

# 基于双线性模型的室内环境品质控制建模方法研究

赵安军, 于军琪, 孙 光

(西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**在现代建筑中,需对建筑室内环境品质进行有效的控制和优化来确保较高的舒适性和较低的能耗。室内环境品质包含了很多不确定因素和非线性因素,传统的线性系统无法对其描述。以西安建筑科技大学智能建筑实验室为研究对象,定义室内环境品质各物理参数和控制量的线性关系,采用双线性模型建模方法,建立室内环境品质控制与优化数学模型。基于研究对象的实测数据,通过最小二乘估计方法对其进行辨识,完成了数学模型中相关参数的求解。实验结果显示,在相同室内外环境条件下,实验采集的室内环境品质参数与模型输出参数吻合度高,验证了建模方法的有效性。

**关键词:**室内环境品质;最小二乘估计;双线性模型

中图分类号: TU111.19

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)01-0145-05

## Study on modeling of indoor environmental quality control by bilinear model

ZHAO Anjun, YU Junqi, SUN Guang

(School of Information and Control Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In modern architecture, it is necessary to control and optimize the quality of indoor environment to ensure the high comfort and low energy consumption. Indoor environmental quality that contains a lot of uncertainties and nonlinear factors is difficult to be described in the traditional linear system. This paper takes the intelligent building laboratory of Xi'an University of Architecture And Technology as the research object. Based on linear relationship between the physical parameters and control parameters of the indoor environmental quality by using bilinear model, the least squares estimation is performed to identify the indoor environmental quality control and energy consumption optimization modeling according to the data measured. Experiment results demonstrate the effectiveness of the modeling method.

**Key words:** indoor environmental quality; the least squares estimation; bilinear model

室内环境品质中,以空气质量和热环境因素对人的影响尤为显著<sup>[1-2]</sup>。在我国,室内大部分都是自然通风,室内人员密度大,夏季普遍采用空调的方式进行制冷。由于天气炎热,需要关闭门窗,在热舒适性保证的同时,导致室内空气质量严重下降。文献[1-2]研究表明,人体各项疲劳指标均与空气质量下降,尤其与 CO<sub>2</sub> 浓度增大有很大关系,室内较差的空气质量严重影响室内人员的健康及工作效率。然而,打开门窗通风又会带走冷量,使得室内的热舒适性受到影响,并造成能源的浪费。同时,由于空调的调节大多采用粗放的调节方式,并不能够根据室外温度变化调整制冷量,使得热舒适性下降的同时增大了能量的消耗。因此,如何保证良好的室内环境品质,又满足能耗较低的要求成为室内环境品质控制和优

化研究中的主要问题。

室内环境品质控制和耗能优化中,模型预测控制<sup>[3-5]</sup>(Model predictive control, MPC)是一种基于模型的优化控制技术,是控制室内环境品质的有效手段。模型准确性是模型预测控制中的关键,直接影响室内环境品质控制和优化的性能指标。模型的建立主要采用黑箱模型<sup>[6-7]</sup>或物理模型<sup>[6-8]</sup>。文献[9]综合考虑建筑及其室内的物理特性,对建筑及 HVAC 系统建立微分方程组来描述室内环境品质系统中个因素之间的关系,通过求解微分方程组,得到系统模型;文献[10]提出了一种基于室内人员,给出的自整定随机人员模型,相比较于传统方法,基于室内人员的自整定模型不需要训练,同时能够更好的适应室内人员情况的变化。文献[11]采用基于径向基神经网络对建

收稿日期: 2016-08-26

修改稿日期: 2016-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508445); 陕西省科技计划国际合作基金资助项目(2014KW17); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2014]1685号)

作者简介: 赵安军(1975—),男,副教授,博士,主要研究方向为智能建筑、能耗检测与评估。E-mail: zhao\_anjun@163.com

筑环境品质控制系统进行建模,该方法不需要建筑物理特性等信息,通过实验获取样本数据,进行训练得到系统模型。

上述文献中提到的建模方法在其具体研究中有较好的适用性,但也存在不足。首先,绝大多数的建模对象都是针对大型的 HVAC 系统而言,不能适应于目前分体式空调和独立的通风换气设备。同时,基于微分方程组的物理模型建立相对复杂,求解的运算量巨大;基于人员的自整定模型虽然有较强的适用性,但其模型的准确性相比物理模型较差;基于神经网络建模需要大量的实验数据支撑,针对不同的建筑,不同气候条件,季节都需要设计实验方案,采集数据,工作量相对较大。

因此,本文采用基于双线性模型<sup>[12]</sup>建模来反映室内环境品质控制和能耗优化的关系。双线性模型是形式上最简单,最接近于线性模型的一类非线性模型,运算量相对较少,准确性较高,能够较好地反映室内环境品质、室外气候和建筑特性之间的关系。本文研究思路如下:首先给出基于双线性的室内环境品质控制与能耗优化数学模型;设计实验方案,获取模型辨识所需相关数据;通过数学求解,完成系统模型的辨识;最后通过实验完成模型的验证与分析。

## 1 室内环境品质控制数学模型

图 1 给出了室内环境品质模型预测控制系统的框图。其中,ACT 代表改善室内环境品质的执行器,包括空调设备和排风机。BEMS 代表建筑能耗管理系统,完成室内环境品质参数的采集和对执行器的控制。 $k$  为能耗管理系统的采样时刻, $x(k)$  为状态变量, $y(k)$  为参考向量, $d(k)$  为扰动, $x_s$  为舒适度设定向量。

那么,基于模型预测室内环境品质控制系统可以描述成以下等式:

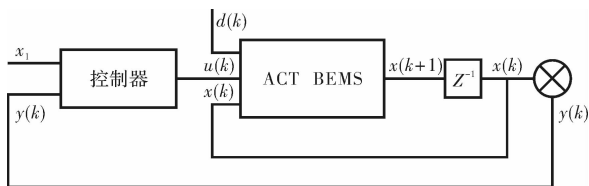


图 1 室内环境品质控制框图

Fig. 1 Block diagram of indoor environmental quality control system

状态方程:  $x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k))$

参考向量:  $y(k) = x(k)$

控制向量:  $u(k) = g(x_s, y(k))$

为了简化系统的辨识过程,不考虑噪声的存在,室内环境品质的模型可以采用如下的双线性模型表示:

$$x(k+1) = x(k) + \rho_1 f_1(x(k), u(k), d(k)) + \rho_2 f_2(x(k), u(k), d(k)) + \dots + \rho_n f_n(x(k), u(k), d(k)) \quad (1)$$

其中,  $\rho_i = \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  是模型中需要辨识的参数,状态向量  $x(k)$  定义如下:

$$x(k) = [CO_{2(in)}(k), T_{in}(k), CO_{2(out)}(k), T_{out}(k)]$$

其中,  $CO_{2(in)}(k)$  为  $k$  时刻室内二氧化碳的浓度;  $T_{in}(k)$  为  $k$  时刻室内温度;  $CO_{2(out)}(k)$  为  $k$  时刻室外二氧化碳浓度;  $T_{in}(k)$  为  $k$  时刻室外温度。

控制向量定义如下:

$$u(k) = [\omega(k), A(k)]$$

式中:  $\omega(k)$  代表  $k$  时刻排风风扇的通风量;  $A(k)$  代表  $k$  时刻空调的制冷和制热量。

舒适度设置向量  $x_s$  定义为

$$x_s = [CO_{2(s)}, T_s]$$

其中,  $CO_{2(s)}$  代表设定的室内二氧化碳浓度;  $T_s$  代表设定的室内温度。

对于室内二氧化碳和温度状态变量,双线性模型采用了不同的形式进行描述。

$k+1$  时刻室内二氧化碳浓度是  $k$  时刻室内二氧化碳的浓度和排风风扇通风量的线形函数,定义如下:

$$CO_{2(in)}(k+1) = CO_{2(in)}(k) + \alpha \omega(k) (CO_{2(out)}(k) - CO_{2(in)}(k))$$

其中,  $\alpha$  是需要辨识的模型参数。 $k+1$  时刻室内温度是  $k$  时刻室内外温度,排风风扇的通风量以及空调的制冷和制热量的线形函数:

$$T_{in}(k+1) = T_{in}(k) + \beta_1 (T_{out}(k) - T_{in}(k)) + \beta_2 A(k) + \beta_3 \omega(k) (T_{out}(k) - T_{in}(k))$$

其中,  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  是需要辨识的模型参数。基于模型预测的控制系统模型可以表示如下:

$$x(k+1) = Bx(k) + Cx(k)\omega(k) + Fu(k)$$

$$\text{其中: } B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\beta_1 & 0 & \beta_1 \\ 0 & 0 & \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_2 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & -\beta_3 & 0 & -\beta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$\varphi_1, \varphi_2$  表示室外气候中二氧化碳浓度和温度参数

的前一个时刻和下一个时刻关系,可以通过测量获得。

## 2 数据采集及模型辨识

实验所处的环境是西安建筑科技大学智能建筑实验室。该实验室面积  $110 \text{ m}^2$ , 高  $2.7 \text{ m}$ ; 外围护两面是混凝土墙, 厚度为  $35 \text{ mm}$ , 另外两面是玻璃隔挡墙, 厚度为  $5 \text{ mm}$ ; 顶部是混凝土板, 厚度为  $30 \text{ mm}$ 。室内空调采用美地的 KF-72LW/Y-Sx(E) 分体落地式空调器, 其制冷量为  $7\,200 \text{ W}$ , 制冷功率为  $2\,820 \text{ W}$ ; 排风扇采用宝昌 FD400E, 无级调速, 功率为  $200 \text{ W}$ , 风量最大  $4\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。能耗管理系统采用德易安建筑能耗管理及控制平台, 通过室内温度、二氧化碳浓度传感器, 采集室内环境参数; 室外数据通过基于 crossbow 的气象站系统提供数据; 空调器和排风扇都被连接该平台上, 通过红外遥控控制室内的温度和二氧化碳浓度。

在实验过程中, 简化了空调和排风扇控制的复杂性。对于空调控制, 出风量不变, 设置为中速, 调节空调的设定温度, 从  $16^\circ\text{C}$  到  $26^\circ\text{C}$ , 对应给能耗管理及控制平台的空调开度控制信号为:

$U_A = \{0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1\}$ , 控制精度为  $1^\circ\text{C}$ ; 对于排风机控制, 调节风机的风量, 从  $0$  到  $4\,000 \text{ m}^3$ , 控制精度为每小时  $400 \text{ m}^3$ , 对应给能耗管理及控制平台的风机开度控制信号为:  $U_w = \{0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1\}$ 。

为了获取真实的实验数据, 针对西安夏季的室外气候条件, 能耗管理及控制平台被设置成连续工作模式, 室内人员数量基本保持  $6$  个, 控制系统按照  $10\%$  的步长控制空调和排风扇在  $24 \text{ h}$  内循环进行制冷、加热和排风, 观测室内环境参数和空调以及排风扇的控制量, 同时记录室外温度, 采样数据作为辨识的样本数据。实验持续时间从  $2015$  年  $4$  月  $11$  日到  $14$  日, 每隔  $2 \text{ min}$  进行一次采样, 共  $2\,882$  个采样点。采集样本数据如图 2 和图 3 所示。

系统辨识采用最小二乘估计<sup>[13]</sup>, 其过程就是对参数  $\rho_i$  的估计。

由公式(1)可得:

$$x(k+1) - x(k) = x(k) + \rho_1 f_1(x(k), u(k), d(k)) + \rho_2 f_2(x(k), u(k), d(k)) \cdots + \rho_n f_n(x(k), u(k), d(k))$$

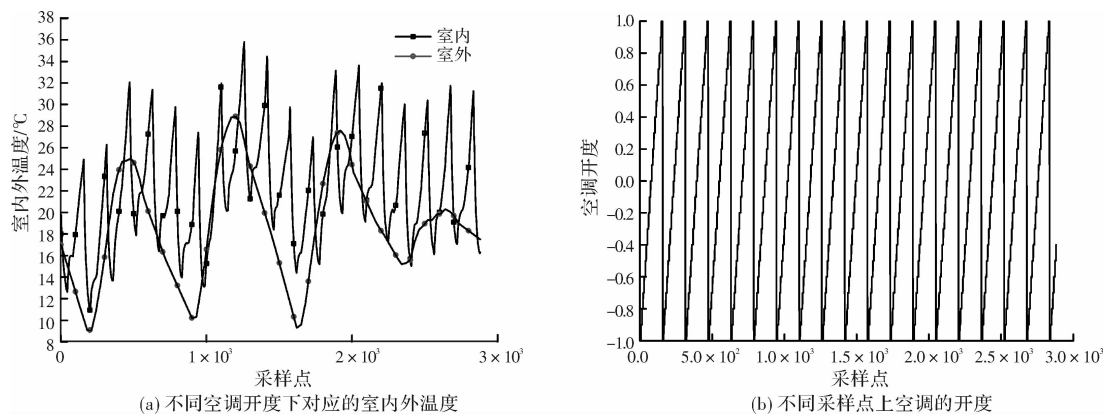


图2 不同空调开度下室内温度

Fig. 2 Indoor and outdoor temperature for different air conditioning output

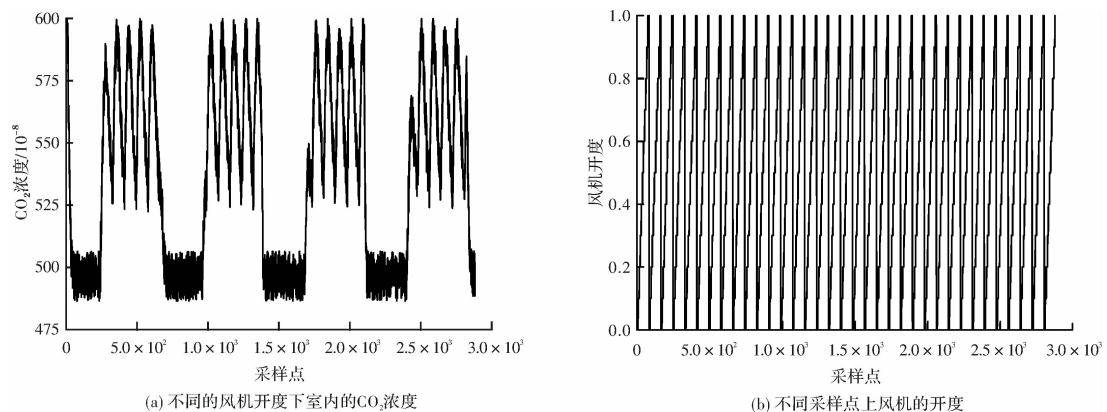


图3 不同风机开度下的室内  $\text{CO}_2$  浓度

Fig. 3 Indoor  $\text{CO}_2$  concentration for different fan opening output

可写成如下形式:  $x = \phi \rho$

$$\text{其中: } x = \begin{bmatrix} x(2) - x(1) \\ x(3) - x(2) \\ \vdots \\ x(n) - x(n-1) \end{bmatrix}; \rho = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_3 \end{bmatrix};$$

$\phi =$

$$\begin{bmatrix} f_1(x(1), u(1)) & \cdots & f_n(x(1), u(1)) \\ f_1(x(1), u(1)) & \cdots & f_n(x(2), u(2)) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_1(x(n-1), u(n-1)) & \cdots & f_n(x(n-1), u(n-1)) \end{bmatrix}$$

被估计参数  $\rho = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T x$ .

那么,下一时刻室内环境品质估计值  $\hat{x}(k+1)$  就可以采用当前的状态  $x(k)$  和被估计参数  $\rho$  表示:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & x(k) + \rho_1 f_1(x(k), u(k)) + \\ & \rho_2 f_2(x(k), u(k)) \cdots + \\ & \rho_n f_n(x(k), u(k)) \end{aligned}$$

基于实验采集的数据,进行室内环境品质模型的最小二乘估计,得到模型参数的估计值.其中,  $\alpha = 0.274$ ;  $\beta_1 = 0.0014$ ;  $\beta_2 = 0.0937$ ;  $\beta_3 = 0.0026$ .

### 3 模型验证分析

模型验证实验环境与数据采集环境基本相同,室内人员数量基本保持 6 个.验证是通过实际测量的室内环境品质参数与模型输出的预测值进行对比完成.实际测量值是在预设的空调和风机控制模式下,通过能耗管理系统进行采集.实验在 2015 年 9 月 17 日进行,时间从 0 点开始,持续时间 24 h,每隔 2 min 采样一次,共 722 个采样点.模型输出值的计算在实际测量完成后,在相同的

室外温度和室内二氧化碳浓度环境下,输出室内环境品质模型预测值.实测数据和模型验证数据如图 4 和图 5 所示.室内环境品质参数的实测值和预测值的均方根误差与相关系数如表 1 所示.

图 4 给出了在不同采样点,空调关闭的情况下,不同排风量,通过模型的预测和智能建筑实验室实际测量获取的二氧化碳浓度的对比.在 0 点到 8 点半之间,室内二氧化碳浓度变化较小,这是因为晚上实验室没有人员,二氧化碳浓度和室外基本能保持一致.8 点以后,实验室人员保持在六个人,室内二氧化碳浓度按照风机的开度状态进行周期性变化.实验数据反映,室内二氧化碳浓度的模型预测值和真实测量基本吻合,当均方根误差在  $2.789 \times 10^{-6}$  时,实测值和预测值的相关系数的是 0.889.

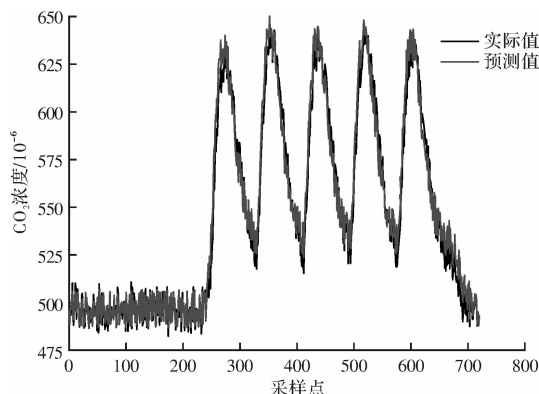
图 5 给出排风扇关闭,仅空调工作的情况下,在不同时间,通过模型的预测和智能建筑实验室实际测量获取的室内温度的对比.

从图中可以看出,不论是真实测量值,还是模型预估值,其变化规律都是受到室外温度以及室内空调的作用,周期性变化.实验结果显示,室内温度的模型预测值和实际测量值基本吻合,当均方根误差在  $0.378^\circ\text{C}$  时,室内温度的实测值和预测值的相关系数的平方达到了 0.9287.

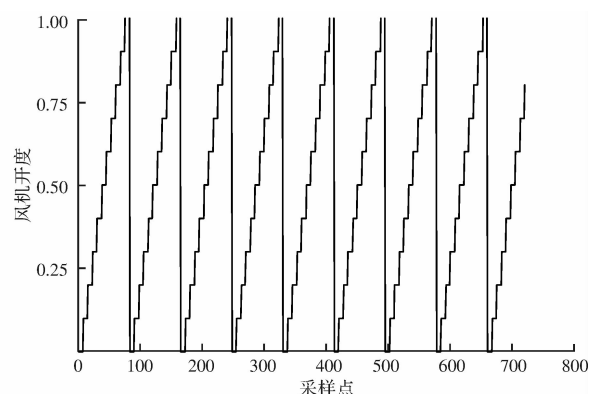
表 1 实测值与预测值的均方根误差和相关系数

Tab. 1 RMSE and  $R^2$  of real and predicted values

品质参数	RMSE	$R^2$
室内温度	0.378	0.9287
二氧化碳浓度	2.789	0.889



(a) 室内CO<sub>2</sub>浓度的实测值和模型预估值



(b) 模型验证中风机的开度

图 4 不同风机开度下的 CO<sub>2</sub> 浓度实测值和预测值

Fig. 4 Real and predicted values of CO<sub>2</sub> concentration for different fan opening output

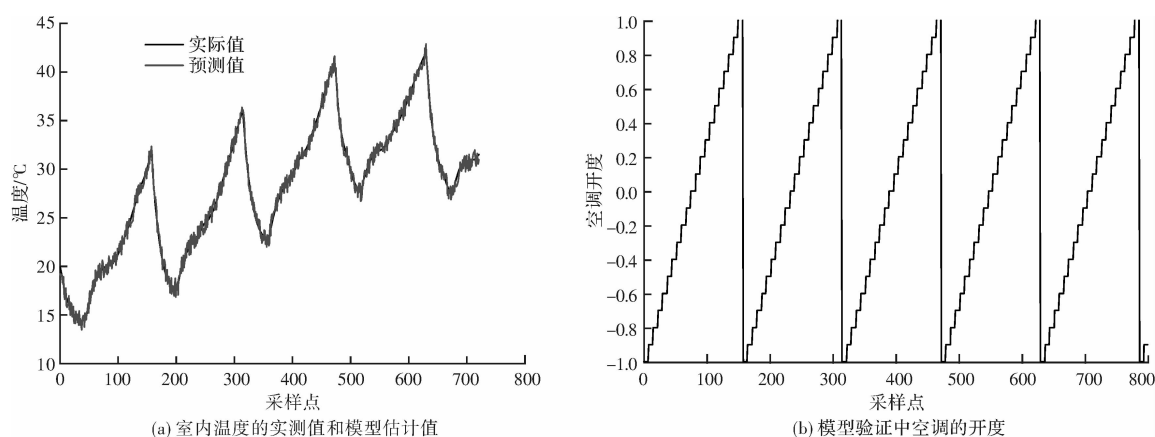


图5 不同空调开度下的室内温度实测值和预测值

Fig. 5 Real and predicted values of indoor Temperature for different air conditioning output

## 4 结论

采用双线性模型结构,对室内环境品质控制建模方法进行研究,最后得到以下结论。

(1)通过整合线性的室内温度与室内二氧化碳浓度状态方程,给出了基于双线性的室内环境品质控制系统数学模型,反应了室内环境品质控制中室内外环境参数以及控制量之间的关系。

(2)以西安建筑科技大学智能建筑实验室为研究对象,通过物理实验采集相关数据,给出了系统模型参数的估计方法,完成了系统的辨识。

(3)通过模型验证与分析,在相同的室内外环境下,通过比较实际物理系统和模型输出,两者给出的室内环境品质参数预测值和实际测量值吻合程度较高,证明采用双线性模型对室内环境品质控制系统进行建模是可行的,该模型为后期的室内环境品质控制和优化奠定了基础。

## 参考文献 References

- [1] CORGNATI SP, FILIPPI M, VIAZZO S. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort[J]. Building & Environment, 2007, 42 (2): 951-959.
- [2] 李百战,刘晶,姚瑞明. 重庆地区冬季教室热环境调查分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(5): 115-117.  
LI Baizhan, LIU Jing, YAO Ruiming. Investigation and analysis on classroom thermal environment in winter in Chongqing[J]. Journal of HV&AC, 2007, 37 (5): 115-117.
- [3] MAYNE DQ. Model predictive control: Recent developments and future promise [J]. Automatica, 2014, 50 (12): 2967-2986.

- [4] 席裕庚,李德伟,林姝. 模型预测控制:现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.  
XI Yugeng, LI Dewei, LIN Shu. Model Predictive Control-Status and Challenges [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.
- [5] PERVEZ H, NURSYAR B, PERUMAL N, et al. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 34: 409-429.
- [6] ABDUL A, FARRONKH J. Theory and applications of HVAC control systemse; a review of model predictive control (MPC) [J]. Building and Environment, 2014, 72: 343-355.
- [7] DALAMAGIDIS K, KOLOKOTSA D, KALAITZAKIS K, et al. Reinforcement learning for energy conservation and comfort in buildings [J]. Building and Environment, 2007, 42(7): 2686-98.
- [8] KARATASOU S, SANTAMOURIS M, GEROS V. Modeling and predicting buildings energy use with artificial neural networks: methods and results [J]. Energy and Buildings, 2006, 38(8): 949-58.
- [9] ZAVALA VM. Real-Time Optimization Strategies for Building Systems[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(9):3137-3150.
- [10] JUSTIN R, BRANDON M. Model predictive HVAC control with online occupancy model [J]. Energy and Buildings, 2014, 82:675-684.
- [11] MOROSAN P, BOURDAIS R, DUMUR D, et al. Building temperature regulation using a distributed model predictive control[J]. Energy Build, 2010, 42: 1445-1452.
- [12] EKMAN M. Modeling and control of bilinear systems, applications to the activated sludge process [D]. Uppsala: Uppsala University, 2005.
- [13] LIU Chuan. Distribution theory of the least squares averaging estimator [J]. Journal of Econometrics, 2015, 186(1): 142-159.

(编辑 桂智刚)