

11-20-2019

## Design of Adaptive Predictive Controller for Superheated Steam Temperature Control

Qian Hong

*1. Shanghai University of Electric Power Automation Engineering Academy, Shanghai 200082, China; ;  
2. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200082, China;*

Yuqing Feng

*1. Shanghai University of Electric Power Automation Engineering Academy, Shanghai 200082, China; ;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design of Adaptive Predictive Controller for Superheated Steam Temperature Control

## Abstract

**Abstract:** An *adaptive model predictive controller* for overheating steam temperature control of thermal power plants is designed, which is based on the control object with large delay, large inertia, nonlinearity and strong time-varying properties. Through the *on-line identification and control* of different models, compared with predictive controllers in a general model, in terms of adjusting the superheat steam temperature, the adjusting time can be shortened drastically, the overshoot can be reduced or even eliminated, and the dynamic performance is improved greatly when applying in adaptive model predictive controller. The results show that the adaptive model predictive controller, because of its simple implementation, can be used in power plants, and also can be applied to solve similar problems, which has a broad application prospects.

## Keywords

thermal power plants, superheated steam temperature, online identification, adaptive predictive control, controller design and simulation

## Recommended Citation

Qian Hong, Feng Yuqing. Design of Adaptive Predictive Controller for Superheated Steam Temperature Control[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(5): 1002-1009.

# 针对过热汽温控制的自适应预测控制器设计

钱虹<sup>1,2</sup>, 冯裕卿<sup>1</sup>

(1.上海电力学院 自动化工程学院, 上海 200082; 2.上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200082)

**摘要:** 针对火电厂过热蒸汽温度控制这种具有大延迟、大惯性、非线性、强时变性等特性的被控对象, 设计针对火电厂过热蒸汽温度控制的自适应模型预测控制器, 通过对不同模型的在线辨识和控制表明, 采用自适应模型预测控制器对过热蒸汽温度进行调节, 效果较普通模型预测控制器相比, 调节时间大幅缩短, 超调量得到了减小或消除, 动态性能有了较大的改善。结果表明, 该自适应模型预测控制器实施手段简便, 可在电厂推广使用, 也可应用到解决同类问题中去, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 火电厂; 过热汽温; 在线辨识; 自适应预测控制; 控制器设计仿真

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 05-1002-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0152

## Design of Adaptive Predictive Controller for Superheated Steam Temperature Control

Qian Hong<sup>1,2</sup>, Feng Yuqing<sup>1</sup>

(1.Shanghai University of Electric Power Automation Engineering Academy, Shanghai 200082, China;

2.Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** An adaptive model predictive controller for overheating steam temperature control of thermal power plants is designed, which is based on the control object with large delay, large inertia, nonlinearity and strong time-varying properties. Through the on-line identification and control of different models, compared with predictive controllers in a general model, in terms of adjusting the superheat steam temperature, the adjusting time can be shortened drastically, the overshoot can be reduced or even eliminated, and the dynamic performance is improved greatly when applying in adaptive model predictive controller. The results show that the adaptive model predictive controller, because of its simple implementation, can be used in power plants, and also can be applied to solve similar problems, which has a broad application prospects.

**Keywords:** thermal power plants; superheated steam temperature; online identification; adaptive predictive control; controller design and simulation

## 引言

火电厂过热蒸汽温度的品质会影响电厂机组

的运行效率, 而目前, 火电厂对过热蒸汽温度的调节都无法达到满意的效果, 其原因在于, 过热蒸汽温度控制对象具有大延迟、大惯性的特性, 且由于电厂负荷经常变动的扰动原因, 导致被控对象具有非线性和时变性, 常规控制系统已经无法很好满足电厂过热蒸汽温度调节的品质要求, 因此需要采用先进的控制算法解决。



收稿日期: 2017-04-10 修回日期: 2017-06-24;  
基金项目: 国家自然科学基金(61503237), 上海市自然科学基金(15ZR1418300), 上海市电站自动化技术重点实验室(13DZ2273800);  
作者简介: 钱虹(1967-), 女, 上海, 博士, 教授, 研究方向为过程控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1002 •

目前, 针对过热汽温控制问题研究人员进行了大量的研究<sup>[1-8]</sup>, 文献[9]提出了一种使用径向基(RBF)神经网络整定 PID 串级主蒸汽温度控制策略, 该策略采用一种最近邻聚类法和梯度下降法相结合的混合学习算法构造 RBF 神经网络, 在线辨识被控对象并对 PID 控制器参数进行调整。而此方法缺陷在于该神经网络的建立需要大量的训练数据, 不易实现; 模糊控制是一种普遍的非线性特征域控制器, 适合于非线性、时变系统的控制, 文献[10]利用模糊控制不依赖被控对象数学模型的特点, 将串级 PID 控制和模糊控制优势相结合, 设计出串级模糊控制器。但模糊控制的模糊规则和隶属度函数来源于经验, 控制器设计较为复杂, 不易实现和推广; 文献[11]提出一种可用于设计自适应模糊控制器的模糊化 B 样条神经网络, 并给出了合适的训练算法来对过热汽温进行调节。文献[12-13]针对常规控制系统调节效果动态性能差的问题, 提出采用带约束的预测控制算法, 该控制算法可改善系统的动态性能和抗干扰能力, 适用于具有大延迟、大惯性的被控对象, 但其对于被控对象模型的依赖性较强, 在具有非线性、强时变性的被控对象上适应性较弱。

因此, 本文针对火电厂过热蒸汽温度控制, 设计针对火电厂过热蒸汽温度控制的自适应模型预测控制器, 通过对象的在线辨识得到动态矩阵并通过仿真比较验证了本自适应模型预测控制器的控制能力, 达到了较好的控制性能要求。

## 1 自适应模型预测控制器的设计

### 1.1 系统结构

本研究所设计的针对火电厂过热蒸汽温度控制的自适应模型预测控制器的系统结构图如图 1 所示。该自适应模型预测控制器内置的预测控制算法为基于阶跃响应模型的动态矩阵控制(DMC)算法, 控制器在每一采样时刻  $k$  采样并存储当前时刻控制器输出的控制律  $u(k)$  和被调量  $y(k)$ , 在线辨识

算法模块利用存储的控制律序列和被调量序列在线计算当前被控对象的动态矩阵  $A_1$ , 并替换原有的初始动态矩阵, 以达到动态矩阵自适应的目的。

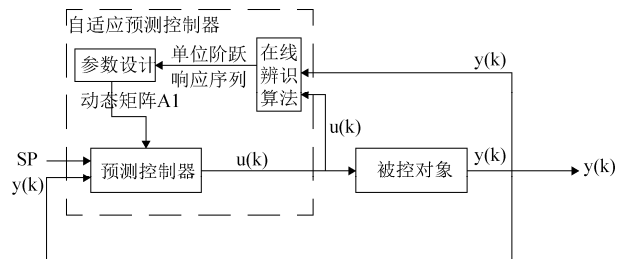


图 1 自适应模型预测控制器系统结构图

Fig. 1 Structure chart of adaptive model predictive control system

### 1.2 控制器的设计

自适应模型预测控制器由模型预测控制器、在线辨识算法模块和预测控制器参数设计模块三大模块组成, 其中模型预测控制器为控制层, 在线辨识算法模块和预测控制器参数设计模块组成在线辨识层。

控制层和在线辨识层同步并行工作。控制层中, 模型预测控制器以过热汽温设定值和实际值作为输入, 计算并输出控制律; 在线辨识层采样并存储每一时刻的控制律  $u(k)$  和被调量实时值  $y(k)$  来更新控制律序列和被调量序列。每一时刻, 在线辨识模块利用更新后的控制律序列和被调量序列进行在线辨识, 得到当前被控对象的单位阶跃响应序列, 该单位阶跃响应序列将被预测控制器参数设计模块作为新的动态矩阵  $A_1$  取代模型预测控制器的原有动态矩阵  $A$  来参与下一时刻预测控制算法的迭代运算。

模型预测控制算法在  $k$  时刻的优化性能指标:

$$\min J(k) =$$

$$\left\| \varpi_p(k) - \hat{y}_{p0}(k) - A\Delta U_M(k) \right\|_Q^2 + \left\| \Delta U_M(k) \right\|_R^2 \quad (1)$$

求该性能优化指标(1)极值的必要条件为:

$$\frac{dJ(k)}{d\Delta U_M(k)} = 0 \quad (2)$$

可求得控制律变化量的最优值为:

$$\Delta U_M(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \Delta u(k+2) \\ \dots \\ \Delta u(k+M-1) \end{bmatrix} = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [\varpi_p(k) - \hat{y}_{p0}(k)] \quad (3)$$

最终可以解得  $k+1$  时刻即时控制作用  $\Delta u(k+1)$  表达式见式(4):

$$\Delta u(k+1) = d^T \times [\varpi_p(k+1) - \hat{y}_{p0}(k+1)] \quad (4)$$

其中,  $k+1$  时刻的初始预测向量  $\hat{y}_{p0}(k+1)$  如式(5)所示:

$$\hat{y}_{p0}(k+1) = [I_{P \times P} \ 0]_{P \times N} \times S_{N \times N} \times \hat{y}_{cor}(k+1) \quad (5)$$

$$\hat{y}_{cor}(k+1) = \hat{y}_{N0_{N \times 1}}(k) + A \times \Delta u(k) + h_{N \times 1} \times$$

$$[y(k+1) - [\hat{y}_0(k+1|k) + a_1 \times \Delta u(k)]] \quad (6)$$

式(4)~(6)为模型预测控制算法中  $k+1$  时刻的即时控制作用  $\Delta u(k+1)$  和  $k$  时刻的即时控制作用  $\Delta u(k)$  之间的函数迭代关系, 该迭代关系式的核心是动态矩阵  $A$ ,  $\Delta u(k+1)$  和  $\Delta u(k)$  之间的关系是由

动态矩阵  $A$  决定的。动态矩阵  $A$  其实是预测控制算法的预测模型, 而模型预测控制算法对预测模型的依赖性极强, 预测模型的准确与否直接关系到控制器的调节效果, 因此本自适应模型预测控制器设计的一大核心功能为通过在线辨识算法实时对当前被控对象进行在线辨识, 实时地更新预测控制算法的动态矩阵  $A$ , 以避免出现预测模型和被控对象实际模型偏离的情况, 从而实现预期的控制效果。

## 2 在线辨识算法

### 2.1 在线辨识算法结构

在线辨识算法的结构框图如图 2 所示, 在线辨识算法模块的输入为每一采样时刻的预测控制算法控制律增量  $\Delta u$  和当前时刻的被测量采样值  $y$ , 输出为所需的模型预测控制算法的预测模型, 即动态矩阵  $A$ 。

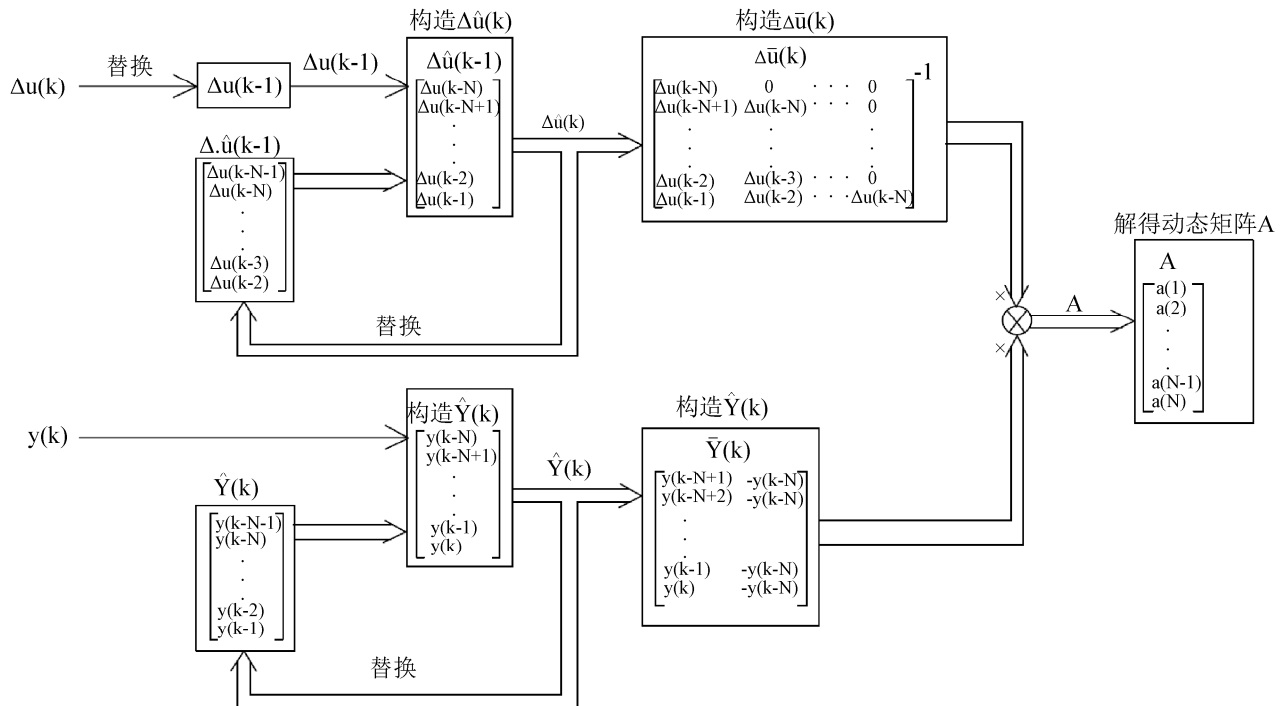


图 2 在线辨识算法结构图  
Fig. 2 Structure chart of online identification algorithm

在采样时刻  $k$ , 在线辨识模块采样当前时刻的控制律增量  $\Delta u(k)$  和被调量的实时值  $y(k)$ 。替换上一采样时刻的控制律增量  $\Delta u(k-1)$  被存储, 以用作下一时刻的在线辨识, 被替换出来的  $\Delta u(k-1)$  和前一  $N-1$  个时刻的控制律增量向量  $\hat{\Delta u}(k-1)$  (见式(7)) 共同构成向量  $\hat{\Delta u}(k)$ 。向量  $\hat{\Delta u}(k-1)$  的所有元素除首元素外, 每一位都向上移动一位, 最后一位由  $\Delta u(k-1)$  来填充, 所得向量即为  $\hat{\Delta u}(k)$ 。

$$\hat{\Delta u}(k-1)=[\Delta u(k-N-1)\cdots\Delta u(k-1)\Delta u(k-2)]^T \quad (7)$$

$$\hat{\Delta u}(k)=[\Delta u(k-N)\cdots\Delta u(k-2)\Delta u(k-1)]^T \quad (8)$$

同时, 将新构成的向量  $\hat{\Delta u}(k)$  (见式(8)) 替换原有的  $\hat{\Delta u}(k-1)$  (见式(7)), 为下一时刻在线辨识做准备。利用所得到的向量  $\hat{\Delta u}(k)$  (见式(8)) 的  $N$  个控制律增量历史值构造  $N$  维矩阵  $\bar{\Delta u}(k)$  (见式(9))。

$$\bar{\Delta u}(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k-N) & 0 & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-N+1) & \Delta u(k-N) & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-2) & \Delta u(k-3) & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-1) & \Delta u(k-2) & \cdots & \Delta u(k-N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

在采样时刻  $k$ , 所采集到的另一个值为被调量的实时值  $y(k)$ ,  $y(k)$  与前  $N+1$  个采样时刻的被调量实时值共同构成向量  $\hat{Y}(k)$ 。  $\hat{Y}(k-1)$  (见式(10)) 的所有元素除首元素外, 每一位都向上移动一位, 最后一位由  $k$  时刻被调量的采集值  $y(k)$  来填充, 所得向量即为  $\hat{Y}(k)$  (见式(11))。同理,  $\hat{Y}(k)$  替换原有的  $\hat{Y}(k-1)$ , 为下一次在线辨识做准备。

$$\hat{Y}(k-1)=[y(k-N-1) y(k-N)\cdots y(k-1)]^T \quad (10)$$

$$\hat{Y}(k)=[y(k-N) y(k-N+1)\cdots y(k)]^T \quad (11)$$

利用所得到的向量  $\hat{Y}(k)$  的  $N+1$  个被调量历史值构造  $N$  维向量  $\bar{Y}(k)$  (见式(12))。

$$\bar{Y}(k) = \begin{bmatrix} y(k-N+1)-y(k-N) \\ y(k-N+2)-y(k-N) \\ \cdots \\ \cdots \\ y(k-1)-y(k-N) \\ y(k)-y(k-N) \end{bmatrix} \quad (12)$$

将计算所得的  $N$  维矩阵  $\bar{\Delta u}(k)$  和  $N$  维向量  $\bar{Y}(k)$  相乘, 所得  $N$  维向量即所求得模型预测控制算法预测模型, 即动态矩阵  $A$ 。

## 2.2 在线辨识算法表达式

具体的算法表达为: 在  $k$  时刻, 根据模型预测控制算法的控制时域  $N$ , 存储有包括  $k$  时刻采样值在内的  $N+1$  个被调量历史值  $\hat{Y}(k)$  (见式(13)) 和  $N$  个控制律增量历史值  $\hat{\Delta u}(k)$  (见式(14))。

$$\hat{Y}(k)=[y(k-N) y(k-N+1)\cdots y(k)]^T \quad (13)$$

$$\hat{\Delta u}(k)=[\Delta u(k-N)\cdots\Delta u(k-2) \Delta u(k-1)]^T \quad (14)$$

需要通过在线辨识算法求解的动态矩阵  $A$  为:

$$A=[a_1 a_2 a_3 \cdots a_{N-1} a_N]^T \quad (15)$$

$N+1$  个被调量历史值、 $N$  个控制律增量和动态矩阵  $A$  三者之间的关系可以用以下关系式进行表示:

$$y(k-N+1)=y(k-N)+a_1 \times \Delta u(k-N)$$

$$y(k-N+2)=y(k-N)+a_1 \times$$

$$\Delta u(k-N+1)+a_2 \times \Delta u(k-N)$$

$$Y(k-N+3)=y(k-N)+a_1 \times \Delta u(k-N+2)+$$

$$a_2 \times \Delta u(k-N+1)+ \quad (16)$$

$$a_3 \times \Delta u(k-N)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$y(k)=y(k-N)+a_1 \times \Delta u(k-1)+a_2 \times$$

$$\Delta u(k-2)+\cdots+a_N \times \Delta u(k-N)$$

即:

$$y(k-N+1)=y(k-N)+$$

$$\sum_{j=1}^N a_j \times \Delta u(k-N+(i-j))$$

$$i=1,2,3,\cdots,N \quad j \leq i \quad (17)$$

将上述表达式组成矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} y(k-N+1) \\ y(k-N+2) \\ y(k-N+3) \\ \vdots \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(k-N) \\ y(k-N) \\ y(k-N) \\ \vdots \\ \vdots \\ y(k-N) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta u(k-N) & 0 & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-N+1) & \Delta u(k-N) & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-N+2) & \Delta u(k-N+1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-1) & \Delta u(k-2) & \cdots & \Delta u(k-N) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (18)$$

求解该矩阵方程即可得到所需的动态矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta u(k-N) & 0 & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-N+1) & \Delta u(k-N) & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-N+2) & \Delta u(k-N+1) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & 0 \\ \Delta u(k-1) & \Delta u(k-2) & \cdots & \Delta u(k-N) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} y(k-N+1)-y(k-N) \\ y(k-N+2)-y(k-N) \\ y(k-N+3)-y(k-N) \\ \vdots \\ \vdots \\ y(k)-y(k-N) \end{bmatrix} \quad (19)$$

即图 2 在线辨识算法结构图中所表示的动态矩阵  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \Delta \bar{u}(k) \times \bar{Y}(k) \quad (20)$$

最终解得动态矩阵  $A$  的  $N$  个模型系数  $a_i$  为:

$$a_i = \begin{cases} \frac{y(k-N+1)-y(k-N)}{\Delta u(k-N)}, i=1 \\ \frac{1}{\Delta u(k-N)} \times \{y(k-N+j)-y(k-N)- \left[ \sum_{j=1}^{i-1} a_j \times \Delta u(k-N+i-j) \right] \}, i=2,3,\dots,N \end{cases} \quad (21)$$

在线辨识得到的该动态矩阵  $A$  就是预测控制算法新的预测模型。将该动态矩阵  $A$  代替模型预测控制算法原有动态矩阵即完成一次模型在线辨识。

### 3 仿真实例

#### 3.1 过热汽温控制系统被控对象模型建立

减温水流量变化是引起过热器蒸汽温度变化的主要因素,采用喷水减温进行过热蒸汽温度调节的控制系统结构简单,且对过热器安全运行比较有利,是目前电厂广泛采用的过热蒸汽温度调节方法。

对过热蒸汽温度被控对象的动态特性模型辨识拟采用减温水流量扰动下的蒸汽温度变化试验测试。图 3 为过热汽温被控对象结构图。系统通过改变减温水阀门开度  $u$  调节减温水流量来控制主蒸汽温度  $y$ 。

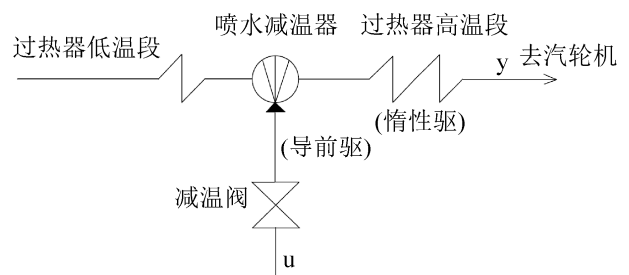


图 3 过热汽温被控对象结构图  
Fig. 3 Structure chart of superheated steam temperature controlled object

测试试验对某电厂 300 MW 机组减温水阀门开度  $u$  (作为输入量) 进行阶跃扰动测试,并记录过热器出口温度  $y$  的历史数据,通过输入输出数据进行辨识来建立过热汽温被控对象的数学模型。由于电厂负荷并不是一个固定不变的参数,当负荷发生改变,减温水阀门开度  $u$  和过热器出口温度  $y$  之间的对应关系同样也会发生变化,因此,使用由减温水阀门开度  $u$  和过热器出口温度  $y$  作为输入量来辨识的到的模型来进行研究可靠性有所降低。故,对记录得到的减温水阀门开度  $u$  和对应时刻的过热器出口温度  $y$  的历史数据做简单处理,得到了减温水阀门开度变化量  $\Delta u$  和对应时刻的过热器出口温度变

化量  $\Delta y$ 。由于减温水阀门开度变化量  $\Delta u$  和过热器出口温度变化量  $\Delta y$  的对应关系在一定程度上表明了减温水调节过热汽温的能力, 是不会随负荷改变而大幅变化的, 因此利用  $\Delta u$  和  $\Delta y$  作为输入进行被控对象的数学模型的辨识具有较高的可靠性。

针对六种不同负荷工况, 对被控对象模型进行辨识, 并做一定的处理, 得到的 6 种模型如表 1 所示。本文针对以上 6 种过热蒸汽温度控制的模型进行自适应模型预测控制器的仿真对比试验, 验证本自适应预测控制器较常规模型预测控制在被控对象发生改变时调节效果上的优势。

表 1 被控对象数学模型

模型	$G(s)=\Delta y/\Delta u(^{\circ}\text{C}/\%)$
模型 1 $G_1(s)$ (初始模型)	$1.2486/(123s+1)^2$
模型 2 $G_2(s)$	$1.2619/(350s+1)$
模型 3 $G_3(s)$	$1.2619/(150s+1)$
模型 4 $G_4(s)$	$1.6486/(123s+1)^2$
模型 5 $G_5(s)$	$1.9486/(123s+1)^2$
模型 6 $G_6(s)$	$2.2486/(123s+1)^2$

### 3.2 自适应预测控制器仿真

仿真测试平台由 Visual Studio2010 和 MATLAB/

Simulink 仿真软件共同搭建完成。本研究针对的火电厂过热蒸汽温度控制的自适应模型预测控制器的功能在 Visual Studio2010 上实现, 本自适应模型预测控制器通过 OPC 接口与 MATLAB/Simulink 仿真平台对接。

MATLAB/Simulink 仿真模型如图 4 所示, 自适应模型预测控制器计算得到的控制律通过 OPC 接口传输给下图中名为“U\_MPC”的 OPC Read 模块, 并作用在被控对象上, 输出端得到的被调量将被名为“Actual\_Temper”的 OPC Write 模块通过 OPC 接口传回自适应模型预测控制器参与控制律的计算, 最终完成被调量对设定值的追踪过程。

对比测试将就表 1 所示的模型进行, 过热器初始温度为  $523^{\circ}\text{C}$ , 设定温度为  $540^{\circ}\text{C}$ , 对比相同模型下自适应模型预测控制与普通模型预测控制器的控制特性曲线。对照测试保证自适应模型预测控制器和普通模型预测控制器的初始预测模型(动态矩阵 A)保持一致, 都采用了初始模型(模型 1)的单位阶跃响应序列。以剩余的模型 2~6 这 5 种模型作为被控对象来分别进行对比实验, 结果通过示波器显示控制特性曲线, 结果如图 5 所示。

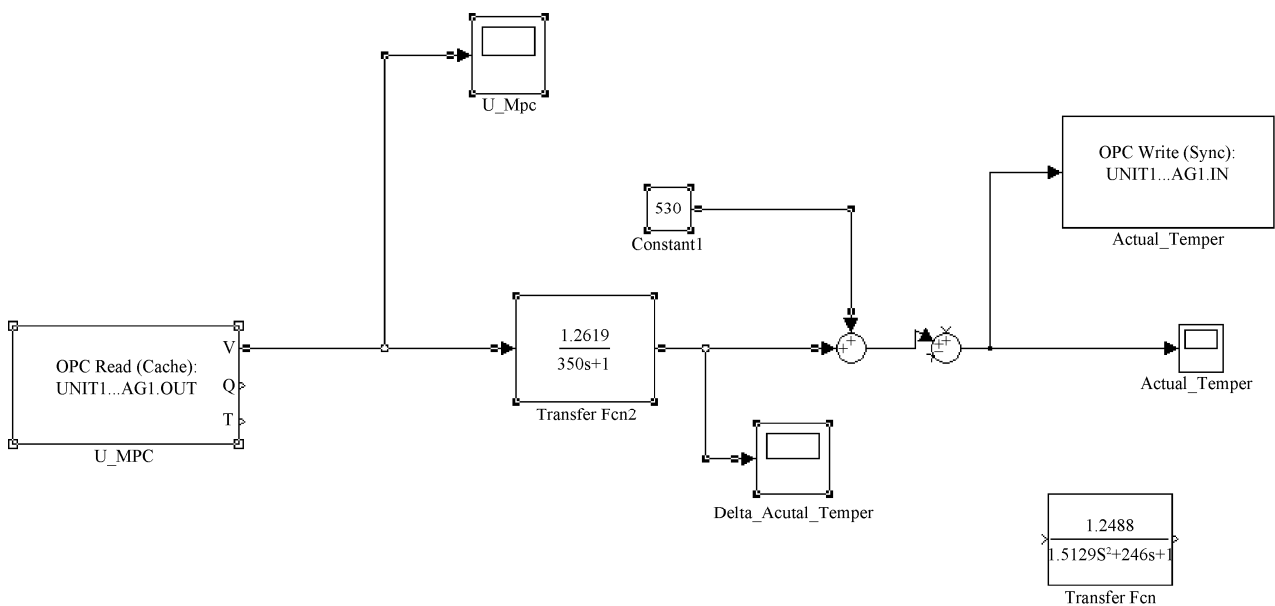
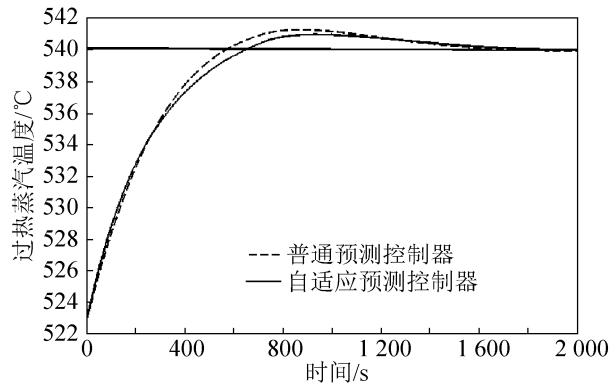


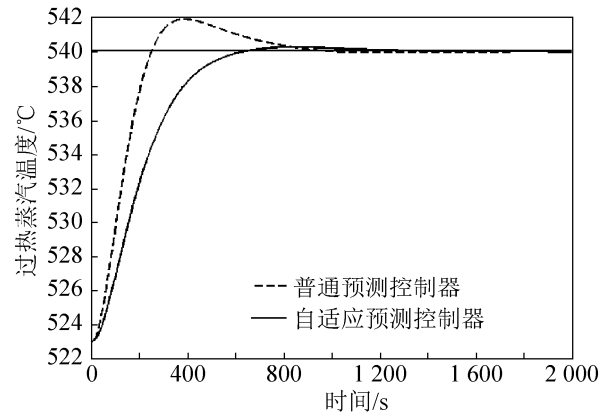
图 4 自适应模型预测控制器仿真图

Fig. 4 Simulation chart of adaptive model predictive controller

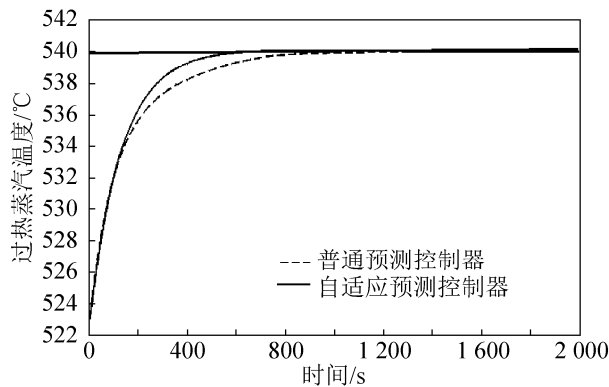




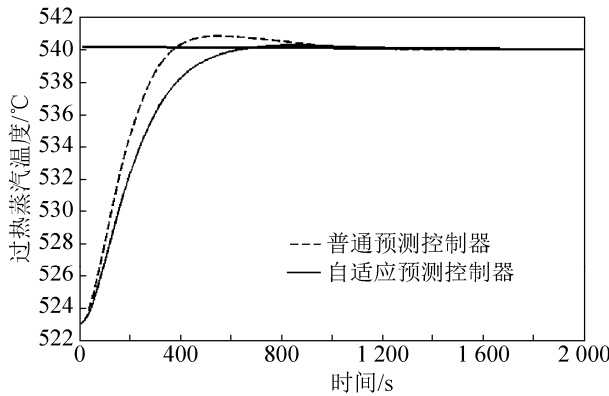
(a) 模型 2



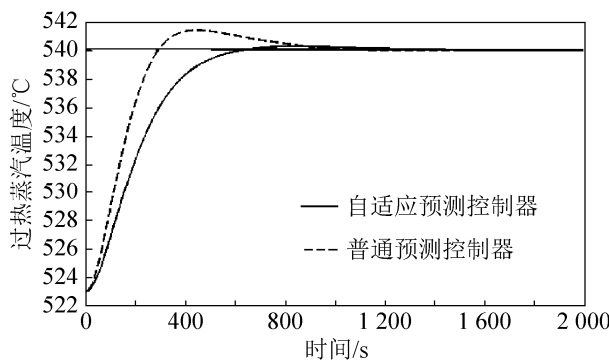
(e) 模型 6



(b) 模型 3



(c) 模型 4



(d) 模型 5

图5 普通预测控制器与自适应预测控制器控制曲线对比  
Fig. 5 Control curve comparison between general predictive controller and adaptive predictive controller

通过以上仿真对比实验图可以看出,在模型2和模型3下,采用自适应MPC预测控制器进行调节,通过对绝对误差积分<sup>[14]</sup>性能指标进行计算,结果较普通预测控制器相比,绝对误差积分分别降低了17%和3%,同时调节时间分别缩短了50%和10%。在模型4、模型5和模型6下,采用自适应MPC预测控制器进行调节,调节时间分别缩短了52%,43%和37%,且完全消除了超调量,使控制特性曲线更加平稳,极大降低了波动性。综上所述,通过对比仿真试验结果可知,采用自适应MPC预测控制器进行调节,能够有效缩短调节时间,减小甚至消除超调量,在一定程度上提高了系统的动态性能,并能够有效地适应被控对象的变化,在对具有大延迟、大惯性、多扰动、强时变性特性的被控对象的控制上具有较为突出的优势。

## 4 结论

本文针对火电厂过热蒸汽温度控制的自适应模型预测控制器进行设计研究,通过对在线辨识算法的研究和自适应模型预测控制器的合理设计,解决了电厂负荷变化时引起的一些扰动,如减温水流量特性改变等,所导致的过热汽温调节无法达到满意效果的问题,使得过热汽温跟踪设定温度速度更快,过程更加平稳。同时,本在线辨识算法实施手

段简便,可在电厂推广使用,也可推广应用到解决同类问题中去。

### 参考文献:

- [1] 李佳. 模糊自整定 PID 控制在过热汽温控制系统中的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.  
Li Jia. Study and Application of the Fuzzy Self-tuning PID Control in Superheated Steam Temperature System [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
- [2] 田伟. 基于非线性状态观测器的过热汽温控制系统的分析与设计[D]. 石家庄: 华北电力大学, 2013.  
Tian Wei. The Analysis and Design of Superheated Steam Temperature Control System Based on Nonlinear State Observer[D]. Shijiazhuang: North China Electric Power University, 2013.
- [3] 张丽香, 陈凤兰. 自适应 Smith 预估补偿的过热汽温控制系统[J]. 信息与控制, 2015, 44(5): 513-518.  
Zhang Lixiang, Chen Fenglan. Superheated Steam Temperature Control System Based on Adaptive Smith Predictive Compensation[J]. Information and Control, 2015, 44(5): 513-518.
- [4] 刘长良, 马增辉, 开平安. 电站过热汽温系统的内模 PID 控制及其仿真 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(11): 2722-2733.  
Liu Changliang, Ma Zenghui, Kai Ping'an. Inter Model PID Control and Its Simulation in Main Steam Temperature System of Power Plant[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(11): 2722-2733.
- [5] 吴丹丹, 张丽香, 王俊刚. 基于 TDFMD PID 的锅炉过热汽温控制系统研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(12): 970-974.  
Wu Dandan, Zhang Lixiang, Wang Jungang. Study on Bolier Superheated Steam Temperature Control System Based on TDFMD PID[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(12): 970-974.
- [6] 孙立, 董君伊, 李东海. 基于果蝇算法的过热汽温自抗扰优化控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(10): 1288-1292.  
Sun Li, Dong Junyi, Li Donghai. Active disturbance rejection control for superheated steam boiler temperatures using the fruit fly algorithm[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2014, 54(10): 1288-1292.
- [7] 王富强. 基于逆向传递策略的直流锅炉主汽温网络化预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4981-4990.  
Wang Fuqiang. Networked Predictive Control of Main Steam Temperature for Once-through Boiler Based on Reverse Transfer Strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4981-4990.
- [8] 钱积新, 赵均, 徐祖华. 预测控制[M]. 1 版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 49-68.  
Qian Jixin, Zhao Jun, Xu Zuhua. Predictive control[M]. 1<sup>st</sup> ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 49-68.
- [9] 王杰, 姜国强, 王栓. 基于混合学习算法的 RBF 神经网络主蒸汽温度控制[J]. 热力发电, 2009, 38(2): 28-32.  
Wang Jie, Jiang Guoqiang, Wang Shuan. Main Steam temperature Control Using RBF Neural Network Based on Hybrid Learning Algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(2): 28-32.
- [10] 张波. 串级模糊控制器自过热蒸汽温度控制中的应用[J]. 锅炉技术, 2010, 41(2): 5-9.  
Zhang Bo. The Cascade Fuzzy Controller in the Application of the Superheat Vapor Temperature[J]. Boiler Technology, 2010, 41(2): 5-9.
- [11] 濮卫兴, 陈来九. 用 B 样条神经网络设计自适应模糊控制器[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(4): 448-454.  
Pu Weixing, Chen Laijiu. Designing Adaptive Fuzzy Controllers Based on B-Spline Neural Networks[J]. Control Theory & Applications, 1996, 13(4): 448-454.
- [12] 王喜庆, 冯晓露. 电厂过热蒸汽温度的有约束预测控制[J]. 动力工程学报, 2010, 30(3): 192-195.  
Wang Xiqing, Feng Xiaolu. Application of Constrained Predictive Model to Power Plant Superheated Steam Temperature Control[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(3): 192-195.
- [13] 杨祖魁. 基于模型技术的典型低氮燃烧型 AGC 机组控制系统优化[D]. 上海: 上海电力学院, 2016.  
Yang Zukui. Control System Optimization of Typical Low Nitrogen Combustion AGC Unit Based on Model Technology[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2016.
- [14] 王谦. 基于继电反馈的预测 PI 控制系统性能评价[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.  
Wang Qian. Performance Assessment to Predictive PI Control System Based on Relay Feedback[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2008.