



架空炕采暖作用下建筑热过程的模拟与分析

大连理工大学 庄智[☆] 李玉国 陈滨

摘要 建立了架空炕采暖作用下建筑热过程的耦合流动和传热模型,并对控制方程进行数值求解。通过实验数据验证,提供了一种准确地分析架空炕采暖系统热性能及预测室内温度的计算方法,可为架空炕采暖系统的优化设计及此种住宅的能耗分析提供工具和指导。

关键词 农村住宅 架空炕采暖系统 建筑热过程 数值模拟

Simulation and analysis of the thermal process in a house with an elevated Chinese kang heating system

By Zhuang Zhi[★], Li Yuguo and Chen Bin

Abstract Establishes a coupled heat transfer and airflow model, and numerically solves the control equation. Provides a method for simulating the thermal performance of the kang heating system and predicting indoor air temperature, and validates it by the field measurement data. Concludes that this method can be used as reference for the optimal design and energy consumption evaluation.

Keywords rural residence, elevated kang heating system, building thermal process, numerical simulation

★ Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning Province, China

①

0 引言

火炕在我国北方农村地区的住宅中广为使用,约有 1.7 亿人采用这种采暖方式。火炕是一种典型的热质蓄热采暖技术,充分利用炊事余热,有效地改善室内热环境,完全或部分满足建筑热负荷需求。在其他国家也存在着类似的采暖系统,如韩国的 ondol^[1],古罗马的 hypocaust^[2]等。然而,只有中国的火炕至今仍被大量使用,据辽宁省农村能源办公室统计,2004 年底全国大约有 6 685 万铺炕,其中最新的结构形式是架空炕^[3]。

火炕在 2 000 多年的发展过程中创造了一些良好的结构和搭砌经验,但仍存在着热效率低、不好烧、炕面温度不均、凉得快等问题^[4];加之农村住宅外墙、门窗等外围护结构的保温性能和气密性普遍较差,建筑热损失严重,使火炕无法实现应有的采暖效果。从而在一定程度上加深了人们对火炕的误解,进而废弃火炕,采用土暖气或小锅炉等方式来供暖,导致商品能源消耗增加。因此,具有巨大使用数量及经济耗能的火炕将会对我国农村能

源需求产生很大的影响,预计在未来几十年中仍会继续使用。

因此,对火炕进行科学认识,研究火炕的供热机理及其对室内热环境的影响作用,从结构和性能等方面加以提高,有利于充分利用炊事余热,节约资源消耗;有助于改善住宅室内环境,提高广大农民的安全和健康水平。据调查发现,目前除了一些有限的实测研究^[5-7],对于火炕及其作用下建筑热状况的科学分析无人问津。基于此,本文针对新型架空炕系统及整体建筑建立物理和数学模型,提出了分析架空炕作用下建筑热过程的模拟计算方法。

1 模拟的主要问题及方法

火炕作用下建筑热过程模拟的主要任务是通过建立描述影响室内热环境的炕、围护结构等部件的物理及数学模型,分析室内温度随着室外条件及

①☆ 庄智,男,1982 年 9 月生,在读博士研究生
116024 大连理工大学建筑环境与新能源研究所
(0411) 84706371
E-mail: zhgzhi@gmail.com
收稿日期:2007-10-15

供热量的变化情况,从理论上量化各部件对室内热环境的影响,为确定室内热环境达到舒适状态下所需的热量及火炕运行策略提供依据。开发和实施模拟的最终目的是提出能够分析整合炕系统的建筑能耗及室内空气温度的计算工具。

采用建筑能耗模拟,可以得到建筑逐时负荷变化,用于系统评估及优化,这类方法主要有热平衡法(heat balance method)^[8-10]和加权系数法(weighting factor method)^[11]等,文献[12]针对这两种方法进行了比较。本文采用热平衡法,分别建立了架空炕系统、围护结构及室内空气系统热平衡控制方程,并进行联立求解。

2 架空炕建筑热过程计算模型

图 1 所示为一典型使用架空炕采暖的农村住宅卧室,其热过程主要包括 3 个方面:外扰(室外温度、太阳辐射、风速等)通过围护结构的热传递,内扰(主要是架空炕、人员、设备等)的热传递和室内外通风换热。本文将重点分析架空炕系统的传热和流动过程。

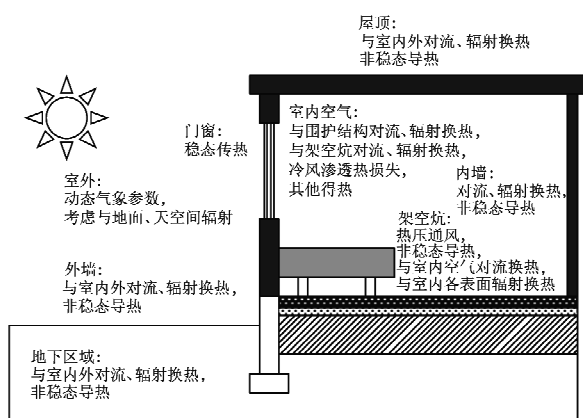
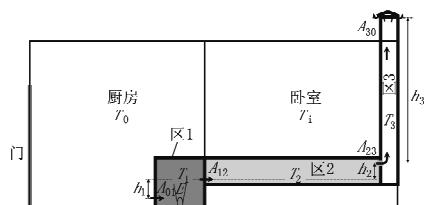


图 1 架空炕采暖建筑物理模型示意图

2.1 架空炕系统传热与流动模型

2.1.1 架空炕工作原理分析

架空炕作为室内主要的采暖设备,充分利用了炉灶出口烟气的余热,见图 2,其换热过程类似于建筑自然通风。在炊事时,厨房内空气在热压作用



总流动阻力,包括各区的沿程阻力以及由于流向或截面变化引起的局部阻力之和,如炕内挡烟墙、炕板支柱等。则有

$$\Delta p = \zeta_1 \frac{m^2}{2\rho_1 A_{01}^2} + \zeta_2 \frac{m^2}{2\rho_2 A_{01}^2} + \zeta_3 \frac{m^2}{2\rho_3 A_{01}^2} \quad (2)$$

式中 ζ_i 为区 i 内当量阻力系数; A_{01} 为炉灶进口面积, m^2 ; m 为气流的质量流率, kg/s 。

2.1.3 热平衡方程

系统各区的热平衡方程分别为

$$\text{区 1: } E + mc_a(T_0 - T_1) = 0 \quad (3)$$

$$\text{区 2: } mc_a(T_1 - T_2) + h_{ks}A_k(T_{ki} - T_2) = 0 \quad (4)$$

$$\text{区 3: } mc_a(T_2 - T_3) = 0 \quad (5)$$

式(3)~(5)中 T_0 为灶进口空气温度, K ; c_a 为空气的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; A_k 为炕板内表面面积, m^2 ; E 为考虑锅灶散热后的热源强度, W ; T_i 为区 i 内空气温度, K ; T_{ki} 为炕板内表面温度, K ; h_{ks} 为炕板内表面的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

炕通过炕板以对流和辐射方式向室内散热,由于炕板的几何尺寸与传热特点,简化其传热过程为一维非稳态导热,完整的数学描述为

$$\rho_k c_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2} \quad (6)$$

$$\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \Big|_{\text{out}} = h_{ko}(T_a - T_{ko}) + q_{MRT}^k \quad (7)$$

$$-\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \Big|_{\text{in}} = h_{ks}(T_2 - T_{ki}) \quad (8)$$

式(6)~(8)中 x 为厚度方向坐标; t 为时间; ρ_k 为炕板材料密度, kg/m^3 ; λ_k 为炕板导热系数, $W/(m \cdot K)$; c_k 为炕板比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; T_a 为室内空气温度, K ; T_k 为炕板节点温度, K ; T_{ko} 为炕板外表面温度, K ; h_{ko} 为炕板外表面的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; q_{MRT}^k 为炕板外表面辐射换热强度, W/m^2 。

2.2 围护结构传热计算

2.2.1 墙体和屋顶传热模型

对于由多层材料组成的围护结构(如墙体、屋面等)的非稳态传热量计算,可求解一定边界条件和初始条件下的一维非稳态导热微分方程,即

$$\rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (9)$$

$$\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \Big|_{\text{out}} = q_s + q_R + q_{\text{conv}} + q_{\text{LWR}} \quad (10)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \Big|_{\text{in}} = h_{wi}(T_a - T_{wi}) + q_{MRT_w} \quad (11)$$

式(9)~(11)中 ρ_w 为材料密度, kg/m^3 ; λ_w 为材料导热系数, $W/(m \cdot K)$; c_w 为材料比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; T_w 为围护结构节点温度, K ; T_{wi} 为围护结构内表面温度, K ; q_s 为围护结构外表面所接受的太阳辐射热量,包括太阳直射辐射量和天空散射辐射量, W/m^2 ; q_R 为围护结构外表面所吸收地面反射辐射量, W/m^2 ; q_{conv} 为围护结构外表面与室外空气间的对流换热量, W/m^2 ; q_{LWR} 为围护结构外表面与周围环境间有效长波辐射换热量, W/m^2 ; h_{wi} 为围护结构内表面的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; q_{MRT_w} 为围护结构内表面的辐射换热强度, W/m^2 。

2.2.2 地板传热模型

农村住宅大多是接地单层结构(见图 1),室内热量会通过土壤向室外散失。建筑物地下区域传热是个多维动态的过程,受室内外条件、土壤物性、地板结构及保温状况等因素影响。地面动态传热机理比较复杂,许多学者曾针对边界条件的确定、多维分析及地下土壤物性(如材料、含水量等)进行不同程度的简化。对于室外地表面与空气间边界条件,在实际分析中可选择简单的对流换热条件;对于室内空气与地板表面间边界条件,大多数计算认为地板上方室内空气温度均匀分布;对于地板经由土壤的多维传热计算,为了减少计算量且保证精度要求,文献[14]提出一个地板的特征尺寸 B' 用于二维模型计算以简化三维问题,其定义如下:

$$B' = \frac{2A_f}{P_f} \quad (12)$$

式中 A_f 为地板面积, m^2 ; P_f 为地板周长, m 。

本文基于特征尺寸对地板和地基传热计算采用二维动态分析。考虑到建筑对地下温度场的影响程度,将土壤区域分为两部分:一是近区,即建筑地面传热影响较大的区域;另一个是远区,即建筑地面传热影响较小的区域,见图 3。其中,近区也是模型的计算区域,其尺寸^[15]在深度方向上可取 0.7~1.0 个建筑宽度,在水平方向上为建筑物两侧 1 倍于建筑物宽度的范围内。图中所示 F_1 和

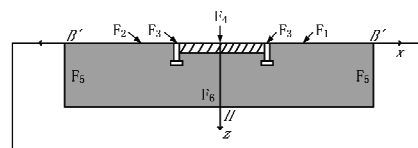


图 3 地下区域传热模型

F_2 为室外地面与周围环境换热边界, F_3 和 F_5 为绝热边界, F_4 为地板表面与室内环境换热边界, F_6 为深层土壤温度边界。

对于其他围护结构, 如门窗, 由于其热容量较小, 不考虑其蓄热作用, 采用稳态计算方法计算传热量; 透过玻璃窗的太阳辐射得热量将在辐射换热计算中考虑。

2.3 室内外通风量计算

农村住宅中一般没有专门的通风设备, 故不考虑机械通风; 自然通风一般是通过门窗的开启或缝隙渗透产生的, 自然通风量的大小与室内外空气温度、风速、围护结构气密性等多个因素有关。目前有很多专门的自然通风计算程序, 如 CONTAM, COMIS, MIX 等。本文采用文献[16]提出的 MIX 模型来计算自然通风量。MIX 模型为多区建筑的自然通风量预测模型, 在已知各区的温度条件下, 通过联立各区流动和压力方程迭代求解得到每个开口风量, 进而能够确定室内外通风引起的换热量。

2.4 辐射换热计算

表面之间的净辐射取决于表面温度、表面间的位置关系及表面的材料物性, 分为短波辐射(如阳光、灯光等)和长波辐射(如墙壁、人员、家具等)两种。本文中短波辐射方面主要考虑透过玻璃窗的太阳辐射得热, 长波辐射方面主要考虑室内空间各表面间的辐射换热。

2.4.1 短波辐射计算

透过玻璃窗的太阳辐射得热被围护结构内表面或家具表面所吸收, 再以辐射或对流方式向室内散热。通常采用三种分配方式处理这部分能量: 1) 入射阳光被地板表面吸收; 2) 入射阳光被某一面墙吸收; 3) 入射阳光均匀地被墙体和地板表面吸收。文献[10]比较了三种入射阳光分配方式对冷负荷的影响, 得出第一种分配方式优于其他两种,

$$\rho_a V_r c_a \frac{dT_a}{dt} = q_{\text{wall}} + q_{\text{roof}} + q_{\text{slab}} + q_{\text{kang}} + q_{\text{win}} + q_{\text{door}} + q_{\text{vent}} \quad (15)$$

式中 V_r 为建筑室内容积, m^3 ; q_{wall} 为墙体向室内的散热量, W ; q_{roof} 为屋顶向室内散热量, W ; q_{slab} 为地板表面向室内的散热量, W ; q_{kang} 为炕体向室内的散热量, W ; q_{win} 为通过窗户的散热量, W ; q_{door} 为通过门的散热量, W ; q_{vent} 为室外通风引起的换热量, W 。

将以上各式联立, 则构成了完整的架空炕采暖

在很多场合与实际相符。为此, 本文采取此种方式考虑透过玻璃窗的太阳辐射得热, 则单位面积地板接受的太阳辐射得热量 HG' 为

$$HG' = \alpha_s (I_{\text{Dk}} \tau_{\text{Dk}} + I_{\text{di}} \tau_{\text{di}}) \frac{A_{\text{wd}}}{A_f} \quad (13)$$

式中 α_s 为地板表面吸收率; I_{Dk} 为南向直射太阳辐射照度, W/m^2 ; τ_{Dk} 为直射太阳辐射透过率; I_{di} 为南向散射太阳辐射照度, W/m^2 ; τ_{di} 为散射太阳辐射透过率; A_{wd} 为窗户的有效面积, m^2 。

2.4.2 长波辐射计算

对于室内空间各表面间的长波辐射换热计算, 有多种计算方法, 如精确角系数下均匀辐射法、Hottel 总灰体交换系数法、平均辐射温度(MRT)法及其改进形式(MRTbal 和 MRTnet)和简单的线性化辐射换热系数法等。这些方法在复杂性和精确性两方面有所取舍, 文献[10]通过计算比较上述方法, 认为 MRT 法由于不需精确计算角系数, 且考虑建筑内部表面特征, 在建筑能耗分析中具有一定优势; 但由于近似计算角系数及平均辐射温度将导致净总辐射量不守恒的问题, 可采用修正后的 MRTbal 法, 通过计算净总辐射不守恒量, 将其均匀分配给各个表面以保证能量守恒。对于任意表面 i 有

$$q_{\text{MRT}}^i = \sigma F_{\text{MRT},i} (T_{\text{MRT},i}^4 - T_{s,i}^4) - R_{\text{Bal},i} \quad (14)$$

式中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常量, $5.6 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; $F_{\text{MRT},i}$ 为表面 i 对应的辐射换热角系数; $T_{\text{MRT},i}$ 为表面 i 对应的辐射温度, K ; $T_{s,i}$ 为表面 i 的温度, K ; $R_{\text{Bal},i}$ 为表面 i 的辐射不守恒量, W/m^2 。

2.5 室内空气热平衡计算

假设室内空气温度均匀, 为单一温度节点, 其接受来自围护结构(包括墙体、屋顶、地板、门窗)和室内热源(主要是架空炕)的对流和辐射热、太阳辐射透射得热及室内外通风换热等, 则对于某一瞬时室内空气温度的热平衡方程为

作用下建筑热过程模型, 可通过数值方法求解。

3 模型求解及验证

3.1 求解方法

在自然通风系统中流动和换热相互作用, 可采用耦合方法求解。常用的方法有顺序耦合、ping-pong 耦合、onions 耦合和直接耦合^[17] 4 种, 其中 ping-pong 耦合和 onions 耦合方法由于在计算精

度和速度方面各有优势通常被采用。文献[18]比较了这两种方法,在 ping-pong 耦合方法中,热模型和流动模型依次运行,在每个时间步长中,每个模型采用对方的求解结果,但若步长很大时,这种方法会产生很大误差;与 ping-pong 方法不同,onions 方法在同一时间步长内对两模型方程反复迭代直至收敛,计算结果精确,但速度相对慢些。

本文采用 onions 方法对架空炕采暖系统传热与流动模型进行耦合求解,将上一时刻炕面板计算温度输入烟气流量方程计算出热压通风量,再将结果导入架空炕热平衡计算模型,将计算得到的炕面板计算温度与初始时刻温度比较,若超出预设范围,则继续迭代直至收敛。同理,在室内自然通风量计算过程中,将某一时刻计算出的房间空气温度代入 MIX 子程序计算各风口的风量,然后将其代入主程序再次计算室内空气温度,并与上次计算值比较,若不满足精度要求,则继续迭代直至收敛。

3.2 实验验证及分析

为了验证上述模型及模拟程序的正确性,对实际房间进行实测,并将实测结果与模拟计算结果进行对比。在 2004 年 11 月中旬进行实测^[7],地点选在大连市一农村住宅中;采用数字式温湿度自记录仪每 10 min 记录一次数据,分别测试室内空气干球温度,炕头、炕梢表面及炕底温度等,以及室外气象参数;在模拟计算中,输入实测建筑和架空炕的几何和物性参数及气象参数。

由于实际运行中灶内热源强度难以测定,为了解决这个问题,通过先假定一热源强度值输入程序计算炕面温度后与实测值相比较,若差值较大则对设定的热源强度值进行修正,直至达到一定精度,如图 4 所示,图 5 为经过处理后的逐时热源强度。

图 6 为室内空气温度实测值和计算值的比较

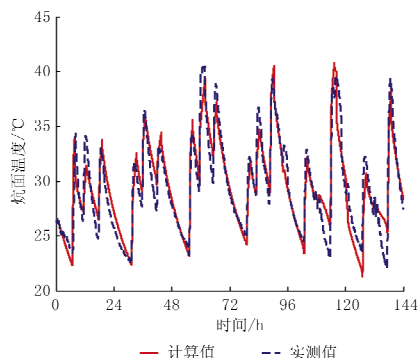


图 4 架空炕表面温度计算值和实测值之间的比较

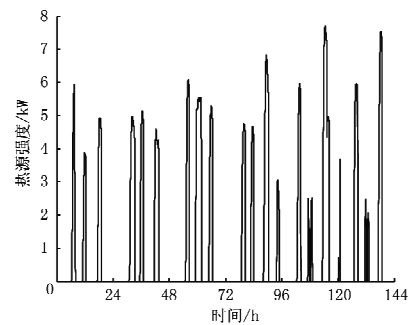


图 5 加热炕体的热源强度逐时值

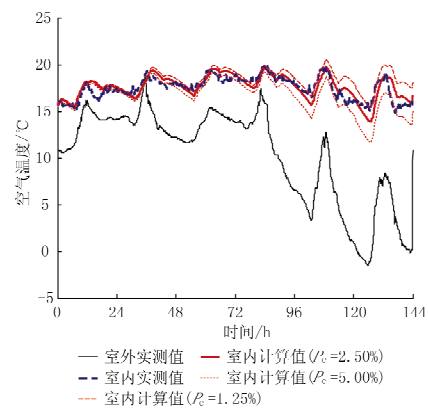


图 6 室内空气温度计算值和实测值之间的比较

情况,图中给出 3 种不同风口开度百分比 P_e (分别为 1.25%, 2.50% 和 5.00%) 条件下室内空气温度计算值。从图中可以看出,当 $P_e = 2.50\%$ 时计算结果与实测结果吻合较好,模型可以较准确地预测室内空气温度。但在局部存在一定的误差,可能是由以下方面引起的:炕热源强度在处理上仍存在一定误差;炕模型中简化上下表面散热状况相同与实际有所差别,没有考虑人为活动因素对炕体及室内空气的影响;室内空气温度分布不均匀及实际测点布置过少等。

图 7 为不同风口开度下室内逐时通风换气次

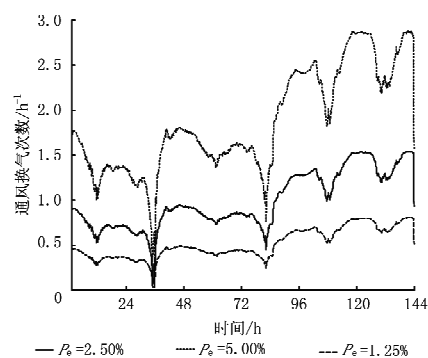


图 7 不同风口开度下室内逐时通风换气次数

数,从图 7 中可以发现,建筑室内风口的开启大小直接影响室内外通风量(即换气次数),但通风量增大将导致冬季房间冷风渗透损失加大,进而降低室内空气温度(如图 6 所示),且室内外空气温差越大时,影响越明显。因此,在寒冷或严寒地区加强建筑围护结构的密闭性是改善室内热环境的有效措施之一。

通过模拟可以得到炕面板向室内的逐时散热量,见图 8,炕面板散热强度在绝大部分时间内在 300~700 W 之间,与热源强度变化(见图 5)相比,幅值大大降低,从而保证炕表面散热均匀且温度适中;在测试期间,架空炕对炊事余热的总利用率达到 52% 以上,是一种经济节能的采暖设施。

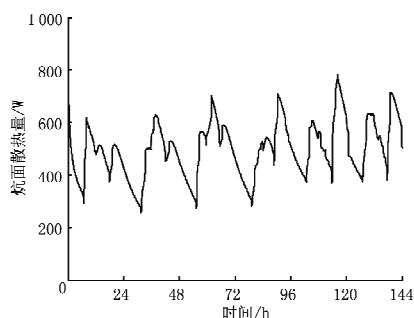


图 8 炕面板向室内的逐时散热量

同时,利用此模型可以分析不同架空炕结构(如材料、几何尺寸等)、室外气象参数以及建筑部件下的架空炕热性能及其作用下室内热状况,可为实现建筑节能提出有效的措施和方法。

4 结语

本文首次采用宏观模型方法分析架空炕采暖系统传热与流动机理,并结合建筑围护结构及室内空气系统热平衡控制方程,建立基于热平衡法的单间架空炕采暖建筑热状况模拟计算模型,并给出求解方法。通过对某一住宅架空炕实测数据与模拟计算结果比较,论证了本文所提出的模型和建立程序具有一定可信性和可用性,可用来分析架空炕采暖系统热性能及其作用下建筑室内热环境状况,为架空炕系统的优化设计和此种住宅的节能设计提供指导依据。

参考文献:

- [1] Yeo M S, Yang I H, Kim K W. Historical changes and recent energy saving potential of residential heating in Korea[J]. Energy and Buildings, 2003, 35 (7):715-727
- [2] Bansal N K. Characteristic parameters of a hypocaust construction[J]. Building and Environment, 1998, 34(3):305-318
- [3] 郭继业. 省柴节煤灶炕[M]. 北京:中国农业出版社, 2003
- [4] 郭继业. 北方省柴节煤炕连灶技术讲座(二)[J]. 农村能源, 1998 (6): 12-14
- [5] 徐洪波, 焦庆余, 徐国堂. 高效预制组架空火炕的研究[J]. 农业工程学报, 1991, 27(3): 81-86
- [6] 出口清孝, 三田拓遂. 中国北部の伝統的暖房を持つ民家の温熱環境[C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002
- [7] 陈滨, 庄智, 杨文秀. 被动式太阳能集热墙和新型节能灶炕耦合运行模式下农村住宅室内热环境的研究[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 20-24
- [8] Pedersen C O, Fisher D E, Liesen R J. Development of a heat balance procedure for calculating cooling loads[G]//ASHRAE Trans, 1997, 103(1):459-468
- [9] McClellan T M, Pedersen C O. Investigation of outside heat balance models for use in a heat balance cooling load calculation procedure[G]//ASHRAE Trans, 1997, 103(1):469-484
- [10] Liesen R J, Pedersen C O. An evaluation of inside surface heat balance models for cooling load calculations[G]//ASHRAE Trans, 1997, 103(3): 485-502
- [11] 陈华, 涂光备, 陈红兵. 建筑能耗模拟的研究和进展[J]. 洁净与空调技术, 2003(3): 5-9
- [12] Ayres J M, Stamper E. Historical development of building energy calculations[G]//ASHRAE Trans, 1995, 101(1): 841-849
- [13] Li Y, Heiselberg P. Analysis methods for natural and hybrid ventilation—a critical literature review and recent developments [J]. International Journal of Ventilation; Special Edition, 2003(1): 3-20
- [14] Anderson B R. Calculation of the steady-state heat transfer through a slab-on-ground floor[J]. Building and Environment, 1991, 24(4):405-415
- [15] 清华大学 DeST 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法——DeST[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004
- [16] Li Y, Delsante A, Symons J. Prediction of natural ventilation in buildings with large openings [J]. Building and Environment, 2000, 35(3): 191-206
- [17] 段双平, 张国强, 彭建国, 等. 自然通风技术研究进展[J]. 暖通空调, 2004, 34(3): 22-28
- [18] Hensen J. Modeling coupled heat and air flow: ping-pong vs. onions [C]//Proceeding 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA, 1995:19-22