

# 1000 MW超超临界机组的多变量约束预测控制的研究

王国良<sup>1</sup>, 阎威武<sup>1</sup>, 陈世和<sup>2</sup>, 张 曦<sup>2</sup>, 邵惠鹤<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 自动化系; 教育部系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 广东电网公司 电力科学研究院, 广东 广州 510600)

**摘要:** 针对1000 MW超超临界机组, 分析了机组协调控制的3输入3输出系统, 研究了机组系统的双层结构多变量约束预测控制(multivariable constrained predictive control, MCPC), 给出了基于阶跃响应的多变量约束预测控制方法和具体算法, 并给出了仿真效果. 最后与传统协调控制进行了对比, 仿真结果表明了算法的有效性.

**关键词:** 超超临界机组; 多变量系统; 预测控制; 协调控制; 负荷跟踪

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Multivariable constrained predictive control of 1000 MW ultra supercritical once-through boiler-turbine system

WANG Guo-liang<sup>1</sup>, YAN Wei-wu<sup>1</sup>, CHEN Shi-he<sup>2</sup>, ZHANG Xi<sup>2</sup>, SHAO Hui-he<sup>1</sup>

(1. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University;

Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai 200240, China;

2. Guangdong Electric Power Research Institute, Guangzhou Guangdong 510600, China)

**Abstract:** For an ultra-supercritical power unit, to deal with its nonlinear characteristics, time-delay and coupling between units, we analyze the coordinated control system with three-input and three-output, and propose the multivariable constrained predictive control (MCPC) based on the double-layer construction of the power unit. The scheme of the MCPC for the ultra-supercritical power unit based on the step-response model is given, and its associated algorithm is developed in details. Simulations of the proposed control method and traditional PID control method are performed for comparison. The results of the proposed control method show less fluctuation in temperature, fuel flow and feed water flow of the units, and faster compensation response to load variations.

**Key words:** ultra-supercritical unit; multivariable system; model predictive control; coordinated control; load following

### 1 引言(Introduction)

火力发电是我国电力的主要来源, 作为最大的煤炭用户, 电力行业需要提高煤炭的利用效率和燃煤发电的生产效率, 才能适应节能减排, 低碳环保的可持续发展的环境要求. 而通过将亚临界、临界发电机组的蒸汽和容量参数提高到超临界、超超临界, 可以显著地提高火电机组的效率<sup>[1]</sup>. 根据常识, 水的临界参数为22.115 MPa, 374.15°C, 当水的参数高于临界参数时, 饱和水和饱和水蒸汽将没有区别, 所以对于水和水蒸气来说, 只有亚临界和超临界的区分, 而超超临界是人为的一种划分, 一般认为火电机组的主蒸汽压力大于25 MPa, 温度高于580°C时, 即为超超临界. 热力循环分析表明, 在超超临界机组参数范围的条件, 主蒸汽压力提高1 MPa, 机组的热耗率就可下降0.13%~0.15%; 主蒸汽温度每提高10°C, 机组的热耗率就可下降0.25%~0.30%; 再热蒸汽温度每

提高10°C, 机组的热耗率就可下降0.15%~0.20%. 超超临界机组蒸汽参数愈高, 热效率也随之提高. 当机组参数提高到30 MPa, 600°C的超超临界时, 电厂效率为48%, 这与17 MPa, 540°C的亚临界机组的38%的电厂效率相比, 提高了10%之多. 同时, 超超临界机组技术具有继承性好, 容易实现大型化的特点, 在机组的可靠性、可用率、热机动性、机组寿命等方面已经可以和亚临界机组持平<sup>[2]</sup>.

超超临界机组采用直流锅炉, 直流锅炉的一次性通过特性使工质流和能量流相互耦合, 这样超超临界机组的各个控制回路, 如给水、汽温及负荷控制回路之间存在着很强的耦合特性, 机、炉之间相互关联性很强<sup>[3]</sup>. 同时, 由于没有汽包的缓冲, 超超临界机组动态特性受末端阻力的影响远比汽

包锅炉大. 随着机组的工况变化, 机组的特性参数也大幅度变化. 由于不同工况下工质物性的巨大差异, 以及锅炉蒸发段位置迁移等因素的影响, 使超超临界机组呈现极强的非线性特性和变参数特性, 因此比常规的机组更难于控制. 而且, 从炉侧到主蒸汽温度的控制环节存在延迟特性, 也使超超临界机组的控制更加复杂.

超超临界机组的上述运行特点, 对机组控制系统设计提出了更高的要求. 而传统控制手段解决超超临界机组控制难点的效果不能令人满意. 预测控制在化工多变量控制系统中的成功应用, 使得预测控制也开始被应用到了火电机组控制领域<sup>[4]</sup>. 文[5]讨论了动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)方法在发电机组中理论和实际应用方面的问题, 而且给出了超临界火电机组的仿真结果. 其中功率、蒸汽压力和蒸汽温度作为被控变量. 文[6]对于蒸汽温度应用了单变量的DMC控制方法, 结果显示控制效果比传统PID好. 文[7]给出了再热蒸汽温度采取DMC结合状态反馈的方法来控制. 文[8]针对传统型机组给出了一种自适应的DMC方法, 并用三阶模型作为简化模型. 文[9]对于过热器、再热器温度控制问题建立了4×4的多变量输入输出模型, 应用阶跃响应曲线建立动态响应矩阵, 通过在线优化求解控制量, 控制效果好于传统的PID方法. 但是, 文献中主要涉及的是传统机组的控制方法, 针对超超临界机组的协调控制的预测控制研究和应用刚刚开始.

本文进行了1000 MW超超临界机组的多变量约束预测控制的研究, 第1节介绍了相关研究和背景, 第2节通过分析超超临界机组的3输入3输出系统, 建立了基于阶跃响应的超超临界机组模型; 第3节给出了多变量约束预测控制的具体算法和对约束的处理, 在第4节中给出了仿真效果, 并给出了与传统协调控制方法的对比, 仿真结果表明了算法的有效性.

## 2 超超临界机组控制系统的系统分析(System analysis of ultra-supercritical unit)

目前, 火电机组控制系统一般采用协调控制, 如机跟炉协调方式、炉跟机协调方式、机炉协调方式<sup>[10]</sup>. 机炉协调控制方式是几种协调控制中比较有效和常用的控制方式. 超超临界机组的机炉协调是个复杂的多输入多输出对象, 而且众多变量之间存在强弱相关和耦合的关系. 决定着机组系统运行状态的关键变量主要有被控变量的主蒸汽温度和压力, 以及输出功率; 操作变量有燃料量, 给水量以及主蒸汽调速阀门. 所以, 超超临界机组

的协调控制系统对象结构模型可简化为一个3输入3输出系统: 输入为燃料量 $M(\%)$ , 汽轮机调门开度 $\mu_T(\%)$ 和给水流量 $W(\%)$ ; 输出为机前压力 $P_T(\text{MPa})$ , 机组负荷 $Ne(\text{MW})$ , 过热器出口蒸汽温度 $\theta(^{\circ}\text{C})$ 或焓值 $(\text{kJ/kg})$ , 其相互间的作用关系如图1所示. 图中: 实线为强相关关系, 虚线为弱相关关系<sup>[11]</sup>.

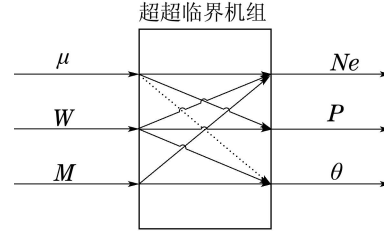


图1 超超临界机组的输入输出对应关系

Fig. 1 The inputs and outputs of ultra-supercritical units

本文结合1000 MW超超临界机组进行了超超临界机组的特性和模型分析. 机组的模型是文献[12]中建立的1000 MW超超临界机组非线性模型. 在一定的工况段范围内, 将机组的模型可以近似为阶段线性模型, 通过施加阶跃扰动可以建立起输入输出阶跃响应矩阵关系, 机组的模型可以建成如下形式:

$$Y_{k+1|k} = Y_{k+1|k-1} + A\Delta U_k, \quad (1)$$

其中: 模型预测输出

$$Y_{k+1|k} = [y_{k+1|k} \ y_{k+2|k} \ \cdots \ y_{k+P|k}]^T \in \mathbb{R}^{P \times 1};$$

输出自由响应向量

$$Y_{k+1|k-1} = [y_{k+1|k-1} \ y_{k+2|k-1} \ \cdots \ y_{k+P|k-1}]^T \in \mathbb{R}^{P \times 1};$$

控制增量向量

$$\Delta U_k = [\Delta u_{k+1|k} \ \Delta u_{k+2|k} \ \cdots \ \Delta u_{k+M-1|k}]^T \in \mathbb{R}^{M \times 1};$$

动态矩阵

$$A = \begin{bmatrix} A^{(1)} & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ A^{(M)} & \cdots & A^{(1)} \\ \vdots & & \vdots \\ A^{(P)} & \cdots & A^{(P-M+1)} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{mP \times nM};$$

第 $k$ 时刻动态矩阵

$$A^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{1,1}^{(k)} & a_{2,1}^{(k)} & \cdots & a_{n,1}^{(k)} \\ a_{1,2}^{(k)} & a_{2,2}^{(k)} & \cdots & a_{n,2}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,m}^{(k)} & a_{2,m}^{(k)} & \cdots & a_{n,m}^{(k)} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n};$$

第  $k$  时刻下系统输出对第  $i$  个控制输入的阶跃响应 FIR 模型  $[a_i^{(1)} a_i^{(2)} \dots a_i^{(N)} \dots a_i^{(P)} \dots a_i^{(N)}]^T \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ , 其中:  $P$  为预测时域,  $M$  为控制时域,  $m$  为输入变量

个数,  $n$  为输出变量个数.

给其中的一个输入增加 10% 的阶跃增量, 另外两个保持恒定, 获得阶跃响应模型. 机组 3 个输出的响应曲线如图 2 所示.

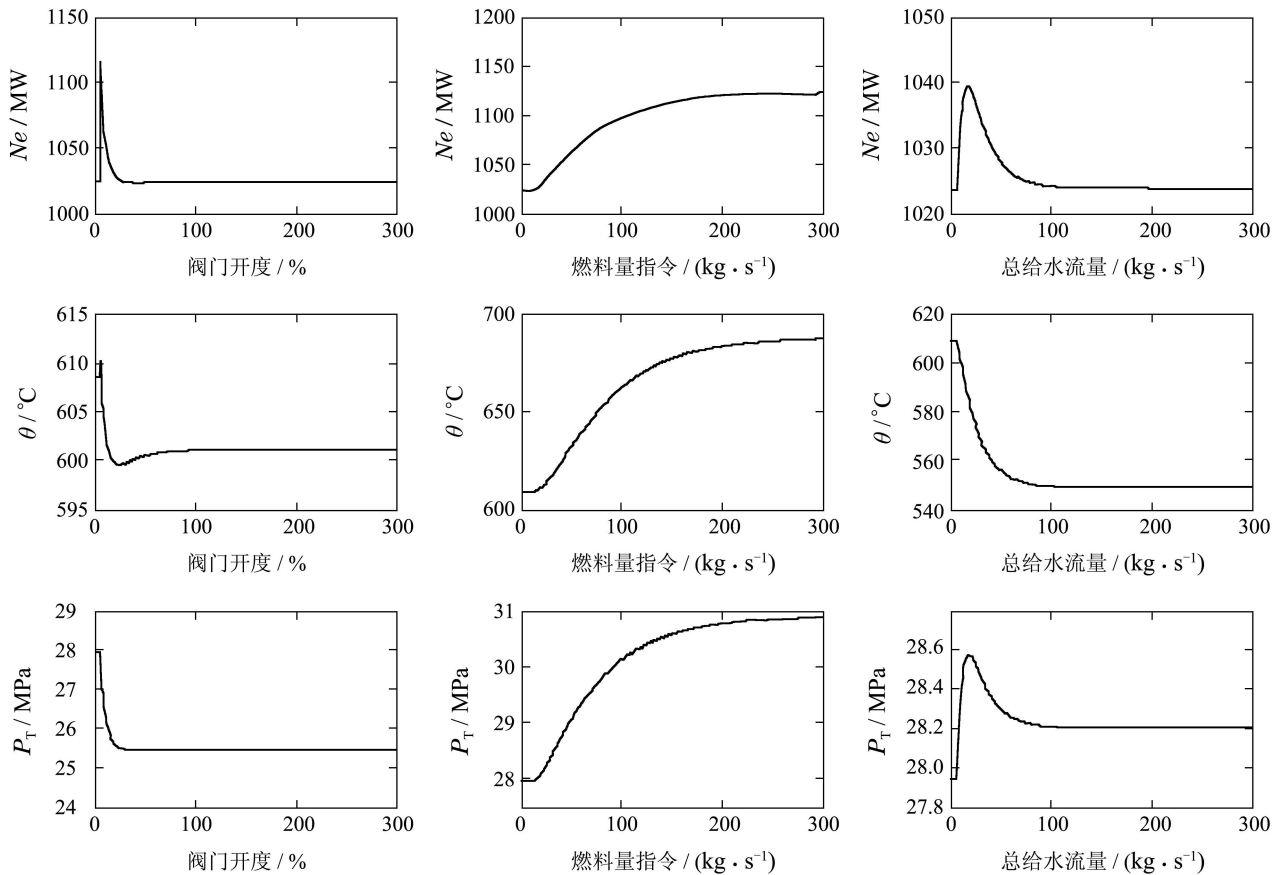


图 2 机组输入增量 10% 时输出的阶跃响应

Fig. 2 The step response of units responding to the 10% increase of inputs

### 3 超超临界机组的多变量约束预测控制 (Multi-variable constrained predictive control of ultra-supercritical unit)

针对超超临界机组系统, 本文采用双层结构的多变量约束预测控制 (multivariable constrained predictive control, MCPC) 架构, 包括稳态优化部分和动态优化部分. 稳态优化将火电机组的负荷、能耗等信息集成到优化问题中去, 考虑输入输出变量受到的约束条件, 实时地求解系统最佳的设定值; 下层动态控制主要进行设定值的实时动态控制. 机组能够较好地运行在定/滑压模式下, 满足系统的要求, 即负荷稳态工况时定值控制准确, 动态工况变动时跟踪控制响应迅速、平稳. 稳态关联约束与定值约束一起, 构成了经济优化问题中的等式约束, 而区域约束条件可以作为不等式约束. 稳态优化给出系统运行的方向, 并将优化值传递给

动态优化, 保证了动态优化始终朝着满足约束的经济最优化方向发展. 控制算法如图 3 所示.

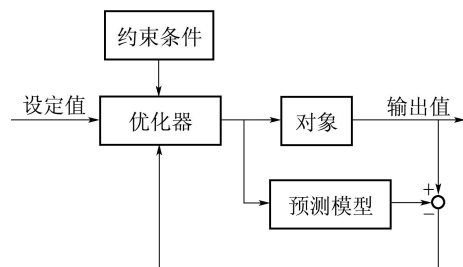


图 3 MCPC 的控制结构

Fig. 3 The structure of MCPC

双层结构多变量约束预测控制中的上层稳态优化考虑火电机组的经济优化, 最优化是在可行域内寻优的过程. 由于在每一步优化计算的过程中, 由于不可避免的干扰存在, 最优的控制目标值可能会改变. 所以, 稳态优化的目的就是

输入和输出值尽可能的推向满足约束条件的最优值. 稳态优化一般使用的稳态模型是通过线性化先验的非线性模型, 或者是动态模型的稳态形式. 稳态优化的卡边操作, 是在在满足约束的条件下, 将系统推向并维持在最优的运行状态.

稳态优化目标函数完成经济目标和约束的预处理, 构成基于稳态线性规划(steady linear programming, SLP)的多变量预测控制策略. 为了实现经济优化, 在多变量约束预测控制中可加入经济指标函数优化. 在各种经济指标中, 线性指标基本上可以描述大多数的经济目标. 本文稳态优化采用线性规划形式, 可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} \min_u f(u, y, c), \\ h_i(u, y, \alpha) = 0, \quad i = 1, \dots, n_e, \\ g_j(u, y, \beta) \leq 0, \quad j = 1, \dots, n_{in}, \end{aligned}$$

其中:  $\alpha, \beta$  为常数,  $u, y$  均为优化变量,  $c$  为目标函数常量,  $n_e$  为等式约束个数,  $n_{in}$  为不等式约束个数.

经动态优化问题的求解划分为两个阶段: 可行性阶段与最优化阶段. 可行性阶段, 要确保优化问题是可行的; 最优化阶段, 是在可行空间内进行寻优, 寻找使目标函数最小(最大)的最优解. 首先判定由约束条件所形成的空间(域)是否存在, 若存在则在其中进行寻优; 若不存在, 则通过软约束调整来获得可行空间, 然后再进行求解.

为进一步减少不确定因素, 在DMC预测模型中应修正预测起点, 减少由于其他模块下的操作变量(manipulated variable, MV)和被控变量(controlled variable, CV)的扰动影响<sup>[13]</sup>:

$$\begin{aligned} Y_{N,k+1|k} &= S[Y_{N,k} + He_k], \\ Y_{k+1|k-1} &= I_{PN}Y_{N,k}, \end{aligned}$$

其中矩阵  $S, H, e$  以及  $I_{PN}$  为状态后移矩阵、误差校正向量、模型偏差、下单位三角矩阵.

基于修正的预测起点, DMC完成带有约束的滚动优化过程:

$$\begin{cases} \min_{\Delta U_k} J_k = \|W_k - Y_k\|_Q^2 + \|\Delta U_k\|_R^2 + \\ \quad \|U_k - U_{IRV,k}\|_V^2, \\ \text{s.t. } C\Delta U_k \leq b, \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $Q, R, V$  分别是误差权矩阵、控制能量权

矩阵、稳态理想值(ideal resting value, IRV)权矩阵,  $Q$  表示对被控变量预测值和目标偏差的重视程度. 对于重要的被控变量, 可以适当加大响应的权重, 而不重要的CV, 则可放松权重以保证重要CV的快速跟踪.  $R$  表示控制量的增量约束, 选择合适的  $R$  可以使得系统在稳定的基础上快速跟踪给定.  $U_{IRV}$  为DMC中MV的IRV值, 即稳态最优值. 它构成了系统MV的软约束. 矩阵  $V$  是对软约束的加权, 矩阵  $C$  和向量  $b$  中集成了所有的硬约束. 上式是一个典型的带有约束的二次型问题的优化求解. 在非病态状态下, 使用传统的拉格朗日乘子法以及内点法(比如SQP等)都可以有效地获得上述约束问题的最优解.

MCPC控制器是基于基础控制层的上层优化控制算法, 在基础控制层的基础上, 优化控制器给出系统优化的操作方向, 并将系统推向最优的工况. 图4给出了基于底层DCS基础控制层的多变量约束预测控制的整体控制方案. 通过模型辨识方法建立机组阶跃响应的模型矩阵, 将MCPC优化结果作为校正量叠加到给水主控, 汽机主控及燃料主控上进行协调控制系统的优化.

#### 4 仿真结果(Simulation)

图5-图7是负荷指令变化时, 被控变量和控制变量的变化曲线中调负荷指令的变化过程: 从800 MW变化到900 MW到1000 MW, 再回到850 MW. 可以看到, 基于多变量约束控制的算法在保证被控变量的响应速度的同时, 减少被控量的波动, 图5是负荷指令变化下的跟踪情况, 传统的控制方法会有较大的波动, 而多变量约束控制则比较平稳. 图6是在负荷变化同时, 过热器出口蒸汽温度的响应曲线, 可以看出机组的主蒸汽温度平稳的控制设定值附近, 而且多变量约束控制的算法的波动明显优于传统PID控制. 主要的操纵变量燃料量和给水量在负荷给定变化下的输出曲线, 在图7、图8中可以看出, 燃料量和给水量在协调控制中要保持一定的比例关系, 维持主蒸汽温度的平稳. 可以看出本文提出的控制方法下的操纵变量的波动要比传统的PID控制小, 这样可以减少实际运行中给水和给煤的剧烈变化, 减少机组的损耗.

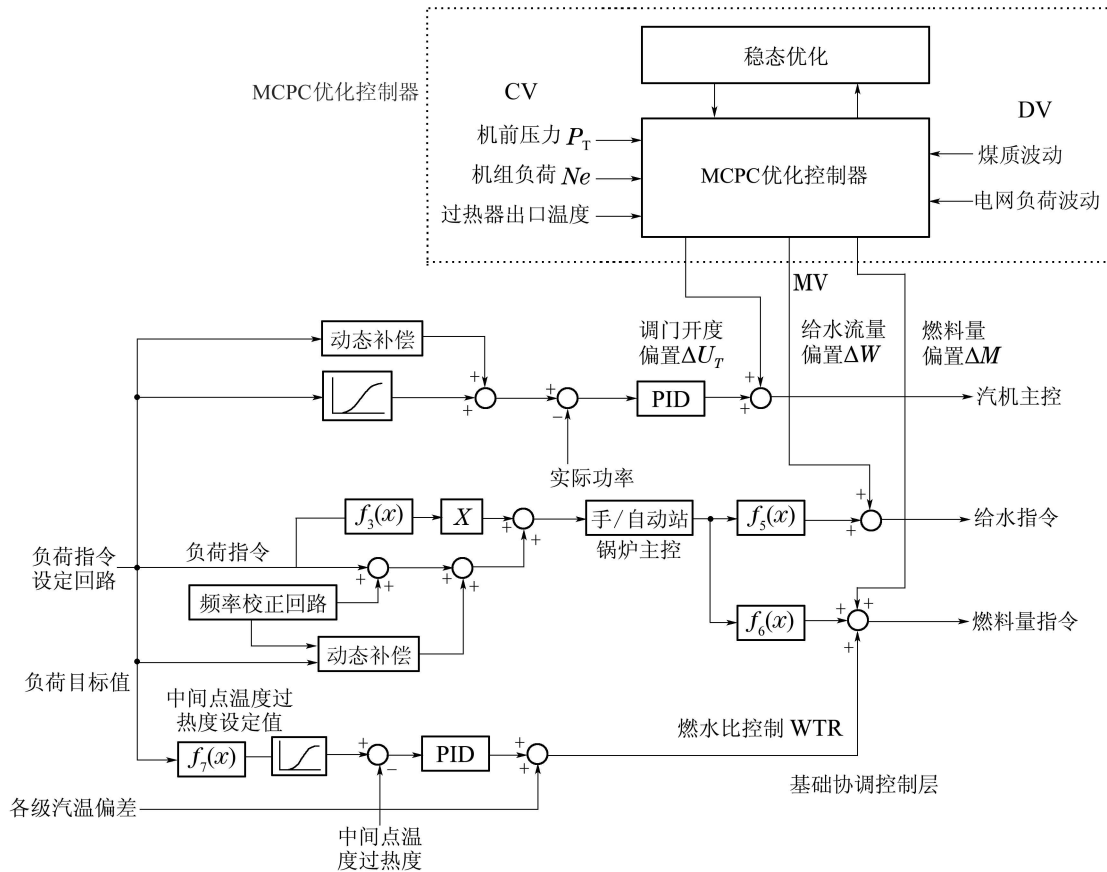


图 4 MCPC 先进控制系统的整体示意图

Fig. 4 The scheme of MCPC control system

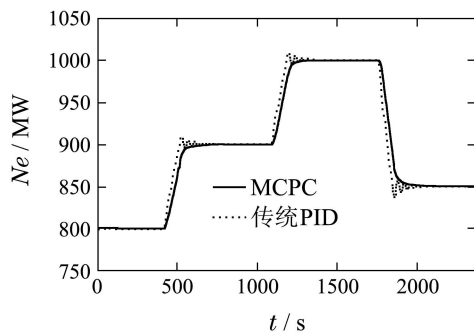


图 5 变负荷下的系统响应

Fig. 5 The system response of changing load command

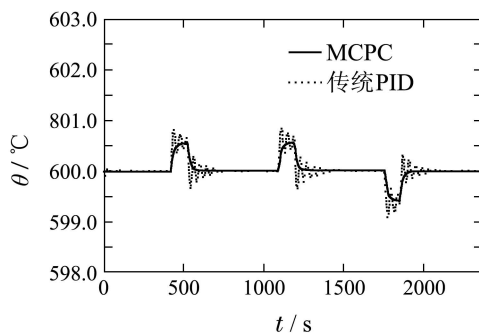


图 6 负荷给定变化下的过热器出口蒸汽温度的响应曲线

Fig. 6 The temperature of superheater outlet under changing load command

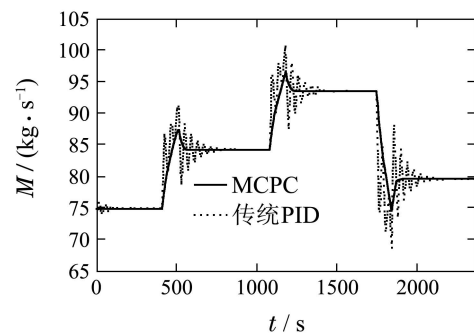


图 7 燃料量的输出曲线

Fig. 7 The output curve of fuel flow

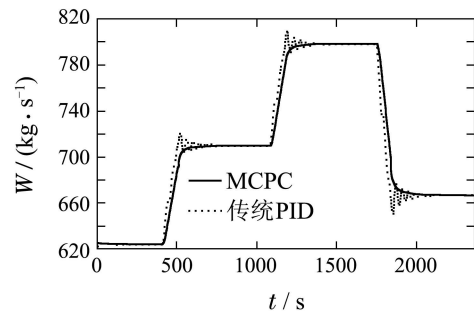


图 8 给水量的输出曲线

Fig. 8 The output curve of feed water flow

## 5 结论(Conclusion)

本文通过分析超超临界非线性机组的特性, 建

立系统3输入3输出阶跃响应模型,并提出了针对超超临界火电机组的多变量约束预测控制,给出了控制算法的构架和整体的实施方案.在最后了仿真结果,并与传统的PID协调控制进行了对比,结果表明多变量约束预测控制在保证了负荷跟踪速率的前提下,被控量和操作变量的波动明显小于传统PID控制,说明了算法的有效性.

### 参考文献(References):

- [1] 杨献勇. 热工过程自动控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.  
(YANG Xianyong. *Thermal Process Automatic Control* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.)
- [2] 冯道显, 金玉兰. 河源电厂600MW超超临界机组锅炉特点 [J]. 电力勘测设计, 2005, 12(6): 52 – 55.  
(FENG Daoxian, JIN Yulan. 600MW USC boiler specialties of Heyuan power plant [J]. *Electric Power Survey*, 2005, 12(6): 52 – 55.)
- [3] 肖伯乐, 我国火电厂自动化与信息化技术的进展 [J]. 动力工程学报, 2011, 31(8): 611 – 618.  
(XIAO Bole. Development progress of automation and information technologies for domestic power plants [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2011, 31(8): 611 – 618.)
- [4] MOON U, KIM W. Temperature control of ultrasupercritical once-through boiler-turbine system using multi-input multi-output dynamic matrix control [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2011, 6(3): 423 – 430.
- [5] 邵惠鹤. 工业过程高级控制 [M]. 第2版. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 292 – 307.  
(SHAO Huihe. *Advanced Control in Industrial Process* [M]. 2nd edition. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003: 292 – 307.)
- [6] ROVNAK J A, CORLIS R. Dynamic matrix based control of fossil power plant [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, 6(2): 320 – 326.
- [7] SANCHEZ L A, ARROYO F G, VILLAVICENCIO R A. Dynamic matrix control of steam temperature in fossil power plant [C] // *IFAC Control of Power Plants and Power Systems*. London: Pergamon Press, 1995: 275 – 280.
- [8] HUA Z, HUA H, LU J, et al. Research and application of a new predictive control based on state feedback theory in power plant control system [C] // *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. New York: IEEE, 2007: 4378 – 4385.
- [9] MOON U C, LEE K Y. Step-response model development for dynamic matrix control of a drum-type boiler-turbine system [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2009, 24(2): 423 – 430.
- [10] 潘凤萍, 陈世和, 陈锐民, 等. 火力发电机组自启停控制技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 285 – 291.  
(PAN Fengping, CHEN Shihe, CHEN Ruimin, et al. *Automatic Power Plant Startup and Shutdown System (APS) Technology and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 285 – 291.)
- [11] 王中胜, 夏明, 赵松烈, 等. 北仑1000MW超超临界机组协调控制策略分析及优化 [J]. 电力建设, 2010, 31(1): 87 – 94.  
(WANG Zhongsheng, XIA Ming, ZHAO Songlie, et al. Coordinated control strategy analysis and optimization of Beilun 1000MW USC unit [J]. *Electric Power Construction*, 2010, 31(1): 87 – 94.)
- [12] 闫姝, 曾德良, 刘吉臻, 等. 直流炉机组简化非线性模型及仿真应用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 126 – 134.  
(YAN Shu, ZENG Deliang, LIU Jizhen, et al. A simplified non-linear model of a once-through boiler-turbine unit and its application [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2012, 32(11): 126 – 134.)
- [13] 许超. 自适应多变量约束预测控制(AMCC)及其软件实现技术的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2002: 74 – 89.  
(XU Chao. *Adaptive multivariable constraint control (AMCC) and study on the architecture of amcc software implementation* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2002: 74 – 89.)

### 作者简介:

王国良 (1978–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为工业过程建模、预测控制, E-mail: glgwang@gmail.com;

阎威武 (1972–), 男, 副教授, 主要研究方向为工业过程的建模、优化和控制、机器学习, E-mail: yanwwsjtu@sjtu.edu.cn;

陈世和 (1965–), 男, 高级工程师, 工学硕士, 从事电厂生产过程自动化控制系统开发研究和技术管理工作, E-mail: chen\_shi\_he@163.com;

张曦 (1974–), 男, 工学博士, 主要从事火力发电厂热控技术和工业过程监控与故障诊断技术研究, E-mail: zhangx.sjtu@gmail.com;

邵惠鹤 (1936–), 男, 教授, 博士生导师, 从事工业过程控制、智能控制等研究, E-mail: hhshao@sjtu.edu.cn.