

· 自动化技术 ·

## 基于扩张状态观测器的火电单元机组协调控制

朱亚清<sup>1</sup>, 董君伊<sup>2</sup>, 陈世和<sup>1</sup>, 潘凤萍<sup>1</sup>, 李东海<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司电力科学研究院 广州 510080; 2. 清华大学热能工程系电力系统国家重点实验室 北京 海淀区 100084)

**【摘要】**扩张状态观测器不依赖对象精确模型, 可将火电单元机组协调系统中普遍存在的耦合、扰动、不确定性等因素看做一个扩张状态进行估计。设计控制率对该估计量进行补偿, 可有效改善系统动态, 提高系统性能鲁棒性。以某300 MW燃煤直流炉再热机组为被控对象进行仿真研究。根据实际控制要求, 进行设定值跟踪实验, 输入扰动实验和蒙特卡洛实验。结果表明, 合理选择扩张状态观测器参数, 可以使机炉协调系统具有较好的负荷跟踪能力, 保证主汽压力在较小范围内波动; 同时能有效抑制输入扰动并使系统具有强的鲁棒性。基于扩张状态观测器的协调控制策略结构简单, 获得了良好的控制品质, 具有工程应用价值。

**关键词** 机炉协调控制; 扩张状态观测器; 输入扰动; 蒙特卡洛实验; 鲁棒性

**中图分类号** TK323

**文献标志码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.012

## Extended State Observer Based Control System Design for Boiler-Turbine Unit

ZHU Ya-qing<sup>1</sup>, DONG Jun-yi<sup>2</sup>, CHEN Shi-he<sup>1</sup>, PAN Feng-ping<sup>1</sup>, and LI Dong-hai<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation Guangzhou 510080;

2. State Key Lab of Power Systems, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University Haidian Beijing 100084)

**Abstract** This paper proposes an extended state observer (ESO) based control strategy to effectively reject the coupling, disturbance and uncertainties in the boiler-turbine unit. The parameter tuning rule of ESO and its effect on estimation and noise suppression ability are analysed. A 300 MW coal-fired boiler-turbine unit model is simulated. The results of the set point tracking simulation as well as the perturbation simulation illustrate that with well-tuned ESO parameters, the proposed control strategy achieves satisfactory control results and strong disturbance rejection ability. With ESO, the disturbance and system uncertainties can be estimated as an extended state and then compensated by the control law. Besides, the ESO based controller has simple structure, thus brings a lot convenience in engineering applications.

**Key words** boiler-turbine unit; extended state observer; input disturbance; Monte Carlo experiment; robustness

扩张状态观测器(extended state observer, ESO), 具有结构简单, 不依赖对象精确模型等特点<sup>[1]</sup>。ESO的核心思想是将被控对象中的高阶特性、干扰、不确定性等看作一个扩张状态进行实时估计。目前, 关于ESO已进行了大量研究。文献[2]分析了ESO估计不确定性的能力; 文献[3]用多Lyapunov函数方法证明了二阶非线性ESO的稳定性; 文献[4]将连续空间的ESO扩展到离散空间, 并给出离散线性ESO的具体形式和稳定性分析。在工程应用方面, 文献[5]将ESO用于多区负荷频率控制, 相比传统方法获得了更强的抗干扰能力; 文献[6]提出基于ESO的转子

磁链观测器, 解决了实际中存在的转子电阻不确定的问题; 文献[7]提出基于ESO的时间最优控制策略并将其用于快速精确的点对点运动系统; 文献[8]将ESO用于二自由度机械手控制系统等。上述研究取得了良好的控制效果, 展现了ESO在实际应用中的发展前景。

单元机组机炉协调系统是一个复杂的多变量系统, 具有大惯性、强耦合、参数时变等特点, 其有效控制对单元机组的高效经济运行具有重大意义。本文以某300 MW燃煤直流炉再热机组在100%负荷工作点处的线性化模型<sup>[9]</sup>为被控对象, 利用扩张状

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(51176086)

作者简介: 朱亚清(1975-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事火电厂自动化控制系统的开发研究、系统分析与优化等方面的研究。

态观测器对系统中的耦合、扰动、不确定性等进行估计, 并设计控制率对该估计量进行补偿, 从而有效改善系统动态, 提高系统性能鲁棒性。

### 1 扩张状态观测器原理

假设  $G_p$  可近似为一个一阶模型:

$$\dot{y} = g(t, y, \ddot{y}, \dots, \omega) + bu \quad (1)$$

式中,  $b$  为被控对象参数;  $g$  为系统高阶部分、模型误差、耦合、扰动等的综合特性。通常情况下, 难以获得  $b$  和  $g$  的准确值, 设  $b_0$  是根据已知对象信息得到的  $b$  的估计值, 并定义  $f = g + (b - b_0)u$  为  $G_p$  的扩张状态。则有:

$$\dot{y} = f + b_0u \quad (2)$$

定义状态变量  $x_1 = y$ , 扩张状态变量  $x_2 = f$ 。

要求  $x_1$  可测量,  $f$  具有一阶连续导数  $h^{[10]}$ , 则式(2)可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0u \\ \dot{x}_2 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

为式(3)表示的对象设计ESO:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(x_1 - z_1) + b_0u \\ \dot{z}_2 = \beta_2(x_1 - z_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  是观测器参数。令  $e_i = x_i - z_i$  ( $i=1,2$ ), 可得ESO的观测误差方程为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\beta_1e_1 + e_2 \\ \dot{e}_2 = -\beta_2e_1 + h \end{cases} \quad (5)$$

式(5)可表示为状态空间的形式:

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 \\ -\beta_2 & 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} h \quad (6)$$

由式(6)得观测误差的特征方程为:

$$\lambda(s) = s^2 + \beta_1s + \beta_2 \quad (7)$$

结合劳斯判据可知,  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 > 0$  且  $h$  有界时ESO稳定。

#### 1.1 扩张状态观测器误差分析

对式(5)进行拉普拉斯变换:

$$\begin{cases} sE_1(s) = -\beta_1E_1(s) + E_2(s) \\ sE_2(s) = -\beta_2E_2(s) + H(s) \end{cases} \quad (8)$$

可得观测误差关于扩张状态的一阶导数的传递函数为<sup>[11]</sup>:

$$G_{E_1}(s) = \frac{E_1(s)}{H(s)} = \frac{1}{s^2 + \beta_1s + \beta_2}$$

$$G_{E_2}(s) = \frac{E_2(s)}{H(s)} = \frac{s + \beta_1}{s^2 + \beta_1s + \beta_2}$$

相应的幅频特性为:

$$|G_{E_1}(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(\beta_2 - \omega^2)^2 + (\beta_1\omega)^2}}$$

$$|G_{E_2}(j\omega)| = \sqrt{\frac{\beta_1^2 + \omega^2}{(\beta_2 - \omega^2)^2 + (\beta_1\omega)^2}}$$

式中,  $\omega \in (0, +\infty)$ 。为了使观测误差趋近于0, 即  $|G_{E_1}(j\omega)| \rightarrow 0$ ,  $|G_{E_2}(j\omega)| \rightarrow 0$ ,  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  的取值应满足在低频段  $|\beta_2| \gg 0$ ; 在高频段  $|\beta_1| \gg 0$ 。

#### 1.2 基于扩张状态观测器的控制率设计

ESO在观测误差足够小时, 可以实现  $z_2$  跟踪  $f$ , 设计控制率为<sup>[10]</sup>:

$$u = \frac{u_0 - z_2}{b_0} \quad (9)$$

联立式(2)和式(9)得:

$$\dot{y} = f + b_0u \approx z_2 + b_0 \frac{u_0 - z_2}{b_0} = u_0 \quad (10)$$

可知, 包含系统高阶部分、模型误差、耦合、扰动等综合特性的扩张状态被ESO估计后, 由控制率进行补偿。同时, 被控对象简化为一阶惯性环节:

$$\dot{y} = u_0 \quad (11)$$

设计  $u_0$  使得被控对象的闭环预期动态特性为:

$$\dot{y} + k_p y = k_p r \quad (12)$$

式中,  $r$  为参考输入。易知  $u_0$  为一比例控制器:

$$u_0 = k_p (r - y) \quad (13)$$

对式(8)进行Laplace变换得到系统闭环传递函数为:

$$G_{cl}(s) = \frac{k_p}{s + k_p} \quad (14)$$

综上, 基于ESO的控制率包含两个部分, 其一为补偿环节, 用于对ESO估计的扩张状态进行补偿; 其二为比例控制器, 用于使闭环对象达到预期的动态特性, 控制框图如图1所示。

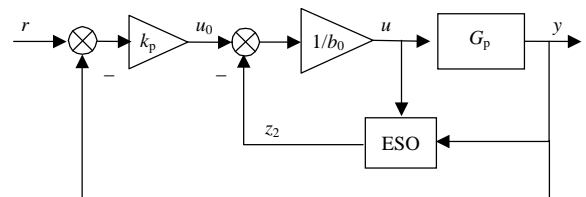


图1 基于扩张状态观测器的控制结构

图1所示的基于ESO的控制结构又被称为自抗扰控制器<sup>[1]</sup>。

### 2 扩张状态观测器参数整定

由1.1节的分析可知,  $|\beta_1| \gg 0$ ,  $|\beta_2| \gg 0$  时, ESO 稳定且观测误差可以达到足够小。但  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  过大会增加ESO对噪声的敏感性, 同时影响闭环系统的稳定性。本文以输出噪声为例进行简要分析, 假设系

统中存在输出噪声  $\varepsilon$ ，此时ESO的方程为<sup>[11]</sup>：

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(x_1 + \varepsilon - z_1) + u_1 \\ \dot{z}_2 = \beta_2(x_1 + \varepsilon - z_1) \end{cases} \quad (15)$$

存在输出噪声时的观测误差方程为：

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\beta_1 e_1 + e_2 - \beta_1 \varepsilon \\ \dot{e}_2 = -\beta_2 e_1 + h - \beta_2 \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

可知， $\varepsilon$  存在于输出误差的方程中，且  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  越大，输出噪声被放大的倍数也越大。

因此， $\beta_1$ 、 $\beta_2$  的取值应综合考虑ESO的观测精度和对噪声的敏感度。令：

$$\beta_2 = \beta_1^2 \quad (17)$$

则ESO有两个可调参数  $\beta_1$ 、 $b_0$ ，在参数整定时，分别取初值为  $\beta_1 = 1$ ， $b_0 = 1$ 。若该组参数下ESO输出  $z_2$  发生振荡，则减小  $\beta_1$  直至  $z_2$  趋于平滑；否则增大  $\beta_1$  直至  $z_2$  即将发生振荡。若  $\beta_1$  的调节不能满足要求，则对  $b_0$  进行调整，使ESO在噪声敏感度较小的前提下达到较优的估计精度。

综上， $\beta_1$  是影响ESO观测能力的关键参数，以热工过程中常见的二阶传递函数对象为例，说明  $\beta_1$  的变化对系统输出和控制量的影响。

不失一般性，选取二阶传递函数对象：

$$G_p = \frac{1}{(10s+1)^2} \quad (18)$$

设计基于ESO的控制器如图1所示，其中  $k_p = 0.05$ ， $b_0 = 1$ 。令  $\beta_1$  取 [0.2 0.5 1 2 5]，分别进行输入扰动实验和输出噪声实验。

### 2.1 输入扰动实验

在  $t=100$  s 时为输入信号加入幅值为1的方波扰动  $d$ ，持续时间900 s，图2为输入存在扰动时的扩张状态曲线，图3为相应的输出曲线和控制量曲线。

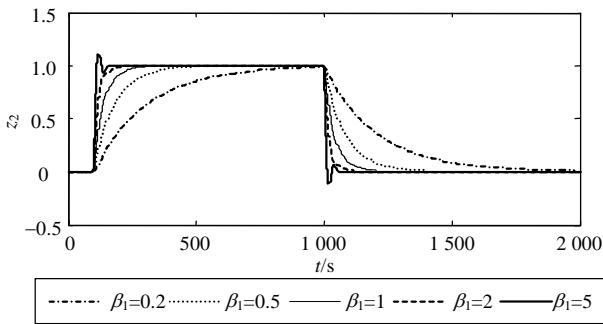


图2 扩张状态曲线

由图2、图3可知， $\beta_1$  越大，ESO的观测速度越快，与之相对应，系统的响应速度越快。但过大的  $\beta_1$  会引起控制量发生振荡。在实际工程中，控制量的振荡不仅耗费巨大的控制能量，而且会对执行机构造成频繁冲击，应予以避免。因此，对于该二阶模

型，取  $\beta_1$  为即将引起扩张状态(控制量)发生振荡的数值，即  $\beta_1 = 1$ 。

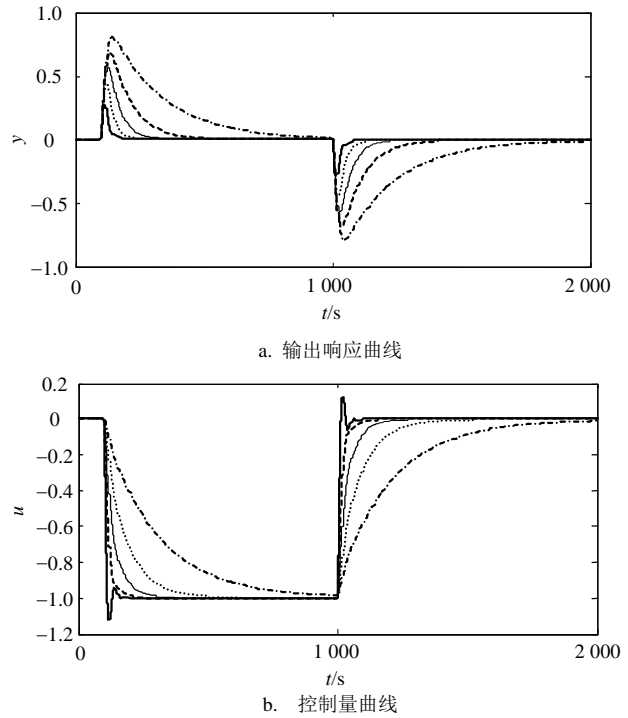


图3 输入扰动响应曲线

### 2.2 输出噪声实验

在  $t=100$  s 时为输出加入白噪声，持续时间400 s，如图4所示。图5、图6为  $\beta_1$  取不同值时系统的控制量曲线和扩张状态曲线。

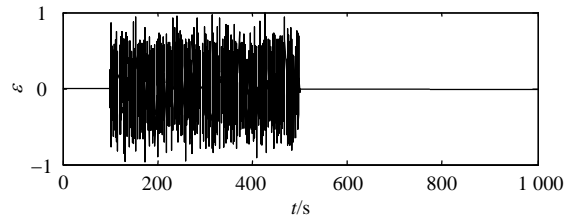


图4 白噪声干扰

为了便于比较，图5、图6的局部放大图中，只给出了  $\beta_1$  取 [0.1 0.2 0.5 1.0] 时的曲线。

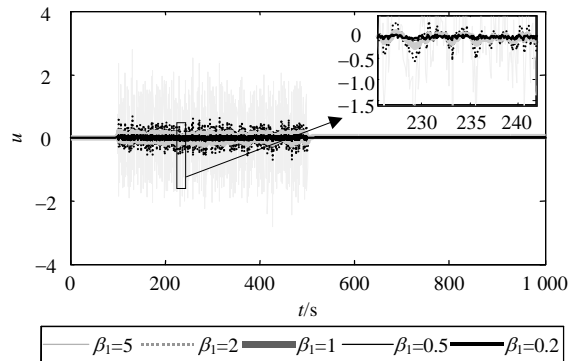


图5 控制量曲线

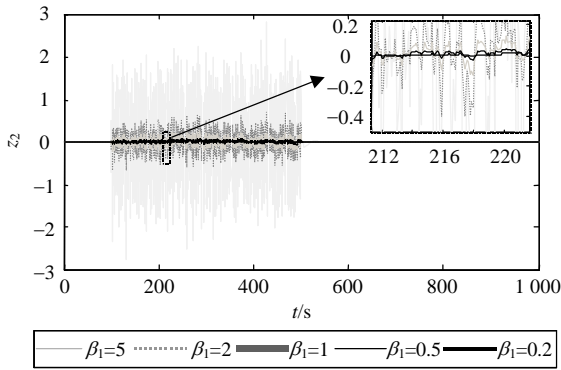


图6 扩张状态曲线

由图5、图6可知, ESO对输出噪声的敏感性与 $\beta_1$ 正相关, 即 $\beta_1$ 越大, 输出噪声被放大的倍数越大, 控制量受噪声影响越剧烈。结合2.1节可知,  $\beta_1 = 1$ 时, ESO估计速度较快, 闭环控制量无振荡, 对噪声敏感度适中。因此, 对式(18)所描述的对象,  $\beta_1 = 1$ 为较优的ESO参数。

### 3 机炉协调控制

传统的单元机组负荷控制方式包括机跟炉控制方式和炉跟机控制方式。前者可维持主汽压力在运行过程中处于相对稳定状态, 但负荷适应性差; 后者可使负荷响应迅速, 但主汽压力波动较大。为了解决单元机组输出在快速性和稳定性之间的矛盾, 目前电厂广泛采用基于前馈补偿和压力拉回的机炉协调控制策略<sup>[12]</sup>作为单元机组的负荷控制方式。在此基础上, 文本引入ESO对系统中的耦合、扰动、不确定性等进行估计并用控制率补偿, 以改善系统动态性能, 增强性能鲁棒性。机炉协调控制系统通常设计为一个二输入二输出的系统, 对应的结构框图如图7所示。图中, 输入为汽机阀门开度指令 $u_T$ 和燃烧率指令 $u_B$ , 输出为机组实发电功率 $N_E$ 和机前主汽压力 $P_T$ 。

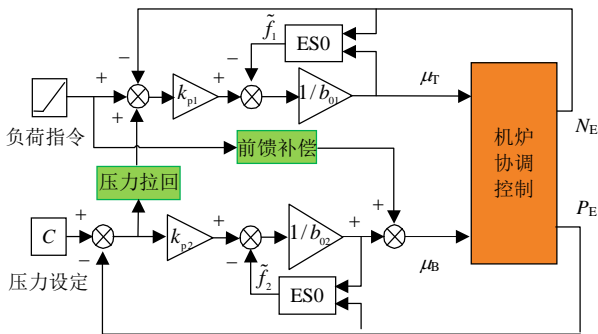


图7 机炉协调控制结构框图

### 4 仿真研究

以某300 MW燃煤直流炉再热机组为研究对象。文献[9]给出了该机组在100%负荷处的线性化传递函数矩阵模型:

$$\begin{bmatrix} N_E(s) \\ P_T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4.665s(1+99s)}{(1+50s+58^2s^2)(1+4.1s)} & \frac{2.069(1+311s)}{(1+149s)^2(1+22.4s)} \\ -1.42\left(0.04 + \frac{0.96}{1+70s}\right) & \frac{1.265(1+205s)}{(1+128s)^2(1+11.7s)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_T(s) \\ u_B(s) \end{bmatrix}$$

式中, 输入输出变量的单位分别为 $u_T/\%$ ;  $u_B/t \cdot h^{-1}$ ;  $N_E/MW$ ;  $P_T/0.1MPa$ 。

为该机组模型设计图7所示的控制策略, 控制目标是: 1) 满足电网对负荷需求的同时维持主汽压力的相对稳定。2) 控制器能够有效地抑制系统中的各种扰动和不确定性。

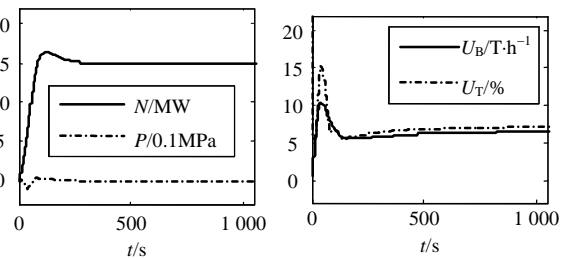
基于该控制目标并结合第2节所述ESO参数整定规律, 确定控制系统各环节的参数如表1所示。在参数整定时, 首先断开两回路间的耦合, 对两个单入单出回路分别进行参数整定, 之后加上耦合对控制器参数进行微调。压力拉回控制器和前馈控制器的引入是为了加快锅炉侧的响应速度, 同时避免主汽压力产生大幅度波动。

表1 控制器参数

控制器	控制器
功率控制器	$k_{p1} = 0.04, \beta_{11} = 1.0, b_{01} = 1.0$
主汽压力控制器	$k_{p2} = 0.015, \beta_{21} = 7.0, b_{02} = 1.0$
前馈控制器	$P = 0.5, D = 5, N = 10$
压力拉回控制器	$K = -3$

#### 4.1 功率阶跃响应实验

在 $t=0$  s时为功率回路加入正向阶跃设定值 $N_s=15$  MW, 系统输出响应曲线和控制量曲线如图8所示。



a. 输出响应曲线

b. 控制量曲线

图8 功率阶跃响应曲线

图8a中, 功率回路快速平稳地跟踪设定值的变化, 超调量较小, 机前主汽压力在较小范围内波动。图8b中, 控制量变化平滑, 无抖振现象。可知, 所设计控制策略获得了良好的控制品质, 其主要原因在于包括耦合、高阶特性等在内的扩张状态被有效地估计并由控制率补偿。

## 4.2 输入扰动实验

机炉协调系统中通常存在很多干扰。设系统处于额定工况下, 在 $t=200$  s时为汽机阀门开度指令 $u_r$ 加入方波扰动, 幅值为 $d_1=10\%$ , 持续时间700 s。图9给出了存在输入扰动时功率回路的扩张状态曲线, 图10为相应的输出曲线和控制量曲线。

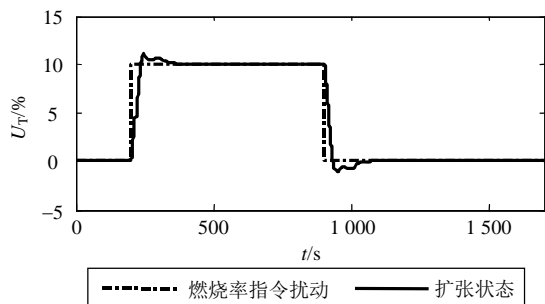
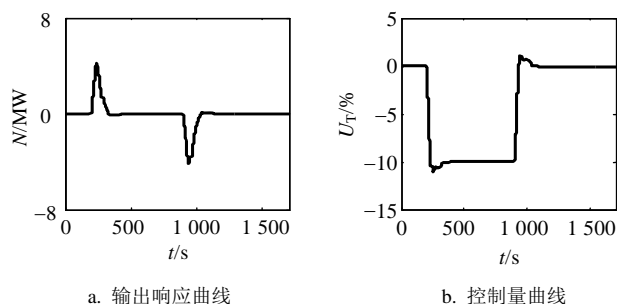


图9 功率回路扩张状态曲线



a. 输出响应曲线

b. 控制量曲线

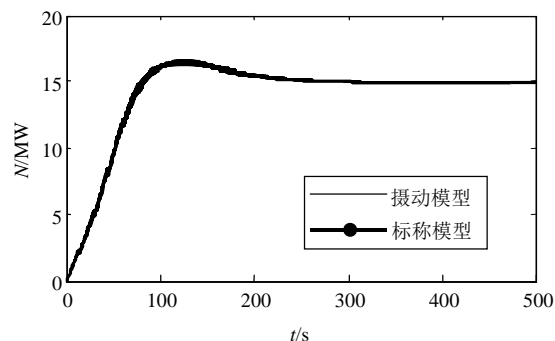
图10 输入扰动响应曲线

由图9、图10可知, 当汽机阀门开度指令受到方波扰动时, ESO能对包含该扰动在内的扩张状态进行有效地估计, 并通过控制量进行补偿, 使得输出能快速回复稳定状态。

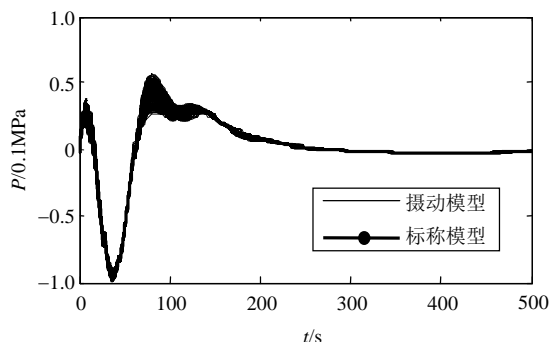
## 4.3 蒙特卡洛实验

对于机炉协调系统, 在建模过程中由于采用模型降阶、线性化等手段, 所得到的模型通常存在一定的误差。根据蒙特卡罗原理, 使被控对象的标称模型参数发生 $\pm 10\%$ 的随机摄动, 产生样本数量为500的摄动对象族 $\{G_M(s)\}^{[13]}$ 。对 $\{G_M(s)\}$ 中各被控对象的功率回路加入正向阶跃的设定值, 用表1中控制器参数对该摄动对象族进行控制。系统功率和压力的输出响应如图11所示。可知, 在标称模型参数发生 $\pm 10\%$ 的随机摄动的情况下, 本文设计的控制策略能保证功率回路快速平稳地跟踪设定值的变化,

机前主汽压力在较小范围内波动, 具有很强的性能鲁棒性。



a. 功率回路蒙特卡洛实验结果



b. 压力回路蒙特卡洛实验结果

图11 蒙特卡洛实验结果

## 5 结论

本文研究了基于扩张状态观测器的火电单元机组机炉协调控制。首先介绍了扩张状态观测器的原理, 对其进行误差分析和控制率设计。其次以热工过程中常见的二阶传递函数对象为例, 分析参数变化对ESO的观测能力和噪声敏感度的影响。最后, 将ESO用于机炉协调控制对系统中的耦合、扰动、不确定性等进行估计并用控制率补偿。仿真结果表明, 合理选择ESO的参数, 可以使机炉协调系统具有较好的负荷跟踪能力, 保证主汽压力在较小的范围内波动, 从而解决了系统输出在快速性和稳定性之间的矛盾; 同时, 引入ESO可以有效地抑制内部扰动和不确定性因素。基于ESO的协调控制策略结构简单, 获得了良好的控制品质, 具有工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007, 1(1): 24-31. HAN Jing-qing. Auto disturbances rejection control technique[J]. Frontier Science, 2007, 1(1): 24-31.
- [2] YANG Xiao-xia, HUANG Yi. Capabilities of extended state observer for estimating uncertainties[C]//Proceedings of the

- American Control Conference. [S.l.]: [s.n.], 2009: 3700-3705.
- [3] 王宇航, 姚郁, 马克茂. 二阶扩张状态观测器的误差估计[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(1): 143-147.  
WANG Yu-hang, YAO Yu, MA Ke-mao. Error estimation or second order extended state observer[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(1): 143-147.
- [4] 邵立伟, 廖晓钟, 夏元清, 等. 三阶离散扩张状态观测器的稳定性分析及其综合[J]. 信息与控制, 2008, 37(2): 135-139.  
SHAO Li-wei, LIAO Xiao-zhong, XIA Yuan-qing, et al. Stability analysis and synthesis of third order discrete extended state observer[J]. Information and Control, 2008, 37(2): 135-139.
- [5] HASANZADEH M, JAHED-MOTLAGH M R, KAZEMI M H. Decentralized disturbance rejection control of multi-area power systems using generalized extended state observer[C]//Electrical Engineering (ICEE), 2012 20th Iranian Conference on. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2012: 940-945.
- [6] 林飞, 张春朋, 宋文超, 等. 基于扩张状态观测器的感应电机转子磁链观测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 145-147.  
LIN Fei, ZHANG Chun-peng, SONG Wen-chao, et al. Flux observer of induction moter based on extended state observer[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2003, 23(4): 145-147.
- [7] SHI X, CHANG S. Extended state observer-based time-optimal control for fast and precise point-to-point motions driven by a novel electromagnetic linear actuator[J]. Mechatronics, 2013, 23(4): 445-451.
- [8] CHAN L, NAGHDY F, STIRLING D. Extended active observer for force estimation and disturbance rejection of robotic manipulators[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1277-1287.
- [9] 刘翔, 姜学智, 李东海, 等. 火电单元机组机炉协调自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 149-152.  
LIU Xiang, JIANG Xue-zhi, LI Dong-hai, et al. Coordinated auto-disturbance-rejection control for boiler-turbine unit[J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(1): 149-152.
- [10] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the American Control Conference. [S.l.]: [s.n.], 2006, 6: 4989-4996.
- [11] 张鼎. 基于扩张状态观测器和非线性PID的数字式悬浮控制系统研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005: 1-73.  
ZHANG Ding. Research on levitation control system based on the extended state observer and nonlinear PID[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 1-73.
- [12] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 协调控制系统多变量PID控制器的自整定方法[J]. 自动化仪表, 2003, 24(6): 10-15.  
LIU Hong-bo, LI Shao-yuan, CHAI Tian-you. Self-tuning method of multivariablwe PID controller for coordinate control[J]. Process Automation Instrumentation, 2003, 24(6): 10-15.
- [13] WANG C, LI D, LI Z, et al . Optimization of controllers for gas turbine based on probabilistic robustness[J]. Journal of Engineering for Gas Tturbines and Power, 2009, 131(5): 054502.1-054502.5.

编辑 漆蓉