

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.009



办公楼室内环境品质控制与优化

孙光, 于军琪, 赵安军

(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055)

摘要:室内办公环境品质直接影响办公室中人员的工作效率和健康,需要进行有效地控制和优化,以保证其舒适性、低能耗和健康的要求。以某办公室为对象,研究了室内环境品质各参数和控制量之间的关系,建立了室内环境品质双线性模型。利用实验数据进行了模型验证,结果表明:模型输出能较好拟合实际情况;并基于模型预测方法进行室内环境品质控制,通过夏季工况仿真实验证明了提出方法比传统控制方式具有更小的稳态误差和较小的超调性,且更加节能。

关键词:室内环境品质;最小二乘辨识;预测控制;办公室

中图分类号:TU111.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0060-08

Control and optimization of indoor environmental quality in an office building

Sun Guang, Yu Junqi, Zhao Anjun

(School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The indoor environment quality of office is closely related with the work efficiency and the health of the staff. It's important to take effective control and optimization measures to ensure the comfort, low energy consumption and health requirements of the office. The relationship between the indoor environment parameters and control variables is studied by using an office as a case. And the bilinear model of the indoor environment quality is established. The results showed that the model output can better fit the actual situation by using the experimental data verification. Meanwhile, based on the predictive control, using the working condition of the summer simulation experiments, it shows the method has a smaller steady-state error and small super tonality, and is more energy efficient than the traditional control mode.

Keywords: indoor environment quality; least squares identification; predictive control; office

良好的办公环境在保障办公人员高效工作的同时,还可以保障人员的身体健康^[1-2]。室内环境品质中,以空气品质和热环境因素对人的影响尤为显著^[3]。从建筑节能的角度来看,采用自然通风方式来调节室内温度是最佳选择;而从人体热舒适角度来看,由于办公建筑室内人员相对密集,在夏季面积

小、房间分散、热湿负荷相差较大的场合,办公建筑仍旧使用空调来调节室内温度以保证室内热舒适性。通常情况下,在使用空调时将门窗紧闭,保证了室内的热舒适性,却导致室内空气品质较差。创造环境品质良好的工作环境是以牺牲资源为代价的,如何对空调、风机等进行合理的控制及优化,使其既

收稿日期:2016-06-19

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

作者简介:孙光(1991-),男,主要从事室内环境品质控制研究,(E-mail)sunguang8569@sina.com。

Received:2016-06-19

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51508445); International Cooperation Project of Shaanxi Province Science and Technology Plan (No. 2014KW17); Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, Ministry of Education (Teaching Outside the Secretary of Stay [2014]No. 1685)

Author brief: Sun Guang (1991-), main research interest: indoor environment quality control, (E-mail) sunguang8569@sina.com.

能保证室内环境品质又能节约能源,有着重要意义。

关于室内环境品质的控制优化研究, Castilla 等^[4]对几种热舒适控制策略进行了比较,结果表明,采用系数加权的模型预测控制 MPC (Model Predictive Control) 控制器对热舒适性具有更好的控制效果。Yang 等^[5]提出了基于多代理的控制框架,用多目标粒子群算法 MOPSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) 进行优化,将其应用于解决智能建筑能源消耗和整体舒适水平之间的问题,结果表明,利用 MOPSO 算法优化的多代理控制可有效解决能源和舒适性的矛盾。Wang 等^[6]使用基于加权平均聚集 OWA (Ordered Weighted Averaging) 算法进行信息融合的建筑节能和室内舒适性的管理模式,采取具有启发式智能优化的多代理控制系统以实现能源的节约和室内热环境舒适性的提高,仿真验证表明,该方法不仅使整体舒适性提高 3%,而且节约了 9% 的能源。Preglej 等^[7]提出了一种以多变量预测函数为基础的模糊控制模型 FMBMPC (Fuzzy Model-Based Multivariable Predictive Control),并对 HVAC (Heating, Ventilation and air Conditioning) 系统进行控制,结果表明,FMBMPC 算法的控制效果优于传统的 PI 方法且更加节能。上述研究表明,室内环境品质控制和耗能优化中,模型预测控制^[8-10]通过建立室内环境品质控制与优化模型,可以预测建筑室内环境品质参数的变化,从而及时调整控制和优化方案,是控制室内环境品质的有效手段。

研究表明,如何建立室内环境品质参数的预测模型并实时调整控制方案,使其既满足室内舒适性

的要求,又能降低其整个运营周期的能耗,已经成为暖通空调领域研究中一项极其受关注的工作。室内热环境对人体的舒适性造成很大影响,而室内空气品质不佳会导致室内人员产生头晕发闷等不舒适感,甚至会影响人体的健康。笔者综合考虑室内热环境及室内空气品质的影响,提出室内环境品质的建模及控制方法,在保证室内环境品质的基础上节能降耗。针对西安建筑科技大学某办公室,采用机理建模的方法建立室内环境参数的数学模型,用最小二乘辨识的方法确定室内环境品质数学模型的相关参数。基于该模型,使用预测控制的方法对空调及风机进行控制。利用 TRNSYS 搭建物理模型,对以上方法进行模拟验证,并与传统的控制方式进行对比,结果表明,基于模型预测的方法可保证室内的环境品质并节约能源。

1 室内环境的数学模型描述

1.1 建筑特征及控制系统描述

以西安建筑科技大学某办公室为对象,研究在特定气候环境和建筑结构下室内环境参数的有效控制问题。为了验证该预测及控制模型的可靠性,通过对该办公建筑的实际调研,采用建筑能耗模拟工具 TRNSYS 建立了西安地区的办公室建筑模型,模型既能反映实际建筑的主要热工特性,也满足国家及地方建筑标准各项参数。办公室大小为 7.2 m × 7.5 m × 3.0 m,室内人员数量 6~8 人,南向窗墙比为 30%,西向窗墙比为 40%,东向及北向墙上无窗,围护结构材料及热工性能取值如表 1 所示,建筑的基本参数如表 2 所示。

表 1 建筑模型围护结构材料及热工性能取值

Table 1 The performance of building envelopes and thermal characteristics parameters

名称	面积/m ²	结构	密度/ (kg · m ⁻³)	导热系数/ [W · (m · K) ⁻¹]	比热容/ [kJ · (kg · K ⁻¹) ⁻¹]	厚度/mm	传热系数
西墙	22.5	水泥砂浆	1 800	0.93	1	20	2.404
		烧结多孔砖	1 200	0.76	1.05	240	
		水泥砂浆	1 800	0.93	1	20	
南墙	21.6	水泥砂浆	1 800	0.93	1	20	2.404
		烧结多孔砖	1 200	0.76	1.05	240	
		水泥砂浆	1 800	0.93	1	20	
地板	54.0	水泥砂浆	1 800	0.93	1	25	0.489
		轻质混凝土	1 200	0.38	1	200	
		水泥砂浆	1 800	0.93	1	25	
顶板	54.0	水泥砂浆	1 800	0.93	1	25	0.489
		轻质混凝土	1 200	0.38	1	200	
		水泥砂浆	1 800	0.93	1	25	
东墙	22.5	玻璃隔档墙		单层 LOE 玻璃,厚度为 25 mm			2.832
北墙	21.6	玻璃隔档墙		单层 LOE 玻璃,厚度为 25 mm			2.832

表 2 模拟建筑物概况及设备参数

Table 2 The outline and device parameters of the simulated building

建筑物类型	房间尺寸	人员密度/ ($\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)	照明强度/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	设备负荷密度/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	空气渗透/ ($\text{次} \cdot \text{h}^{-1}$)	温度调节设备	通风设备
办公建筑	7.2 m×7.5 m× 3 m	7	11	20	0.5	功率 7 200 W, COP 为 2.7	功率 200 W, 最 大风量 4 000 m^3/h , 无极调速

室内环境品质模型预测控制系统的原理框图如图 1 所示。

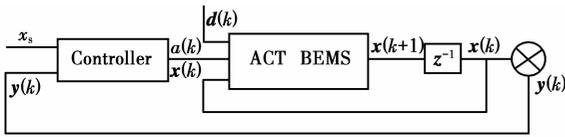


图 1 室内环境品质控制原理框图

Fig. 1 The control principle diagram of the indoor environment quality

图 1 中, ACT 为改善室内环境品质的执行器(空调设备,排风机), BEMS 为建筑能耗管理系统,完成室内环境品质参数的采集和对执行器的控制, k 为采样时刻, $x(k)$ 为状态变量, $y(k)$ 为输出变量, $u(k)$ 为控制变量, $d(k)$ 为干扰变量(门的开度、人员吸烟等), x_s 为设定值。

非线性状态方程: $x(k+1) = f(x(k), u(k), d(k))$

控制器输出方程: $u(k) = g(x_s, y(k))$

室内环境品质中,以空气品质和热环境因素对人的影响尤为显著,而室内空气质量变差最主要的因素为室内人员产生的 CO_2 浓度过高,所以选取温度、 CO_2 浓度为环境被控变量。

$$x(k) = [\text{CO}_{2\text{in}}(k) T_{\text{in}}(k) : \text{CO}_{2\text{out}}(k) T_{\text{out}}(k)]^T = [\mathbf{x}_{\text{in}}^T(k) \mathbf{x}_{\text{out}}^T(k)]^T \quad (1)$$

式中: $\text{CO}_{2\text{in}}(k)$ 为 k 时刻室内 CO_2 质量百分比, 10^{-6} ; $T_{\text{in}}(k)$ 为 k 时刻室内温度, $^{\circ}\text{C}$; $\text{CO}_{2\text{out}}(k)$ 为室外空气中 CO_2 质量百分比, 10^{-6} ; $T_{\text{out}}(k)$ 为室外温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

控制变量为

$$u(k) = [W(k)AC(k)]^T \quad (2)$$

式中: W 为风机开度,全关为 0,全开为 1,线性输出; AC 为加热或制冷输出,制冷为 -1,加热为 +1,关闭为 0。

设定值为

$$x_s = [\text{CO}_{2\text{sp}} T_{\text{sp}}]^T \quad (3)$$

式中: $\text{CO}_{2\text{sp}}$ 为 CO_2 质量百分比设定值; T_{sp} 为温度设

定值。

1.2 环境品质模型描述

由图 1 可知, $k+1$ 时刻的建筑环境变量可以通过一个双线性模型^[11]描述,如式(4)。

$$x_p(k+1) = x_p(k) + \lambda_1 \cdot f_1(u(k), x_p(k), d(k)) + \dots + \lambda_m \cdot f_m(u(k), x_p(k), d(k)) \quad (4)$$

式中: $\lambda_i = \lambda_1 \dots + \lambda_m$ 为与特定建筑相关的因数,通过系统辨识确定^[12]。

$k+1$ 时刻室内 CO_2 质量百分比是一个与 k 时刻室内 CO_2 质量百分比、风机转速和室外 CO_2 质量百分比有关的线性函数,可以用式(5)描述。

$$\text{CO}_{2\text{in}}(k+1) = \text{CO}_{2\text{in}}(k) + \alpha_1 W(k) [\text{CO}_{2\text{out}}(k) - \text{CO}_{2\text{in}}(k)] + C_1 \quad (5)$$

式中: C_1 为室内人员在一个采样时间间隔内产生 CO_2 的速率, α_1 为常数通过系统辨识确定。

$k+1$ 时刻室内温度是一个与 k 时刻室内温度、室外温度和空调及风机开度有关的线性函数,可以用式(6)描述。

$$T_{\text{in}}(k+1) = T_{\text{in}}(k) + \beta_1 W(k) [T_{\text{out}}(k) - T_{\text{in}}(k)] + \beta_2 AC(k) + \beta_3 [T_{\text{out}}(k) - T_{\text{in}}(k)] + C_2 \quad (6)$$

式中: C_2 为室内人员在一个采样时间间隔内产生的热量; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为常数,通过系统辨识确定。

基于式(5)、(6),系统可以用如式(7)的双线性模型描述。

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \beta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_1(k) & \beta_3 \\ 0 & 0 & 0 & \phi_2(k) \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 0 & \alpha_1 & 0 \\ 0 & -\beta_2 & 0 & \beta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x(k)W(k) + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \beta_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 数据采集及模型辨识

采用机理建模的方法建立室内环境品质的数学

模型后,用最小二乘辨识的方法确定相关参数。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_p(2) - \mathbf{x}_p(1) - C \\ \mathbf{x}_p(3) - \mathbf{x}_p(2) - C \\ \vdots \\ \mathbf{x}_p(n-1) - \mathbf{x}_p(n-2) - C \\ \mathbf{x}_p(n) - \mathbf{x}_p(n-1) - C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{u}(1), \mathbf{x}_p(1)) & \cdots & f_m(\mathbf{u}(1), \mathbf{x}_p(1)) \\ f_1(\mathbf{u}(2), \mathbf{x}_p(2)) & \cdots & f_m(\mathbf{u}(2), \mathbf{x}_p(2)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(\mathbf{u}(n-2), \mathbf{x}_p(n-2)) & \cdots & f_m(\mathbf{u}(n-2), \mathbf{x}_p(n-2)) \\ f_1(\mathbf{u}(n-1), \mathbf{x}_p(n-1)) & \cdots & f_m(\mathbf{u}(n-1), \mathbf{x}_p(n-1)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

或

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}\boldsymbol{\lambda} \quad (9)$$

最小二乘估计如式(10)所示。

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{x} \quad (10)$$

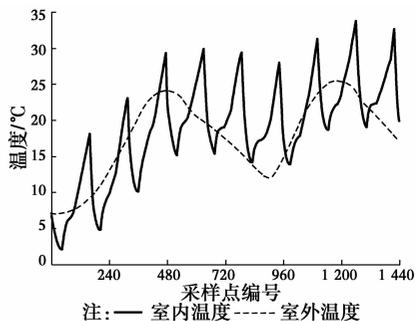
根据式(11),下一时刻的 $\mathbf{x}_p(k+1)$ 可以通过当前时刻 $\mathbf{x}_p(k)$ 及 $\mathbf{u}(k)$ 的值通过式(11)预测。

$$\mathbf{x}_p(k+1) = \mathbf{x}_p(k) + \hat{\boldsymbol{\lambda}}_1 f_1(\mathbf{u}(k), \mathbf{x}_p(k)) + \cdots + \hat{\boldsymbol{\lambda}}_m f_m(\mathbf{u}(k), \mathbf{x}_p(k)) \quad (11)$$

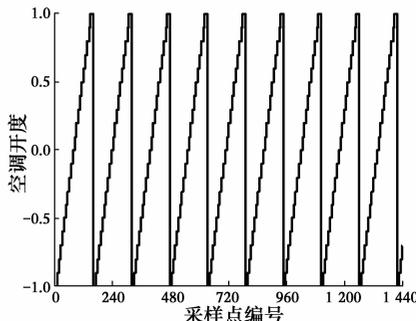
辨识实验数据获取方法:能耗管理系统采用德易安建筑能耗管理及控制平台,通过室内温度、CO₂ 质量百分比传感器采集室内环境参数;室外数据通过 crossbow 气象站系统获取;空调器和排风扇均连接在该平台上,通过红外遥控控制室内的温度和 CO₂ 质量百分比。在实验过程中,简化了空调和排风扇控制的复杂性。对于空调控制,出风量不变,设置为中速,调节空调的设定温度,从 16 °C 到 26 °C。对应给能耗管理及控制平台的空调开度控制信号为 $U_{AC} = \{-1, -0.9, \dots, 0, 0.1, \dots, 1\}$,控制精度为 1 °C;对于排风机控制,调节风机的风量,从 0 到 4 000 m³,控制精度为 400 m³/h,对应给能耗管理及控制平台的风机开度控制信号为 $U_w = \{0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1\}$ 。

实验时间从 2015 年 5 月 12 日到 13 日,时间从 0 点开始,针对办公环境的环境变量及控制变量每 2 min 进行一次采样,共 1 441 个采样点;在估计和辨识的过程中,为了覆盖所有的情况,在最初的 24 h,控制器的位置以 10% 的步长逐渐从最小值到最大值;在接下来的 24 h 重复上述过程,数据曲线如图 2 所示。

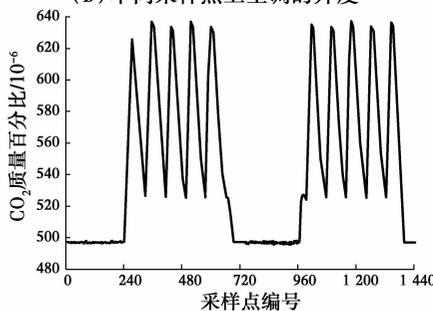
室内人员人均产生 CO₂ 为 0.036 kg/h,所以 C₁ 为 7.5。通过最小二乘辨识可知 α_1 为 0.210 7;室内人员每人产生热量为 50 400 J/h,所以 C₂ 为 0.068 5;经过最小二乘辨识可知 β_1 、 β_2 、 β_3 分别为:0.022 6、0.351 1、0.003 3。



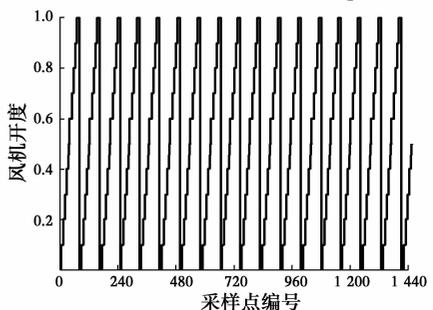
(a) 不同空调开度下对应的室内外温度



(b) 不同采样点上空调的开度



(c) 不同的风机开度下室内的 CO₂ 浓度



(d) 不同采样点上风机的开度

图 2 不同采样点下空调和风机的开度及不同开度下温度及二氧化碳的变化

Fig. 2 The opening of the fan and air conditioning under different sampling points and the change of temperature and carbon dioxide

1.4 模型验证分析

模型验证实验数据的采集时间为7月20日到7月21日,时间从0点开始,持续时间48 h,每隔2 min采样一次,共1441个采样点。室内CO₂的真实数据曲线及预测曲线如图3(a)和(b)所示。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CO₂质量百分比环境下,输出室内环境品质模型预测值。

由辨识结果可知,CO₂质量百分比可以通过式(12)得到。

$$\text{CO}_{2\text{in}}(k+1) = \text{CO}_{2\text{in}}(k) + 0.2107 \times$$

$$W(k)[\text{CO}_{2\text{out}}(k) - \text{CO}_{2\text{in}}(k)] + 7.5 \quad (12)$$

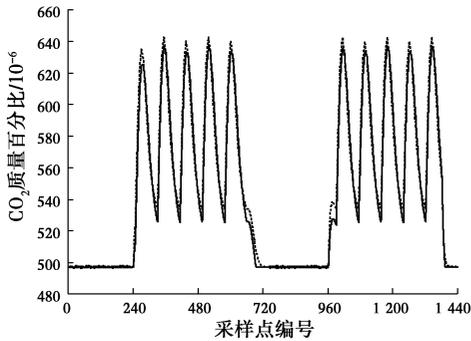
经计算,决定系数 R^2 为0.955,均方根误差RMSE为 5.873×10^{-6} 。

由辨识结果可知,室内温度模型可用式(13)描述。

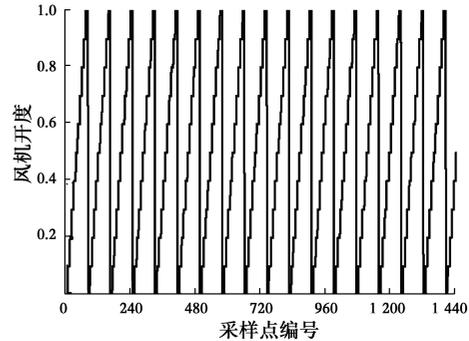
$$T_{\text{in}}(k+1) = T_{\text{in}}(k) + 0.0226W(k) \times$$

$$[T_{\text{out}}(k) - T_{\text{in}}(k)] + 0.3511AC(k) + 0.0033[T_{\text{out}}(k) - T_{\text{in}}(k)] + 0.0685 \quad (13)$$

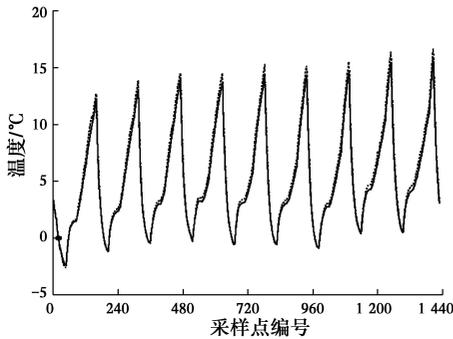
室内温度的真实数据曲线及预测曲线如图3(c)和(d)所示。



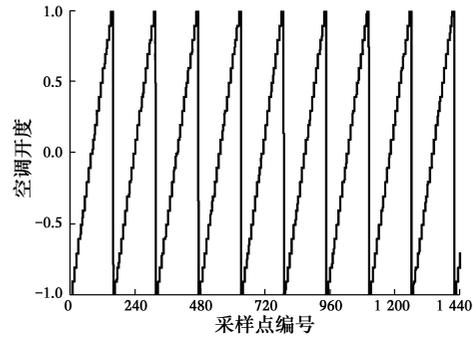
注: ——CO₂浓度实际值 —— CO₂浓度预测值
(a) 室内CO₂浓度的实测值和模型估计值



(b) 模型验证中风机的开度



注: ——室内温度实际值 —— 室外温度预测值
(c) 室内温度的实测值和模型估计值



(d) 模型验证中空调的开度

图3 室内温度及二氧化碳实测值与估计值的对比及模型验证中风机和空调的开度

Fig. 3 The comparison of the measured with the estimated about indoor parameters and the fan and air conditioning opening

经计算,决定系数 R^2 为0.89,均方根误差RMSE为 $0.685 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2 控制器设计

控制器的目标函数 $J(k)$ 定义如式(14)。

$$J(k) = ||\mathbf{x}_{\text{in}}(k+N) - \mathbf{x}_s||_Q^2 + ||\mathbf{u}(k)||_R^2 \quad (14)$$

式中: Q 和 R 分别为表征环境变量与设定点接近程度和各执行器能耗的权重矩阵。

控制器设计目标是使目标函数 $J(k)$ 最小,目标

是保证环境变量接近设定值 \mathbf{x}_s 并且使得总能耗最小, $J(k)$ 在 N 个采样周期后的值可以通过式(14)估计,控制器设计目标如式(15)。

$$\min_{\mathbf{u} \in U} J = ||\mathbf{x}_{\text{in}}(k+N) - \mathbf{x}_s||_Q^2 + ||\mathbf{u}(k)||_R^2 \quad (15)$$

对式(15)预测时遵循的规则为:在预测的 N 个采样周期内,控制信号保持恒定,即 $\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k+1) = \dots = \mathbf{u}(k+N)$;在预测的 N 个采样周期内,外部扰动保持恒定且与最后一时刻的值相等,即 $\mathbf{x}_{\text{out}}(k) = \mathbf{x}_{\text{out}}(k+1) = \dots = \mathbf{x}_{\text{out}}(k+N) = \hat{\mathbf{x}}_{\text{out}}(k)$ 。

根据《室内空气质量标准》^[13],CO₂ 质量百分比超过 $1\ 000 \times 10^{-6}$ 将会对人体产生危害。人员在室内持续时间超过 30 min 的室内 CO₂ 质量百分比不得超过 600×10^{-6} ,故设定室内 CO₂ 质量百分比为 600×10^{-6} 。室内温度设定值 T_{sp} ,夏季为 26 °C,冬季为 20 °C。所以设定变量为

$$x_s = [600T_{sp}] \quad (16)$$

通过试验和误差确定预测范围为 $N=5$ 个采样周期。此范围是在没有限制预测边缘的情况下,为了使当前的真实状况在外部干扰下不会产生大的偏差而确定的。

权重矩阵定义如式(17)、(18)所示。

$$Q = a \cdot \text{diag}[q_1 \quad q_2] \quad (17)$$

$$R = (1-a) \cdot \text{diag}[r_1 \quad r_2] \quad (18)$$

为了反映环境变量不同等级的差别以及建立环境变量的值与能耗消耗之间的平衡, $a, q_i = q_1, q_2$ 和 $r_j = r_1, r_2$ 通过试验和误差选定。

外部干扰设定值为 $W_{CO_2, \text{ext}} = 0, W_{T, \text{ext}} = 0$

权值矩阵 Q 与设定值有关,为了使环境变量实现标准化,权值的设定通过环境变量最大设定值除以各环境变量设定值来实现标准化处理,室内温度权重通过除以 25 °C 来计算,25 °C 代表了室外温度条件的平均值; $W_{CO_2} = \frac{600}{600} = 1, W_{T_{in}} = \frac{600}{25} = 24$ 。各变量权重设定值如表 3 所示。

表 3 权值矩阵 Q 的设定值

Table 3 The set value of the weight matrix of Q

环境参数	权重
室内温度	$W_{T_{in}} = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{in} < 26 \text{ }^\circ\text{C} \\ 24 & \text{if } T_{in} \geq 26 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$
CO ₂ 质量百分比	$W_{CO_2} = \begin{cases} 0 & \text{if } CO_{2in} < 600 \times 10^{-6} \\ 1 & \text{if } CO_{2in} \geq 600 \times 10^{-6} \end{cases}$

如果室内 CO₂ 质量百分比低于 600×10^{-6} ,系统不应该动作直到 CO₂ 质量百分比达到设定值,所以 Q 矩阵中的权值应该设定为 0。同样当室内温度在 20 °C 至 26 °C 之间时,权值也应该设定为 0。

Q 矩阵设定如式(19)。

$$Q = a \cdot \text{diag}[q_1 \quad q_2] = a \cdot \text{diag}[W_{CO_2} W_{T_{in}}] \quad (19)$$

R 矩阵表征执行器动作消耗的能耗,风机耗能相比于空调耗能很小,设定风机能耗权重为 1,空调

能耗权重为 8^[14]。 R 矩阵设定如式(20)。

$$R = (1-a) \cdot \text{diag}[r_1 \quad r_2] = (1-a) \cdot \text{diag}[1 \quad 8] \quad (20)$$

设定 $a=0.5$ 表征使目标函数最小化 Q 和 R 矩阵同等重要。

3 仿真实验验证

采用 TRNSYS 与 MATLAB 结合的方式进行仿真实验验证。首先通过 TRNSYS 建立办公室的物理模型,设定建筑物尺寸、墙体材料、通风渗透率等表征建筑物特性的参数,再建立空调、风机等控制系统模型,形成仿真实验环境。将 TRNSYS 建立的模型运行所得数据曲线与辨识过程得出的数学模型输出的数据曲线进行对比,验证 TRNSYS 建立模型的有效性,结果表明,TRNSYS 建立的物理模型可以很好地模拟实际建筑物的特性。利用 MATLAB 实现相关控制算法,通过 TRNSYS 调用 MATLAB 产生控制信号作用于相应的执行器(空调、风机),对算法进行仿真实验验证。

由于 TRNSYS 不能对室内 CO₂ 质量百分比进行仿真,故对室内 CO₂ 质量百分比的模拟通过 MATLAB 实现,CO₂ 质量百分比通过式(21)计算^[15]。

$$[CO_2]_t = \frac{(\rho_a V / \Delta t) \cdot [CO_2]_{t-\Delta t} + m_{o,t} [CO_2]_{o,t} + S_t}{(\rho_a V / \Delta t) + m_{o,t}} \quad (21)$$

式中: $[CO_2]_t$ 为 t 时刻的 CO₂ 质量百分比; ρ_a 为空气密度,kg/m⁻³; V 为房间体积,m³; Δt 为仿真步长,h; $[CO_2]_{t-\Delta t}$ 为 $t-\Delta t$ 时刻的 CO₂ 质量百分比; $m_{o,t}$ 为通风流动速率,kg/h; $[CO_2]_{o,t}$ 为 t 时刻周围的 CO₂ 质量百分比; S_t 为房间 CO₂ 排放速率,kg/h。

考虑到西安地区冬季主要靠暖气采暖,所以仅针对夏季工况(6月至8月)进行了实验验证(室内人员工作时间为 8:00—22:00),利用 TRNSYS 与 MATLAB 对基于模型预测的控制方法与传统控制方法(对空调的控制采用 PID 控制,设定温度为 26 °C;室内通风主要通过门窗调节,间隔 2 h 开窗 15 min 进行通风换气)进行模拟,得出模拟结果如 4 所示。

由图 4(a)可以看出,传统控制方式下室内温度波动较大,而基于模型的预测控制下室内温度基本稳定在 26 °C;由图 4(b)可以看出,传统控制方式下

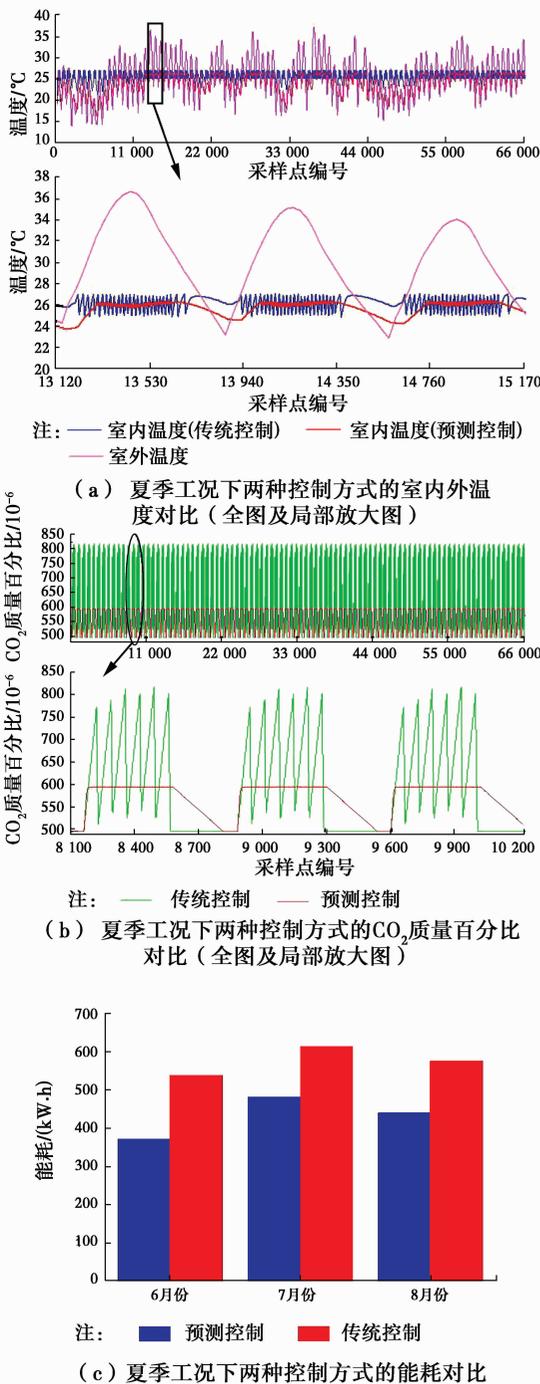


图4 相同工况下两种控制方式对室内环境品质及能耗的影响

Fig. 4 The influence of two control modes on indoor environment quality and energy consumption under same working conditions

室内CO₂质量百分比大部分时间处于浓度超标的状态,而基于模型的预测控制下室内CO₂质量百分比基本维持在 600×10^{-6} 附近,可以维持一个良好的室内环境品质。由图4(c)可以看出,传统控制方式在6、7、8月产生的能耗分别为538.44、613.92、

575.47 kW·h;基于模型的预测控制在6、7、8月产生的能耗分别为:371.84、481.83、439.91 kW·h。在6月份室外温度相对较低,两种控制方式在该月产生的能耗均较低,同时可以看出在相同的室外气象条件、相同的时间段内,基于模型的预测控制产生的能耗总是低于传统控制方式产生的能耗。

传统方式无法预知未来室内环境的变化,往往当室内温度控制过低时才会停止工作,当室内温度过高时才会开启导致室内温度处于一个大幅波动的状态,而基于模型的预测控制可以保证室内温度相对恒定;对于室内CO₂质量百分比的控制,传统控制方式主要通过间隔一段时间打开门窗进行通风换气,所以在门窗关闭的时间段CO₂质量百分比急剧升高,CO₂质量百分比严重超标,当室内人员感到呼吸不畅时通常将窗户完全开启,期间又带进较多的热空气,造成制冷能耗增加。通过对以上两种控制方式在夏季工况下进行模拟,可以得出预测控制方式在整个工况所需总能耗为1 293.59 kW·h;而传统控制方式在整个夏季工况所需总能耗为1 728.28 kW·h。综上所述,预测控制对于室内环境品质的控制效果更好,使室内环境维持在一个舒适的状态下,同时预测控制相对于传统的控制方式具有更加节能的效果。

4 结论

以西安建筑科技大学某办公室为对象,通过控制空调、风机周期性的动作,采集室内环境相关参数及控制变量数据,利用双线性模型描述室内环境品质,用辨识的方法求解得到室内环境品质控制模型,使用TRNSYS建筑模型,在模型建立的基础上进行基于模型的预测控制仿真实验。结果表明:

1)通过系统辨识建立的室内环境控制模型可直观反映室内环境随室外气象条件及建筑设备变化的情况。研究表明,环境变量CO₂拟合的效果较温度更好,决定系数达0.955,而拟合温度模型决定系数为0.89,原因是影响温度的因素较多,而CO₂仅与室内外CO₂质量百分比差和风机的开度有关。

2)预测控制方式对温度的控制较传统控制方式相对稳定,室内CO₂质量百分比基本保持在在设定值左右,超调小,有效避免了室内CO₂长期超标、空气品质较差的状态。

3)通过对预测控制方式和传统控制方式在夏季

工况下进行模拟,预测控制方式在夏季工况下所需总能耗为 1 293.59 kW·h,而传统的控制方式在整个夏季工况所需总能耗为 1 728.28 kW·h。由此可见,预测控制对于室内环境品质的控制效果更好,使室内环境维持舒适状态,且节约了 25% 的能源。

参考文献:

- [1] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [2] CORGNATI S P, FILIPP I 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.
- [3] 李百战,刘晶,姚润明. 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 B Z, LIU J, YAO R M. Investigation and analysis on classroom thermal environment in winter in Chongqing [J]. *Journal of HV & AC*, 2007, 37(5): 115-117. (in Chinese)
- [4] CASTILLA M, ÁLVAREZ J D, BERENGUEL M, et al. A comparison of thermal comfort predictive control strategies [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43: 2737-2746.
- [5] YANG R, WANG L F. Multi-objective optimization for decision-making of energy and comfort management in building automation and control [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2012, 2(1): 1-7.
- [6] WANG Z, WANG L F, YANG R. Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings [J]. *Applied Energy*, 2012, 99(2): 247-254.
- [7] PREGLEJ A, REHRL J, SCHWINGSHACKL D, et al. Energy-efficient fuzzy model-based multivariable predictive control of a HVAC system [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82(5): 520-533.
- [8] MAYNE D Q. Model predictive control: Recent developments and future promise [J]. *Automatica*, 2014, 50(12): 2967-2986.
- [9] 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 Y G, LI D W, LIN S. Model predictive control—status and challenges [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(3): 222-236. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] EKMAN M. Modeling and control of bilinear systems, applications to the activated sludge process [D]. Uppsala: Uppsala University, 2005.
- [12] KOLOKOTSA D, POULIEZOS A, STAVRAKAKIS G. Sensor fault detection in building energy management systems [C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Technology and Automation, ICTA'05*, Thessaloniki, Greece, 2005: 282-287.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 室内空气质量标准: GB/T 18883—2002 [S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [14] CIGLER J, PRÍVARA S, VÁŇA Z, et al. Optimization of predicted mean vote index within model predictive control framework: Computationally tractable solution [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 52(1): 3056-3061.
- [15] DOUNIS A I, TIROPANIS P, ARGIRIOU A, et al. Intelligent control system for reconciliation of the energy savings with comfort in buildings using soft computing techniques [J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(1): 66-74.

(编辑 胡英奎)