

火电机组锅炉过热汽温的约束模型预测控制研究

睢 刚, 陈绍炳, 徐治皋

(东南大学 动力系, 江苏 南京 210096)

摘 要: 提出了一种具有输入硬约束的模型预测控制算法, 该算法无需在线迭代求解或矩阵在线求逆, 具有算法简单, 在线计算量小的优点。将其应用于火电机组锅炉过热汽温控制进行仿真研究, 结果表明该算法是有效的。

关 键 词: 预测控制; 约束; 锅炉; 过热汽温

中图分类号: TP273; TK223.7⁺³ 文献标识码: A

1 引言

随着我国的电力工业的发展, 电力企业对火电机组控制系统的性能提出了更高的要求。锅炉过热汽温是火电机组重要的被控参数之一, 目前国内火电机组控制系统仍普遍采用 PID 控制器, 由于锅炉过热汽温过程具有较大的惯性和滞后, 常规的 PID 控制系统往往不能很好地将其控制在预定的范围内^[1]。预测控制是 20 世纪 70 年代后期产生的一类新型控制技术, 由于其对有大惯性、大滞后特性的工业过程具有很好的控制品质和鲁棒性, 因而受到人们的广泛重视^[2]。研究表明, 预测控制对热工过程的控制性能远优于 PID 控制^[1]。

在实际应用中, 受执行机构(如阀门、挡板等)的制约, 过程的有效控制输入总是在一个有限范围内的, 因此控制算法应对控制量的范围进行限制; 另外, 执行机构的动作需要一定的行程时间, 控制算法也要对控制量的变化速度加以限制。在控制算法中考虑这些客观物理条件的限制就是对控制施加硬约束。尽管预测控制具有很强的处理各种约束的能力^[3], 但是, 目前已有的预测控制方法是通过反复在线求解一个带不等约束的二次优化问题来实现约束预测控制的, 其控制算法涉及在线迭代求解或矩阵在线求逆^[3~4], 因此算法较复杂, 在线计算量大, 不利于工程应用。工程应用总是要求控制算法越简单越好, 特别是国内大型火电机组普遍采用了 DCS, 而 DCS 的实现客观上要求控制算法不能太复杂。为此, 本文作者针对控制输入受约束问题, 提出了一种新的约束模型预测控制算法, 并将其应用于火电

组锅炉过热汽温控制中, 仿真研究结果表明, 该算法具有优良的控制性能, 并且算法简单, 在线计算量小, 有利于工程实现。

2 具有输入硬约束的模型预测控制算法

设被控过程为:

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-1) \quad (1)$$

式中, $y(k)$ 为过程输出, $u(k)$ 为控制输入, $A(q^{-1})$ 和 $B(q^{-1})$ 为如下 q^{-1} 的多项式:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_nbq^{-nb}$$

过程的第 N 步输出预测值可通过如下的递推算算法计算:

$$\hat{y}(k+j) = -\sum_{i=1}^{na} a_i \hat{y}(k+j-i) + \sum_{i=0}^{nb} b_i u(k+j-i-1) + d(k+j) \quad j = 0, 1, \dots, N \quad (2)$$

式中 $d(k+j)$ 为未来各时刻过程所受扰动的预测值, 由下式估算:

$$d(k+j) = d(k) = y_m(k) - \left[-\sum_{i=1}^{na} a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^{nb} b_i u(k-i-1) \right] \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中 $y_m(k)$ 为当前时刻过程输出的测量值。式(3)假定未来各时刻过程所受的扰动恒定不变, 其大小为当前时刻过程输出的测量值与模型输出值之差。

定义 N 步预测偏差

$$\hat{e}(k+N) = r - \hat{y}(k+N) \quad (4)$$

其中 r 为过程输出的设定值。设过程当前和未来的控制量大小恒为前一时刻的控制输入量 $u(k-1)$ 时, 过程的 N 步预测差为 $\hat{e}_0(k+N)$ 。假定过程的增益为正, 如果 $\hat{e}_0(k+N) > 0$, 表明当前时刻的控制量 $u(k)$ 应大于前一时刻的控制量 $u(k-1)$, 即 $\Delta u(k)$ 应大于 0; 如果 $\hat{e}_0(k+N) < 0$, 表明当前时刻的控制量 $u(k)$ 应小于前一时刻的控制量 $u(k-1)$, 即 $\Delta u(k)$ 应小于 0。因此在确定当前时刻的控制输

入时,可根据 $\hat{e}_0(k+N)$ 的符号确定控制量的变化方向.考虑如下的控制量硬约束条件

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \quad (5)$$

$$|\Delta u(k)| \leq \Delta u_{\max} \quad (6)$$

式中 u_{\min} 和 u_{\max} 分别为控制量的下限和上限, Δu_{\max} 为控制量变化的上限,则预测控制律可取为

$$\Delta u(k) = \begin{cases} \alpha_1 \min[\Delta u_{\max}, u_{\max} - u(k-1)] & \text{if } \hat{e}_0(k+N) > 0 \\ -\alpha_2 \min[\Delta u_{\max}, u(k-1) - u_{\min}] & \text{if } \hat{e}_0(k+N) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

显然,只要 α_1 和 α_2 在 $[0, 1]$ 区间取值,就能保证满足式(5)和式(6)的约束条件.

式(7)的控制律只考虑了控制量的变化方向和控制量的约束条件,要获得满意的控制品质还必须确定控制量的变化大小.显然, $\hat{e}_0(k+N)$ 的绝对值越小, $|\Delta u(k)|$ 应越小,因此 α_1 和 α_2 的取值应越小;反之, $\hat{e}_0(k+N)$ 的绝对值越大, $|\Delta u(k)|$ 应越大, α_1 和 α_2 的取值也应越大.为此取

$$\alpha_1 = \beta \frac{|\hat{e}_0(k+N)|}{|\hat{e}_0(k+N)| + |\hat{e}_1(k+N)|} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \beta \frac{|\hat{e}_0(k+N)|}{|\hat{e}_0(k+N)| + |\hat{e}_2(k+N)|} \quad (9)$$

式中, $\beta \in [0, 1]$, $\hat{e}_1(k+N)$ 和 $\hat{e}_2(k+N)$ 为过程当前和未来的控制量大小分别恒为 u_{\max} 和 u_{\min} 时,过程的 N 步预测偏差.这里引入 $\hat{e}_1(k+N)$ 和 $\hat{e}_2(k+N)$ 是为了提高预测控制的性能. $\hat{e}_1(k+N)$ 或 $\hat{e}_2(k+N)$ 的绝对值越小,表明 $u(k)$ 的取值应距 u_{\max} 和 u_{\min} 越近,因此 α_1 和 α_2 的取值应越大;反之,亦然.因此式(8)和式(9)实际上是根据过程当前和未来的控制量大小分别恒为 $u(k-1)$ 、 u_{\max} 和 u_{\min} 时过程的 N 步预测偏差的大小来决定当前时刻的控制输入的变化量.下面给出完整的预测控制算法步骤:

(1) 确定控制量的下限和上限 u_{\max} 和 u_{\min} , 以及控制量变化的上限 Δu_{\max} , 设置预测步数 N 和参数 β 的值;

(2) 由式(2)、式(3)和式(4)计算过程当前和未来的控制量大小分别恒为 $u(k-1)$ 、 u_{\max} 和 u_{\min} 时过程的 N 步预测偏差 $\hat{e}_0(k+N)$ 、 $\hat{e}_1(k+N)$ 和 $\hat{e}_2(k+N)$;

(3) 根据式(7)、式(8)和式(9)计算当前时刻的 $\Delta u(k)$ 及相应的 $u(k)$;

(4) 将 $u(k)$ 作用于过程,转至式(2).

3 仿真研究

为验证本文的约束预测控制算法的有效性,现以某火电机组锅炉过热汽温为被控过程进行仿真研究.图1为过热汽温串级控制系统框图.图中 $W_{a1}(s)$ 、 $W_{a2}(s)$ 分别为副、主调节器, $W_{01}(s)$ 、 $W_{02}(s)$ 、 $W_{01}(s)$ 分别为调节对象及其导前区的传递函数, $W_{H1}(s)$ 、 $W_{H2}(s)$ 分别为导前汽温和过热汽温测量单元,各环节模型为[1, 5]:

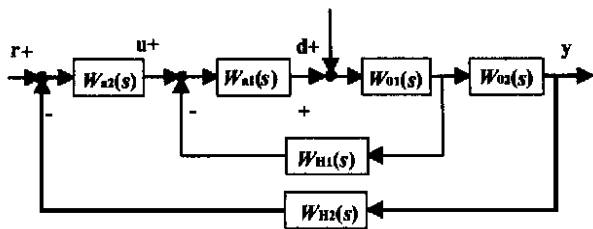


图1 单元机组过热汽温调节系统框图

$$W_{01}(s) = \frac{8}{(1+15s)^2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mA}$$

$$W_{02}(s) = \frac{1.125}{(1+25s)^3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mA}$$

$$W_{H1}(s) = W_{H2}(s) = 0.1 \text{ mA}/^\circ\text{C}$$

在预测控制仿真中,副调节器 $W_{a1}(s)$ 采用比例控制,取 $W_{a1}(s) = 25$,主调节器 $W_{a2}(s)$ 采用预测控制,其等效的预测控制系统如图2所示,图中 $W_e(s)$ 为等效被控过程

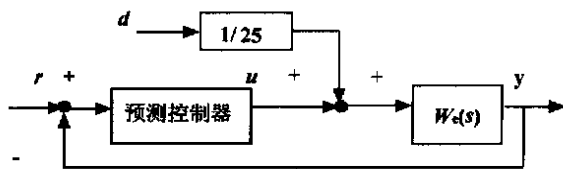


图2 过热汽温预测控制系统等效框图

$$W_e(s) = \frac{W_{a1}(s)W_{01}(s)W_{02}(s)W_{H2}(s)}{1+W_{a1}(s)W_{01}(s)W_{H1}(s)}$$

取采样周期为 5 s,对 $W_e(s)$ 进行 z 变换(加零阶保持器),得如下等效过程的模型[1]:

$$\begin{aligned} A(q^{-1})y(k) &= B(q^{-1})u(k-1) + \xi(k)/\Delta \\ A(q^{-1}) &= 1 - 2.5711q^{-1} + 2.8068q^{-2} - \\ & 2.0413q^{-3} + 1.0957q^{-4} - 0.2818q^{-5} \\ B(q^{-1}) &= 0.0001 + 0.0024q^{-1} + 0.0047q^{-2} + \\ & 0.0016q^{-3} + 0.0001q^{-4} \end{aligned}$$

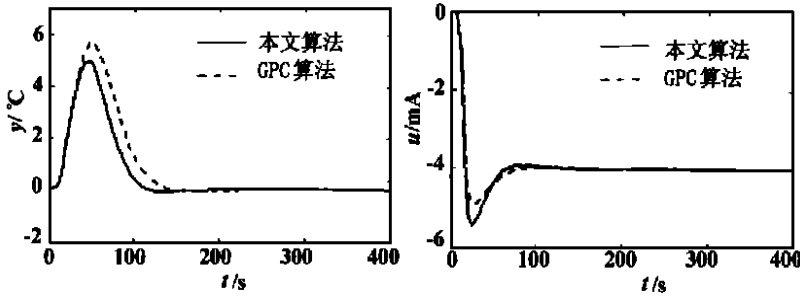


图 3 d 作 +100 mA 阶跃变化时预测控制系统的响应

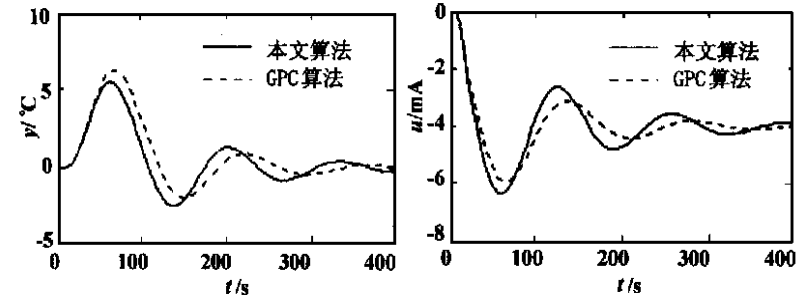


图 4 对象惯性变大后预测控制系统的响应

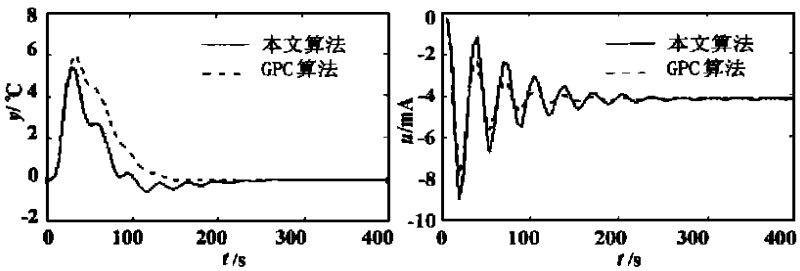


图 5 对象增益变大后预测控制系统的响应

假定预测控制器输出的控制量的上下限分别为 $u_{max} = 50 \text{ mA}$ 和 $u_{min} = -50 \text{ mA}$, 控制量变化的上限为 $\Delta u_{max} = 40 \text{ mA}$. 取控制参数 $N = 10, \beta = 0.8$, 图 3 为当 d 作 +100 mA 阶跃变化时, 过热汽温控制系统的响应曲线. 为说明约束预测控制的性能, 图中同时给出了采用广义预测控制(GPC)的过热汽温控制仿真曲线, 广义预测控制的仿真采用了文献[1]给出的设计参数. 显然, 本文提出的约束预测控制算法具有很好的控制品质.

一般来说, 过热汽温过程的惯性会受积灰等因素的影响而变大. 假定变化后的对象模型为 ($W_{01}(s)$ 不变)

$$W'_{02}(s) = \frac{1.125}{(1 + 35s)^3}$$

而控制系统其它各环节均不变. 图 4 为对象惯

性变大后预测控制系统的响应曲线. 假定对象的增益发生变化, $W_{02}(s)$ 的分之由 1.125 变大为 2.0, 图 5 为对象增益变大后预测控制系统仿真结果. 从图 4 和图 5 可看出, 约束预测控制算法具有很好的鲁棒性.

大量仿真研究结果表明, 约束预测控制算法的参数 N 和 β 的取值对控制性能的影响具有明确的规律性: N 减小或 β 增大, 控制输入变化加快, 系统动态偏差减小, 但系统的鲁棒性减弱; 反之, 亦然. 因此, 在实际应用中可通过改变参数 N 和 β 的取值来调整预测控制系统的性能.

4 结论

目前国内火电机组控制系统采用的控制技术趋于保守, 已远远落后于控制理论及其相应的控制技术的发展. 如何将一些先进的控制技术应用于热工过程的控制, 以提高火电机组控制系统的性能, 是一个值得研究的课题. 本文作者针对目前已有的约束预测控制方法存在的算法复杂, 在线计算量大的问题, 提出了一种新的约束模型预测控制算法, 并将其应用于火电机组锅炉过热汽温控制, 仿真研究结果表明本文提出的约束预测控制算法是有效的. 由于该约束模型预测控制算法避免了在线迭代求解或矩阵在线求逆等问题, 因此算法较为简单, 在线计算量小, 为预测控制在热工过程控制中的应用提供了方便.

参考文献:

- [1] 吕剑虹. 预测控制在热工过程控制中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 1990.
- [2] QIN S J, BADGWELL T A. An overview of industrial model predictive control technology[A]. AICHE Symposium Series: Fifth International Conference on Chemical Process Control[C]. California: 1996. 232-256.
- [3] GARCIA C E, PRETT D M, MORARI M. Model predictive control: theory and practice-a survey[J]. *Automatica*, 1989 25(3): 335-348.
- [4] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [5] 陈来九. 热工过程自动调节原理和应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.

tute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—637~640

The use of an advanced combustion diagnostic system can be conducive to an effective enhancement of utility boiler operation economy and safety. Through the collection of furnace flame images and by utilizing computer-based digital image processing techniques as well as the analysis method of an artificial neural network model a combustion diagnostic system of flame images has been developed for boiler No. 5 of Yongan Thermal Power Plant in Fujian Province. This system has provided meaningful quantified characteristics parameters, performing a highly effective probing of the combustion condition identification mechanism. As a result, a new method and approach for combustion diagnosis and optimized control is provided for utility boilers. **Key words:** utility boiler, combustion diagnosis, digital image, artificial neural network

火电机组锅炉过热汽温的约束模型预测控制研究 = **A Study of the Constrained Model Predictive Control for the Boiler Superheated Steam of a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / JU Gang, CHEN Shao-bing, XU Zhi-gao (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—641~643

Presented is a model predictive control algorithm with an input of hard constraints. With no need for on-line iteration solution or on-line matrix inversion the recommended algorithm features a simplified calculation method with a low on-line computation load. It has been employed for the simulation study of boiler superheated steam control of thermal power plants and proved to be highly effective. **Key words:** predictive control, constraint, boiler, superheated steam temperature

75 t/h 树皮—煤粉复合燃烧系统的建模与仿真 = **Model Building and Simulation of a 75 t/h Bark and Pulverized Coal-fired Boiler** [刊, 汉] / BAO Gang, DENG Su-bi, WANG Zu-wen (Pneumatics Technology Center under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—644~645, 649

A 75 t/h boiler with a composite firing system operates on bark and pulverized coal. A model of the firing system has been set up with the combustion system serving as an object model. Meanwhile, a simulation of its control system was also conducted. **Key words:** fluidized bed boiler, simultaneous burning of bark and pulverized coal, mathematical model, control system simulation

压水堆核电站二回路的反平衡单元分析法 = **Inverse-balance Element Analysis for the Secondary Circuit of a Pressurized Water Reactor-based Nuclear Power Plant** [刊, 汉] / LI Yun-ze, YAN Jun-jie, LIN Wan-chao (Power System Engineering Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), DENG Shi-min (Thermal Engineering Research Institute of National Electric Power Co., Xi'an, China, Post Code: 710032) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(6)—646~649

On the basis of analyzing the effect of additional components on the incoming water factor of a heating unit derived is a general expression for the incoming water factor of the high-pressure heating unit of a secondary circuit. Through a detailed theoretical analysis and mathematical deduction an inverse-balance mathematical model was set up for the secondary circuit of a pressurized water reactor-based nuclear power plant. The foregoing has laid a theoretical basis for the inverse-balance element analytical method of the above-mentioned secondary circuit. Such an analytical method features a simplified calculation and an accuracy of the calculated results. Being convenient for manual calculations and programming-based electronic calculations, it represents one of the effective tools for the secondary circuit system design and energy-saving diagnosis. **Key words:** pressurized water reactor-based nuclear power plant, secondary circuit, heating unit, incoming water factor, heat release factor, inverse-balance element analytical method

利用 Monte Carlo 方法对循环流化床锅炉炉膛传热的数值计算 = **Numerical Calculation of Heat Transfer in a**