

时间序列预报法在供热控制中的应用研究

齐维贵, 朱学莉

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 为了节能和优质供热, 提出将负荷预报和预测控制施加于供热系统中. 文中首先介绍了时间序列法预报原理, 接着应用该原理给出供热负荷和模型误差的预报. 负荷预报作为供热系统的设定值, 模型误差作为预测控制的校正量. 最后, 给出了两种预报方法在供热系统的应用及仿真结果.

关键词: 时间序列; 负荷预报; 预测控制; 误差校正

中图分类号: TP273, TU833+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 02-0268-03

A Study of Time Series Prediction Method in Heat Supply Control

QI Wei-gui, ZHU Xue-li

(Electric Engineering and Automation College, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: This paper presents the application of heating load prediction and predictive control in the heat supply system for energy saving and high grade heat supply. First, it introduces time series analysis principle. Then, heating load and model error prediction are given by this principle. The load forecast is used as set point of heat supply system, and model error is used as corrected value of predictive control. Finally, the application of two prediction methods in heat supply system and simulation result are given.

Key words: time series; load prediction; predictive control; error correction

1 引言

城市集中供热系统的自动控制面临两个问题, 其一是供热能耗大, 需要节能; 其二是供热对象具有时滞、时变、不确定、非线性的特点, 需要采用先进的控制方法保证优质的供热服务. 这方面国内外都做了许多工作, 文献[1]依据 ARMA、EWMA、LR 和人工神经网络对未来 24 小时负荷进行预报, 预报具有充分的准确性. 但该文仅给出了负荷预报, 对如何跟踪预报负荷, 没有给出好的控制方案. 文献[2]提出建立等效户外温度方程, 方程中的参数可以估计, 文中指出用该温度作区域供热系统的控制信号, 可达到节能的目的, 该文也没有给出控制方案. 国内的供热控制方法通常是把室外温度作为参考信号, 根据室外温度来调节供热量, 在控制上基本采用 PID 算法, 文献[3]介绍了用 PID 与智能兵-兵控制的变结构智能算法. 文献[4]提出用室外温度调节供水温度的平均值, 采用抗积分饱和的 PI 算法. 本文提出用负荷预报和预测控制相结合的控制策略, 将该策略施加于供热系统, 使其满足节能及优质供热的需要. 在该策略中, 两个关键之处应用了时间序列预报方法, 即用时序法预报供热负荷保证节能, 用时序法预报误差, 用预报误差校正预测控制, 保证控制精度.

2 时间序列法预报原理

时间序列法预报是指利用现实和历史序列 $x(k)$ 、 $x(k-1)$ 、 $x(k-2)$... 在满足某种优化判据的条件下, 对未来序列 $\hat{x}(k+1|k)$ 、 $\hat{x}(k+2|k)$... 进行估计. 时间序列法预报由建模、参数估计、最优预报几个步骤组成.

2.1 时间序列模型

假定 $\{x(k)\}$ 是随机序列, 经平稳化处理, 若 $x(k) =$

(k) 是一平稳随机序列, 则可用 ARMA(n, m) 模型来描述该平稳随机序列.

$$(k) + a_1(k-1) + \dots + a_n(k-n) = (k) + c_1(k-1) + \dots + c_m(k-m) \quad (1)$$

式中: (k) 为均值为零, 方差为 σ^2 的白噪声序列. 如果令

$$1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} = A(q^{-1});$$

$$1 + c_1q^{-1} + \dots + c_mq^{-m} = C(q^{-1});$$

$A(q^{-1})$, $C(q^{-1})$ 为稳定的多项式, 代入式(1)中, 得

$$A(q^{-1})(k) = C(q^{-1})(k) \quad (2)$$

2.2 参数估计

式(1)中的参数 a_1, a_2, \dots, a_n 和 c_1, c_2, \dots, c_m 未知, 需要估计. 可采用渐消记忆的递推最小二乘法对参数进行辨识.

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(k) &= \hat{x}(k-1) + K(k)(k) \\ K(k) &= \frac{P(k-1)(k-1)}{1 + (k-1)^T P(k-1)(k-1)} \\ P(k) &= \frac{P(k-1)}{1 + (k-1)^T P(k-1)(k-1)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $(k) = [\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_n, \hat{\epsilon}_1, \hat{\epsilon}_2, \dots, \hat{\epsilon}_m]^T$;

$$(k-1) = [-(k-1), \dots, -(k-n), (k-1), \dots,$$

$$(k-m)]^T$$

为遗忘因子, $0.9 < \lambda < 1$;

$$\hat{x}(0) = 0, P(0) = rI,$$

$$(0) = (-1) = \dots = (-m+1) = 0.$$

2.3 最优预报^[5]

根据最小方差预报原理, 在参数估计值取得后, 最优预报

为

$$\left. \begin{aligned} \hat{\alpha}(k+i|k) &= - \sum_{j=1}^n \hat{\alpha}_j \hat{\alpha}(k+i-j|k) + \sum_{j=i}^m \hat{c}_j (k+i-j) \\ (1 \leq i \leq m) \\ \hat{\alpha}(k+i|k) &= - \sum_{j=1}^n \hat{\alpha}_j \hat{\alpha}(k+i-j|k) \\ (m < i \leq n) \end{aligned} \right\} (4)$$

取得 $\hat{\alpha}(k+i|k)$ 的估计值 $\hat{\alpha}(k+i|k)$ 以后,再代入下式可取得随机序列预报值 $\hat{\alpha}(k+j|k)$.

$$\hat{\alpha}(k+j|k) = \sum_{i=1}^j \hat{\alpha}(k+i|k) + x(k) \quad (j=1,2,\dots) \quad (5)$$

3 供热负荷预报^[6]

进行供热负荷预报的目的是用预报的负荷来决定供热系统的设定值,使各子系统能够正常、协调、可靠的工作,传统的负荷预测方法认为负荷仅与室外温度有关,这种方法预测精度不够,不能很好的指导供热系统节能和优质运行,采用时序法进行预测可以克服上述传统方法的缺陷.

3.1 传统的负荷预测

下面给出了传统的热负荷预测.

$$Q = Q_j \frac{t_n - t_w}{t_{nj} - t_{wj}} \quad (6)$$

式中: Q 为负荷预测值; Q_j 为设计条件下的热负荷值; t_{nj} 为供热室外设计温度; t_w 为未来的室外气温; t_{mj} 为用户室内计算温度; t_n 为用户要达到的室内温度.

其中,对已知的供热用户来说, t_{nj} , t_{wj} 及 Q_j 为常数, t_n 又取为 $t_n = t_{nj}$, 因此预测负荷仅与室外温度有关.

然而实际的供热系统并非是理想的,按式(6)进行的负荷预测与实际差别较大,供热负荷除与室外温度有关还与其他气象条件如风速、风向、日照以及建筑物的结构、形状和使用条件有关,尤其应考虑热负荷受到传热惯性影响,本身有滞后和惯性的特点.为了提高预测的准确性,需引入新的预测方法,时间序列预报法就是一种预报既有随机又有相关因素过程的方法.

3.2 供热负荷预报

用时间序列预报法对供热负荷进行短期预报,将预报值作为供热控制系统的设定值,其预报步骤为:

(1) 按预测步长内负荷的平均值构成负荷历史序列 $\{Q(k-i)\}$, $i=0,1,\dots,n$.

(2) 检验负荷序列的平稳性.采用游程检验法作平稳性检验.经检验,如果负荷序列是平稳的,转为步骤(4),否则按顺序执行.

(3) 对非平稳序列 $\{Q(k)\}$ 进行平稳化处理,处理的方法是求出 $Q(k)$ 中的趋势项 $d(k)$,则 $Q(k) - d(k)$ 为平稳随机序列.

(4) 取平稳序列 $\{Q(k)\}$ 的零均值化残差序列 $\{Q(k) - \bar{Q}(k)\}$ ($\bar{Q}(k)$ 是序列 $\{Q(k)\}$ 的平均值)或平稳化的序列 $\{Q(k) - d(k)\}$,按式(1)建立 ARMA 模型,并估计模型中的参数和阶次.

(5) 给出一步预报值.当原序列是平稳的,则供热负荷的一步预报值为:

$$Q(k+1|k) = - \hat{\alpha}_1 Q(k) - \dots - \hat{\alpha}_n Q(k-n) + \hat{c}_1 (k-1) + \dots + \hat{c}_m (k-m) + \bar{Q}(k) \quad (7)$$

如果原序列并非平稳,则热负荷的一步预报值为:

$$Q(k+1|k) = - a_1 (Q(k) - d(k)) - a_2 (Q(k-1) - d(k-1)) - \dots - a_n (Q(k-n) - d(k-n)) + (k) + c_1 (k-1) + \dots + c_m (k-m) + d(k+1) \quad (8)$$

在取得 $Q(k+1|k)$ 后,协调预测控制,将 $Q(k+1|k)$ 作为设定值 $y_r(k+P)$.

4 预报误差校正的预测控制

用时间序列预报原理除给出负荷预报并作为预测控制设定值外,还给出误差的预报,用预报的误差校正代替即时误差校正.

4.1 动态矩阵控制(DMC)的组成

DMC 由预测模型、滚动优化、误差校正及参考输入四部分组成^[7],DMC 基于易于测取的阶跃响应序列作为预测模型.

DMC 的预测模型为

$$Y_m(k+1) = A U(k) + A_0 U(k-1) \quad (9)$$

式中: A 、 A_0 为由阶跃响应序列 a_1, a_2, \dots, a_N 构成的零状态响应和零输入响应系数阵.

DMC 的误差校正是对预测模型的修正,给出更接近实际输出的预测输出 $Y_p(k+1)$

$$Y_p(k+1) = A U(k+1) + A_0 U(k-1) + h e(k) \quad (10)$$

DMC 的滚动优化指标是对跟踪和控制加权的二次型性能指标,由该指标可导出滚动优化控制

$$U(k) = (A^T Q A + \dots)^{-1} A^T Q [Y_r(k+1) - A_0 U(k-1) - h e(k)] \quad (11)$$

式中: Q 为跟踪加权阵, \dots 为控制加权阵, $Y_r(k+1)$ 为设定向量,由式(11)可推导出即时控制律.

$$u(k) = \frac{1}{F(z^{-1})} [D_r(z^{-1}) y_r(k+P) - h e(k)] \quad (12)$$

式中: $F(z^{-1})$ 为 $N-1$ 阶, $D_r(z^{-1})$ 为 $P-1$ 阶,它们对应的系数可计算.可见 $u(k)$ 与 $y_r(k+P)$ 和 $e(k)$ 有关,而式中的 $e(k)$ 如果用预报误差 $e(k+P|k)$ 取代,则控制 $u(k)$ 将更好地保证跟踪性.

4.2 误差预报器

模型误差 $e(k) = y(k) - y_m(k)$ 是由模型失配和各种干扰因素造成的,可以将 $\{e(k)\}$ 看成随机序列,对其求差分 $e(k) = e(k) - e(k-1)$,则 $\{e(k)\}$ 是平稳随机序列,这样可用式(1)ARMA 模型描述 $\{e(k)\}$ 序列.用式(3)估计模型中的参数,由于 $C(q^{-1})$ 是稳定多项式,因此有

$$e(k) = \frac{A(q^{-1})}{C(q^{-1})} (k) \quad (13)$$

式中: $A(q^{-1}) = 1 + \hat{\alpha}_1 q^{-1} + \dots + \hat{\alpha}_n q^{-n}$; $C(q^{-1}) = 1 + \hat{c}_1 q^{-1} + \dots + \hat{c}_m q^{-m}$

用最小方差预报原理,按式(4)给出 $\hat{\alpha}(k+i|k)$ ($i=1,2,\dots,P$)

$$\hat{\alpha}(k+i|k) = - \sum_{j=1}^n \hat{\alpha}_j \hat{\alpha}(k+i-j|k) + \sum_{j=i}^m \hat{c}_j (k+i-j)$$

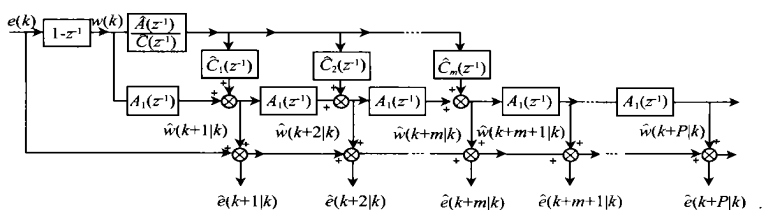


图1 数字误差预报器

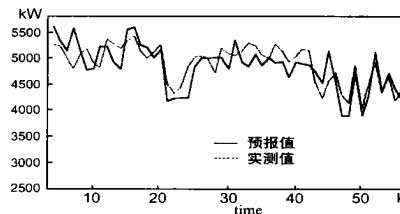


图2 预报值与实测值的比较

$$(1 \leq i \leq m)$$

$$\hat{e}(k+i|k) = - \sum_{j=1}^n \hat{\alpha}_j \hat{e}(k+i-j|k) \quad (14)$$

在取得预报值 $\hat{e}(k+i|k)$ 后,按式(5)可以给出 $\hat{e}(k+j|k)$ ($j=1,2,\dots,P$)

$$\hat{e}(k+j|k) = \sum_{i=1}^j \hat{e}(k+i|k) + e(k) \quad (j=1,2,\dots,P) \quad (15)$$

对式(13)~(15)取 Z 变换,并令

$$\left. \begin{aligned} A_1(z^{-1}) &= -(\hat{\alpha}_1 z^{-1} + \hat{\alpha}_2 z^{-2} + \dots + \hat{\alpha}_n z^{-n}) \\ C_i(z^{-1}) &= \sum_{j=i}^m \hat{e}_j z^{-j}, i=1,2,\dots,m \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

得到易于实现的数字误差预报器如图 1 所示.将 $\hat{e}(k+j|k)$ ($j=1,2,\dots,P$)代替式(12)中的 $e(k)$,根据此式可得预测控制的内模控制结构图.

5 应用及仿真

5.1 负荷预报应用

用时间序列法预报供热负荷已在某城市集中供热系统中应用.根据预报负荷指导供热系统运行,预测的平均误差 8.1%,结果是令人满意的.图 2 给出了预报值与其实际值的比较.

5.2 预报误差校正仿真

一般的预测控制采用误差校正方法,而用预报误差校正代替误差校正可进一步提高控制精度和鲁棒性,图 3 给出了两种校正方法的输出量和控制量曲线.从图中可见,预报误差校正的跟踪性能有较大的改善.

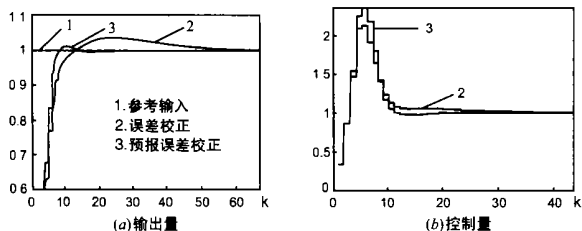


图3 两种校正方法的比较

6 结语

供热控制系统中有两处应用时间序列预报法,即用负荷预报作为预测控制的设定值,确保系统节能,用预报误差校正预测控制,确保系统的跟踪性.通过工程应用和仿真,说明时

间序列预报法给出的预报是满足供热控制系统需要的.考虑实现,在应用时间序列预报法时,由上位机作平稳化处理和参数估计,现场测控器完成实时控制.

参考文献:

- [1] Minoru Kawashima, Charles E Dorgan, John W Mitchell. Hourly thermal load prediction for the next 24 hours by ARIMA, EWMA, LR, and an artificial neural network[J]. ASHARE Transactions, 1995, 101(1): 186 - 200.
- [2] Gudmundur R Jonsson, Valdimar K Jonsson. Equivalent outdoor temperature for district heating systems[J]. ASHARE Transactions, 1995, 101(1): 394 - 399.
- [3] 胡维俭. 热力交换站温度的控制[J]. 煤气与热力, 1996, 16(2): 47 - 51.
- [4] 曹玉强. 分布式集中供热微机控制系统[J]. 自动化仪表, 1998, 11(2): 25 - 27.
- [5] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1996. 45 - 50.
- [6] 周恩泽. 供热负荷中短期预报理论研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学, 1998.
- [7] Cutler C R, Ramaker B L. Dynamic matrix control-A computer control algorithm[A]. Proc. JACC[C]. San Francisco: JACC, 1980.

作者简介:



齐维贵 男,1944 年生于辽宁黑山,教授,主要从事自适应控制、预测控制、智能控制理论及其在工程中的应用研究.



朱学莉 女,1955 年生于江苏赣榆,副教授,主要从事预测控制、智能控制的研究.