

周期双外扰作用下建筑墙体非稳态传热过程研究

王登甲, 刘艳峰, 马超

(西安建筑科技大学环境学院)

摘要: 建筑墙体通常受室外空气温度和太阳辐射双波动外扰联合作用。在采暖热负荷简化计算中, 往往将室外温度处理为采暖室外计算温度, 将太阳辐射通过朝向修正率进行考虑或直接作为安全项予以忽略。但是, 在太阳能建筑中, 热负荷具有动荷特性, 室外空气温度和太阳辐射也多为典型设计日逐时变化数据, 室外扰动的稳态处理方式则难以分析其对墙体的热作用。基于此, 本文建立建筑墙体非稳态传热控制方程, 利用数学分析方法对室外温度和太阳辐射边界条件扰动作用下控制方程求解, 获得分析解, 并通过实例分析展示了分析解的计算方便和实用特性。

关键词: 太阳能; 周期双外扰; 非稳态传热; 分析解;

中图分类号: TU111.1

Study on the wall unsteady heat transfer process affected by cycle double wave external disturbance

WANG Dengjia, LIU Yanfeng, MA Chao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology)

Abstract: Building envelope is generally affected by the external disturbance of outdoor air temperature and solar radiation. In the heat load simplified calculation, outdoor air temperature was often treated as the heating outdoor design temperature, and the solar radiation often considered by correction factor for orientation or as security item to be ignored. However, for the passive solar house, heat load have dynamic characteristics, the outdoor air temperature and solar radiation are also designed for a typical day hourly data change. Based on analysis above, this paper established building wall unsteady heat transfer equations, using the mathematical method solve the unsteady heat transfer equations under the boundary conditions of outdoor temperature and solar radiation disturbance, and the analytical solution was obtained. Finally, the convenient and practical features of the analysis solution were shown by the calculating example.

Key words: solar energy; cycle double wave external disturbance; unsteady heat transfer; analytical solution

0 引言

建筑围护结构通常处于室外空气温度和太阳辐射周期性外扰作用下的非稳态传热条件。在采暖热负荷简化计算中, 往往将室外温度按照采暖室外计算温度进行计算, 进而根据稳态传热方法计算围护结构得失热量, 并将太阳辐射通过朝向修正率进行附加或者直接作为安全项予以忽略^[1-3]。但在太阳能建筑热环境调控时, 其建筑热负荷具有鲜明的波动特性^[3-6], 室外空气温度和太阳辐射也多依据逐时变化数据, 室外扰动的稳态处理方式在此难以适用。虽然关于墙体非稳态传热问题的研究很多, 但是大多是数值计算^[7-8], 难以获得周期外扰作用下的墙体动态响应函数规律, 难以适用于理论分析难。

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金 (20136120120003, 20116120110006); 陕西省教育厅专项基金 (2013JK0985)

作者简介: 王登甲 (1984-), 男, 副教授, 主要研究方向: 太阳能热利用、建筑级热湿环境调控. E-mail: wangdengjia@xauat.edu.cn

因此,本研究建立建筑墙体非稳态传热控制方程,利用理论数学推导的分析,获得求得室外温度和太阳辐射双外扰作用下墙体非稳态传热分析解,提供理论分析依据。

1 周期双外扰波动规律

1.1 室外空气温度波动特性

根据文献[9]给出的典型气象年逐时气象参数数据,统计分析可获得各地区典型年室外空气温度典型日逐时数据,进行拟合分析,得到各地区室外空气温度变化函数,拟合函数与原始数据相关系数 R^2 均在 0.95 以上。室外空气温度波动规律通用方程式:

$$t_w(\tau) = \bar{t}_w + A_w \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau + \psi_o\right) \quad (1)$$

式中, \bar{t}_w : 室外平均温度, $^{\circ}\text{C}$; A_w : 室外空气温度波幅, $^{\circ}\text{C}$; ψ_o : 室外空气温度初相位, rad ; T : 室外空气温度波动周期, 24 h ; 举例给出西安、拉萨和西宁三个城市采暖期室外空气温度变化规律通式系数取值,如表 1 所。

表 1 采暖期室外空气温度通式系数取值

Tab.1 The general formula coefficient values of Heating period outdoor air temperature

| 城市 | $\bar{t}_w / ^{\circ}\text{C}$ | $A_w / ^{\circ}\text{C}$ | ψ_o / rad | T / h |
|----|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|
| 西安 | 4.1 | 5.0 | 2.3 | 24 |
| 西宁 | -3.4 | 6.5 | 2.0 | 24 |
| 拉萨 | 1.5 | 5.9 | 1.9 | 24 |

1.2 太阳辐射变化规律

同样,统计分析可得到典型日水平面和南垂直面太阳辐射逐时数据,进行拟合分析,得到各地区太阳辐射强度变化函数,拟合函数与原始数据相关系数 R^2 均在 0.96 以上。太阳辐射强度波动规律通用方程式:

$$I(\tau) = A\tau^2 + B\tau + C \quad \tau_a < \tau < \tau_b \quad (2)$$

式中, A 、 B 和 C : 拟合函数系数; 举例给出西安、西宁、拉萨水平面和南垂直面太阳辐射强度变化规律通式系数取值如表 2。

表 2 采暖期太阳辐射强度通式系数取值

Tab.2 The general formula coefficient values of Heating period solar radiation intensity

| 城市 | 位置 | A | B | C | $\tau_a < \tau < \tau_b (\text{h})$ |
|----|-----|-------|-------|---------|-------------------------------------|
| 西安 | 南墙面 | -12.6 | 338.0 | -1946.6 | $8 < \tau < 18$ |
| | 水平面 | -11.9 | 320.4 | -1832.0 | $8 < \tau < 18$ |
| 西宁 | 南墙面 | -21.5 | 553.2 | -3006.1 | $8 < \tau < 18$ |
| | 水平面 | -20.1 | 517.5 | -2818.2 | $8 < \tau < 18$ |
| 拉萨 | 南墙面 | -21.8 | 565.7 | -2974.3 | $8 < \tau < 19$ |
| | 水平面 | -22.9 | 595.7 | -3184.8 | $8 < \tau < 19$ |

例如,照射在南墙面上的太阳总辐射强度为 I_V , 辐射热量 $\rho_s I_V$ 被墙体外表吸收,另一部分热量 $(1 - \rho_s) I_V$ 被反射,被吸收的热量一部分先经过墙体导热以辐射和对流形式传向室内,另一部分主要通过对流形式散向室外。根据热网络法原理^[10], 向室内传热和向室外散热比例与其热阻有关,可分别表示为

$$q_w(\tau) = N_1 \rho_s I_V; \quad q_a(\tau) = N_2 \rho_s I_V$$

$$N_1 = \frac{R + R_{in}}{R_{out} + R + R_{in}}; \quad N_2 = \frac{R_{out}}{R_{out} + R + R_{in}}$$

70 式中, $q_w(\tau)$ 、 $q_a(\tau)$: 墙体外表面吸收的太阳辐射热量分别向室外和室内的传热量, W/m^2 ; R_{out} : 墙体外表面换热热阻, $m^2 \cdot K/W$; R_{in} : 墙体内表面放热热阻, $m^2 \cdot K/W$; R : 墙体材料导热热阻, $m^2 \cdot K/W$; ρ_s : 墙体外表面对太阳总辐射吸收率; α_w 、 α_a : 围护结构内外表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ : 材料导热系数, $W/(m \cdot K)$; l : 围护结构厚度, m 。

1.3 多层墙体当量厚度简化分析

75 墙体主要由主体结构层和保温、防渗透等辅助多层组成, 主体结构层厚度远大于辅助结构层。因此, 将辅助结构层利用当量厚度法化归为主体结构。在非稳态传热过程中, 传热特征主要决定于热惰性指标 D , 利用热惰性指标将辅助结构层进行划归, 当量厚度计算式:

$$l_i' = \frac{D_i}{D_m} \cdot l_i \frac{\sqrt{\frac{2\pi\rho_i c_i \lambda_i}{T}} \cdot \frac{l_i}{\lambda_i}}{\sqrt{\frac{2\pi\rho_m c_m \lambda_m}{T}} \cdot \frac{l_m}{\lambda_m}} \cdot l_i = \sqrt{\frac{\rho_i c_i \lambda_i}{\rho_m c_m \lambda_m}} \cdot \frac{\lambda_m l_i^2}{\lambda_i l_m} \quad (3)$$

多层墙体化归单层后总厚度为:

80
$$l = \sum l_i' + l_m \quad (4)$$

式中, ρ_i 、 c_i 和 λ_i : 某辅助结构层材料的密度、比热和导热系数, kg/m^3 、 $kJ/(kg \cdot K)$ 、 $W/(m \cdot K)$; ρ_m 、 c_m 和 λ_m : 主体结构层材料的密度、比热和导热系数, kg/m^3 、 $kJ/(kg \cdot K)$ 、 $W/(m \cdot K)$; l_i 、 l_m : 某辅助结构层和主体结构层厚度, m 。

2 外扰作用下非稳态传热的分析解

85 2.1 周期性室外温度作用

假设条件: 忽略室内空气热容, 取其温度均一恒定; 墙体内外表面换热系数恒定; 墙体传热为匀质恒物性一维传热。

建立墙体非稳态传热控制方程, 室外为周期性温度变化边界条件, 室内取采暖室内设计温度, 两侧均为第三类边界条件。对于周期热作用问题, 无初始条件。

90 墙体传热控制方程:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad 0 < x < l, \quad \tau > 0 \quad (4)$$

边界条件

$$\text{室外侧 } x=0, \quad -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = \alpha_w [t_w(\tau) - t(x, \tau)]$$

$$\text{室内侧 } x=l, \quad -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = \alpha_a [t(x, \tau) - t_a]$$

95 式中, a 、 λ : 墙体热扩散系数和导热系数, m^2/s 、 $W/(m \cdot K)$; α_w 、 α_a : 墙体外表面和内表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; l : 墙体厚度, m 。

由于室外空气温度周期变化规律的平均值 \bar{t}_w 和室内空气温度 t_a 都为恒定值, 可将墙体非稳态传热过程分解为两过程, 如下所示。

(1) 室外平均温度作用下的稳态传热过程:

100 室外空气温度表示为:

$$t_w(\tau) = \bar{t}_w + \Delta t_w(\tau) \quad (5)$$

内表面温度恒定为:

$$\bar{t}(l) = \bar{t}_w - \frac{\bar{t}_w - t_a}{R} R_l$$

式中: $R_l = \alpha_w^{-1} + \frac{l}{\lambda}$, $m^2 \cdot K/W$;

105 (2) 室外谐波热作用下周期性传热过程:

$$\Delta t_w(\tau) = A_w e^{i(\frac{2\pi}{T}\tau + \psi_o)} \quad (6)$$

由周期热作用可知^[11], 墙体内各点温度都有式(6)的形式, 由于墙体蓄热系数、热惰性指标的作用, 墙体内各处温度波相比室外空气温度波有波幅的衰减和相位的延迟。谐波热作用下, 墙体内温度分布规律为:

$$110 \quad \vec{t}(x, \tau) = \frac{A_w}{\beta_{cx}} e^{i(\frac{2\pi}{T}\tau + \psi_o)}$$

其中, β_{cx} : 复数衰减量。

内表面温度动态变化规律为:

$$\vec{t}(l, \tau) = \frac{A_w}{\beta_{cl}} e^{i(\frac{2\pi}{T}\tau + \psi_o)}$$

115 式中, β_{cl} : 围护结构的总复数衰减量; 可表示为: $\beta_{cl} = \beta_c \beta_l$; β_c 、 β_l 分别为围护结构外空气边界的复数衰减量和围护结构的复数衰减量;

其中:

$$\begin{cases} \beta_c = \frac{\alpha_w + S\sqrt{i}}{\alpha_w} \\ \nu_c = \frac{\alpha_w + Y}{\alpha_w} \\ \varphi_c = \text{tg}^{-1} \frac{Y}{Y + \alpha_w \sqrt{2}} \end{cases} \quad \begin{cases} \beta_l = \exp(RS\sqrt{i} - i\varphi_0) \frac{S + \alpha_a}{S + Y} \\ \nu_l = \exp \frac{RS}{\sqrt{2}} \frac{S + \alpha_a}{S + Y} \\ \varphi_l = \frac{RS}{\sqrt{2}} - \varphi_0; \quad \varphi_0 = \text{tg}^{-1} \frac{\alpha_a}{\alpha_a + S\sqrt{2}} \end{cases}$$

式中, R : 墙体材料热阻, $m^2 \cdot K/W$; S : 墙体材料蓄热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; Y : 材料表面蓄热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。 ν 、 φ : 室外空气谐波通过墙体后的振幅衰减度、相位延迟角, deg。

120 墙体内表面温度变化规律为:

$$\vec{t}(l, \tau) = A_w \nu_{cl}^{-1} e^{i[\frac{2\pi}{T}(\tau - \varphi_{cl}) + \psi_o]}$$

将稳态和谐波两热作用过程进行叠加, 得墙体内表面温度变化规律为:

$$t(l, \tau) = \bar{t}(l) + \vec{t}(l, \tau) = \bar{t}_w - \frac{\bar{t}_w - t_a}{R} R_l + A_w \nu_{cl}^{-1} e^{i[\frac{2\pi}{T}(\tau - \varphi_{cl}) + \psi_o]}$$

根据 Euler's 公式展开上式, 取其实部得墙体内表面温度变化规律为:

125
$$t(l, \tau) = \bar{t}_w - \frac{\bar{t}_w - t_a}{R} R_l + A_w v_{cl}^{-1} \cos \left[\frac{2\pi}{T} (\tau - \varphi_{cl}) + \psi_o \right]$$

式中: $v_{cl} = \exp \left(\frac{RS}{\sqrt{2}} \right) \cdot \frac{\alpha_w + Y}{\alpha_w} \cdot \frac{S + \alpha_a}{S + Y}$; $\varphi_{cl} = \frac{T}{2\pi} \left(\operatorname{tg}^{-1} \frac{Y}{Y + \alpha_w \sqrt{2}} + \frac{RS}{\sqrt{2}} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\alpha_a}{\alpha_a + S\sqrt{2}} \right)$

得墙体内表面热流密度变化规律为:

$$q(l, \tau) = K (\bar{t}_w - t_a) + A_w \Phi S \exp \left(-\frac{RS}{\sqrt{2}} \right) \cos \left[\Theta + \frac{\pi}{4} \right] \quad (7)$$

式中, $\Phi = \left[\frac{\alpha_w + Y}{\alpha_w} \cdot \frac{S + \alpha_a}{S + Y} \right]^{-1}$; $K = \left(\alpha_w^{-1} + \frac{l}{\lambda} + \alpha_a^{-1} \right)^{-1}$;

130
$$\Theta = \frac{2\pi}{T} \tau + \psi_o - \left(\operatorname{tg}^{-1} \frac{Y}{Y + \alpha_w \sqrt{2}} + \frac{RS}{\sqrt{2}} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\alpha_a}{\alpha_a + S\sqrt{2}} \right)$$

2.2 周期性太阳辐射作用

从前述分析得知, 南墙围护结构外表面太阳辐射得热量传入室内部分为:

$$q_a(\tau) = N_2 \rho I_V \quad (8)$$

其中: $N_2 = \frac{R_{out}}{R_{out} + R + R_{in}}$, 则 $q_a(\tau) = \frac{\rho R_{out}}{R_{out} + R + R_{in}} (A\tau^2 + B\tau + C)$, $\tau_a < \tau < \tau_b$

135 式中, τ_a 、 τ_b : 日出、日落时刻, h。

假设条件与 2.1 节相同。建立墙体传热控制方程, 设置边界条件。已知太阳辐射作用为周期变化函数, 周期为 24h, 将太阳辐射对墙体传热的影响在一个周期内分为两个阶段考虑, 第一阶段: 有太阳辐射作用的昼间, 即在 $\tau_a < \tau < \tau_b$, 墙体外表面边界条件为太阳辐射得热量传入室内部分, 属于第二类热流边界条件, 由于研究太阳辐射作用对墙体内温度波动特性的影响, 因此, 室内设置为零度, 墙体内表面为第三类边界条件。第二阶段: 无太阳辐射作用的夜间内, 即 $\tau_b < \tau < \tau_a'$, 其中 τ_a' 指的是第二天日出时刻, 此时墙体内、外表面均为第三类边界条件, 两侧空气温度恒设置为零度。第一阶段的初始条件为温度恒定且等于零度, 第二阶段的初始条件为第一阶段末了时刻墙体内部温度分布状况。

(1) 第一阶段: 墙体传热控制方程:

145
$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad 0 < x < l, \quad \tau_a < \tau < \tau_b \quad (9)$$

初始条件: $\tau = \tau_a$ 时, $t_{\tau_a} = 0 \quad 0 < x < l$

边界条件: $x = 0$, $-\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = q_a(\tau) \quad \tau_a < \tau < \tau_b$

$$x = l, \quad \lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} + \alpha_a t(x, \tau) = 0 \quad \tau_a < \tau < \tau_b$$

150 通过变量代换将非齐次边界齐次化, 引入函数 $w(x, \tau)$, $t(x, \tau) = v(x, \tau) + w(x, \tau)$ 引入后原问题具有齐次边界条件。

通过求解得墙体温度分布为:

$$t(x, \tau) = -\frac{q_a(\tau)}{\lambda} x + \left(\frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \right) q_a(\tau) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{L_n^2} \left[\int_{\tau_a}^{\tau} \int_0^l f(\xi, t) e^{-a\beta_n^2(\tau-t)} \cos \beta_n \xi d\xi dt \right] \cos \beta_n x$$

墙体热流分布为:

$$q(x, \tau) = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = q_a(\tau) - \lambda \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{L_n^2} \left[\int_{\tau_a}^{\tau} \int_0^l f(\xi, t) e^{-a\beta_n^2(\tau-t)} \cos \beta_n \xi d\xi dt \right] \beta_n \sin \beta_n x$$

155 其中, β_n 为下超越方程形式特征方程一组特征值,

$$\tan \beta l = \frac{\alpha_a}{\lambda \beta} \quad (10)$$

由第一阶段墙体温度分布规律可得终了时刻 $\tau = \tau_b$ 墙体温度分布, 由函数定义可知太阳辐射进入室内热量 $q_a(\tau)$ 在 τ_b 及以后时刻为零, 则:

$$t(x, \tau_b) = t_{\tau_b}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{L_n^2} \left[\int_{\tau_a}^{\tau_b} \int_0^l f(\xi, t) e^{-a\beta_n^2(\tau_b-t)} \cos \beta_n \xi d\xi dt \right] \cos \beta_n x$$

160 第一阶段终了时刻围护结构内温度分布 $t(x, \tau_b)$ 即为第二阶段温度初始条件。

(2) 第二阶段: 墙体传热控制方程相同, 初始条件为:

$$\tau = \tau_b \text{ 时, } t(x, \tau_b) = t_{\tau_b}(x) \quad 0 < x < l$$

边界条件:

$$x = 0, -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} + \alpha_w t(x, \tau) = 0 \quad \tau_b < \tau < \tau_a'$$

$$165 \quad x = l, \quad \lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} + \alpha_a t(x, \tau) = 0 \quad \tau_b < \tau < \tau_a'$$

上述数学描述可根据分离变量法直接求解。其特征函数为:

$$X_n(x) = \beta_n \cos(\beta_n x) + H_1 \sin(\beta_n x)$$

$$\text{式中: } H_1 = \frac{\alpha_w}{\lambda}, \quad \xi_n = \beta_n l;$$

其中, ξ_n 为下超越方程形式特征方程的一组特征值;

$$170 \quad tg(\xi_n) = \frac{\xi_n (Bi_1 + Bi_2)}{\xi_n^2 - Bi_1 Bi_2}$$

$$\text{式中: } Bi_1 = \frac{\alpha_w l}{\lambda}, \quad Bi_2 = \frac{\alpha_a l}{\lambda};$$

$$\text{得非稳态导热问题的温度分布规律为: } t(x, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n X_n(x) \exp(-\xi_n^2 Fo) \quad (11)$$

$$\text{式中: } C_n = \frac{1}{N_n^2} \int_0^l t_{\tau_b}(x) X_n(x) dx; \quad \frac{1}{N_n^2} = \frac{2}{l} \left[(\xi_n^2 + Bi_1^2) \left(1 + \frac{Bi_2}{\xi_n^2 + Bi_2^2} \right) + Bi_1 \right]^{-1};$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} = \frac{a(\tau - \tau_b)}{l^2}$$

175 代入式 (11) 得:

$$\begin{aligned} t(x, \tau) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{N_n^2} \int_0^l t_{\tau_b}(x) X_n(x) dx X_n(x) \exp(-\xi_n^2 Fo) \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N_n^2} \int_0^l t_{\tau_b}(x) [\beta_n \cos(\beta_n x) + H_1 \sin(\beta_n x)] dx \times \exp(-\xi_n^2 Fo) [\beta_n \cos(\beta_n x) + H_1 \sin(\beta_n x)] \end{aligned}$$

墙体热流密度分布规律为:

$$q(x, \tau) = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x}$$

$$180 \quad = \lambda \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N_n^2} \int_0^l t_{\tau_b}(x) [\beta_n \cos(\beta_n x) + H_1 \sin(\beta_n x)] dx \times \exp(-\xi_n^2 Fo) [\beta_n^2 \sin(\beta_n x) - H_1 \beta_n \cos(\beta_n x)]$$

综合太阳辐射第一阶段和第二阶段热作用结果, 得周期内 ($\tau_a < \tau < \tau_a'$) 墙体内表面温度和热流的变化规律。

墙体内表面温度变化规律:

$$\tau_a < \tau < \tau_b \quad t(l, \tau) = \frac{q_a(\tau)}{\alpha_a} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{L_n^2} \left[\int_{\tau_a}^{\tau} \int_0^l f(\xi, t) e^{-a\beta_n^2(\tau-t)} \cos \beta_n \xi d\xi dt \right] \cos \beta_n l$$

$$185 \quad \tau_b < \tau < \tau_a'$$

$$t(l, \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N_n^2} \int_0^l t_{\tau_b}(x) [\beta_n \cos(\beta_n x) + H_1 \sin(\beta_n x)] dx \times \exp(-\xi_n^2 Fo) [\beta_n \cos(\beta_n x) + H_1 \sin(\beta_n x)]$$

墙体内表面热流变化规律:

$$\tau_a < \tau < \tau_b \quad q(l, \tau) = q_a(\tau) - \lambda \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{L_n^2} \left[\int_{\tau_a}^{\tau} \int_0^l f(\xi, t) e^{-a\beta_n^2(\tau-t)} \cos \beta_n \xi d\xi dt \right] \beta_n \sin \beta_n l$$

$$\tau_b < \tau < \tau_a' \quad q(l, \tau) = \lambda \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N_n^2} \int_0^l t_{\tau_b}(x) [\beta_n \cos(\beta_n x) + H_1 \sin(\beta_n x)] dx$$

190 3 分析解应用分析

选取西安市采暖典型日, 通过上述分析解计算普通 240mm 南外砖墙在周期室外空气温度和周期太阳辐射作用下墙体内表面温度及热流密度日变化规律, 并获得其日最大值及最大值及其出现时刻, 采暖室内设计温度 $t_a=18^\circ\text{C}$ 。

(1) 周期室外空气温度波作用

195 室外温度变化规律:

$$t_w(\tau) = \bar{t}_w + A_w \cos\left(\frac{2\pi}{T} \tau + \psi_o\right)$$

其中: $\bar{t}_w = 4.1^\circ\text{C}$; $A_w = -5.0^\circ\text{C}$; $\psi_o = 0.9\text{rad}$; $T = 24\text{h}$;

计算参数确定为: 墙体外表面对流换热系数 α_w : $23.2\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 墙体内表面对流换热系数 α_a : $8.7\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 粘土砖密度 ρ : $1800\text{ kg}/\text{m}^3$; 粘土砖导热系数 λ : $0.81\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

200 粘土砖比热容 c : $0.88\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 粘土砖蓄热系数 (24h); S : $9.65\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

赋值计算得内表面温度和热流变化规律分别为:

$$t(l, \tau) = 14.5 + 0.48 \cos\left(\frac{\pi}{12} \tau + 0.23\right); \quad Q(l, \tau) = -46.3 + 8.3 \cos\left(\frac{\pi}{12} \tau + 1.02\right)$$

将墙体内表面温度变化及热流规律表达式绘制如图 1 所示, 热流密度为负值, 表示与坐标轴方向相反, 即热流方向由室内指向室外, 反之为正。墙体内表面热流及温度极值及出现时刻如表 3。

205

(2) 周期室外空气温度波作用

南外表面太阳辐射得热传入室内部分为: $q_a(\tau) = \frac{\rho_s R_{out}}{R_{out} + R + R_m} (A\tau^2 + B\tau + C) \quad \tau_a < \tau < \tau_b$

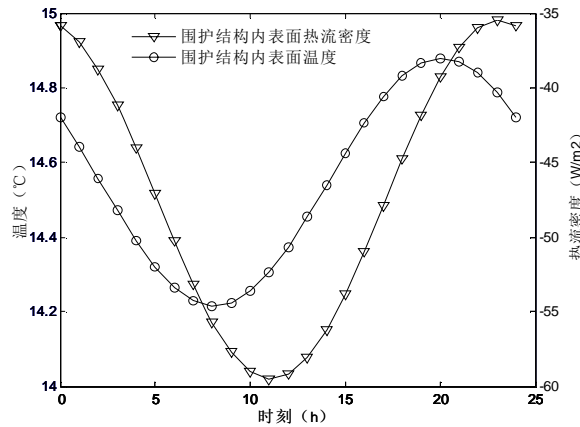


图 1 墙体内表面热流密度及温度变化规律

Fig.1 The internal surface temperature and heat flux density

表 3 墙体内表面热流密度和温度极值及出现时刻

Tab.3 The extreme value and occur moments of the internal surface temperature and heat flux density

| | 内表面 温度(°C) | 出现 时刻 | 内表面热流 密度(W/m ²) | 出现 时刻 |
|------|---------------|----------|--------------------------------|----------|
| 日最大值 | 14.98 | 23:07 | -54.6 | 08:06 |
| 日最小值 | 14.02 | 11:07 | -38 | 20:06 |
| 日平均值 | 14.50 | — | -46.3 | — |

式中, A 、 B 和 C : 拟合函数系数, 分别为 $-12.6W/(m^2 \cdot h^2)$, $338W/(m^2 \cdot h)$, $-1946.6 W/m^2$. 取值区间 $\tau_a < \tau < \tau_b$, τ_a 、 τ_b 分别为 8:00 和 18:00。

215 墙体外表面对太阳辐射的吸收率 $\rho_s=0.75^{[12]}$; 其余计算参数同前。得太阳辐射作用下内表面温度变化规律及热流密度变化规律, 对一个周期 (24h) 内进行分段给出。

第一阶段: $8 < \tau < 18$

$$\text{赋值计算得: } t(l, \tau) = -0.103\tau^2 + 6.283\tau + 103e^{(0.346-0.0414\tau)} - 148.4$$

$$q(l, \tau) = -0.897\tau^2 - 6.554\tau - 896.058e^{(0.3465-0.0414\tau)} + 1013.7$$

220 计算得墙体内表面温度和热流密度变化规律如图 2 所示, 第一阶段末了时刻墙体内部温度分布如图 3 所示。

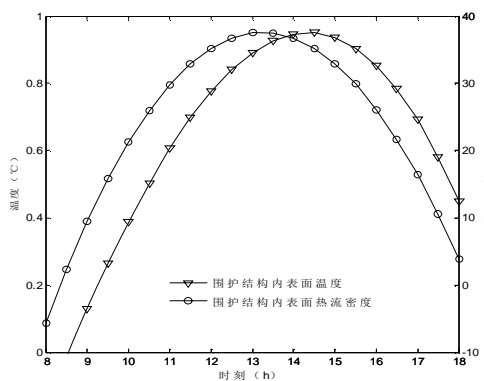


图 2 太阳辐射作用第一阶段内表面温度及热流密度 Fig.2 The internal surface temperature and heat flux density during the first stage of the solar radiation effect

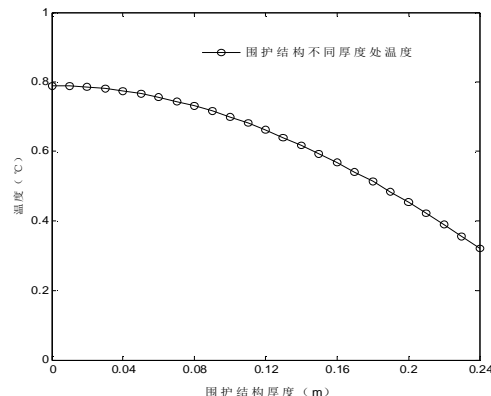


图 3 第一阶段末了时刻墙体内部温度分布

225

分析时, 将室外空气温度与太阳辐射对墙体传热的影响分开考虑, 则图中墙体内表面温

度的日波动较小，仅为太阳辐射的单独影响，如分析室外空气温度与太阳辐射周期双波外扰的联合影响则需对两部分进行叠加。

第二阶段：初始条件为第一阶段末了时刻墙体内部温度分布为：

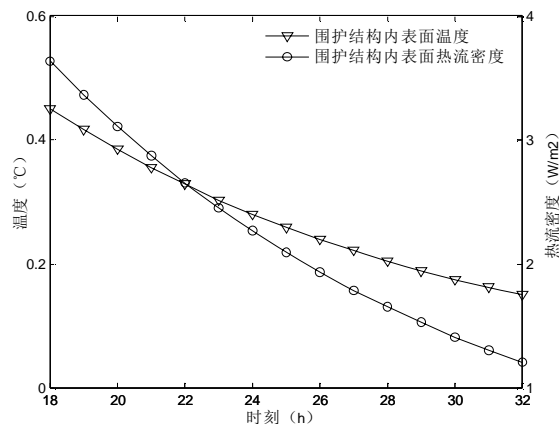
230 $t_{\tau_0}(x) = 0.7889 \cos(4.7954x)$ ，如图 3 所示。

赋值计算得：

$$t(l, \tau) = 0.4502e^{(1.4202-0.0789\tau)} \quad 18 < \tau < 8$$

$$q(l, \tau) = 3.6390e^{(1.4202-0.0789\tau)} \quad 18 < \tau < 8$$

计算得墙体内表面热流及温度变化规律如图 4 所示，其中至次日 8:00 用 32 表示。



235

图 4 太阳辐射作用第二阶段内表面温度及热流密度

Fig.4 The internal surface temperature and heat flux density during the second stage of the solar radiation effect

4 结语

(1) 对《中国建筑热环境分析专用气象数据集》中典型气象年逐时气象参数数据进行统计，获得典型年采暖期室外空气温度及太阳辐射周期双波动规律。

240

(2) 利用数学分析方法研究墙体在室外空气温度和太阳辐射扰动作用下非温态传热过程，分别获得周期双外扰作用下墙体温度和热流密度分布的分析解。

(3) 通过实例计算，体现了分析解结果计算方便和实用的特性。

[参考文献] (References)

245 [1] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版, 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
 [2] 中华人民共和国国家标准, GB50736-2012.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
 [3] 路延魁. 空气调节设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
 [4] 李元哲. 被动太阳房热工设计手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
 250 [5] 中国建筑科学研究院, (GB 50495-2009). 太阳能供热采暖工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
 [6] 王登甲. 间歇采暖建筑热过程及设计优化研究[D]. 西安建筑科技大学博士学位论文, 2012, 03.
 [7] 陈友明. 建筑围护结构非稳态传热分析新方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 [8] 陶文铨. 数值传热学(第二版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
 255 [9] A.B.Luikov, 任兴季, 张志清译. 建筑热物理理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
 [10] 方贤德. 被动式太阳房的通用模拟程序[J]. 太阳能学报, 1994, 15(4): 363-367.
 [11] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
 260 [12] 刘加平. 建筑物理(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.