

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.08.023

# 被动式采暖中太阳辐射热效应分析

刘大龙<sup>1,2,3</sup>, 杨柳<sup>1,2,3</sup>, 刘加平<sup>1,2,3</sup>, 张群<sup>1,2,3</sup>

(1.西安建筑科技大学 建筑学院, 710055 西安; 2.陕西省西部绿色建筑协同创新中心, 710055 西安;  
3.陕西省(西部)绿色建筑重点实验室(西安建筑科技大学), 710055 西安)

**摘要:**为解决被动式太阳能建筑设计中辐射热与采暖需求之间的匹配问题,以非稳态传热原理为基础,提出评价被动式太阳房辐射热效用的“太阳能被动采暖热系数”指标.以拉萨和北京为例,通过计算该指标分析了两地被动式太阳能采暖的可用性.建立了主被动结合太阳能间歇式采暖系统的控制策略,据此分析了在太阳能丰富地区采用主被动相结合的间歇性采暖方式的可行性.

**关键词:** 太阳辐射; 非稳态传热; 间歇性采暖; 建筑节能

中图分类号: TU1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)08-0117-03

## Analysis of thermal reaction of solar radiation in passive building heating

LIU Dalong<sup>1,2,3</sup>, YANG Liu<sup>1,2,3</sup>, LIU Jiaping<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qun<sup>1,2,3</sup>

(1.College of Architecture, Architecture School, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China;  
2.Shaanxi Provincial Collaborative Innovation Centre of Green Building in Western, 710055 Xi'an, China; 3.Shaanxi Provincial Key Laboratory of Green Building in Western (Xi'an University of Architecture and Technology), 710055 Xi'an, China)

**Abstract:** To solve matching problem between the sun's available heat and heating demand in the design of passive solar building. The indicator of "solar passive heating thermal coefficient" (SPHTC) was proposed based on the principle of unsteady heat transfer. Based on case study of Lhasa and Beijing, the contribution of solar radiation for heating energy consumption was analyzed by calculating SPHTC. The control strategy for intermittent active and passive combined solar heating system was proposed, and the feasibility of such system in regions with rich solar energy was evaluated.

**Keywords:** solar radiation; unsteady heat transfer; intermittent heating; building energy efficiency

太阳能采暖是建筑应用可再生能源,实现节能的重要技术,建筑的被动式太阳能利用是进行太阳能采暖的主要方法.单纯依靠太阳能难以满足建筑的供暖需求,主被动结合是太阳能建筑热利用的发展趋势<sup>[1-2]</sup>.太阳能主被动结合采暖方式不同于传统的冬季连续采暖方式,开展间歇性采暖研究是实现太阳能利用的迫切需要.连续采暖方式中计算采暖能耗时采用稳定计算方法,而在间歇性采暖中需重点考虑太阳辐射的热作用<sup>[3-4]</sup>,因此稳定计算方法不再适用,必须采用非稳态方法来计算辐射热效率

及采暖能耗.

在围护结构稳态传热计算中,以有效传热系数<sup>[5-6]</sup>、传热系数修正系数<sup>[7]</sup>等方式考虑了太阳辐射对采暖能耗的影响,采用非稳态方法计算时传热系数的概念不再适用,论文开展非稳态传热方法计算被动式太阳能采暖能耗,以及被动式间歇性采暖理论基础的相关研究.

### 1 太阳辐射作用下围护结构传热的理论分析

被动式太阳房的工作原理是“温室效应”,太阳辐射通过透明围护结构被引入室内实现室内升温<sup>[8]</sup>.被动式太阳能建筑的设计难点是:在间歇的太阳辐射条件下,如何通过非透明围护结构以保温、蓄热等方式满足室内热舒适要求,因此被动式太阳房设计的重点是非透明围护结构,非透明围护结构研究重点是传热特性.在被动式太阳房的非透明围护结构中,南墙和北墙是最重要的传热部位,对它们的传热研究可等效为墙体有无辐射的传热研究.

收稿日期: 2014-05-26.

基金项目: 国家自然科学基金(51348002);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTCL03-17);中国博士后基金(2014M552419).

作者简介: 刘大龙(1976—),男,副教授;

杨柳(1970—),女,教授,博士生导师;

刘加平(1956—),男,教授,博士生导师;

张群(1973—),男,教授,博士生导师

通信作者: 刘大龙, coffeevc@xauat.edu.cn.

### 1.1 围护结构导热计算原理

匀质非透明围护结构传热主要是热传导方式,墙体导热传热的傅里叶定理一维非稳态计算公式<sup>[9]</sup>为

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

式中: $x$ 为围护结构厚度, m;  $\tau$ 为时间, s;  $a$ 为围护结构材料的导温系数,  $\text{m}^2/\text{h}$ ;  $\lambda$ 为材料的导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ .

对上述墙体传热微分方程,采用有限差分法进行求解,将其墙体看做均质材料层,按照等厚度划分,从外表面开始分层,其差分形式为

$$\frac{\lambda \Delta \tau}{c \rho \Delta x^2} \left[ t_{k-1}^m - \left( \frac{1}{\frac{\lambda \Delta \tau}{c \rho \Delta x^2}} + 2 \right) t_k^m + t_{k+1}^m \right] = -t_k^{m-1}. \quad (2)$$

式中: $c$ 为材料的比热,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $\rho$ 为材料密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t_k^m$ 为围护结构第  $k$  层  $m$  时刻的温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

使用第三边界条件求解,给出室内外空气温度,边界条件数学表述为

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha(\theta - t), \quad (3)$$

式中: $\theta$ 为围护结构周围气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$ 为围护结构壁面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$ 为围护结构表面换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ .

其差分表达式为

$$\begin{cases} \frac{2\lambda_1}{\Delta x_1} t_1^m - \left( \frac{2\lambda_1}{\Delta x_1} + \alpha_e \right) t_0^m = -\alpha_e t_e^m, \\ \frac{2\lambda_n}{\Delta x_n} t_n^m - \left( \frac{2\lambda_n}{\Delta x_n} + \alpha_r \right) t_{n+1}^m = -\alpha_r t_r^m. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $t_e^m$ 、 $t_r^m$ 为  $m$  时刻室外、室内气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_e$ 、 $\alpha_r$ 为外、内表面换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ .

根据式(2)、(4),构建围护结构导热差分方程组,使用追赶法求解围护结构的外表面温度,再依据表面换热原理可计算通过围护结构外表面的热流。

### 1.2 太阳能被动采暖热系数

为量化太阳辐射对于采暖能耗的减少,提出“太阳能被动采暖热系数”概念,指单位时间内太阳辐射热作用下的围护结构失热量与无辐射失热量之差与室内外温差的比值:

$$\eta_{\text{TC}} = \frac{(Q_{\text{NS}} - Q_{\text{S}})}{(T_i - T_a)}, \quad (5)$$

式中: $\eta_{\text{TC}}$ 为太阳能被动采暖热系数;  $Q_{\text{NS}}$ 为无太阳辐射热作用下的围护结构失热量, W;  $Q_{\text{S}}$ 为有太阳辐射热作用下的围护结构失热量, W;  $T_i$ 为采暖室内计算温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_a$ 为计算日室外平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ; 分子、分母都是日逐时平均值。

为计算太阳辐射热作用下的冬季围护结构失热量,室外气象条件用室外综合温度来表示;在无辐射条件下的计算围护结构失热量时,采用室外空气温度,两种情形下室内均为采暖室内计算温度,两类失热量计算原理相同。

室外综合温度是考虑太阳辐射热作用的室外等效温度,多用于计算夏季围护结构的非稳态传热,为了分析冬季太阳辐射对建筑采暖能耗的影响,室外气象参数选用室外综合温度<sup>[10]</sup>,见式(6)。

“太阳能被动采暖热系数”从太阳辐射强度和室内外温差等方面衡量了被动式太阳能建筑中辐射的热效用,该参数综合了气候条件、围护结构热传递特性,较全面地评价了太阳辐射对冬季采暖能耗的影响。“太阳能被动采暖热系数”越大太阳能采暖效果越好,它比传热系数修正系数更适合被动太阳房的传热特性分析。

$$t_{\text{sa}} = t_e + \frac{\rho I}{\alpha_e} - t_{\text{lr}}, \quad (6)$$

式中: $t_{\text{sa}}$ 为室外综合温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_e$ 为室外空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$ 为外墙太阳辐射吸收系数;  $I$ 为南立面太阳辐射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $t_{\text{lr}}$ 为外表面有效长波辐射温度,  $^{\circ}\text{C}$ ,取 1.8;  $\alpha_e$ 为外表面换热系数,取 23。

## 2 主被动太阳能间歇采暖控制策略

在日照时间内室外综合温度高于室外气温,用它计算围护结构的热流强度将小于使用室外气温得到的。当太阳辐射足够强时,热流可能从室外流向室内,室内得热,此时可减少或者停止供暖,辐射热将使室内所需供热量减少,这是间歇性采暖的工作原理。

何时起停主动供暖设备是运行主被动结合太阳能间歇采暖系统的关键问题。假设主动采暖方式以固定热量供热,建筑北向无太阳辐射热作用。在此条件下,当南向外墙吸收的辐射热等于北向外墙散失的热量时,此时东西外墙的散热不会低于北墙,因此可单纯依靠辐射热保持室内热量平衡,可停止主动供热,如果小于则启动主动供热。

$$(t_{\text{sa}} - t_{\text{s0}}) \alpha_e \geq (t_{\text{n0}} - t_e) \alpha_e, \quad (7)$$

式中: $t_{\text{s0}}$ 为南向外墙外表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{n0}}$ 为北向外墙外表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

南、北向外墙外表面温度可通过傅里叶定律使用第三类边界条件计算得到,将室外综合温度计算公式带入并整理可得:

$$2t_e + \frac{\rho I}{\alpha_e} - t_{\text{lr}} \geq t_{\text{n0}} + t_{\text{s0}}. \quad (8)$$

当南、北向外墙的外表面温度与室外气温满足式(8)时,即可停止主动供暖,否则不可停止。

### 3 被动式太阳采暖的围护结构传热实例分析

#### 3.1 计算条件

以中国太阳辐射资源丰富的拉萨和资源中等的北京为例,研究太阳辐射对于冬季采暖能耗的影响.以典型气象年为数据源,将采暖期内每天 24 h 的平均值构成一个平均气象日作为室外计算气象参数,这样便于分析辐射的作用规律,更能反映出运行能耗的基本规律<sup>[11]</sup>.拉萨采暖期 132 d;北京采暖期 123 d<sup>[12]</sup>.

研究对象南北朝向,外围护结构主体为 300 mm 砖墙,外墙太阳辐射吸收系数取 0.50,拉萨和北京采暖季平均室外综合温度见图 1.采暖室内设计温度为 18 ℃.

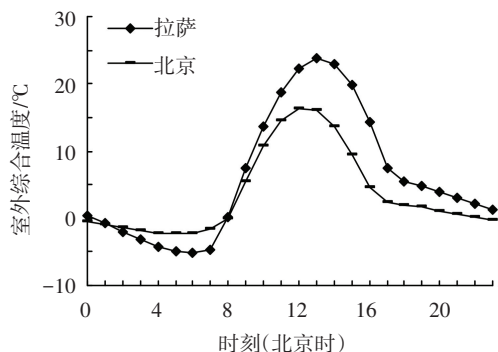


图 1 南向室外综合温度

#### 3.2 计算结果分析

使用有限差分法求解,采用 VC++6.0 编制了求解程序.在求解表面温度后计算外表面热流.有/无辐射作用下,建筑南向外围护结构外侧热流强度的差值见图 2.拉萨太阳能被动采暖热系数为 2.37,北京为 1.33.计算结果表明,在日照时间内,无论是太阳资源丰富的拉萨,还是较弱的北京,太阳能都可显著减少室内热损失.

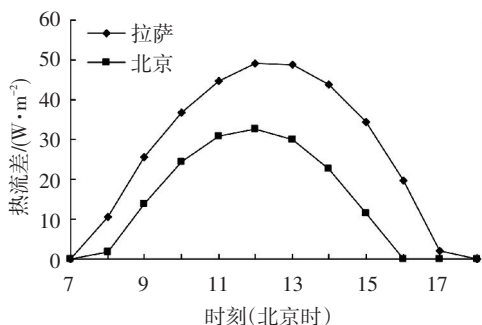


图 2 有辐射南向外墙热流差值

拉萨在中午 11 点到 15 点,南向外墙热流方向从室外流向室内,在 13 点到 14 点两个小时内,满足式(8),此时可停住主动供暖.北京在 12 点南向外墙热流从室外流向室内,在全天内都不满足停止供暖的条件.可见,完全依靠被动式太阳能采暖要达到室

内 18 ℃ 的设计目标较为困难,因此主被动结合是解决太阳能采暖热舒适的有效途径.

### 4 结 语

使用室外综合温度为室外计算条件,以非稳态导热方程来计算辐射作用下墙体的传热量.提出了“太阳能被动采暖热系数”指标评价被动式太阳房中的辐射热效应.给出了主被动结合太阳能间歇式采暖系统的控制策略.以拉萨和北京为例,计算了两地的“太阳能被动采暖热系数”,研究了两地间歇采暖的可行性.值得关注的是,被动式太阳房是个复杂系统,围护结构是决定辐射热作用主要环节,但建筑朝向、空间尺度、材料以及换气次数等因素都会影响辐射热效应,这些问题将在后续研究进行探讨.

### 参考文献

- [1] SOTERIS A K. Solar energy engineering [M]. 2nd. Burlington: Elsevier, 2014: 323-395.
- [2] BRIAN S R, NICHOLAS E, CHMIELEWSKI, et al. Heating season performance of a full-scale heat pipe assisted solar wall[J]. Solar Energy, 2013, 87(1): 76-83.
- [3] ALI A B, ADNAN W J, MUSTAFA N B, et al. Comparative study of continuous versus intermittent heating for local residential building: case studies in Jordan[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 65(1): 709-714.
- [4] 王登甲,刘艳峰,刘加平.间歇采暖太阳能建筑设计及运行优化研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(5): 720-725.
- [5] 杨善勤.用有效传热系数法估算采暖耗热量及进行建筑节能设计[J].建筑科学, 1986(2): 55-65.
- [6] 杨善勤.关于用有效传热系数法估算采暖耗热量的几个问题[J].暖通空调, 1988(1): 20-23.
- [7] JGJ26—95 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)[S].北京:中国建筑科学研究院, 1996.
- [8] GUILLERMO Q, DANIEL R, YVAN D, et al. A comprehensive review of solar facades, Opaque solar facades [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 2820-2832.
- [9] 彦启森,赵庆珠.建筑热过程[M].北京:中国建筑工业出版社, 1986.
- [10] 刘加平.建筑物理[M].4版.北京:建筑工业出版社, 2009.
- [11] 刘大龙.区域气候预测与建筑能耗演化规律研究[D].西安:西安建筑科技大学, 2010.
- [12] GB50376—2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.

(编辑 赵丽莹)