文章编号：1671-7848(2015)01-0564-05 DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.140015

基于自校正的供暖系统启动控制

冯增喜，刘琦洲
(西安建筑科技大学 信息与控制工程学院，西安 710055)

摘 要：供暖系统最佳启动控制的重点在于准确预测预热时间，获取供暖系统的准确预热时间，并以其控制供暖系统的启动，有助于整个供暖系统能耗最小化。针对具有间歇供暖系统供暖的建筑物，分析其内部温度在外界环境和热源影响下的变化过程和规律，从热力学角度建立了间歇供暖预热过程的数学模型。基于该模型，在间歇供暖的启动控制中引入了自校正控制，并进行了仿真和实验。结果表明，将自校正控制用于供暖系统的启动控制效果较好，能够节约能源。

关键词：自校正；间歇供暖；启动
中图分类号：TP29 **文献标识码：** A

Start Control of Heating Systems Based on Self-tuning

FENG Zeng-xi, LIU Qi-zhou
(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract：The key problem of the optimal start of heating systems is the accurate prediction of the preheat time. If the accurate preheat time can be estimated and used to start the heating system, it will be helpful to minimize the energy consumption of the heating system. Aiming at the building with intermittent heating system, the internal temperature changing process and the changing principle are analyzed under the influence of heating source and external environment, and the mathematical model of the preheating process of intermittent heating system is established from the point of thermodynamics. Based on the mathematical model, the self-tuning control scheme is introduced to finish the simulation and experiment of the intermittent heating start, the results show that the method proposed in this paper behaves well and saves energy.

Key words: Self-tuning; intermittent heating; start

1 引 言

目前在全社会终端能耗中，建筑能耗约占到45%，如此巨大的建筑能耗由三部分构成：建筑在使用过程中的能耗、建筑材料在生产过程中的能耗和建筑建造过程中的能耗。建筑在使用过程中的能耗所占比例最大，约有28 %，建筑材料在生产过程中的能耗和建筑建造过程中的能耗所占比例分别为16 %和2 %左右[1]。建筑在使用过程中的耗能，冬季供暖占很大比例，加之在设计、运行和管理等方面我国供暖技术相对落后，因此利用合适的控制方法，能带来很大的节能效果。

建筑物供暖系统节能包括运行过程中的节能和启停阶段的节能。针对采用间歇供暖制度运行的供暖系统的启动阶段，采用自校正控制来实现其最佳启动，以达到既满足环境舒适性的要求，又达到节能的目的。

2 供暖系统的启动控制和节能分析

依照建筑物不同的使用性质，供暖制度可分为连续供暖制度和间歇供暖制度两大类[2]。对于间歇供暖而言，供暖系统仅在每天建筑使用期间运行来维持室内平均温度在设定温度，在每天的非工作期停止使用。间歇式供暖系统的控制方式，如图 1 所示。

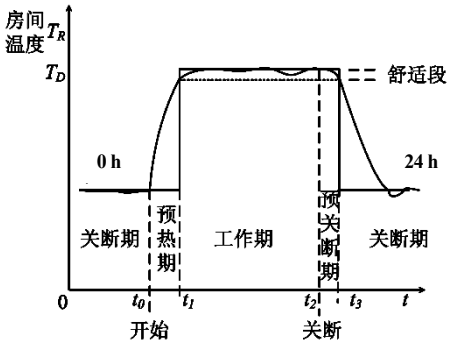

图 1 热源系统的操作方式图

Fig. 1 The intermittent operation of heating systems

收稿时间：2013-12-27；修回时间：2014-05-13
基金项目：陕西省教育厅自然科学基金(No.11JK0914, No.12JK0999)；西安市城乡建设委员会建设科技项目(No.2011003)
作者简介：冯增喜(1979-)，男，陕西韩城人，博士生，讲师，主要从事建筑设备自动化等方面的教学与科研工作。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图中间歇供暖制度中的预热时间（$t_p = t_1 - t_0$）的准确估计直接影响节能效果和被调空间舒适性[3-4]。当采用某种方法估计预热时间时，若预热时间估计值大于实际值 t_p 时，被调空间的温度会提前达到期望温度，能源被浪费。而估计的预热时间过短，远小于实际值 t_p 时，被调空间的温度在工作期之初达不到期望温度，满足不了舒适性。因此，有必要准确预测预热时间，实现对供暖系统的最佳启动控制，以达到既满足环境舒适性的要求，又达到节能的目的。

若要通过传统的控制方法实现供暖系统的最佳启动控制，则需要提前知道供暖系统及建筑物的相关参数和特性，而这一点通常难以实现，且供暖系统及建筑物的温度调节存在相当大的滞后，故采用一般的控制方法时不能取得很好的效果。而自校正控制能根据被控对象的特性变化和环境干扰，在线辨识被控对象参数，适用于干扰和模型缓慢变化的场合[5-7]。供暖系统的预热时间模型和所受干扰的变化恰恰都比较缓慢，因此，本文采用自校正控制来实现供暖系统的最佳启动。利用热力学知识建立了间歇供暖加热过程的数学模型，通过加权递推最小二乘估计算法辨识其参数，然后用估计的最佳预热时间来启动供暖系统，减小“无用功”时间，从而节约能源。由于该方法可使事先知道热源及采暖区的物理参数特性这一环节被避免，故适用于间歇式供热系统的启动控制。

3 建筑物供热系统预热时间模型及分析

供暖系统中的 2 个随时间变化参量，建筑物的房间温度 T_r 和墙体温度 T_b 微分方程分别为[8-10]：

$$\frac{\mathrm{d}T_r}{\mathrm{d}\tau} + \frac{T_r}{\tau_r} = \frac{Q_h}{C_r} + \frac{T_o}{C_r R_o} + \frac{T_b}{C_r R_s} \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}T_b}{\mathrm{d}\tau} + \frac{T_b}{\tau_s} = \frac{T_s}{C_s R_s} + \frac{T_o}{C_s R_{so}} \tag{2}$$

式中，R 为线性热阻；C 为储存热容；T_o 为室外气温；τ_r 为供暖房间时间常数；τ_s 为供暖房间结构常数。

τ_r 和 τ_s 的计算如下：

$$\tau_r = C_r R_s R_o / (R_s + R_o) \quad \tau_s = C_s R_s R_{so} / (R_s + R_{so})$$

由于 $\tau_s >> \tau_r$，$R_{so} >> R_o >> R$，且考虑到实验的可能性，等式（1）（2）可改进为

$$\tau_1 \frac{\mathrm{d}T_r(t)}{\mathrm{d}t} + T_r(t) = \tau_1 R_1 \frac{\mathrm{d}Q_h(t)}{\mathrm{d}t} + (R_1 + R_2) Q_h(t) + T_o(t) \tag{3}$$

式中，$\tau_1 = C_b R_2$；C_b 为房间结构热容；R_1 为内部线性热阻；R_2 为外部线性热阻。

在使用间歇式供暖制度的建筑内，在热源开启以前，建筑物的墙体温度和房间温度的变化是缓慢的，因此，若设定热源开启时刻 $t = 0$，则由等式（3）式可计算出任意 t 时刻的房间温度：

$$T_r(t) = Q_h\{R_1 + R_2(1 - \exp(-t/\tau_1)\} + T_b(t) \tag{4}$$

式中，房间墙体结构温度 $T_b(t)$ 值可由式（5）计算：

$$\tau_1 \frac{\mathrm{d}T_b(t)}{\mathrm{d}t} + T_b(t) = T_o(t) \tag{5}$$

设定初始时刻后，可根据式（4）计算预热时间的初值：

$$t_p(0) = \tau_1 \ln\{\frac{R_2 Q_h}{Q_h(R_1 + R_2) - T_d + T_b(0)}\} \tag{6}$$

式中，T_d 为房间期望温度。

由于该等式具有非线性，不易在自校正控制中实现。但是由于 t_p 远小于 τ_1，故取 $e^{-t_p/\tau_1} \approx 1 - t_p/\tau_1$，则等式（6）简化为

$$t_p(0) = \frac{\tau_1}{Q_h R_2}\{T_d - Q_h R_1 - T_b(0)\}$$

式中，Q_h 为热源能量输出，R 为建筑物热阻。为确保满足舒适性要求，通常它们的设计值比期望值大。

简化后的等式（6）可近似为

$$t_p(0) = k_1 + k_2 T_b(0) \tag{7}$$

供热系统开启后，对于房间或供热区域来说是连续的热源系统能量 Q_h 经过一段时间后才能稳定输出，且房间存在热惯性，这两个原因使房间温度响应供暖系统存在滞后。考虑上述影响，于是等式(7)变为[11-12]：

$$t_p(0) = \{\frac{T_d - Q_h / Hi - T_b(0)}{Q_h \sqrt{4R_e / \prod C_e}}\}^2$$

$$\text{或}\ t_p(0) = k_3 + k_4 T_b(0) + k_5 T_b^2(0) \tag{8}$$

在这个预热时间的推导中忽略了不可测扰动诸如太阳辐射热能和刮风条件下热量损失等因素的影响。因此针对这些因素的影响，可用首一非零滑动平均噪声过程来描述。基于此再将等式（8）离散化，则在第 n 时刻预热时间模型的采样值为

$$t_p(n) = k_6 + k_7 T_b(n) + k_8 T_b(n)^2 + e(n) + k_9 e(n-1) \tag{9}$$

式中，e 为均值是零的独立噪声序列。在利用 Matlab 仿真时，可由噪声函数 wgn（）产生 e。

4 参数自校正控制

供暖系统最佳启动控制的重点在于准确预测预热时间，并通过预测的预热时间控制供暖热源的启动，

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

最终使供暖系统的能量消耗最小化。而供暖系统的实际预热时间与建筑物的结构和环境等因素密切相关，但是由于许多非线性及时变因素的存在，同时由于供热系统能量输出与房间温度之间存在滞后，使得对预热时间的预测变得复杂和困难。而自校正是一种适用于模型和干扰缓慢变化以及具有随机扰动的过程的控制方法。因此，可利用自校正控制技术来实现供暖系统的最佳启动控制，以达到既满足环境舒适性的要求，又达到节能的目的。参数自校正控制系统的典型结构，如图 2 所示。

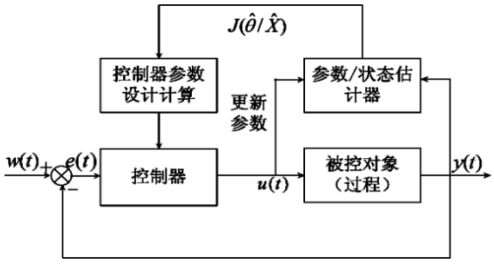

图 2 参数自校正控制系统结构图

Fig. 2 Structure of the self-tuning control system

图中，在线辨识环节，即对象参数/状态的递推估计器参数自校正控制的主要特点[6-7]。在参数/状态估计器中，被控对象当前的结构参数(θ)/状态(x)是根据输入$u(t)$和输出$y(t)$的观测序列利用系统辨识技术被估计出，参数估计值$\hat{\theta}$/状态估计值$\hat{x}$送到控制器参数计算单元进行计算。

本文以最小方差控制为控制策略，即自校正控制律是以最小输出方差为目标来设计。在此供暖系统的自校正控制启动方案中，参数估计器采用了加权递推最小二乘估计算法，以减小旧数据的作用，加大新数据的作用。

根据最小方差控制的定理：使系统希望输出$y_r(t+d)$与实际输出$y(t+d)$之间的误差方差$J=E\{[y(t+d)-y_r(t+d)]^2\}$为最小作为控制目标，则最小方差控制律被设定为

$$F(q^{-1})u(t)=y_r(t+d)+[C(q^{-1})-1]y^*(t+d\,|\,t)-G(q^{-1})y(t) \tag{10}$$

式中，$C(q^{-1})$为 Hurwitz 多项式，被控对象的数学模型（11）的参数项。

$$A(q^{-1})y(t)=q^{-d}B(q^{-1})u(t)+C(q^{-1})\xi(t) \tag{11}$$

供暖系统的自校正控制启动方案中的参数估计器使用的加权递推最小二乘参数辨识公式为[13-14]

$$\begin{cases}\hat{\theta}(n)=\hat{\theta}(n-1)+K(n)\varepsilon(n)\\ P(n)=\dfrac{1}{\lambda}\left\{P(n-1)-\dfrac{P[(n-1)]\phi(n)\phi^{\mathrm{T}}(n)P(n-1)}{\lambda+\phi^{\mathrm{T}}(n)P(n-1)\phi(n)}\right\}\\ K(n)=\dfrac{P(n-1)\phi(n)\varepsilon(n)}{\lambda+\phi^{\mathrm{T}}(n)P(n-1)\phi(n)}\\ \lambda=0.995\sim0.999\end{cases} \tag{12}$$

将等式（9）离散化，并结合等式（12），则可将预测估计式可以写成如下形式：

$$\hat{t}_p(n)=\varphi^{\mathrm{T}}(n)\hat{\theta}(n-1) \tag{13}$$

5 建筑物最佳预热时间预测的仿真和实验

5.1 建筑物最佳预热时间的预测控制算法

假设已知等式（9）的参数，则可利用最小方差自校正调节算法来估计供暖系统的预热时间。可由等式（14）估计预热时间 [8][15]：

$$\hat{t}_p(n)=k_6+k_7T_b(n)+k_8T_b(n)^2+k_9\varepsilon(n-1) \tag{14}$$

式中，$\varepsilon(n-1)=t_p(n-1)-\hat{t}_p(n-1)$ 。

$$\hat{T}_b(n)=\alpha\hat{T}_b(n-1)+\beta T_o(n)+\gamma T_r(n) \tag{15}$$

式中，α=0.8，$\beta=(1-\alpha)f$，$\gamma=(1-\alpha)(1-\beta)$。

以矢量形式描述预测时间模型，如下式：

$$t_p(n)=\varphi^{\mathrm{T}}(n)\theta+\varepsilon(n) \tag{16}$$

式中，$\varphi^{\mathrm{T}}(n)=[\varepsilon(n-1)\ \ T_b(n)\ \ T_b^2(n)\ \ 1]$

$\theta^{\mathrm{T}}=[k_9\ \ k_7\ \ k_8\ \ k_6]$。

本设计采用 Matlab 仿真，根据（12），（13）描述的自校正启动控制器采用 Matlab 程序实现。算法如下：

自校正控制律由预测模型得

$\hat{t}_p(n)=k_6+k_7T_b(n)+k_8T_b(n)^2+k_9\varepsilon(n-1)$；

②设置初值$T_b(0)$，$t_p(0)$，$\theta(0)$，$P(0)$，$\varphi^{\mathrm{T}}(0)$；

③采样并读取新的观测数据$T_o(k)$，$t_p(k)$，

取α=0.8，$\beta=(1-\alpha)f$，$\gamma=(1-\alpha)(1-\beta)$，

则$\hat{T}_b(k)=\alpha\hat{T}_b(k-1)+\beta T_o(k)+\gamma T_r(k)$；

④组成新的观测向量$K(k)$，$\varphi^{\mathrm{T}}(k)$；

⑤利用加权 RLS 公式计算$\hat{\theta}(k)$，$P(k)$；

⑥利用公式（13）计算$\hat{t}_p(k)$；

⑦以方差最小来判断$\hat{t}_p(k)$是否为最佳启动时间，若是，启动定时器，输出控制；若否，$k=k+1$，继续循环第③步至第⑦步。

5.2 建筑物最佳预热时间预测的仿真和实验

将从某热力站管理处获得的11月至3月间每天的室外气温和热力站实际的预热时间作为仿真数据，仿真时将150天的数据等分为25组。

研究过程中主要针对公式：

$$\hat{t}_p(n)=k_9\varepsilon(n-1)+k_7T_b(n)+k_8T_b(n)^2+k_6$$

在仿真初始化时，取$\theta^{\mathrm{T}}=[k_9\ \ k_7\ \ k_8\ \ k_6]$＝[0.000 0, 0.000 0, 0.000 0, 1.500 0]，取加权因子为 0.995。仿真结束后，θ^{T}=[0.032, 0.073, 0.162, 0.009 2]，每 6 天

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

末的参数估计结果，如图 3~6 所示。

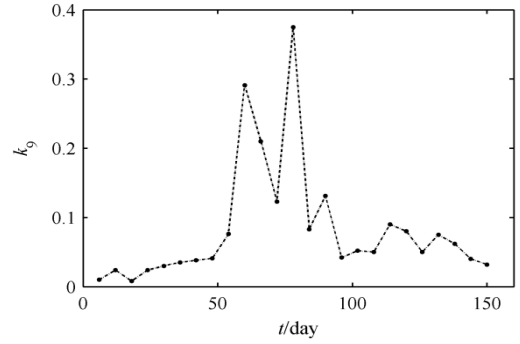

图 3　k_9 的分布图

Fig.3 Distribution of parameter k_9

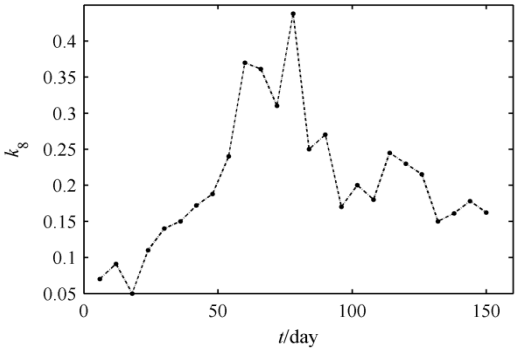

图 4　k_8 的分布图

Fig.4 Distribution of parameter k_8

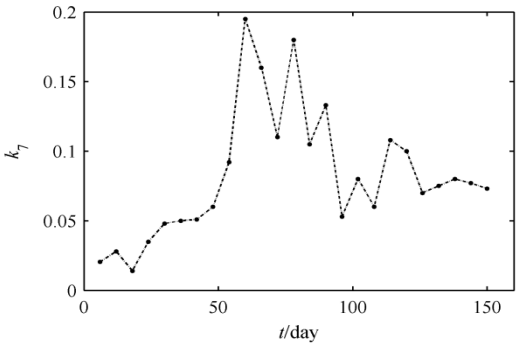

图 5　k_7 的分布图

Fig.5 Distribution of parameter k_7

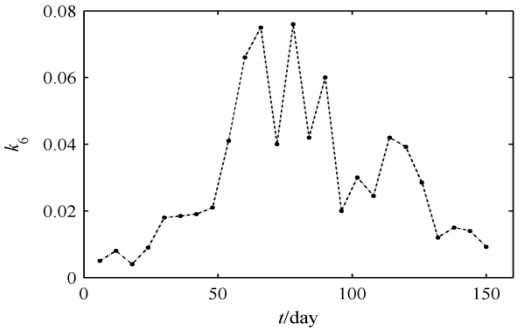

图 6　k_6 的分布图

Fig. 6 Distribution of parameter k_6

仿真结果表明，预热时间的预测误差范围为 −0.24h~0.16h，且在 150 天中，有 135 天的预测误差在−0.12h~0.12h 之间。预测误差的统计，如图 7 所示。

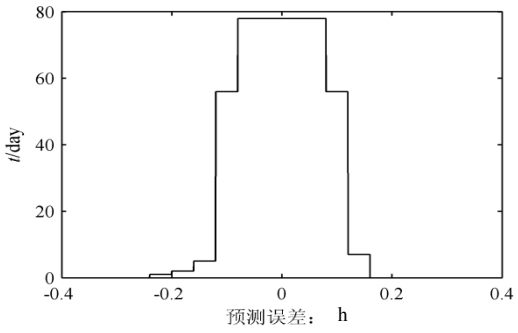

图 7 预测误差统计图

Fig.7 Statistics of the prediction error

根据以上仿真采用的算法，基于单片机开发供暖系统启动控制器，并进行了 20 天实验，实际最佳值与预测值得误差，如图 8 所示。

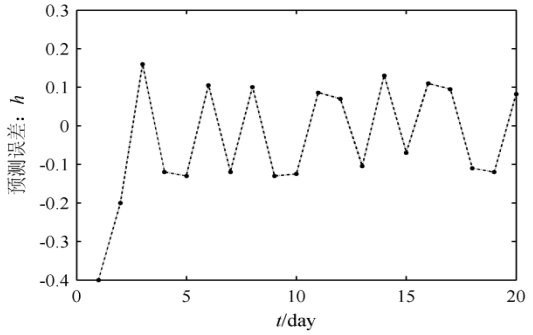

图 8 实验预测误差图

Fig. 8 Statistics of the experimental prediction error

由图 8 可知，在进行预热时间预测的前三天，预测误差较大。此后预测误差都比较小，在-0.13～0.14 h 较小的范围内。此实验证明了即使在建筑物和供热系统的热工特性未知的情况下，自校正启动控制器具有较好的控制效果。

6 结　论

本文将自校正控制策略引入到间歇供暖启动控制问题中，该方法相对于目前供暖系统的两种启动方法：

①按照近年来最长的预热时间作为启动时间，此启动时间远大于实际最佳启动时间，造成能耗很大；②有经验的操作人员每天根据实际气象条件来决定当天的预热时间，但是操作员出于舒适性的考虑，根据实际气象条件来决定当天的预热时间时也很保守，他们确定的启动时间也都是大于实际最佳的预热时间），不仅节能效果好，而且自动化程度高。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献(References)

[1] 赖明. 发展绿色建筑推动节能减排[J]. 建设科技,2011,10(1): 16-17.
Lai M. Developing green building to promote energy conservation and emissions reduction[J]. Construction Science and Technology, 2011, 10:5-28.

[2] 任庆昌，于军琪. 建筑物供暖节能中的智能控制技术研究[J].智能建筑与城市信息，2007,125(4): 25-28.
Ren Q C, Yu J Q. The study on the control of energy saving of heating systems in intelligent building[J]. Intelligent Building & City Information, 2007, 125(4):5-28.

[3] HendersonPE. Optimum start control: principle and practice[J]. Energy World, 1975,2(2): 3-6.

[4] DexterAL. A computer-controlled environmental test facility for investigation room temperature control[J]. J. Instn. Heat. Vent. Engrs, 1976, 40(3): 43-45.

[5] 谢新民，丁锋. 自适应控制系统[M]. 北京：清华大学出版社，2002.
Xie X M, Ding F. The adaptive control system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[6] 陈复扬，姜斌. 自适应控制与应用[M]. 北京：国防工业出版社，2009.
Chen F Y, Jiang W. The adaptive control and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

[7] 李言俊. 自适应控制理论及应用[M]. 西安：西北工业大学出版社，2005.
LiY J. The adaptive control theory and application[M]. Xi'an: Northwest Industrial University press, 2005.

[8] DexterAL. Self-tuning optimum start control of heating plant[J]. Automatic, 1981, 17(3):483-492.

[9] AthienitisAK. Thermal analysis of buildings in a mathematical programming environment and applications[J]. Building and Environment, 1999, 34(3): 401-415.

[10] Barney, F. Temperature prediction models and their application to the control of heating systems[J]. Automation, 1985, 17(3): 1847-1852.

[11] RootsNK. Electric heating in the North AmericalHome[J]. J.Instn. Heat. Vent. Engrs, 1981, 39(4): 24-33.

[12] Bjorn W. A self-Tuning predictor[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1974, 19(6): 848-851.

[13] 侯媛彬. 系统辨识及Matlab仿真[M]. 北京：科学出版社, 2004.
Hou Y B. System identification and Matlab simulation[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[14] 刘党辉. 系统辨识[M]. 北京：国防工业出版社，2010.
Liu D H. System identification[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[15] 钱荣. 神经网络预测器在供热系统中的应用[D]. 西安，西安建筑科技大学学位论文, 2004.
Qian R. The application of neural network predictor in the heating system[D].Xian, Master Dissertation of Xi'an University of Architecture & Technology. 2004.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net