

Design and Energy Conservation Analysis of Simple Passive Solar House in Western Sichuan Plateau

Huayu Tang¹, Shuang Rao², Yangzhao Guo¹, Qiong Yang¹

¹Sichuan Institute of Building Research, Chengdu Sichuan

²College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Email: 776070514@qq.com

Received: Oct. 5th, 2018; accepted: Oct. 23rd, 2018; published: Oct. 30th, 2018

Abstract

The principle, the type and the characteristic of passive solar house (PSH) were clarified. The basic theory for energy-saving analysis of PSH was also exposed. On these bases, according to the heating problem of a school building located at western Sichuan plateau, the atrium of the school building was ingeniously designed as an attached sunspace for constructing an attached sunspace-type PSH. Additionally, the corresponding thermal analysis models of the building were established, and both the heating gain and the energy saving effect of the designed PSH were studied. The main conclusions are as follows: PSH is of strong applicability. According to the engineering practice, constructing a building as PSH by proper ways and measures, utilizing solar thermal energy for heating, is a comprehensively considerable method for solving the heating problem of buildings located at western Sichuan plateau. The scheme of ingeniously designing atrium into attached sunspace and forming PSH is effective, simple, and strongly applicative for school buildings with an atrium of western Sichuan plateau. Properly designed atrium-type sunspace plays a good role in heating, can effectively enhance the room temperature in winter and greatly decrease the heating hourage and the auxiliary heat supply of building, and can lead to a significant energy-saving effect with the energy-saving ratio reaching above 75%. Applying removable type internal-sun-shading measure is an optional way for solving the overheating problem of building in partial period of summer due to setting atrium-type sunspace.

Keywords

The Plateau Area in Western Sichuan, Passive Solar House, Building Energy Conservation

川西高原某简易被动式太阳房的设计与节能分析

唐华宇¹, 饶爽², 郭阳照¹, 杨琼¹

¹四川省建筑科学研究院, 四川 成都

²成都理工大学, 环境与土木工程学院, 四川 成都

Email: 776070514@qq.com

收稿日期: 2018年10月5日; 录用日期: 2018年10月23日; 发布日期: 2018年10月30日

摘要

阐明被动式太阳房(PSH)的原理、类型及特点, 揭示PSH节能分析的基础理论, 在此基础上, 针对川西高原某学校综合楼的采暖问题, 巧妙将该建筑的中庭设计成附加阳光间, 形成附加阳光间式PSH, 并建立相应的热工分析模型, 对设计的PSH的采暖增益和节能效果进行深入探究。主要结论如下: PSH适用性强, 根据工程实际采用合适的方式和措施将建筑构建成PSH, 综合利用太阳光热能采暖, 是改善和解决川西高原建筑采暖问题时值得综合考虑的方法和途径; 巧妙利用中庭作为附加阳光间形成PSH的方案有效、易行, 对于川西高原的带中庭学校建筑尤为适用; 合理设计的中庭式阳光间具有良好的采暖增益效果, 在寒冷季节可有效提高室温, 大大降低建筑的采暖度小时数和辅助供热量, 起到显著的节能效果, 节能率可达75%以上; 采取活动式内遮阳措施是解决设置中庭式阳光间时建筑在夏季部分时段室温过高的问题的可选手段和措施。

关键词

川西高原, 被动式太阳房, 建筑节能

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

川西高原地区属寒冷地区, 地理条件特殊, 能源紧缺, 常规能源价格昂贵, 且大部分区域冬季大气压在 800 hPa 以下, 空气含氧量低, 对燃油燃气采暖锅炉的运行效率亦有一定影响。而另一方面, 川西高原地区日照率高, 大气透明度好, 日照辐射强度大, 连晴时间长, 属于太阳能采暖气候区中的次佳区 [1]。因此, 该地区具有丰富的太阳能资源; 合理利用太阳能对于缓解该地区的能源供需矛盾具有重要的现实意义。

被动式太阳房(Passive Solar House, PSH)是建筑利用太阳能采暖最为简单的一种方式。其结构简单、建造及运维成本低, 可有效节省能源开销。为推动 PSH 在川西高原的应用, 本文综合分析 PSH 的原理、类型及特点, 剖析 PSH 节能分析基础理论; 针对川西高原某典型的学校建筑, 巧妙将建筑的中庭设计成附加阳光间形成 PSH, 并基于 DEST 软件建模分析, 探究设计的 PSH 的节能效果。研究及成果有助于促进 PSH 技术的发展, 为 PSH 的工程应用提供有益的参考。

2. 被动式太阳房简述

被动式太阳房(PSH)是一个以墙、屋盖、地板等构件形成的可吸收、蓄存、控制与分配太阳能的系统, 其依靠对流、传导、辐射等传热机制吸收、蓄存和释放太阳热能, 目前主要应用于解决房屋在冬季的采暖问题。PSH 利用太阳热能的型式主要有以下几种典型的型式: 直接受益式、集热蓄热墙式、屋顶集热

蓄热式、附加阳光间式、利用热虹吸作用的对流环路式及组合式等，如图 1 所示。

与普通节能建筑不同，PSH 主要不是依赖提高外墙、屋面、地板、门窗等房屋维护结构的保温性能达到节能的目的，而是强调对太阳能的光热利用，通过建筑物朝向和周围环境的合理布置、内部空间和外部形体的巧妙处理，以及建筑材料、节能构造的恰当选择，以自然热交换方式，在冬季集取、保持、储存、分布太阳热能，利用太阳热能替代部分常规能源，使房屋在冬季有尽量多的太阳热量、尽量少的热损失及必要的热稳定性，室内环境温度满足一定使用要求，达到通过尽量少的热工投资实现显著节能效益的良好效果[2]。

与主动式太阳房不同，PSH 无需外部的机械动力驱动，不是通过附加集热设备和热交换设备等专用设备为房屋汲取和输送太阳热能，不存在着设备复杂、先期投资高等问题，而是根据当地的气象条件和生活习惯等，通过合理的建筑构造和利用建材的热工性能，在基本上不添置附加设备的条件下，达到一定的供暖效果。PSH 作为节能建筑的一种特殊形式，符合我国现阶段的国情，在我国具有较好的推广价值。

3. 被动式太阳房节能分析的基础理论

自然室温是指建筑物未设置采暖空调系统，在室外气象条件和室内各种发热量的联合作用下所导致的室内空气温度。它能够全面反映建筑物本身的性能和室外气象参数、室内发热量等各种被动性热扰动对建筑物的影响，是分析和评价 PSH 节能效益的重要基础和参数。

对 PSH 进行节能效益分析可首先根据其逐时自然室温 t_z ，计算得出建筑所需的逐时采暖热负荷 Q_R ，其为由日照形成的自然得热 Q_Z 和弥补自然室温与基准室温差值的辅助供热量 Q_F 之和，见下式(1)；然后，根据等比关系式(2)，推导得出建筑在任一时段所需的辅助供热量 Q_F 的计算公式，见式(3)，并据此算出 Q_F ；最后，将各时段所需的辅助供热量累加得出全年为维持室内基准温度所需要耗费的辅助热量 Q_{hF} ；通过对比 PSH 和普通房屋全年的辅助供热量，即可明确 PSH 的节能效益[3] [4]。

$$\begin{aligned}
 Q_R &= Q_F + Q_Z \\
 &= \alpha FK(t_i - t_w) + 0.28C_p \rho L(t_i - t_w) \\
 &= (\alpha FK + 0.28C_p \rho L)(t_i - t_z) + (\alpha FK + 0.28C_p \rho L)(t_z - t_w) \\
 &= Q_F + Q_Z
 \end{aligned} \tag{1}$$

式(1)中， Q_R 为建筑的逐时采暖热负荷； t_i 、 t_z 、 t_w 分别为室内基准温度、逐时自然室温和逐时室外温度； α 为修正系数； F 、 K 分别为围护结构的面积和传热系数； ρ 、 C_p 分别为空气的密度和定压比热容； L 为渗透空气量； Q_Z 、 Q_F 分别为逐时自然得热量和逐时辅助供热量。

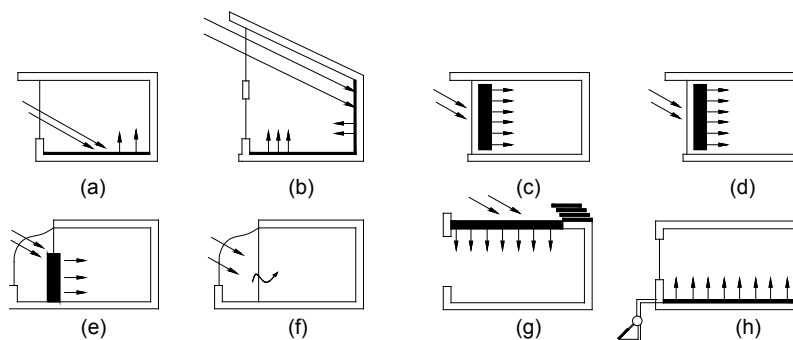


Figure 1. Schematic diagram of typical passive solar house
图 1. 典型被动式太阳房示意图

$$\frac{Q_F}{Q_F + Q_Z} = \frac{t_i - t_z}{t_i - t_w} \quad (2)$$

$$Q_F = Q_R \cdot \frac{t_i - t_z}{t_i - t_w} \quad (3)$$

$$Q_{RF} = \sum_{n=1}^{n=h} Q_R \cdot \frac{t_i - t_z}{t_i - t_w} \quad (4)$$

式(2)和式(3)中, Q_{hF} 为全年为维持室内基准温度所需要耗费的辅助热量; h 为全年 $t_z < t_i$ 的时段数。

4. 大型被动太阳房工程实践与效果分析

4.1. 工程概况

某学校综合楼地处甘孜州, 海拔高度约 3900 米, 建筑总高 15.85 m, 地上 3 层; 建筑总面积 6580 m², 设有中庭, 中庭面积约 1550 m²; 建筑所在地的气候条件较为严峻, 建筑室外气温在 18℃ 以下的时长总数约占全年总时长的 98.1%, 其中, 低于 0.0℃ 的时长占比约为 31.4%, 0.0℃ 至 18℃ 之间的时长占比约为 66.7%, 如图 2 所示。

为改善和解决该综合楼的采暖问题, 在综合考虑建筑自身特点及经济性因素的基础上, 采取在中庭顶部设置采光天窗的简易方案, 巧妙地将该建筑的中庭设计为附加阳光间, 起到利用太阳光热能采暖的作用: 白天日照阶段, 太阳光以短波辐射形式透过天窗照射在中庭四周墙体和地板等构件, 构件吸收的太阳热能一部分通过导热传至周边房间, 一部分以长波辐射形式加热中庭内空气, 并通过空气对流将热量传至周边房间, 还有一部分被蓄积在墙(地)中, 夜间室温降低时释放出来, 从而使得整栋建筑成为一个附加阳光间式的被动式太阳房(PSH), 见图 3 [5]。

4.2. 分析模型的建立

为研究上述综合楼在设置附加阳光间后所获得的采暖增益和节能效果, 根据该建筑的设计方案, 采用 DEST 软件分别建立相应的热工分析模型, 并对其热环境进行全年逐时的动态模拟, 如图 4 和图 5 所示。分析模型包括太阳房模型和对比房模型两种, 两者的区别在于前者的中庭顶部设置了玻璃采光天窗形成了附加阳光间, 而后者则采用普通的保温屋面; 建模时, 主要围护结构的热工参数见表 1。

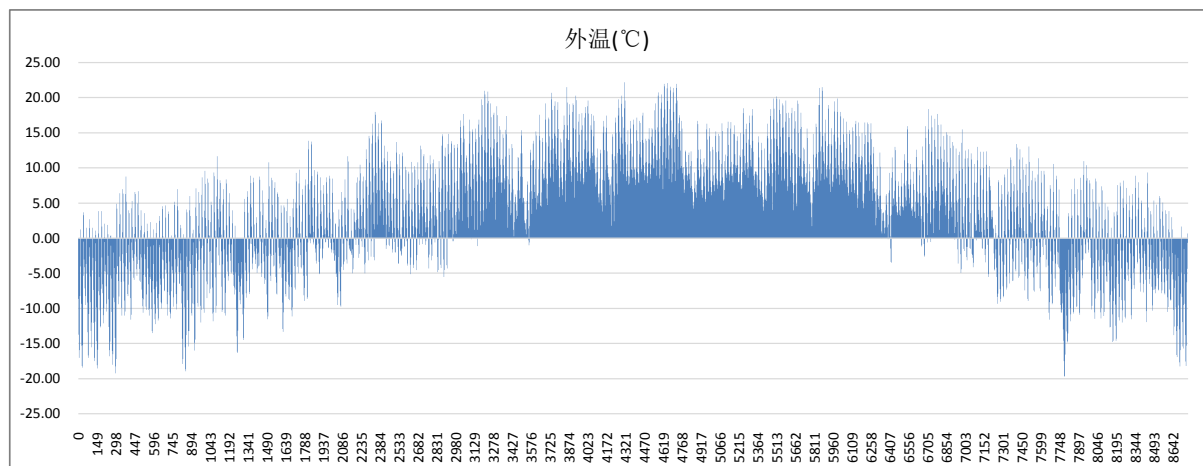


Figure 2. Annual variation curves of the outdoor temperature

图 2. 全年室外分时温度变化曲线



Figure 3. Field photo of the atrium attached sunspace
图 3. 中庭附加阳光间现场照片

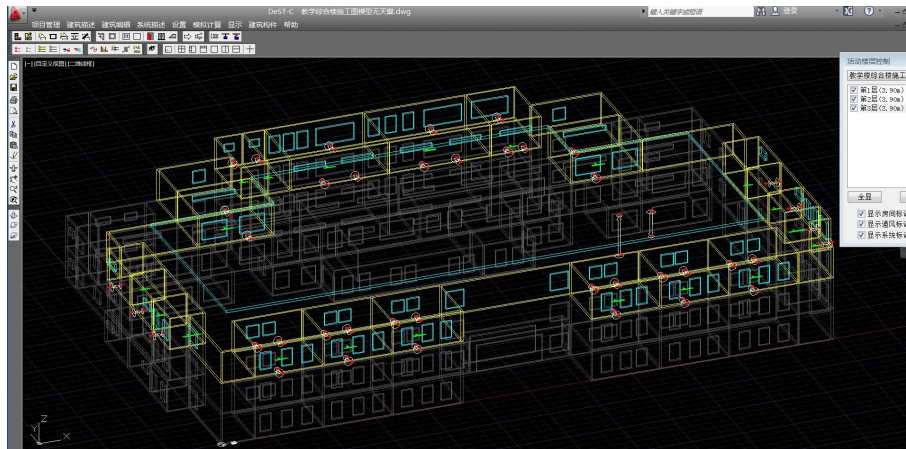


Figure 4. Schematic diagram of the thermal analysis model
图 4. 热工分析模型示意图

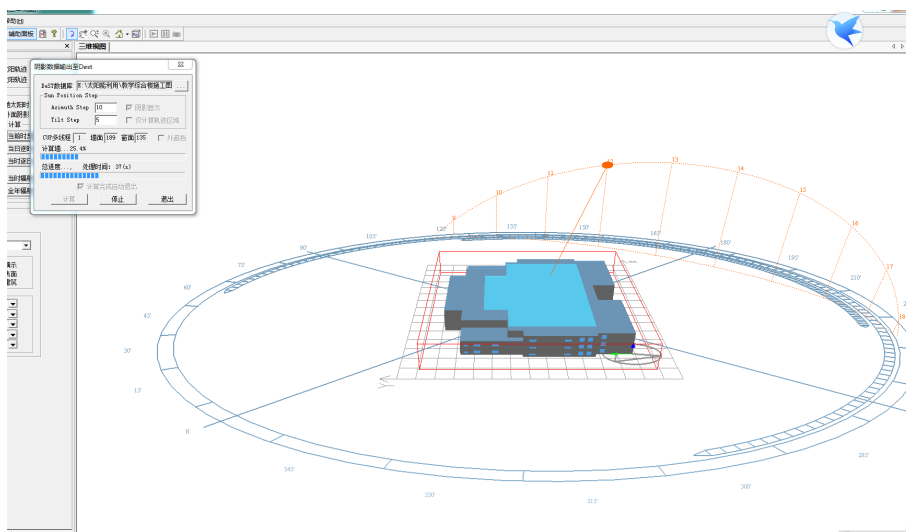


Figure 5. Schematic diagram of annual sunshine simulation analysis based on DEST software
图 5. 基于 DEST 软件的全年日照模拟分析示意

Table 1. Thermal parameters of the main enclosure components
表 1. 主要围护构件的热工参数

	太阳房	对比房
外墙	加气混凝土砌块, 平均传热系数 1.05 W/(m ² ·K)	
外窗	普通中空玻璃(中空 12 mm), 传热系数 2.4 W/(m ² ·K), 遮阳系数 0.86, 可见光透射率 0.71	
房间与外界换气次数	1 次/h	
房间互通风	1 次/h	
屋面	中庭顶部为 6 mm 单层玻璃, 传热系数 6.5 W/(m ² ·K), 遮阳系数 0.93, 太阳能透射率 70%; 其余屋面为保温屋面, 传热系数 0.44 W/(m ² ·K)	中庭顶部敞开, 房间顶部为保温屋面, 传热系数 0.44 W/(m ² ·K)

4.3. 自然室温计算

通过对上述建筑进行全年太阳辐射的模拟计算, 得出建筑围护结构表面的年太阳辐射量, 继而算出建筑各房间的自然室温, 据此得出太阳房主要朝向房间全年的日均室温变化曲线, 如图 6 所示; 同时将太阳房和对比房的逐时自然室温进行对比, 统计出全年太阳房的升温情况如表 2。由图 6 和表 2 可知:

1) 由于位置和朝向不同造成房间日照量及散热情况的差异, 太阳房中不同位置和朝向的房间的逐时室温亦有所不同。其中, 北向房间由于接受的日照量少, 室温普遍较低; 南向房间接受日照量大, 中部房间无外墙外窗散射, 室温相对较高。

2) 利用中庭设置阳光间后, 建筑内各房间的自然室温均有明显的升幅, 其中, 升温幅度最大的是南向房间, 其次为中部房间, 升温幅度最低的是北向房间; 全年内, 最低日平均升温为 3.0℃, 最高日平均升温为 13.1℃。

4.4. 度小时数分析

采暖度小时数是当房间逐时温度低于供热基准温度(18℃)时, 将其与基准温度的差值乘以时长, 再将全年所有时段的乘积累加得出; 制冷度小时数, 是当房间逐时温度高于供冷基准温度(28℃)时, 将其与基准温度的差值乘以时长, 再将全年所有时段的乘积累加得出, 见式(5)。通过对不同建筑或不同房间的采暖度小时数和制冷度小时数进行比较, 即可明确其辅助供热量和辅助制冷量的高低及比例关系。

$$D_h = \sum_{n=1}^{n=h} |t_i - t_z| \quad (5)$$

基于 DEST 软件对太阳房和对比房的度小时数进行统计和对比分析。太阳房中庭的度小时数统计结果见图 7。由图 7 可知: 中庭不同楼层的采暖度小时数有所区别, 随着楼层的升高, 采暖度小时数呈下降趋势, 且降速逐步减缓: 从一层到二层, 采暖度小时数降低 3%, 从二层到三层, 度小时数降低 1.8%, 这主要由于中庭三层靠近天窗, 围护结构的散热损失大于其它两层; 另外, 由于夏季七、八月份的统计结果, 太阳房中庭出现制冷度小时数, 表明在此时段太阳房中庭会出现温度偏高的情况, 需采取控温措施。

为明晰中庭附加阳光间对不同朝向、不同楼层房间的采暖效应, 抽取具有代表性的部分房间的采暖及制冷度小时数计算结果列于表 3。由表 3 可知:

1) 平面位置相同但楼层不同的房间, 其采暖度小时数有所不同, 而且随层高变化具有明显的规律性, 但变化规律对于太阳房和对比房两种不同情况是完全不同的: 对比房因屋顶散热的缘故, 采暖度小时数随层高的升高逐层递增; 太阳房因中庭阳光间产生的烟囱效应, 采暖度小时数随着楼层增加逐层递减。

2) 利用建筑中庭作为阳光间形成太阳房的方案起到了良好的采暖增益效果。就北向房间而言, 太阳房北向房间的采暖度小时数较对比房相应位置房间降低 54%~59%; 对于南向房间, 太阳房南向房间的采暖度小时数较对比房降低 52%~62%。

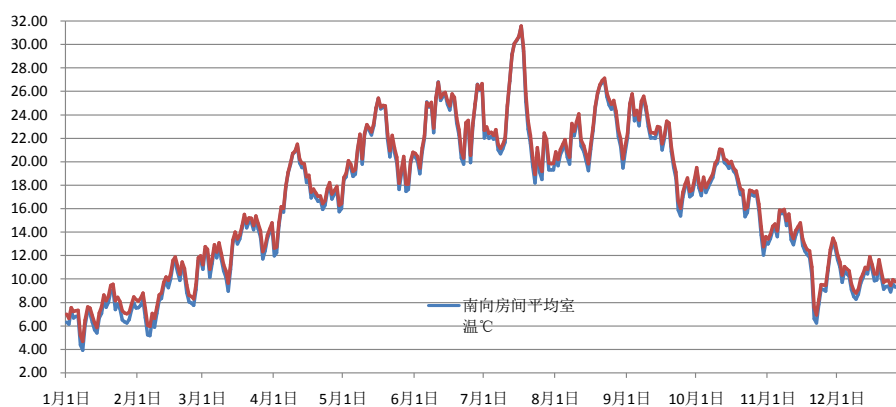


Figure 6. Variation curves of the solar house's room temperature

图 6. 太阳房全年逐时室温变化曲线

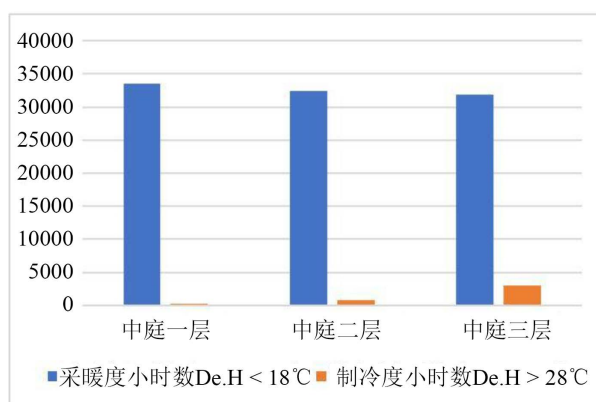


Figure 7. Heating degree hours and cooling degree hours of atrium

图 7. 中庭采暖及制冷度小时数

Table 2. Statistics of the natural room temperature value appreciation of solar house

表 2. 太阳房自然室温升温统计

	南向房间	中部房间	北向房间	西向房间	东向房间
最低日平均升温(°C)	3.0	3.0	3.3	4.9	5.6
最高日平均升温(°C)	13.1	8.2	8.0	10.6	11.6
1月平均每小时升温(°C)	7.3	6.5	5.0	5.3	6.0
2月平均每小时升温(°C)	8.4	6.2	4.9	5.5	6.1
3月平均每小时升温(°C)	5.9	5.6	4.8	5.8	6.6
4月平均每小时升温(°C)	6.7	5.4	5.0	6.3	7.1
5月平均每小时升温(°C)	6.8	4.9	4.8	6.4	7.2
6月平均每小时升温(°C)	7.1	4.7	4.8	6.5	7.3
7月平均每小时升温(°C)	8.8	5.1	4.9	6.2	6.8
8月平均每小时升温(°C)	9.8	5.2	5.1	6.3	6.7
9月平均每小时升温(°C)	7.5	4.6	4.7	6.0	6.7
10月平均每小时升温(°C)	6.1	4.4	4.5	5.8	6.7
11月平均每小时升温(°C)	5.6	5.1	4.7	5.6	6.5
12月平均每小时升温(°C)	5.3	5.5	4.6	5.3	6.1
全年平均每小时升温(°C)	7.1	5.3	4.8	5.9	6.7

Table 3. Comparison on the heating and cooling degree hours between PSH and the comparative building
表 3. 太阳房与对比房的采暖度小时数及制冷度小时数比较

北向房间度小时数比较			南向房间度小时数比较		
房间名称	De.H < 18℃	De.H > 28℃	房间名称	De.H < 18℃	De.H > 28℃
太阳房-一层科学教室 2	37146.7	101.1	太阳房-一层教室 3	35497.8	143.3
太阳房-二层美术教室	33197.8	480.2	太阳房-二层教室 5	33764.5	539.2
太阳房-三层教师办公室	31220.6	2092.5	太阳房-三层教室 3	30803.3	2482.6
对比房-一层科学教室 2	80896.2	0.0	对比房-一层教室 3	73869.8	0.0
对比房-二层美术教室	76210.1	0.0	对比房-二层教室 5	77662.7	0.0
对比房-三层教师办公	78024.6	0.0	对比房-三层教室 3	81415.0	0.0

注：为减少干扰，抽取的同一朝向、不同楼层的样板房间，其水平位置一致。

4.5. 辅助供热量比较

以学年为单位，综合考虑建筑的使用情况确定辅助供热量计算的时段和时长。本案例为学校综合楼，每年 1 月初至 2 月下旬及 7 月中旬至 8 月下旬分别为寒、暑假期，在计算辅助供热量时，将以上期间扣除；

另外，在非寒、暑假期间，该楼每天的使用时段为早上 7 时至下午 6 时，因此，每天的逐时辅助供热量仅提取该时段进行计算。基于上述原则，该楼在一个学年内的辅助供热量统计时段总长为 3576 小时。

太阳房和对比房在一个学年内的辅助供热量对比见图 8。由图 8 可知，设计的中庭阳光间式太阳房具有显著的节能效益：太阳房在一个学年内的辅助供热量仅为 386.3 GJ，而对比房的辅助供热量高达 1551.6 GJ，两者相比，太阳房每年可节约辅助供热量 1165.4 KJ，节能率达 75.1%；按电采暖辅助供热方式、电采暖热效率 100%、每 kWh 电耗费 0.4 kg 标准煤计算，每年可减少使用 129 吨标准煤，减排 CO₂ 达 323 吨[6] [7]。

4.6. 夏季控温措施效果分析

针对前文分析结果所反映的太阳房在夏季部分时段中庭出现温度偏高的问题，采取在中庭顶部桁架设置活动式浅色窗帘的措施降低该时段的日照得热量以起到降温的作用；基于 DEST 软件对设置窗帘后太阳房的制冷度小时数进行分析，分析结果见图 9。由图 9 可以看出，采取上述措施后，太阳房的制冷度小时数大幅降低，降幅达 50%~62%，表明了上述措施的有效性和显著效果[8]。

5. 结论

本文在阐明被动式太阳房(PSH)之原理、类型、特点，揭示 PSH 节能分析基础理论的基础上，针对川西高原某学校综合楼的采暖问题，巧妙的将该建筑的中庭设计成附加阳光间，并基于 DEST 软件建立相应的热工分析模型，对设计的 PSH 的采暖增益和节能效果进行分析，得出如下主要结论：

- 1) PSH 型式多样、适用性强。根据工程实际采用合适的方式和措施将建筑构建成 PSH，综合利用太阳光热能采暖，是改善和解决川西高原许多建筑的采暖问题时值得综合考虑的方法和途径。
- 2) 巧妙利用中庭作为附加阳光间形成 PSH 的方案合理有效且简单易行、优势突出，对于川西高原的带中庭学校建筑尤为适用。
- 3) 合理设计的中庭式阳光间具有良好的采暖增益效果，在寒冷季节可有效提高室温，大大降低建筑的采暖度小时数和辅助供热量，起到显著的节能效果，节能率可达 75%以上。

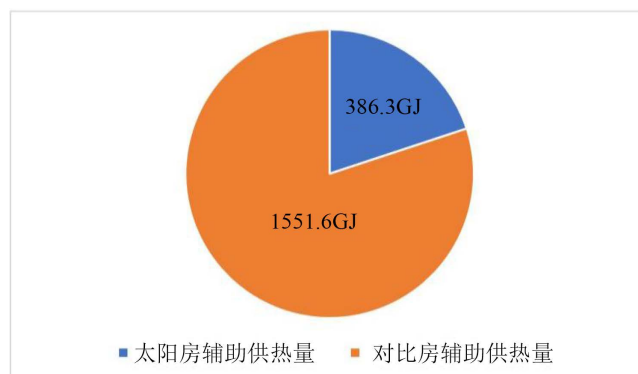


Figure 8. Decrease of solar house's auxiliary heating load
图 8. 太阳房的辅助供热量降幅

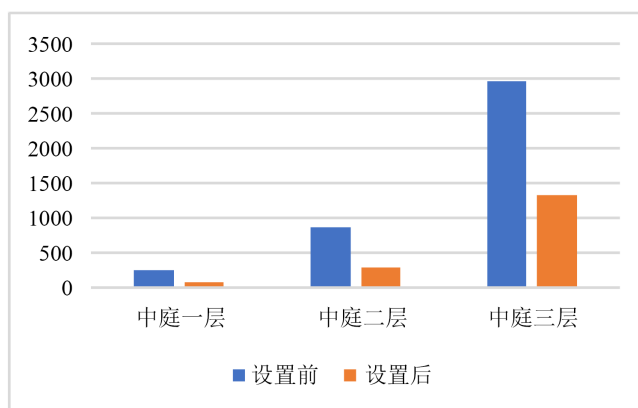


Figure 9. Cooling degree hours after setting inner shade curtain
图 9. 设置内遮阳窗帘后的制冷度小时数对比

4) 在川西高原的带中庭建筑中采用中庭式阳光间冬季采暖需综合考虑建筑在夏季部分时段室温过高的问题。设置浅色窗帘等活动式内遮阳措施是解决该问题的可选手段和措施。

基金项目

住房与城乡建设部科技项目(2016-K6-006); 四川省科技支撑计划项目(2017FZ0080)。

参考文献

- [1] Yezioro, A. (2009) A Knowledge Based CAAD System for Passive Solar Architecture. *Renewable Energy*, **34**, 769-779. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.008>
- [2] Ralegaonkar, R.V. and Gupta, R. (2010) Review of Intelligent Building Construction: A Passive Solar Architecture Approach. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2238-2242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.016>
- [3] 李元哲. 被动式太阳房热工设计手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [4] 李元哲, 狄洪发, 方贤德. 被动式太阳的原理及其设计[M]. 北京: 能源出版社, 1989.
- [5] 王磊. 西藏地区被动式太阳能建筑采暖研究[D]. [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [6] 宋金昭, 杨建平, 杭伟, 等. 被动式太阳能建筑节能经济优化研究[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(8): 1425-1429.
- [7] 杨柳, 杨晶晶, 宋冰, 等. 被动式超低能耗建筑设计基础与应用[J]. *科学通报*, 2015(18): 1698-1710.
- [8] 庾汉成, 党建国. 高寒地区被动式太阳能采暖技术应用的调查与分析[J]. *工业建筑*, 2010, 40(12): 22-24.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org