

# 间歇采暖太阳能建筑设计及运行优化研究

王登甲<sup>1,2</sup>, 刘艳峰<sup>1,2</sup>, 刘加平<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**对太阳能建筑室温及负荷特征分析发现:采暖期室内热环境状况难以完全满足热舒适要求,需与主动式采暖系统配合使用;而且太阳能建筑采暖期部分昼间时间室温高于采暖设定温度。因此,与之配合的主动系统存在间歇模式运行来满足室内温度要求的条件。分析提出了间歇采暖地板结构设计和运行参数的选用原则;对间歇采暖与被动太阳能技术耦合调节的室温变化特征分析结果表明:耦合调节室温平均值可维持在18℃左右,且波动幅度在2~3℃;在减小供暖时间的同时也避免了由于连续采暖造成的室内过热现象,对节约采暖能源及保证室内热舒适条件均起到积极作用。

**关键词:**热环境;热负荷;间歇采暖

**中图分类号:**TU111.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2012)05-0720-06

太阳能建筑简便易行、无运行能耗,但受气候条件、建筑形态等限制,在夜间等时间段尚难以达到房间热环境需要。为保证全天热舒适要求,这些时段需要间歇性启动采暖系统作为补充。在采暖系统运行期,主动系统理论上也只承担被动技术的热负荷缺口,运行负荷也低于传统采暖系统。可见该组合调节方式具有明显的节能潜力。

研究间歇采暖技术与被动太阳能得热对室内热环境耦合调节之前,需首先掌握被动太阳房室温及负荷特征,掌握间歇采暖地板表面散热量变化特性,进而研究相互匹配的间歇采暖运行模式,最后,对耦合调节作用下室温变化特性进行分析。

诸多学者对被动太阳房室温及负荷特征进行过理论、实验及模拟研究<sup>[1-5]</sup>,但是,地板辐射间歇采暖模式下地板动态蓄放热量特征研究较少<sup>[6-9]</sup>,而且关于被动太阳能与地板间歇采暖技术耦合调节作用更是鲜见研究。地板间歇采暖技术与被动太阳能耦合调节,其间歇运行模式如何确定?室温波动特性如何?是否满足热舒适要求?通过模拟与实测相结合的方法对上述问题进行了研究。

## 1 太阳房室温及负荷特征

### 1.1 研究对象

选取直接受益式太阳能建筑为研究对象,其房间尺寸为:宽度3300 mm×进深3900 mm×层高2900 mm;东、西向分别与卧室相邻、北向与卫生间相邻,南墙窗墙面积比为0.5。围护结构构造:屋面为120 mm厚钢筋混凝土现浇板+100 mm厚挤塑型聚苯板,传热系数为0.33 W/(m<sup>2</sup>·K);地面为150 mm厚3:7灰土+40 mm厚挤塑聚苯板+300 mm厚卵石垫层+100 mm厚混凝土地面,传热系数为0.29 W/(m<sup>2</sup>·K);南墙为240 mm厚砖墙+50 mm厚挤塑聚苯板,传热系数为0.45 W/(m<sup>2</sup>·K);其他外墙为240 mm厚砖墙+80 mm厚挤塑聚苯板,0.31 W/(m<sup>2</sup>·K);南窗采用60系列外开双玻塑钢窗,传热系数为2.0 W/(m<sup>2</sup>·K)。

### 1.2 室温及热负荷特征

利用能耗模拟软件Energyplus对太阳能建筑采暖期室温及热负荷特征进行模拟研究,直接受益式

收稿日期:2012-04-25 修改稿日期:2012-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078302,50921005)

作者简介:王登甲(1984-),男,陕西礼泉人,博士,讲师,主要从事建筑热环境调节与太阳能采暖研究。

太阳房全年室温特征如图1所示.其中,室内采暖设定温度取 $16^{\circ}\text{C}$ ,采暖起止日期为11月4日至次年3月19日共计136 d.

根据图1,在采暖期01/01—02/15之间,直接受益式太阳房室温全天均低于 $16^{\circ}\text{C}$ ,即该时间段内需采用连续采暖模式可满足室内热环境要求;采暖期其余时间段内,每天均存在部分时间段室温高于 $16^{\circ}\text{C}$ 、而其余时间段室温低于 $16^{\circ}\text{C}$ ,主要由于昼间太阳辐射影响,白天室温较高,夜间则较低,在该时间段内采用间歇采暖模式较为合理,即昼间室温高于采暖设定温度时间段采暖系统停止运行,其余时间则开启.01/01—02/15之间,全天负荷均大于零,采暖期其余时间段室温高于设定温度时负荷为零,否则负荷大于零.

根据对太阳能建筑全年室温和负荷特征分析,得到以下两点分析结果:①太阳能建筑在采暖期难以完全满足室内热环境要求,需与主动式采暖系统配合使用;②太阳能建筑采暖期部分昼间时间段室温高于采暖设定温度,与之配合的主动系统存在间歇模式运行来满足室内温度要求的条件.

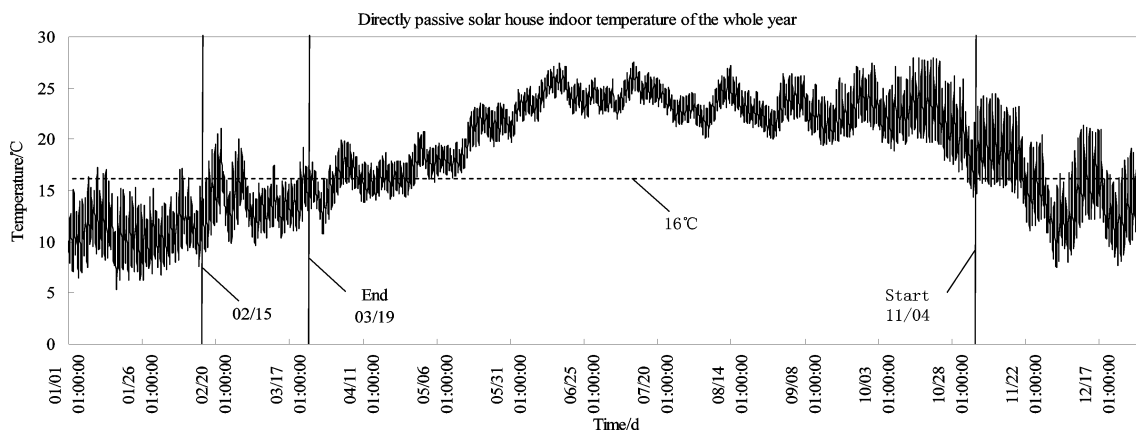


图1 直接受益式太阳房全年室温特征

Fig. 1 Directly passive solar house temperature over the year

## 2 间歇采暖地板结构参数选用原则

在掌握太阳能建筑负荷特征的前提下,辐射供暖地板散热量存在最佳匹配方案,既满足室内热环境要求又可使主动系统运行时间最短.为了达到较好的匹配,地板填充层厚度、盘管间距,盘管运行水温等设计和运行参数都需要合理的选择,大致可遵循以下几点选用原则.

(1)太阳能建筑热负荷数值较大时,主要可通过提高盘管运行水温来实现,其次可通过适当较小盘管间距或减小填充层厚度来调节;

(2)太阳能建筑热负荷增大过程较快时,主要可通过减小盘管间距来实现,其次可通过减小填充层厚度来调节,合理盘管运行水温为前提;热负荷减小过程较快时,主要可通过减小填充层厚度来实现,合理盘管间距和盘管运行水温为前提;

(3)太阳房热负荷减小或增大过程持续时间较长时,主要可通过减小或增大填充层厚度来实现,合理盘管间距和盘管运行水温为前提.

## 3 间歇供热量与太阳房负荷匹配研究

根据太阳房室温及负荷规律分析,选取常见数种被动太阳房负荷规律做分析,以热负荷值大小可分为热负荷值较大、较小两种情况,以热负荷持续时间可分为热负荷持续时间较长、较短两种情况.研究选取负荷规律A、B、C和D如图2所示.其中负荷较大的负荷规律B和D为附加阳光间式、负荷较小的A和C为直接受益窗式房间热负荷.

针对热负荷规律D做分析,其余负荷规律仅给出计算结果,热负荷规律D最大值约为 $330\text{ W/m}^2$ ,

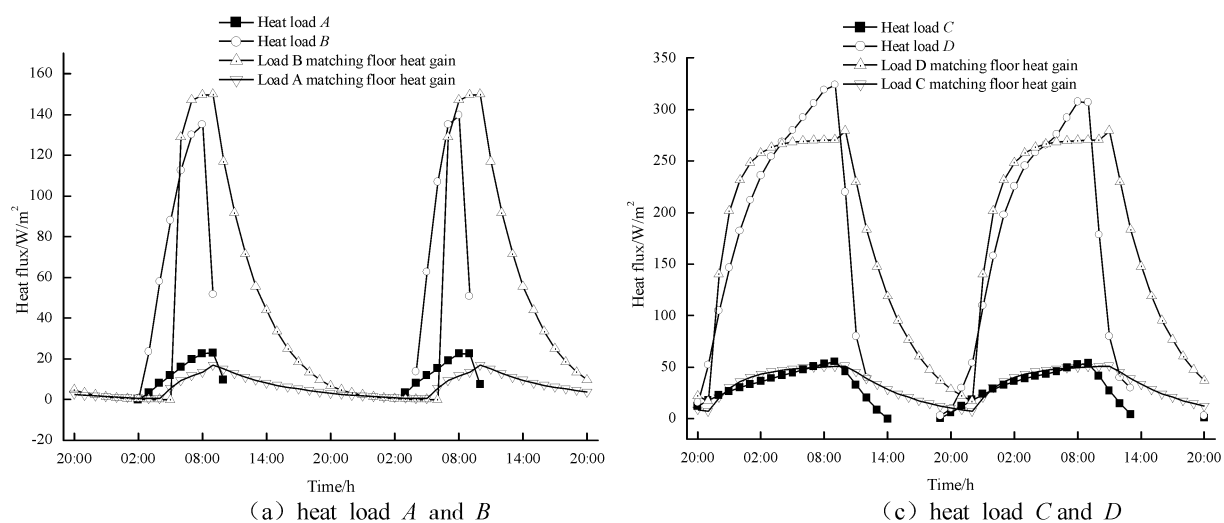


图2 辐射地板散热量与房间热负荷匹配过程

Fig. 2 The matching process of floor heat gain and passive solar house heat load

持续时间约为 13~14 h. 根据文献[10]中的地板散热量规律以及前述间歇采暖地板结构参数选用原则可知,地板填充层厚度选择 60 mm,盘管间距选择 200 mm,盘管运行水温选择 60 °C,由热负荷开始增大时刻地板开始加热,至热负荷最大时刻停止加热,热负荷减小过程依靠间歇期地板散热量来补充,可得到辐射地板散热量与房间热负荷匹配关系如图 2 所示;与其余热负荷相匹配的地板结构性能参数和间歇运行模式如表 1 所示.

表1 地板结构性能参数及地板采暖间歇运行模式

Tab. 1 Floor structure performance parameters and heating intermittent operation mode

Heat load	Space between pipes/mm	Thickness of filling layer/mm	Pipe water average temperature /°C	Heating operation time /h	Operation time/h	Heating intermittent time /h	Intermittent time /h
A	300	70	20	05:00—08:00	3	08:00—next day 05:00	21
B	100	50	40	05:00—08:00	3	08:00—next day 05:00	21
C	300	70	30	21:00—next day 09:00	12	09:00—21:00	12
D	200	60	60	21:00—next day 09:00	12	09:00—21:00	12

根据表 1,在太阳房负荷规律 A、B、C 和 D 情况下,主动式采暖系统每天仅需运行 3 h、3 h、12 h 和 12 h 即可满足太阳房热环境要求. 可以看出,相比连续供暖,主动系统运行时间明显缩短.

#### 4 耦合调节建筑室温特性分析

以直接受益窗式房间热负荷规律 A 和 C 为耦合研究对象,与之匹配的地板结构性能参数,如盘管间距,填充层厚度、盘管运行水温,以及采暖间歇模式等详见表 1 所示. 通过耦合调节分析,得到各自太阳房基础室温与耦合调节后房间室温变化如图 3 所示.

根据图 3,耦合调节房间室温明显高于基础室温,且房间温度波幅也有所减小. 负荷 A 和 C 工况房间基础室温平均值分别为 15.8 °C 和 9.6 °C,波动幅度分别为 4.6 °C 和 3.7 °C,耦合调节后室温平均分别为 18.6 °C 和 17.9 °C,波动幅度分别为 3.0 °C 和 2.5 °C. 可见耦合调节房间室温平均温度在 18 °C 左右,且波动幅度在 2~3 °C,完全满足人体热舒适要求. 综上分析,太阳能建筑与间歇采暖耦合调节供暖方式,在很大程度上减小供暖时间的同时也避免了由于连续采暖造成的室内过热现象,对节约采暖能源及保证室内热舒适条件均起到积极作用.

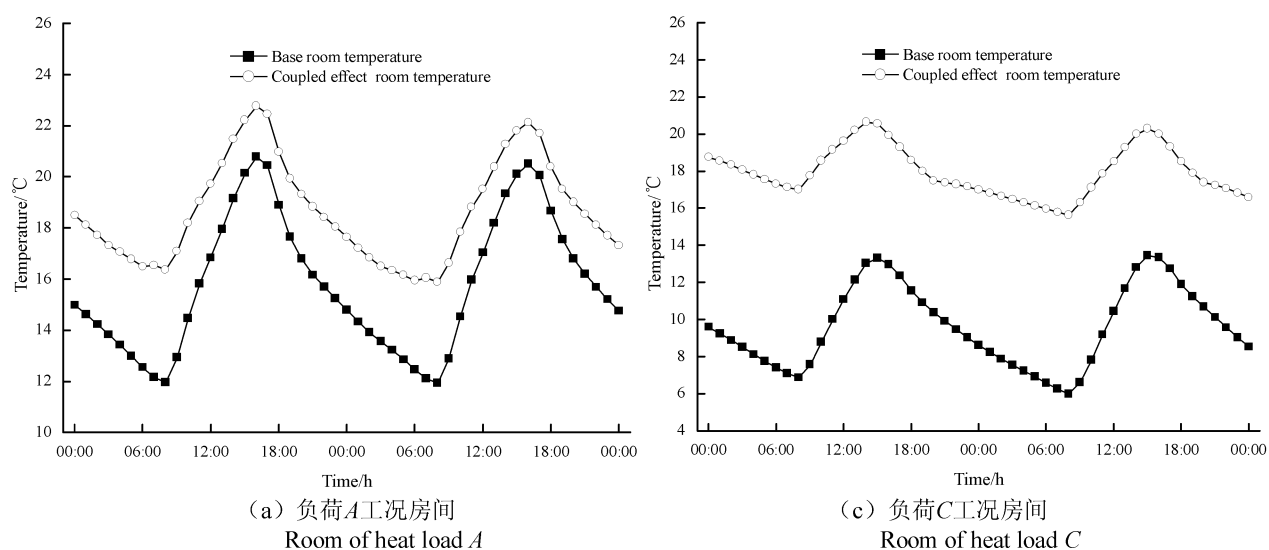


图3 太阳能建筑基础室温和耦合调节室温

Fig. 3 The base room temperature and coupled effect room temperature

## 5 测试分析

利用上述分析得到的与太阳能建筑相配合的间歇采暖方案,对青海省刚察县农牧民定居点示范工程进行了实测分析,其中采暖系统由主动太阳能采暖系统承担.

### 5.1 测试对象

实验测试房间选择示范工程A区7号房卧室2为对象,南向为集热蓄热墙结构,其中间为1500 mm×1800 mm单层中空玻璃南外窗,通风孔尺寸为200 mm×200 mm,上部两个通风孔,通风孔中心距离屋顶200 mm,底部三个通风孔,通风孔中心距离地面200 mm,围护结构热工参数与前述模拟研究对象相同.



图4 测试太阳房实景

Fig. 4 The live action of passive solar houses

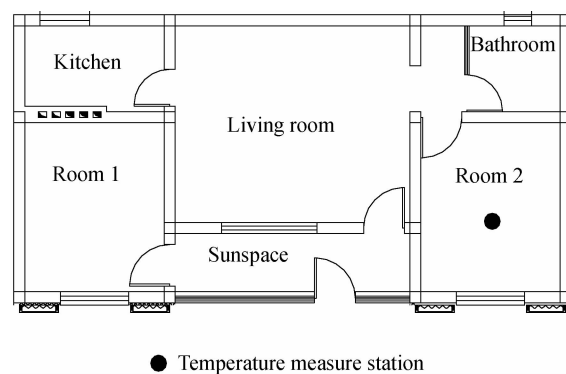


图5 测试太阳房平面及测点

Fig. 5 Location map and measurement station

### 5.2 测试结果及分析

测试对象南向为集热蓄热墙结构,其中间为1500 mm×1800 mm单层中空玻璃南外窗,通风孔尺寸为200 mm×200 mm,上部两个通风孔,通风孔中心距离屋顶200 mm,底部三个通风孔,通风孔中心距离地面200 mm,围护结构热工参数与前述模拟研究对象相同.

根据表2,间歇模式工况一为:03:00—06:00 停暖3 h,14:00—18:00 停暖4 h;间歇模式工况二为:14:00—18:00 停暖4 h;间歇模式工况三为:02:00—06:00 停暖4 h.测试得到三种工况下太阳房室内温度如图6所示,耦合调节与基础室温对比如图7所示.

表2 测试期间地板辐射采暖间歇模式

Tab.2 Heating intermittent operation mode

Case	Heating operation time /h	Heating intermittent time /h
Intermittent heating case one	00:00—03:00, 06:00—14:00, 18:00—00:00	03:00—06:00, 14:00—18:00
Intermittent heating case two	00:00—14:00, 18:00—00:00	14:00—18:00
Intermittent heating case three	00:00—02:00, 06:00—00:00	02:00—06:00

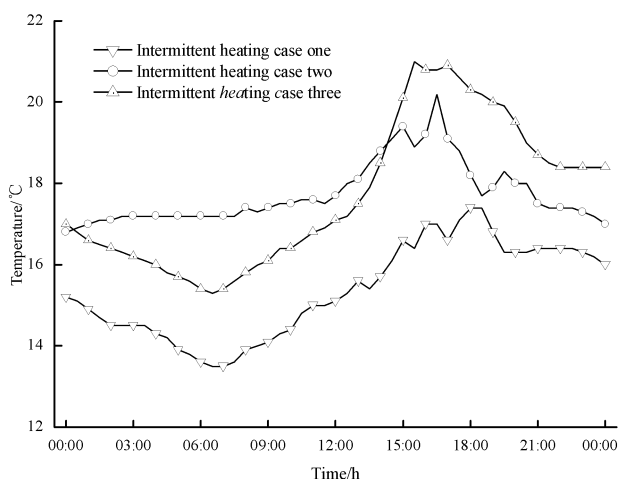


图6 耦合调节室温

Fig.6 Coupled effect room temperature

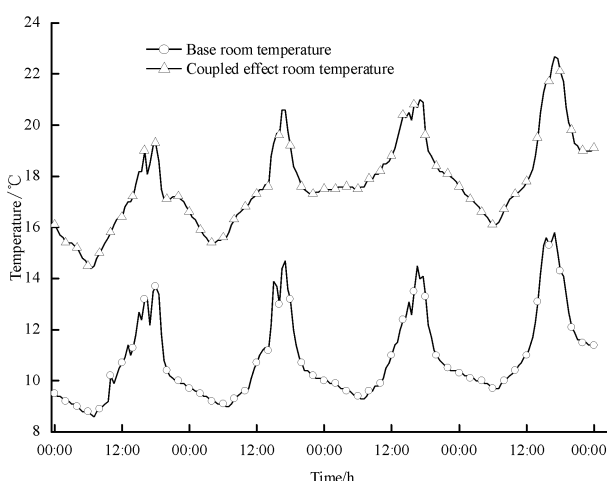


图7 耦合调节与基础室温对比

Fig.7 The comparison between coupled effect and base room temperature

根据图6,三种地板辐射间歇供暖模式下太阳房室温变化规律,对比分析工况一、二,14:00—18:00之间两种间歇模式均停暖,该时间段内室温较高的原因主要由于被动太阳能得热,其次,虽地板辐射供暖停止,但是其地板内蓄热通过地板表面向房间的散热仍可持续一段时间,14:00—18:00时间段房间平均温度分别为16.6℃和19.0℃,此温差主要由室外空气日平均温度差异形成.夜间03:00—06:00之间,工况一停暖,工况二连续供暖,因此,工况一室温在该时间段逐渐降低,而工况二室温基本保持恒定,03:00—06:00时间段房间平均温度分别为14.1℃和17.2℃,此温差主要由工况二连续供暖而工况一停暖形成.对比分析工况一、三,工况三在夜间02:00—06:00之间停暖,和工况一夜间停暖模式基本相似,而工况三昼间无间歇停暖,因此可看出,工况一、三夜间室温变化规律基本相似,而昼间工况三室温明显高于工况一,夜间02:00—06:00之间室温平均值分别为14.2℃和15.9℃,此温差主要由室外空气日平均温度差异形成,昼间14:00—18:00室温平均值分别为16.6℃和20.3℃,此温差主要由模式三连续供暖而模式一停暖形成,同时一定程度上也受室外空气日平均温度差异影响.间歇模式一、二和三日平均温度分别为15.6℃、17.7℃和17.6℃,基本满足人体热舒适要求.

根据图7,耦合调节房间室温明显高于单纯被动太阳房室温,房间日平均值分别为10.8℃、17.7℃,高出约6.9℃,可见耦合调节对单纯被动太阳房室内热环境的改善是显而易见的.总评结果,太阳能建筑与地板辐射间歇采暖耦合调节可很好的保证室内热环境,并且对节约采暖能耗也起着巨大作用.

## 5 结 论

1)被动太阳能建筑在采暖期难以完全满足室内热环境要求,需与主动式采暖系统配合使用;太阳能建筑采暖期部分昼间时间室温高于采暖设定温度,与之配合的主动系统存在间歇模式运行来满足室内温度要求的条件.

2)提出了与被动太阳房热负荷相匹配的间歇采暖地板结构设计及运行参数的选用原则;间歇采暖被动太阳房室温平均温度可维持在18℃左右,且波动幅度在2~3℃,满足人体热舒适要求.

3)太阳能建筑与地板辐射间歇采暖耦合调节可很好的保证室内热环境,对节约采暖能耗也起着巨大作用.

## 参考文献 References

- [1] 刘加平,杨 柳. 零辅助能耗窑居太阳房热工设计[J]. 太阳能学报, 1999, 20(3): 302-310.  
LIU Jia-ping, YANG Liu. Thermal design of a zero energy cave-dwelling solar house[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1999, 20(3): 302-310.
- [2] 刘艳峰,刘加平,杨 柳,等. 拉萨多层被动太阳能住宅热环境测试研[J]. 暖通空调, 2007, 37(12): 122-124.  
LIU Yan-feng, LIU Jia-ping, YANG Liu, et al. Measurement of thermal environment in a multistoried passive solar residence in Lhasa[J]. HV&AC, 2007, 37(12): 122-124.
- [3] 陈 滨,孟世荣,陈会娟,等. 被动式太阳房集热蓄热墙对室内湿度调节作用的研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(3): 42-46.  
CHEN Bin, MENG Shi-rong, CHEN Hui-juan, et al. Effect of advanced Trombe walls on indoor environment moisture control[J]. HV&AC, 2006, 36(3): 42-46.
- [4] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar Engineering of Thermal Processes[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- [5] 刘艳峰,鱼亚丽,孔 丹. 西北地区居住建筑太阳能采暖保证率[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2011, 43(2): 273-276.  
LIU Yan-feng, YU Ya-li, KONG Dan. Solar fraction of residential building in north-west China[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(2): 273-276.
- [6] 冯晓梅,肖勇全. 低温地板辐射供暖的动态仿真[J]. 建筑热能通风空调, 2001, 20(6): 16-18.  
FENG Xiao-mei, XIAO Quan-yong. Dynamic Simulation of The Low Temperature Radiant Floor Heating System[J]. Building Energy & Environment, 2001, 20(6): 16-18.
- [7] 胡松涛,于慧俐,李绪泉,等. 地板辐射供暖系统运行工况动态仿真[J]. 暖通空调, 1999, 29(4): 15-17.  
HU Song-tao, YU Hui-li, LI Xu-quan, et al. Dynamic simulation of operation of the radiant floor heating system[J]. HV&AC, 1999, 29(4): 15-17.
- [8] KILKIS B, et al. A simplified model for the design of radiant in-slab heating panels[J]. ASHREA Trans, 1995, 101(1): 210-216.
- [9] LIU Yan-feng, WANG Deng-jia, LIU Jia-ping. Study on heat transfer process for in-slab heating floor[J]. Building and Environment, 2012(54): 77-85.
- [10] 王登甲. 间歇采暖太阳能建筑热过程及设计优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2012.  
WANG Deng-jia. Study on the thermal process and the design optimization of intermittent heating solar house[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.

## Study on the design and operation optimization of intermittent solar heating building

WANG Deng-jia<sup>1,2</sup>, LIU Yan-feng<sup>1,2</sup>, LIU Jia-ping<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** On the basis of the indoor temperature and heat load characteristics of passive solar heating house, it is found that; the thermal environment can not fully satisfy the thermal comfort requirements during the heating period, and it needs to combine with the active heating system. However, the passive solar house indoor temperature is higher than setting temperature in the part time of heating period. Therefore, the active system should apply intermittent running mode to meet the requirements of the indoor temperature conditions. The selection principle of the intermittent heating floor structure design and operation parameters were obtained and the room temperature change characteristics under the adjustment of the coupled intermittent heating and passive solar energy technology analyzed. The results show that the average room temperature can keep 18℃ or so, and the fluctuations remained between 2~3℃. The coupled regulation technology reduces the heating time and avoids the indoor overheating caused by continuous heating at the same time, and plays a positive role in heating energy saving and indoor thermal comfort.

**Key words:** thermal environment; heat load; intermittent heating

**Biography:** WANG Deng-jia, Lecturer, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13279455510, E-mail: wangdengjia1020@163.com