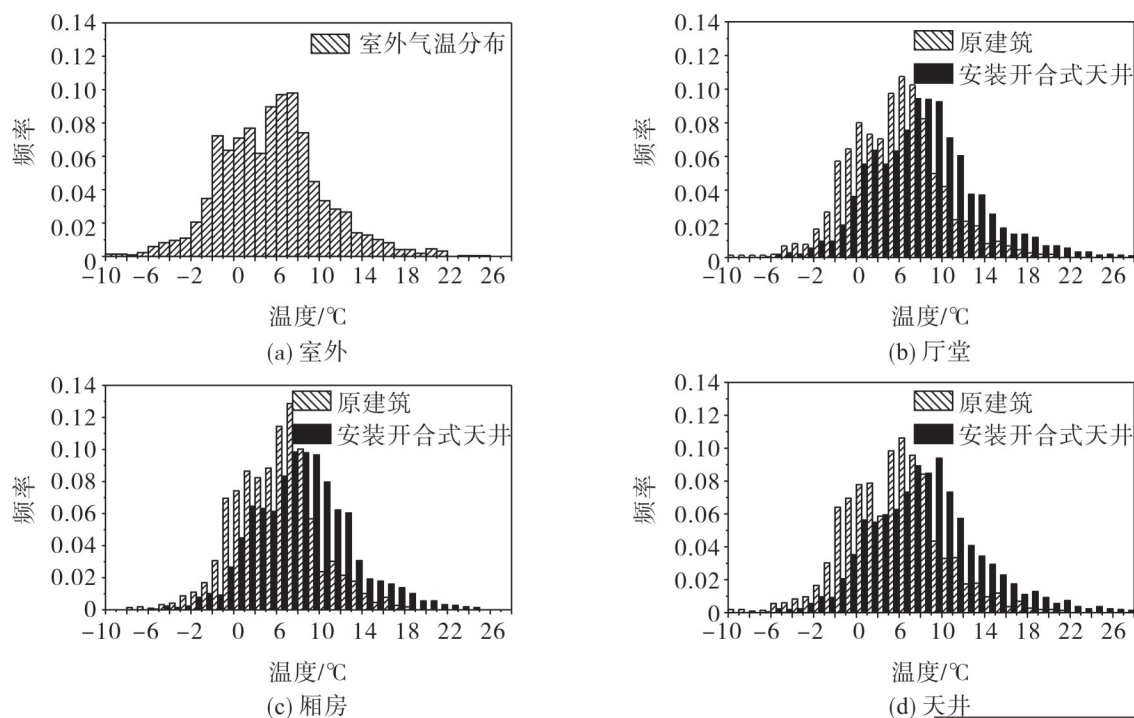


图 11 安装开合式天井前后室内外气温分布对比

Fig. 11 Contrast of indoor and outdoor temperature distribution before and after installing the retractable patio

### 3.3 天井和围护结构改造

在改造围护结构的基础上,安装开合式天井,模拟结果如图 12 所示,厅堂平均气温相比原建筑提高了 4.0 °C,舒适时间占比达到了 32.68%;天井平均气温由原来的 5.6 °C 提高到了 9.7 °C,舒适时间占比也由原来的 9.90% 提高到了 33.12%;改造后的厢房平均气温为 9.7 °C,相比原建筑提高了 3.3 °C,舒适时间占比为 32.01%,整个冬季 98.50% 的时间均在 0 °C 以上,室内热环境改善效果明显。

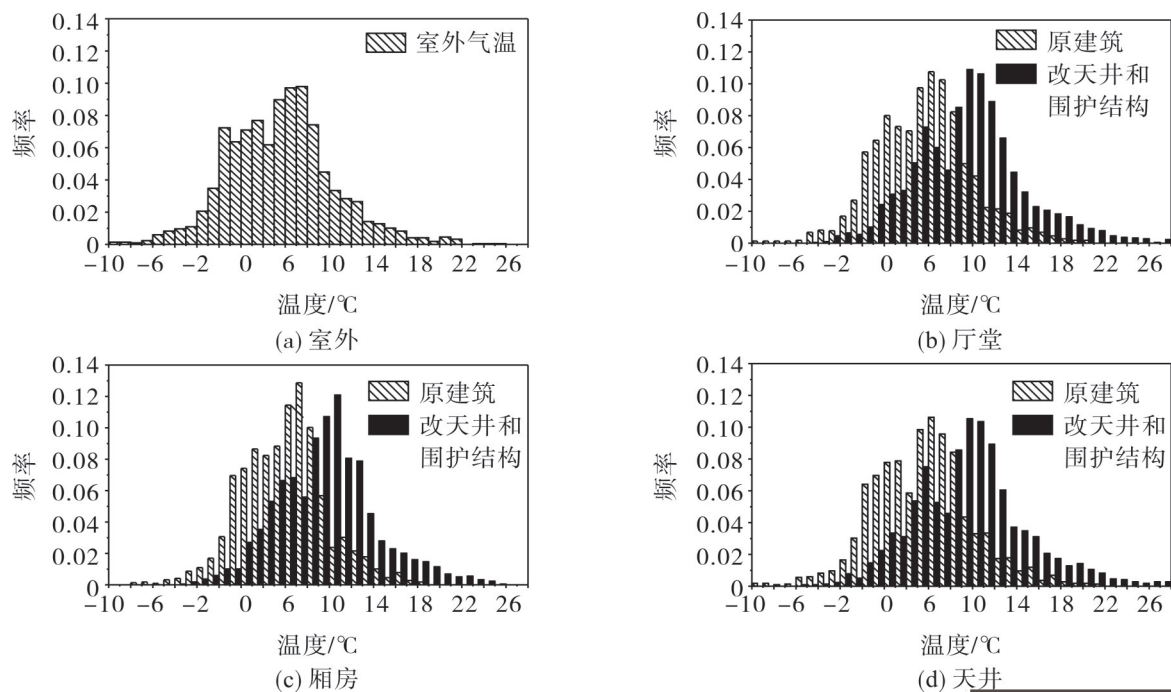


图 12 改造天井和围护结构前后室内外气温分布对比

Fig. 12 Contrast of indoor and outdoor temperature distribution before and after reconstructed patio and external envelope

同时对天井和围护结构进行改造,冬季室内舒适时间占比有了明显的提升,也就意味着,在不开空调情况下,冬季厅堂、天井、厢房分别有32.68%,33.12%,32.01%的时间,室内气温是舒适的,极端寒冷(气温低于0℃)的时间占比在1.5%以下,所以对徽州传统民居天井和围护结构改造有效且可行。

## 4 结 论

1) 增加民居围护结构的保温性能,冬季平均气温最高可提升0.6℃,舒适时间占比与原建筑基本相同,均在10%左右,室内热环境的改善效果不明显。

2) 民居上加装开合式天井,可在一定程度上改善冬季室内热环境,室内平均气温相比原来可提升2.0~3.0℃,且处于舒适温度的时间占整个冬季时间22%以上。

3) 在增加民居围护结构保温性能的基础上,加装开合式天井,冬季室内平均气温相比原建筑提高了3.0~4.0℃,室内舒适时间占比均在32%以上,室内热环境改善效果明显。

### 参考文献:

- [1] 宋冰,白鲁建,杨柳,等. 徽州传统民居夏季室内热环境研究[J]. 建筑节能, 2015(4):69-73.
- [2] 宋冰,杨柳,刘大龙,等. 西递徽州民居冬季室内热环境测试研究[J]. 建筑技术, 2014, 45(11):1033-1036.
- [3] 陈晓扬,仲德崑. 宏村徽州传统民居过渡季节室内环境分析[J]. 建筑学报, 2009(S2):68-70.
- [4] 李峥嵘,苟少清,赵群,等. 浙江中部古村落传统民居的气候适应性研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(8):1486-1492.
- [5] 焦胜,柳肃,周建飞,等. 基于气候适应性的湘南天井式民居研究[J]. 筑热能通风空调, 2006, 25(6):88-91.
- [6] LIN B R, TAN G, WANG P, et al. Study on the thermal performance of the Chinese traditional vernacular dwellings in summer[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(1):73-79.
- [7] 钱伟,黄志甲,赵玲玲,等. 皖南传统民居自然通风营造技术研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2013, 30(3):261-265.
- [8] 何路路,吴永发. 基于Ecotect软件对徽州民居气候双重适应性分析研究[J]. 建筑节能, 2013(12):72-76.
- [9] 黄志甲,董亚萌,程建. 徽州传统民居气密性实测研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2016, 32(8):115-118.
- [10] 王立雄,建筑节能[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社, 2009:74-75.
- [11] 李俊鸽,杨柳,刘加平. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[J]. 暖通空调, 2008, 38(7):20-24.
- [12] 中国建筑标准设计研究院,中国建筑科学研究院. 建筑围护结构节能工程做法及数据:09J908—3[S]. 北京:中国计划出版社, 2009:130-131.

责任编辑:丁吉海