

# 基于标准气象日的南墙太阳辐射净得热总量 预测模型研究

李剑琨, 张红婴, 吕银娇, 成晓霞, 费华

(江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:**建筑中的能耗是我国总能耗中不可忽略的部分。为了缓解我国目前能源紧张的情况,更合理地利用能源,很有必要充分了解全年建筑围护结构净得热总量的具体情况。在南昌市全年各月标准日气象数据的基础上,利用数值模拟方法对居住建筑南墙的非稳态传热过程进行计算,分析不同月份标准气象日的南墙各典型表面的平均温度及传热量变化趋势。进而对南墙太阳辐射净得热情况进行研究,得到南墙太阳辐射净得热总量及其周期性变化模型。该模型决定系数接近于1,表明能很好地表征南墙太阳辐射净得热总量的周期性变化规律,为南昌地区建筑南墙全年传热负荷的估算提供了理论基础。

**关键词:**标准气象日;太阳辐射;南墙;辐射得热;预测模型

**中图分类号:**TU83

**文献标志码:**A

## 引言

化石能源的消耗使其日趋枯竭、同时带来了严重的环境恶化问题。太阳能是一种相对无限且清洁的能源,合理利用太阳能可以很好地解决能源匮乏的问题。建筑用能属于分散型能耗,建筑围护结构的外表面暴露在太阳光的直接照射下,成为太阳辐射的直接接受面。分散型能源和建筑有效的结合促成了建筑太阳辐射的被动利用<sup>[1]</sup>。

世界各国研究者均将太阳能被动利用作为实现建筑节能的重要手段并进行了相关的研究工作。Yang等人<sup>[2]</sup>用离散传输辐射模型(Discrete Transmission Radia-

tion Model, DTRM),模拟了建筑受阳光照射时,围护结构外表面温度、热通量的变化情况,以及其对市区热环境产生的影响。李恩等人<sup>[3-4]</sup>研究分析了拉萨市的直接受益式住宅建筑,建立起建筑的热环境模型,研究了在冬季太阳辐射作用下,拉萨地区各个朝向建筑围护结构内表面温度的变化情况。张君等人<sup>[5]</sup>运用有限差分法,在考虑太阳辐射以及环境温度变化的情况下,建立了建筑围护结构温度场的数值模型,计算出北京市保温墙体的温度场变化。邹晓泉等人<sup>[6]</sup>通过软件模拟分析了冬季风向和风速对不同保温形式建筑南墙的对流换热系数、外表面温度和日辐射净得热总量的影响。刘大龙等人<sup>[7]</sup>研究分析了青藏高原冬季情况下,辐射和海拔高度

收稿日期:2018-04-23

基金项目:国家自然科学基金(51666004);国家级大学生创新创业训练计划项目(201710407009)

作者简介:李剑琨(1992-),男,山西大同人,硕士生,主要从事建筑节能方面的研究,(E-mail)ljk3709@163.com;

张红婴(1972-),女,江西铅山人,副教授,博士,主要从事室内空气品质和建筑节能方面的研究,(E-mail)zhanghongying2@sina.com

等因素对建筑能耗的影响,发现相对于海拔高度,辐射因素从根本上决定了建筑的能耗情况。刘大龙等人<sup>[8]</sup>还分析了气象参数对建筑能耗灵敏度的影响。王晓腾等人<sup>[9]</sup>通过 Fluent 软件,利用数值模拟的方法,对上海地区冬季时,建筑南墙在太阳辐射的作用情况下,室内以及室外的空气温度和太阳辐射持续天数等因素对围护结构具体传热过程的影响进行了研究。上述研究主要集中在对建筑冬季太阳能的被动利用上,而在中国夏热冬冷地区,围护结构吸收的太阳辐射能除了能减少冬季的供暖负荷外,也将对夏季围护结构传热负荷造成很大影响,但前人关于这方面的研究报道甚少。

本文以夏热冬冷地区的典型城市南昌为例,计算标准气象日条件下,南墙全年实际吸收的太阳辐射量,并拟合出南墙太阳辐射净得热总量随时间变化的数学模型,为合理利用和调控夏热冬冷地区太阳能提供理论基础和规划建议。

## 1 数值计算方法

### 1.1 数学和物理模型

模拟采用 Fluent 14.0 软件作为基本的计算程序。为了得到简易且可信的模拟结果,在模拟计算的过程中设建筑周边的流场保持稳定不变。计算域流场的具体控制方程如参考文献[10]所示,辐射传输采用离散坐标(Discrete Ordinates, DO)模型,其辐射传输模型和传热过程控制方程参见文献[11-12]中所示。

根据建筑用标准气象数据手册中提供的数据<sup>[13]</sup>,采用南昌市(东经 115.89°,北纬 28.68°)全年的标准气象日的气象参数作为模拟和分析的基础和背景。由于文献[13]中只提供了1、3、5、7、9和11这6个月间标准气象日的具体气象参数,因此,根据文献[14]中提供的方法,选取了2、4、6、8、10和12这6个月的气象标准日来作为剩余月份模拟和分析的基础。本文着重分析奇数月气象标准日的建筑南墙外表面温度和传热情况。

本文的建筑模型尺寸设置为 20 m × 20 m × 15 m(长 × 宽 × 高),建筑模型如图 1(a)所示。

根据南昌地区建筑特点,模型建筑的南墙厚度取为 0.26 m,由三层组成,墙体从室外到室内依次为水泥砂浆,240 多孔砖,水泥砂浆。南墙材料的具体参数以及厚

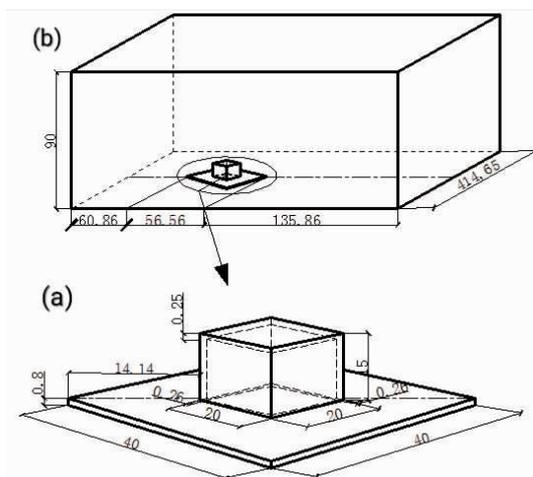


图 1 建筑模型和计算域(单位:m)

度都列于表 1<sup>[15]</sup>。为了可以清楚了解南墙受太阳辐射影响下的各典型表面的温度及传热通量的变化趋势,根据等分的原则将南墙从室外到室内分成 3 层,形成了 4 个典型面,各典型表面与南墙外表面的距离  $l$  分别为 0 m、0.1 m、0.2 m 和 0.3 m,各典型面相应的分别以“ $l=0$  m”、“ $l=0.1$  m”、“ $l=0.2$  m”、“ $l=0.3$  m”表示。

表 1 墙体材料

位 置	参 量			
	厚度 $\delta$ /m	密度 $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 $\lambda$ /W /(m·°C)	热容 $c_p$ /(kJ/(kg(°C)))
水泥砂浆	0.01	1800	0.93	1.05
240 多孔砖	0.24	1106	0.454	1.05
水泥砂浆	0.01	1800	0.93	1.05

### 1.2 边界条件和初始条件

考虑到建筑围护结构附近的地表会对太阳辐射造成反射,而这些反射则会对建筑围护结构的外表面造成一定的影响,因此将建筑围护结构周围 10 m 范围内的地表设置为夯实土壤。通过对地表进行热平衡分析,发现地表温度除了与太阳辐射强度、室外空气温度和建筑外表面温度有关外,还与地表下面的土壤温度有关。根据文献[16]计算得出南昌市土壤恒温层的深度约为 15 m,表明地下 15 m 左右处的位置土壤温度全年保持不变。因为在数值模拟计算时,随着土壤厚度的增大,模拟计算的成本也越大。而且,根据文献[17-20]可知地表以下 0.8 m 处土壤各月温度变化幅度范围很小,因此将建筑围护结构附近的地面土壤厚度设为 0.8 m,用各月室外空气平均温度来代替土壤的底部温度。

参照文献[11]将数值模拟的计算域设置为 245 m × 170 m × 90 m (长 × 宽 × 高), 计算域如图 1(b) 所示。

将模拟的计算域入口设置为速度入口, 根据文献[12]中所提供的气象参数等数据, 入口的风速取南昌市(1、3、5、7、9、11月)6个不同月份标准气象日的气象参数<sup>[13]</sup>中的实时风速。室外空气温度  $T$  取南昌市6个不同月份标准气象日的气象参数<sup>[13]</sup>中实时空气温度。

太阳辐射强度  $I$  采用南昌市1、3、5、7、9、11月间标准气象日中南墙外表面辐射强度的逐时值<sup>[13]</sup>, 如图2所示。

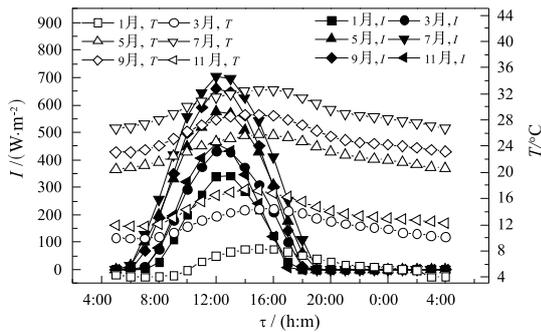


图2 南昌标准日室外逐时空气温度及逐时太阳辐射强度

计算区域出口处的流场被视作充分发展的湍流, 基于此, 将该计算区域流进与流出的质量流率设置为相同, 所以将计算域出口定义为速度出口。将计算区域的上下两面都设置为绝热且无滑移的表面, 而将计算区域左右两侧的面设置为对称面, 建筑模型围护结构外表面同样设置为无滑移表面, 且外表面的辐射吸收系数设置为 0.65。由软件 Fluent 14.0 中的自带程序来计算太阳辐射方向与高度角的具体信息, 同时太阳辐射的方向与高度角每一个时间步长自动更新一次。模拟计算采用非稳态算法, 一个时间步长为 90 s。

因为空调对温度的控制, 夏季室内的空气温度恒为 25 °C, 冬季室内的空气温度恒为 16 °C。而春秋室内的空气温度则认为是 20 °C。为获得真实可靠的模拟结果, 在整个模拟研究过程中, 对建筑物理模型做了适当的假设和简化: 假设当模拟计算开始时, 整个计算区域热环境就已经达到了平衡状态; 假设空气对太阳辐射来说是透明的, 而对长波辐射则是非透明的; 地面和建筑围护结构外表面对太阳辐射则是不透明的。

### 1.3 数值计算方法验证

已有的研究与本文的模拟计算区域特征最为相

近的为 Gómez 等人<sup>[22]</sup>所做的实测及模拟结果。因此本文利用文献[22]所用的湍流和辐射模型进行模拟计算, 并将模拟的结果与实测的结果进行对比, 以此来证明选取的湍流和辐射模型的准确可信。同时, 还将数值模拟结果与文献[22]进行比较。南墙外表面温度模拟值与文献实测及模拟结果的比较如图3所示。

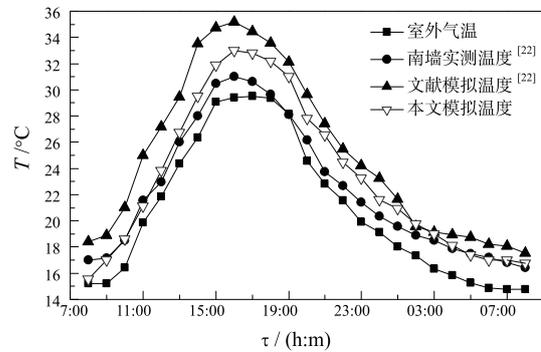


图3 南墙外表面温度模拟值与文献实测及模拟结果的比较

从图3可知, 本文利用数值模拟得出的结果在很长时间内都要比文献[22]中的温度模拟计算值更贴近于实际值。因此, 本文建立的计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 模型用于研究阳光照射下建筑的传热特性方面是可信的, 可以用于后续的相似研究。

## 2 结果和讨论

要定量的分析建筑围护结构太阳辐射能的吸收情况与传热特征, 就必须建立热平衡方程<sup>[23-24]</sup>。

太阳辐射作用下, 南墙外表面的热平衡关系为:

$$q_{3n\tau} = q_{1n\tau} - q_{2n\tau} \quad (1)$$

式中,  $q_{1n\tau}$ 、 $q_{2n\tau}$ 、 $q_{3n\tau}$  分别为月份为  $n$  ( $n = 1, 3, 5, 7, 9, 11$ ) 时,  $\tau$  时刻的单位面积南墙吸收的热量、散发到室外的热量、南墙外表面的传热通量,  $W/m^2$ 。

$$q_{1n\tau} = \beta(I_{dn\tau} + I_{rn\tau}) \quad (2)$$

式中,  $I_{dn\tau}$ 、 $I_{rn\tau}$  分别为  $n$  月份的  $\tau$  时刻的南墙外表面的太阳直射辐射、散射辐射强度,  $W/m^2$ 。  $\beta$  是南墙外表面的太阳辐射吸收系数, 为 0.65。

$$q_{2n\tau} = (\alpha_c + \alpha_\tau)(t_{n\tau} - t_{a\tau}) \quad (3)$$

式中,  $t_{n\tau}$  为  $n$  月份的  $\tau$  时刻的南墙外表面温度, °C;  $t_{a\tau}$  为  $\tau$  时刻室外空气温度, °C;  $\alpha_c$ 、 $\alpha_\tau$  为对流热交换系数、长波辐射换热系数。

除南墙外表面外,其他各典型表面传热计算如公式4所示。

$$q_{iint} = -\lambda \frac{T_{i-1} - T_i}{l_{i-1} - l_i} \quad (4)$$

式中,  $i = 1, 2$ ;  $\lambda$  是建筑外围护结构材料的导热系数,为  $0.504, W/m^2$ ;  $T_i$  为典型表面  $i$  的平均温度,  $^{\circ}C$ 。

### 2.1 建筑南墙各典型表面平均温度随时间变化的趋势

根据文献[23-24]中热平衡方程(1)-(4)的关系可知,建筑南墙实际吸收的太阳辐射能不仅与太阳辐射吸收系数和换热系数有关,而且还与南墙外表面的温度有关。根据模拟计算结果得到南昌地区各月标准气象日南墙内部各典型表面在典型时刻的平均温度,如图4所示。

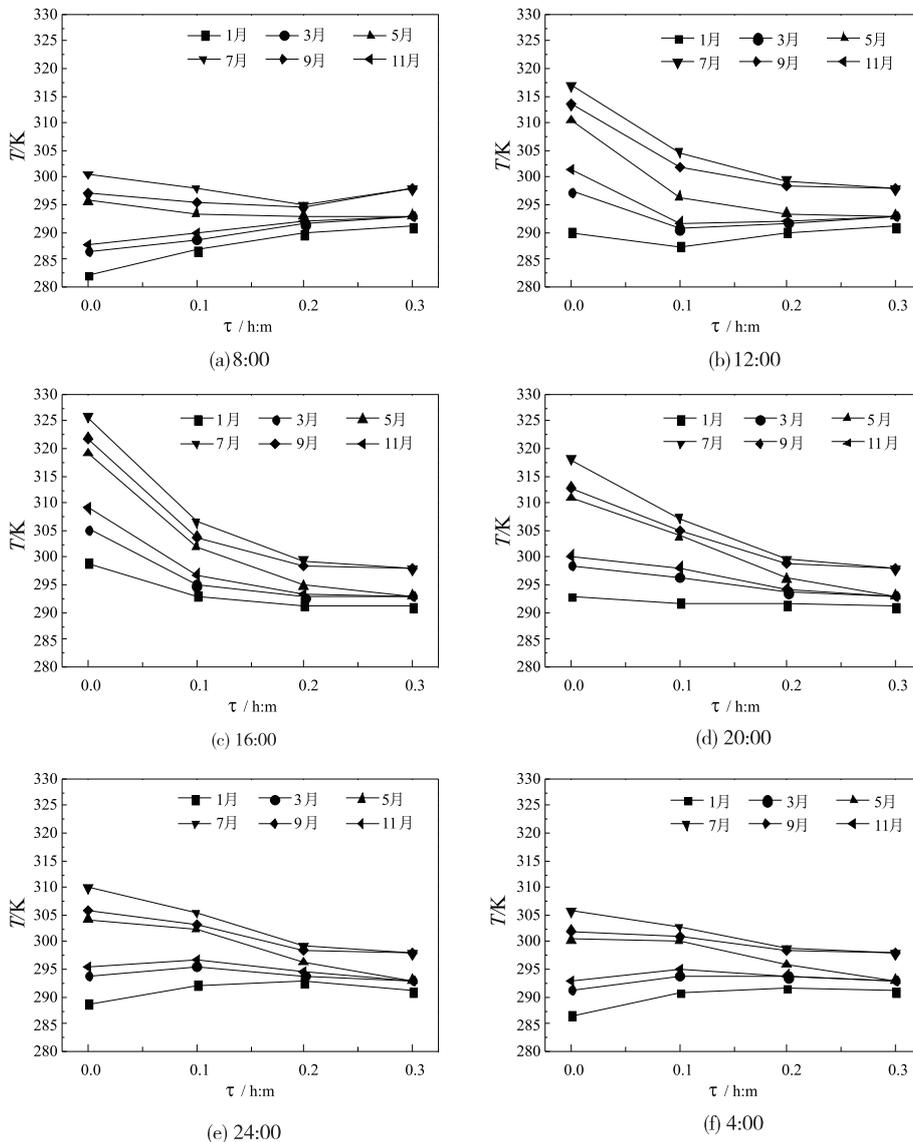


图4 各月标准气象日典型时刻南墙各典型表面平均温度

由图4可知,在各月标准日的相同时刻,建筑南墙各典型表面的温度并不相同。其中夏季7、9两个月的各典型面的温度明显要高于冬季1月以及春秋两季各典型面的温度,其中7月最高而1月最低。这是由于5、7、9这三个月室外的太阳辐射量要明显多于1、3、11这三个月,因此建筑夏季周围的环境温度也要明显高

于冬季,而南墙外表面受到对流换热的影响,导致夏季各典型表面的温度更高。南墙内各典型表面从室外到室内,温度逐渐降低。这是由于建筑南墙外表面直接受太阳辐射的影响,温度变化最为剧烈。由于围护结构的蓄热性和延时性,南墙外表面接收的太阳辐射能,一部分通过对流与辐射换热,向周边环境散失了,另一

部分则蓄集在该层围护结构中,只有很少的一部分向室内传导。

## 2.2 建筑南墙不同月份各典型面传热通量变化情况

根据公式(1)~(4)和模拟计算结果,统计各标准日南墙各典型表面传热通量的逐时值,如图5所示。图中假设热量从南墙外侧传入内侧为传热的正方向,热量从内侧传向外侧是负方向。

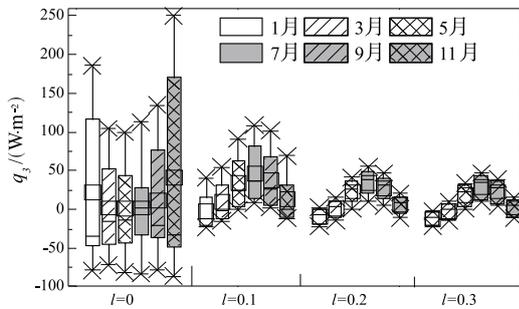


图5 各月标准气象日南墙各典型表面的传热通量

由图5可知,南昌地区一年各月标准气象日中,由于南墙外表面直接受太阳辐射和对流换热的影响,不同月份外表面的热通量有一定差距。其中11月的外表面热通量最大,而5月外表面的热通量最小。这是由于夏季时,太阳直射北半球,建筑南墙受到的太阳直射辐射很少,大部分为散射辐射,使得南墙受到的太阳辐射量很少。冬季因为太阳直射南半球,因此南墙直接受到太阳的直射辐射和散射辐射,导致南墙受到的太阳辐射量较大,因此冬季南墙受到的太阳辐射量要大于夏季。虽然南墙外表面对流换热会散失一部分热量,但远小于太阳辐射得热量。太阳辐射依然是决定围护结构外表面传热通量的重要因素。由于围护结构的蓄热性和传热的延时性,各月南墙内表面  $l=0.1$  m、 $l=0.2$  m、 $l=0.3$  m的传热量最大值出现的时间较相同月份外表面  $l=0$  m的传热通量有一定推迟,且从室外到室内,不同月份相同典型表面传热通量之间的大小差异越来越小。

## 2.3 建筑南墙日净得热总量周期性变化模型

利用南墙的蓄热性能来进行太阳能被动利用设计是工程实践中的常用做法。在北方地区,由于冬季寒冷且夏季气温也不会太高,因此只侧重南墙冬季太阳能的被动利用,而南昌属于夏热冬冷地区,因此在冬季利用南墙蓄积太阳能的同时,必须注意南墙的夏季防热及其

对全年建筑能耗的影响,所以应明确不同时间内南墙对投射到其外表面的太阳辐射能的实际吸收量。

全年各月的标准日从上午5:00到次日5:00,将这24个小时内建筑南墙外表面的热通量随时间进行积分,可以得出一天时间内建筑南墙太阳辐射净得热总量,计算见公式(5)。

$$Q_3 = \int_{5:00}^{\text{次日}5:00} q_{3nr} d\tau \quad (5)$$

式中  $Q_3$  为标准日一天时间内建筑南墙外表面的太阳辐射净得热总量,  $\text{kJ}/\text{m}^2$ 。

根据公式(5)计算得到了南昌地区全年不同月份时,建筑南墙太阳辐射净得热总量,如图6所示。

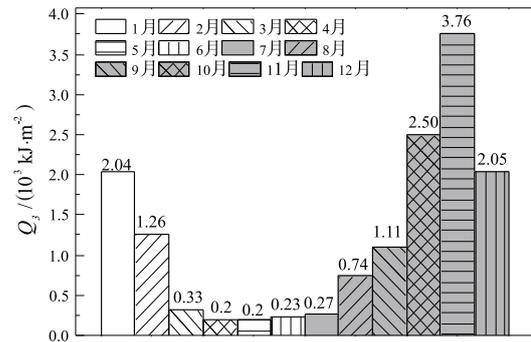


图6 全年标准日建筑南墙净得热总量

从图6可知,11月南墙外表面日净得热总量最大,为  $3.76 \times 10^3 \text{ kJm}^{-2}$ ,而5月份时的南墙外表面日净得热总量最小,为  $0.202 \times 10^3 \text{ kJm}^{-2}$ 。这是由于太阳高度角和太阳方向夹角以及气候的原因,冬季太阳直射南半球,建筑南墙直接受到太阳辐射的影响,因此11月份投射到南墙外表面的太阳辐射量很大,而夏季则恰恰相反,这时太阳直射北半球,建筑南墙不能直接受到太阳辐射的影响,因此5月份投射到南墙外表面的太阳辐射量很小。影响建筑南墙外表面日净得热总量大小的决定因素依旧是建筑南墙所吸收太阳辐射能的多少。

为了预测不同时间内南墙太阳辐射净得热总量,将全年各月标准日建筑南墙净得热总量  $Q_3$  与对应月份的数据输入1stOpt15PRO软件中进行拟合,具体拟合过程由软件自带程序算出。拟合结果如公式(6)所示。

$$Q_3 = 1.81 + 1.39x - 1.54x^2 + 0.43x^3 - 0.04x^4 - 0.001x^5 - 0.0004x^6 - 0.000017x^7 \quad (6)$$

式中,  $x$  为一年中各个月份 ( $x=1, 2, \dots, 12$ )。公式2中均方根误差 (RMSE) 为 0.082, 误差平方和 (SSE) 为

0.079, 决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.994。以上误差检验均说明公式 2 的拟合优度良好, 能很好的表示南墙太阳辐射净得热总量随时间变化的关系。

### 3 结 论

在夏热冬冷地区, 进行太阳能被动利用的同时, 必须注意全年南墙太阳能吸收对围护结构传热负荷的影响。本文以南昌地区为代表, 采用数值计算方法分析了一年中的 12 个不同月中, 标准气象日南墙非稳态传热情况, 并讨论了各月标准气象日条件下南墙太阳辐射净得热总量, 主要结论如下:

(1) 因为太阳辐射和室外气温的变化, 建筑南墙外表面上平均温度以及传热通量的变化幅度也较大, 从室外到室内, 南墙各典型表面的温度和传热通量变化幅度逐渐减小。

(2) 虽然一年中夏季室外空气温度较高, 冬季室外温度较低, 但由于太阳高度角和太阳方向角的缘故造成夏季投射到南墙上的太阳辐射能小于冬季, 因此南墙各典型表面夏季的传热通量均小于冬季。

(3) 由于太阳高度角和太阳方向角以及晴空指数等的共同影响, 一年中的 11 月份南昌地区南墙太阳辐射净得热总量最大, 5 月最小。用 1stOpt15PRO 软件拟合南墙太阳辐射净得热总量与时间的关系, 其决定系数  $R^2$  大于 0.99, 表示拟合优度良好, 因此可用上述拟合公式预测南昌地区全年各月南墙的太阳辐射净得热总量。

### 参 考 文 献:

- [1] BELLO S D. Solar radiation application[M]. AvE4Eva. 2015.
- [2] YANG X Y, LI Y G, YANG L N. Predicting and understanding temporal 3D exterior surface temperature distribution in an ideal courtyard[J]. Building and Environment, 2012, 57: 38.
- [3] 李恩, 刘加平, 杨柳. 拉萨市直接受益式太阳房居住建筑被动式设计优化研究[J]. 工业建筑, 2012, 12(2): 27.
- [4] 李恩, 杨柳, 刘加平. 拉萨市附加阳光间式住宅建筑被动式优化设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2016, 48(2): 258 - 264.
- [5] 张君, 黄振利, 李志华等. 不同保温形式墙体温度场数值模拟与分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 12: 1356.
- [6] 邹晓泉. 风速风向对不同保温形式南墙冬季太阳辐射得热的影响[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [7] 刘大龙, 刘加平, 张习龙, 等. 青藏高原气候条件下的建筑能耗分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(8): 2167 - 2172.
- [8] LIU D L, W W Q, LIU J P. Sensitivity analysis of meteorological parameters on building energy consumption[J]. Energy Procedia, 2017, 132: 634-639.
- [9] 王晓腾, 亢燕铭, 张红婴, 等. 南墙太阳能得热量关于室内外温度的回归分析[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2017, 43(3): 430 - 435.
- [10] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269.
- [11] MATHUR S R, MURTHY J Y. Coupled ordinates method for multigrid acceleration of radiation calculations[J]. Journal of thermophysics and heat transfer, 1999, 14(4): 467.
- [12] JAGER W, RANNACHER R, WARNATZ J, et al. Diffusion and transport[M]. Heidelberg, German: Springer, 2006: 495.
- [13] 张晴原, 杨洪兴. 建筑用标准气象数据手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 李红莲, 杨柳, 侯立强. 建筑能耗模拟用典型年气象参数的选取方法[J]. 太阳能学报, 2016, 37(9): 2408-2414.
- [15] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 247.
- [16] 高华根. 浅层地温观测影响因素与恒温层[J]. 华南地震, 1985(3): 98-101.
- [17] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [18] 刘晓燕, 赵军, 石成, 等. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 494-498.

- [19] 牟灵泉.地道风降温:计算与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,1982.
- [20] MIYOSHI Y,HIDAKA K,OKAYASU T,et al.Application of the constant soil temperature layer for energy-saving control of the local environment of greenhouse crops.I.Local control of the ambient environment of strawberry[J].Environment Control in Biology,2013,51(2):89-94.
- [21] MOCHIDA A,TOMINAGA Y,MURAKAMI S,et al.Comparison of various  $k-\varepsilon$  models and DSM applied to flow around a high-rise building—Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment[J].Wind Struct,2002,5(2-4):227.
- [22] GOMEZ M A,LVAREZ FEIJOO M A,COMESANA R,et al.CFD simulation of a concrete cubicle to analyze the thermal effect of phase change materials in buildings[J].Energies,2012,5:2093.
- [23] 张红婴,钟珂,刘加平.太阳辐射吸收系数对围护结构夏季净得热量的影响[J].太阳能学报,2017,38(1):156-163.
- [24] 张红婴,钟珂,刘加平.太阳辐射吸收系数对建筑物全年空调能耗的影响[J].东华大学学报:自然科学版,2017,43(2):266-273.

## Analysis of Solar Heat Gain in South Wall of Typical Weather Day

LI Jiankun, ZHANG Hongying, LV Yinjiao, CHENG Xiaoxia, FEI Hua

(School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** The energy consumption in buildings is a non-negligible part of the total energy consumption in China. To ease the current energy shortage in China and make more rational use of energy, it is necessary to fully understand the specific situation of the total net heat gain of building envelopes throughout. Using the numerical simulation method, the unsteady heat transfer process of the residential building south wall is calculated, and the average temperature and heat transfer trend of typical surfaces on the South Wall in standard weather day in different months are analyzed. The net solar heat gain of the South Wall is studied, then its periodic variation model is obtained. The determination coefficient of the model is close to 1 which shows that this model could well characterize the periodic variation of the net total solar heat gain in the south wall, which could provide a theoretical basis for estimating the annual heat transfer load in the south wall of Nanchang area.

**Key words:** typical weather day; solar radiation; south wall; radiant heat; prediction model