

文章编号:1674-7607(2025)02-0275-07

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.230719

基于等价输入干扰方法的再热汽温预测控制

陈刚^{1,2}, 华山^{1,2}, 倪向红^{1,2}, 杜友武³, 孙立⁴

(1. 国家能源集团科学技术研究院有限公司, 低碳智能燃煤发电与超净排放全国重点实验室, 江苏南京 210046; 2. 国能南京电力试验研究有限公司, 江苏南京 210046;
3. 江苏理工学院 电气信息工程学院, 江苏常州 213001; 4. 东南大学 能源与环境学院, 大型发电装备安全运行与智能测控国家工程研究中心, 江苏南京 210018)

摘要: 针对再热汽温控制系统存在大惯性、大时滞和易受扰的问题, 提出一种基于等价输入干扰 (Equivalent Input Disturbance, EID) 估计与补偿的预测控制方法, 以提高系统控制的精度。构建状态观测器和 EID 估计器, 估计扰动在控制输入端的一个等价量。由于系统时滞产生相位差, 导致无法利用扰动估计值进行实时补偿, 根据泰勒级数原理, 设计扰动预测器, 计算扰动预测值, 利用该预测值在输入端对扰动进行反向补偿。基于被控对象模型, 提出一种新型状态预测方法, 利用预测值设计反馈控制规律。基于分离原理将控制系统分解为扰动抑制和跟踪控制 2 个子系统, 得出系统稳定性条件和参数设计步骤。仿真结果表明: 所提方法可获得满意的控制精度和抗干扰性能。

关键词: 控制理论; 再热汽温; 预测控制; 等价输入干扰; 扰动抑制; 时滞

中图分类号: TP273

文献标志码: A

学科分类号: 510.80

Predictive Control of Reheated-steam Temperature Using Equivalent Input Disturbance Approach

CHEN Gang^{1,2}, HUA Shan^{1,2}, NI Xianghong^{1,2}, DU Youwu³, SUN Li⁴

(1. State Key Laboratory of Low-carbon Smart Coal-fired Power Generation and Ultra-clean Emission, China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210046, Jiangsu Province, China; 2. Guoneng Nanjing Electric Power Test and Research Co., Ltd., Nanjing 210046, Jiangsu Province, China; 3. The School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, Jiangsu Province, China; 4. National Engineering Research Center of Power Generation Control and Safety, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210018, Jiangsu Province, China)

Abstract: Aiming at the issues concerning large inertia, significant time delay, and susceptibility to disturbances of reheated-steam temperature, a predictive control scheme was proposed to improve its control performance based on the equivalent input disturbance (EID) approach. A state observer and an EID estimator were devised to estimate an equivalent signal of a disturbance on the control input channel. Due to the phase lag caused by the time delay, the estimate cannot be used for real-time compensation. A distur-

收稿日期: 2023-11-29 修订日期: 2024-02-23

基金项目: 国家重点研发青年科学家项目(2022YFB4100500); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20221404); 常州市自然科学基金资助项目(CJ20220068)

作者简介: 陈刚(1986—), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为火电厂复杂自动控制系统优化。
孙立(通信作者), 男, 副研究员, 博士生导师, 博士, E-mail: sunli12@seu.edu.cn。

ance predictor was designed to produce a prediction of the disturbance based on Taylor series theory. As a result, the prediction instead of the estimate of a disturbance was employed for the compensation on the control input channel. A new predictive scheme was proposed to obtain future information on the system state based on the plant model. A state feedback control law was designed using the future state. The control system was divided into two subsystems including disturbance attenuation and tracking control, thereby obtaining the stability criteria and design procedure. Simulation results show that the proposal can achieve the satisfactory performance of control accuracy and anti-disturbance.

Key words: control theory; reheated-steam temperature; predictive control; equivalent input disturbance; disturbance attenuation; time delay

我国是一个能源消耗大国,对电量的需求日趋加大,在未来一段时间内,火力发电仍然是电力产业发电的主要方式,研究如何提高火力发电机组的效率,以达到节能减排的目标具有重要的意义^[1]。再热技术是一种可以提高机组热循环效率的有效手段,再热汽温的控制性能对机组运行的经济性和安全性具有重要影响,已成为系统设计的主要指标之一^[2]。然而,再热汽温控制的引入使得发电机组系统内部耦合加重,加大了系统控制难度,且再热汽温控制过程具有大惯性和大时滞等特点,容易受到其他因素的影响,如受机组负荷和燃烧工况等变化的影响。因此,再热汽温控制是火力发电机组控制的难点之一,受到国内外学者的广泛关注^[3-5]。

早期的再热汽温控制系统主要以 PID 控制为主,该方法无需被控对象的数学模型,控制结构简单,因而在工程中易于实现^[6]。但是传统 PID 控制方法处理大时滞和时变扰动的能力不足,难以获得满意的控制效果,越来越多的学者将先进控制算法应用于再热汽温的控制,如 Smith 预估器^[7]、预测控制^[8]、内模控制^[9]等。崔晓波等^[7]将自抗扰控制与 Smith 预估器结合,估计再热汽温控制过程的总扰动,提高系统扰动抑制的能力,但是该方法未进行扰动预测,对时变扰动的抑制也存在一定的局限。赵晖等^[10]提出了一种再热汽温变结构的预测控制方法,设计了一种具有可调因子的目标函数,实现变结构预测控制,加快了控制系统的响应速度。王林等^[11]提出一种基于增益自适应预估器的非线性 PID 控制方法,采用自适应预估器预测再热汽温,然后将预测值与实际值进行加权,计算再热汽温值,在此基础上,设计非线性 PID 反馈控制。虽然上述预测控制方法可以有效地补偿时滞所造成的相位差,但是现有研究较少考虑扰动(如负荷波动、外界未知扰动)对系统的影响,造成控制性能下降。

本文针对上述问题,提出一种基于等价输入干扰(Equivalent Input Disturbance, EID)估计与预测

的控制方法。首先,利用 EID 方法,在线估计扰动在系统控制输入端的一个等价量,在此基础上,设计基于泰勒级数的扰动预估器,获得扰动预测值,用在控制输入端反向补偿;其次,采用模型预测方法计算系统状态的未来信息,并基于预测值,设计内模控制和反馈控制;最后,分析系统稳定性,提出系统参数设计的步骤,通过实例仿真验证所提出方法的有效性和优越性。

1 再热汽温控制方案及问题描述

再热汽温控制系统主要通过调节烟气挡板开度、改变燃烧器摆角大小以及喷水减温等手段,控制再热器出口的蒸汽温度,其中调节烟气挡板方式具有结构简单和操作简便等特点,获得了广泛的应用^[12-13]。图 1 为采用烟气挡板调节的再热汽温控制示意图。

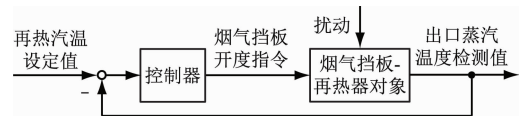


图 1 采用烟气挡板调节再热汽温示意图

Fig. 1 Conceptual block diagram of reheated-steam temperature control by gas damper

根据再热汽温设定值与出口蒸汽温度检测值的偏差,设计合适的控制规律,调节烟气挡板的开度来控制流经烟道中的烟气量,通过热传导,达到调节再热器出口蒸汽温度的目的。一方面,再热汽温调节过程具有惯性大和延时大的特点,且机理复杂,常采用实验数据辨识方法建立其数学模型,通常所建立的模型形式繁琐,阶次较高,为了简化控制系统设计复杂度和工程实际需求,可采用一阶惯性环节加延时环节对模型进行简化和近似,不仅模型拟合度高,还能减少系统设计复杂度,便于工程实施,简化后的模型传递函数可描述为

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: K 为对象的增益; T 为被控对象的惯性时间常数; τ 为纯滞后的延时常数。

另一方面,实际的汽温调节过程容易受到诸如机组负荷波动、燃烧工况变化等扰动的影响,导致控制效果降低,因此实际系统被控对象的状态方程可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}[u(t-\tau) + d_e(t)] \\ y(t) = \mathbf{C}x(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 为系统的状态; $u(t)$ 为系统的控制输入; $y(t)$ 为系统的输出; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 和 \mathbf{C} 为系统的常数矩阵; $d_e(t)$ 为系统总扰动等效到控制输入端的一个等价输入干扰量。

若已知 $[t, t+\tau]$ 时间段的扰动信息,根据模型预测控制原理,计算未来状态信息 $x(t+\tau)$ 为

$$x(t+\tau) = \int_t^{t+\tau} e^{\mathbf{A}(t+\tau-\xi)} \mathbf{B}[u(\xi-\tau) + d_e(\xi)] d\xi + e^{\mathbf{A}\tau} x(t) \quad (3)$$

式中: ξ 为常规积分变量。

利用状态 $x(t+\tau)$ 和扰动 $d_e(t+\tau)$ 进行反馈控制,可以补偿时滞 τ 和扰动对控制系统的影响,控制规律为

$$u(t) = \mathbf{K}_p x(t+\tau) - d_e(t+\tau) \quad (4)$$

式中: \mathbf{K}_p 为状态反馈控制增益矩阵。

将式(4)代入式(2)可得线性标称系统

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = (\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_p)\hat{x}(t) \\ y(t) = \mathbf{C}\hat{x}(t) \end{cases} \quad (5)$$

由于再热汽温控制过程中扰动信息未知且不可测量,无法直接获得扰动 $d_e(t)$ 的信息,从而难以计算精确的状态预测值 $x(t+\tau)$,并且无法在控制规律(4)中进行扰动的主动补偿,导致再热汽温控制精度下降。因此,需要根据系统可获取的信息对扰动进行估计和预测,补偿扰动对控制系统的影响。

2 基于扰动估计与补偿的预测控制设计

采用等价输入干扰方法^[14]对再热汽温控制过程中的扰动进行实时估计,并基于泰勒级数原理,设计扰动预测器,获得扰动信息的预测值,在此基础上,设计基于模型的预测控制规律和扰动补偿策略。图2为所提出的基于扰动估计与补偿的再热汽温预测控制框图。

状态观测器设计如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \mathbf{A}\hat{x}(t) + \mathbf{B}u_f(t-\tau) + \mathbf{L}[y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}(t) = \mathbf{C}\hat{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{x}(t)$ 为状态观测值; $u_f(t)$ 和 $\hat{y}(t)$ 分别为观测器的输入和输出; \mathbf{L} 为观测器增益矩阵。

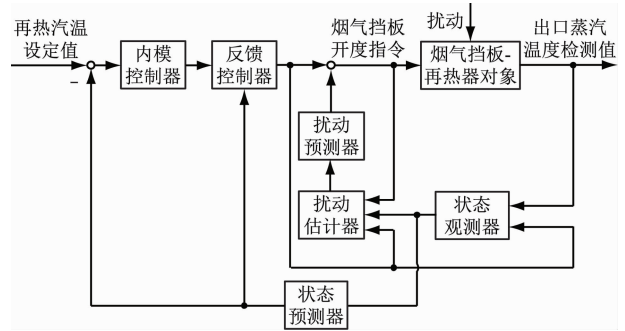


图2 基于扰动估计与补偿的再热汽温预测控制框图

Fig.2 Predictive control configuration of reheated-steam temperature based on disturbance estimation and compensation

定义状态观测误差 $\Delta x(t)$ 为

$$\Delta x(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (7)$$

将式(7)代入式(2)可得

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= \mathbf{A}\hat{x}(t) + \mathbf{B}u(t-\tau) + \mathbf{A}\Delta x(t) - \\ &\Delta \dot{x}(t) + \mathbf{B}d_e(t) \end{aligned} \quad (8)$$

由于系统可控,在控制端必定存在一个信号 $\Delta u(t)$,使得下式成立:

$$\Delta \dot{x}(t) = \mathbf{A}\Delta x(t) + \mathbf{B}\Delta u(t) \quad (9)$$

定义一个扰动估计值 $\hat{d}(t)$ 为

$$\hat{d}(t) = d_e(t) - \Delta u(t) \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(8)得到

$$\dot{\hat{x}}(t) = \mathbf{A}\hat{x}(t) + \mathbf{B}u(t-\tau) + \mathbf{B}\hat{d}(t) \quad (11)$$

根据式(6)、式(7)和式(11),容易计算扰动估计值的一个可行解为

$$\hat{d}(t) = \mathbf{B}^+ \mathbf{L}\mathbf{C}\Delta x(t) + u_f(t-\tau) - u(t-\tau) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{B}^+ = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T$ 。

设计低通滤波器传递函数 $F(s)$ 为

$$F(s) = \frac{1}{T_c s + 1} \quad (13)$$

用以选择扰动估计的频段和滤除测量信号中的噪声,其中 T_c 为滤波器的时间常数,其选择需使得滤波器满足

$$|F(j\omega)| \approx 1, \forall \omega \in [0, \omega_h] \quad (14)$$

式中: ω_h 为所选择频段的最大角频率; ω 为角频率。

因此,经过滤波后的扰动估计值 $\hat{d}_f(t)$ 为

$$\hat{d}_f(t) = \mathbf{L}^{-1} \{F(s) \hat{D}(s)\} \quad (15)$$

式中: $\hat{D}(s)$ 为 $\hat{d}(t)$ 的拉氏变换。

即使扰动可以被准确地实时估算出来,但是由于控制输入通道存在时滞,会产生相位差,使得扰动估计值无法实时对扰动进行反向抵消补偿。因此,需要对扰动估计值进行未来一段时间的预测,以补偿输入时滞造成的相位差。由于扰动估计值 $\hat{d}(t)$ 是根据系统输入信号及状态观测器的误差通过

式(12)计算得到的,且 $\hat{d}_f(t)$ 是 $\hat{d}(t)$ 经过滤波器 $F(s)$ 后的滤波值,因此 $\hat{d}_f(t)$ 是随着时间变化的连续光滑函数,根据泰勒级数原理,容易得到

$$\hat{d}_f(t+\tau) = \hat{d}_f(t) + \tau \hat{d}_f^{(1)}(t) + \dots + \frac{\tau^n}{n!} \hat{d}_f^{(n)}(t) + \zeta_n \quad (16)$$

式中: $\hat{d}_f^{(i)}(t) (i=1,2,\dots,n)$ 代表 $\hat{d}_f(t)$ 的第 i 次微分; ζ_n 为泰勒级数余项; n 为预测器的阶次。

然而上式中的扰动微分项未知,因此设计如下扰动预估器计算各阶次微分和扰动预测值

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = \mathbf{A}_z z(t) + \mathbf{B}_z \hat{d}(t) \\ \tilde{d}_f(t+\tau) = \mathbf{C}_z z(t) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $z(t)$ 为预估器的状态; $\tilde{d}_f(t+\tau)$ 为扰动估计值 $\hat{d}(t)$ 的预测值; \mathbf{A}_z 、 \mathbf{B}_z 、 \mathbf{C}_z 为常数矩阵。

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} -l_0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -l_1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -l_n & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_z = \begin{bmatrix} l_0 \\ l_1 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_z = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \dots & \frac{\tau^n}{n!} \end{bmatrix}.$$

其中: l_i 为预测器的增益。

选择增益 l_i 的形式如下:

$$l_i = \binom{n+1}{i+1} \omega_0^{i+1}, \omega_0 > 0 \quad (18)$$

从而使得扰动预估器所有极点都位于 $-\omega_0$, 确保预测器指数收敛。通过上述扰动估计和预测,可以获得扰动在时间段 $[t, t+\tau]$ 的信息,根据模型预测理论,可得到如下的状态预测 $\hat{x}_p(t+\tau)$:

$$\hat{x}_p(t+\tau) = e^{\mathbf{A}\tau} \hat{x}(t) + \int_t^{t+\tau} e^{\mathbf{A}(t+\tau-\xi)} \mathbf{B} [u(\xi-\tau) + \tilde{d}_f(\xi)] d\xi \quad (19)$$

利用前一周期预测误差来调节本周期的预测值,设计一种新的状态预测,其预测值 $\hat{x}(t+\tau)$ 为

$$\hat{x}(t+\tau) = \hat{x}_p(t+\tau) + \hat{x}(t) - \hat{x}_p(t) \quad (20)$$

针对已知的参考输入信号,设计如下内模控制器以保证系统的跟踪精度:

$$\dot{x}_r(t+\tau) = \mathbf{A}_r x_r(t+\tau) + \mathbf{B}_r [r(t+\tau) - \mathbf{C}\hat{x}(t+\tau)] \quad (21)$$

式中: $x_r(t+\tau)$ 为内模控制器的状态; \mathbf{A}_r 、 \mathbf{B}_r 为内模控制器参数,可根据参考输入信号 $r(t+\tau)$ 的类型进行设计。

由于输入信号 $r(t+\tau)$ 已知,内模状态 $x_r(t+\tau)$ 可以由式(21)计算得到,设计如下预测反馈规律:

$$u_f(t) = \mathbf{K}_p \hat{x}(t+\tau) + \mathbf{K}_r x_r(t+\tau) \quad (22)$$

式中: \mathbf{K}_r 为反馈控制增益矩阵。

将扰动预测值 $\tilde{d}_f(t+\tau)$ 反向施加在控制输入端进行扰动主动补偿,从而得到如下新的控制规律:

$$u(t) = u_f(t) - \tilde{d}_f(t+\tau) \quad (23)$$

3 稳定性分析及参数设计

3.1 稳定性分析

令 $r(t)=0$ 和 $d_e(t)=0$, 分析系统的稳定性。

一方面,由式(2)、式(6)、式(7)和式(23)可以得到

$$\Delta \dot{x}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{LC}) \Delta x(t) - \mathbf{B} \tilde{d}_f(t) \quad (24)$$

由式(12)和式(23)可得

$$\hat{d}(t) = \mathbf{B}^+ \mathbf{LC} \Delta x(t) + \tilde{d}_f(t) \quad (25)$$

另一方面, $\hat{d}(t)$ 经过滤波器 $F(s)$ 和扰动预测器 $H(s)$ 后得到 $\tilde{d}_f(t+\tau)$ 。根据上述分析和公式,容易画出系统的等价控制框图,如图 3 所示。

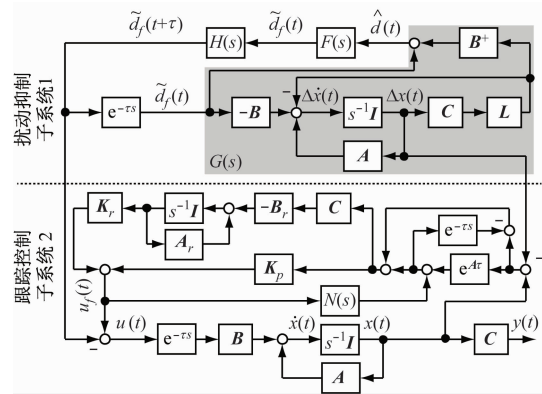


图 3 控制系统等价框图

Fig. 3 Equivalent configuration of control system

图中 $N(s)$ 为式(19)积分项的拉氏变换,阴影部分 $G(s)$ 为

$$G(s) = 1 - \mathbf{B}^+ \mathbf{LC} [s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})]^{-1} \mathbf{B} = \mathbf{B}^+ (s\mathbf{I} - \mathbf{A}) [s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{LC})]^{-1} \mathbf{B} \quad (26)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。

由图 3 可知,控制系统由 2 个子系统组成,位于虚线以上的子系统 1,主要作用是扰动主动估计与补偿,用以实现系统的抗扰性能;位于虚线以下的子系统 2,主要作用是状态预测控制,用以实现系统的跟踪性能,并且子系统 2 的动态特性不影响子系统 1。因此,子系统 1 的分析与设计可独立于子系统 2。

仅考虑子系统 1,由于时滞 $e^{-\tau s}$ 满足

$$|e^{-j\omega\tau}| = 1, \forall \omega \in [0, \infty) \quad (27)$$

根据小增益定理可知,若每个独立单元分别稳定,即 $G(s)$ 、 $F(s)$ 和 $H(s)$ 各自稳定,且满足关系式:

$$\|HFG\|_\infty < 1 \quad (28)$$

那么子系统 1 是稳定的。由于 $F(s)$ 和 $H(s)$ 自身是稳定的, $G(s)$ 的稳定性由矩阵 $(\mathbf{A} - \mathbf{LC})$ 决定,因此可得到如下定理。

定理 1 扰动抑制子系统 1 是稳定的,当且仅当下面 2 个条件成立:

(1) 矩阵 $(A-LC)$ 是 Hurwitz 矩阵;

$$(2) |F(j\omega)H(j\omega)| < \left| \frac{1}{G(j\omega)} \right|, \forall \omega \in [0, \infty)$$

考虑跟踪控制子系统 2, 对式 (20) 两边微分得到

$$\dot{\hat{x}}(t+\tau) = A\hat{x}(t+\tau) + Bu_f(t) + LC\varepsilon(t) \quad (29)$$

式中: $\varepsilon(t) = \Delta x(t) + e^{A\tau}[\Delta x(t) - \Delta x(t-\tau)]$ 。

根据式 (21) 和式 (29), 可以得到子系统 2 的动态特性 $\dot{\eta}(t)$ 为

$$\dot{\eta}(t) = (\bar{A} + \bar{B}K_\eta)\eta(t) + B_\varepsilon\varepsilon(t) \quad (30)$$

式中:

$$\eta(t) = \begin{bmatrix} \hat{x}(t+\tau) \\ x_r(t+\tau) \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -B_rC & A_r \end{bmatrix},$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, B_\varepsilon = \begin{bmatrix} LC \\ 0 \end{bmatrix}, K_\eta = [K_p \quad K_r].$$

由上式可知, 一方面, 子系统 2 的稳定性主要由系统矩阵 $(\bar{A} + \bar{B}K_\eta)$ 决定, 由于系统可控和参考信号内模已知, 容易设计反馈增益 K_p 和 K_r 使得 $(\bar{A} + \bar{B}K_\eta)$ 为 Hurwitz 矩阵, 从而使得系统稳定; 另一方面, 系统稳定的界限取决于第二项 $\varepsilon(t)$, 根据 $\varepsilon(t)$ 的定义可知, 若子系统 1 稳定, 则 $\varepsilon(t)$ 是有界的。因此, 可以得到如下定理 2。

定理 2 跟踪控制子系统 2 是有界稳定的, 当且仅当下面 2 个条件成立:

- (1) 矩阵 $(\bar{A} + \bar{B}K_\eta)$ 是 Hurwitz 矩阵;
- (2) 子系统 1 是稳定的。

3.2 参数设计

综上所述, 基于扰动估计与补偿的预测控制系统进行参数设计, 可以总结归纳如下几点:

(1) 仅考虑标称无时滞系统, 即式 (29) 中 $\varepsilon(t) = 0$, 采用线性系统理论, 设计状态反馈控制增益 K_p 和 K_r , 使得 $(\bar{A} + \bar{B}K_\eta)$ 为 Hurwitz 矩阵, 并且使系统具有期望的跟踪控制性能。

(2) 根据系统所受扰动的频率范围, 设计低通滤波器 $F(s)$ 的带宽, 通常选择时间参数 $T_e < \frac{1}{(5 \sim 10)\omega_n}$ 。

(3) 根据时滞的大小和扰动变化的快慢, 选择扰动预估器 $H(s)$ 的极点 ω_0 以及预估器的阶次 n , 针对再热汽温过程控制, 通常选择 $n = 2 \sim 4$ 和 $\omega_0 = 10 \sim 50$ 。

(4) 根据线性系统理论, 设计状态观测器增益 L , 确保 $(A-LC)$ 是 Hurwitz 矩阵, 并且定理 1 的第二个条件满足, 保证系统的稳定性。

滤波器 $F(s)$ 的带宽越大, 可以处理的扰动频率越高, 理论上, 当带宽趋向无穷大时, 可以处理任意频段的扰动, 但是带宽越大, 系统对测量信号中的噪

声越敏感, 导致系统在工程上无法实施。虽然实际控制系统中扰动往往未知且不可测量, 但是扰动的特性和类型通常是可以预知的, 例如再热汽温控制过程扰动由机组负荷和燃烧工况等变化引起, 因此可以根据所受扰动的频率特性, 选择合适大小的 ω_n , 从而可以获得较好的扰动抑制性能, 同时滤除传感器测量噪声。

理论上, 扰动预测器 $H(s)$ 的阶次 n 越大, 基于泰勒级数原理的扰动预测值 $\hat{d}_f(t+\tau)$ 越准确, 但是阶次 n 越大, 造成 $H(s)$ 的增益越高, 从而引起预测过程暂态峰值现象, 并且放大系统测量噪声, 给工程实施带来困难。通常对于时变较慢的扰动信号, 可以选择较低的阶次 n , 而对于时变较快的扰动信号, 适当增加阶次 n , 同时减小 $H(s)$ 的极点, 以降低预测器的增益。

4 实例仿真验证

以 600 MW 超临界机组的基于烟气挡板调节再热汽温控制过程为被控对象, 分别采用模型预测控制、基于传统 EID 方法的预测控制、基于 EID 估计与预测的控制等 3 种方法, 开展仿真分析, 验证本文所提方法的有效性。被控对象参数如下: $K = 0.8089$, $T = 220$, $\tau = 50$ s。本仿真实验中仅考虑参考输入信号是一个阶跃信号, 因此, 内模控制器设计为一个积分器即可, 参数如下: $A_r = 0$, $B_r = 1$ 。

$t = 0$ 时刻, 在输入延迟后加入如下外部扰动:

$$d_e(t) = 5\sin(0.01t) \quad (31)$$

用以模拟总扰动对再热过程的影响。针对扰动抑制子系统 1, 设计二阶扰动预测器, 且极点选择为 10, 从而得到如下参数

$$A_z = \begin{bmatrix} -20 & 1 \\ -100 & 0 \end{bmatrix}, B_z = \begin{bmatrix} -20 \\ -100 \end{bmatrix}, C_z = [1 \quad 50] \quad (32)$$

选择扰动估计器中低通滤波器时间常数为 $T_e = 0.1$ s。利用线性系统理论中完美调节方法设计状态观测器, 使定理 1 中的条件满足。选择如下性能指标 J_L

$$J_L = \int_0^\infty [\rho x_L^\top(t) Q_L x_L(t) + R_L u_L^2(t)] dt \quad (33)$$

式中: $x_L(t)$ 为系统 (A, B, C) 的对偶系统状态; $Q_L = 100$; $R_L = 1$; ρ 为一个调节参数; $u_L = L^\top x_L(t)$ 。

根据完美调节理论, 当 $\rho \rightarrow \infty$ 时, 可以使得 $|G(j\omega)|$ 足够小。当 $\rho = 10^6$ 时, 获得参数 L 为: $L = 10\,000$, 可保证定理 1 中的条件满足, 如图 4 所示。

采用二次型最优控制设计方法获得如下反馈控制器参数: $K_p = -40.27$, $K_r = -3.16$, 保证定理 2 的第一个条件满足。

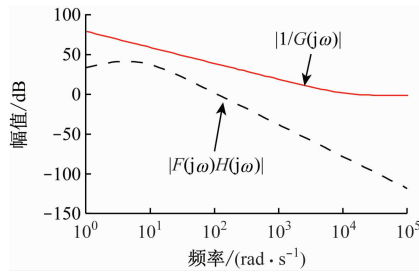


图 4 $|F(j\omega)H(j\omega)|$ 和 $|G(j\omega)|$ 的幅频特性

Fig. 4 Frequency responses of $|F(j\omega)H(j\omega)|$ and $|G(j\omega)|$

首先,不考虑外部扰动,假设初始再热汽温为 500 °C,在 $t=0$ s 时刻,设定再热汽温从 500 °C 上升 10 K,运用本文所提出的预测控制方法,仿真结果如图 5 所示。由仿真结果可知,预测控制较好地补偿了输入时滞带来的影响,系统输出从 50 s(系统时滞时间)后变化的轨迹符合无时滞标称模型下反馈控制的期望。

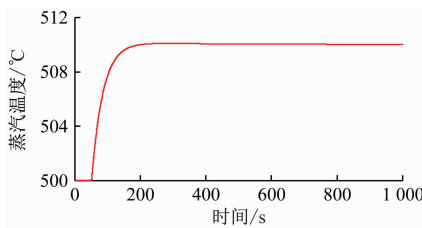
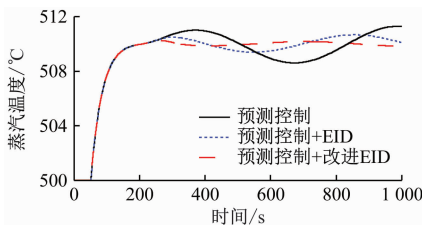


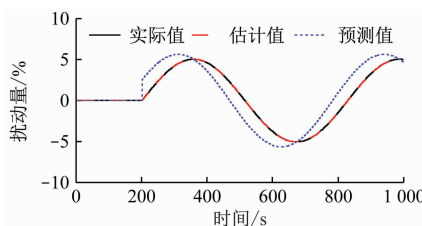
图 5 无扰动下控制系统输出

Fig. 5 Control system output without disturbances

其次,在 $t=200$ s 时刻加入上述扰动,利用预测控制(无扰动估计和补偿)、预测控制加上基于 EID 方法的扰动估计和补偿(无扰动预测)、预测控制加上基于改进型 EID 方法的扰动估计和补偿(具有扰动预测功能)等 3 种方法,开展实验研究,仿真结果如图 6 所示。



(a) 系统输出



(b) 扰动估计与预测

图 6 3 种控制方法的仿真结果

Fig. 6 Simulation results for three methods

从图 6(a)可以看出,虽然预测控制可以较好地补偿时滞带来的影响,但是扰动处理能力不足,基于该方法的系统输出误差最大。从图 6(b)结果可知,虽然 EID 方法可以较好地估计出扰动的大小,但是由于估计值是在控制输入端进行反向补偿的,而输入时滞势必会产生估计值与实际值在施加点处的相位差,影响其补偿效果。采用本文所提的方法(即图中预测控制+改进 EID),在估计值的基础上,进行了扰动预测,补偿时滞产生的相位差,虽然预测存在一定的误差,但从图 6(a)和图 6(b)的仿真结果可知,采用预测控制+改进 EID 方法,可以获得更好的控制精度。

最后,为了验证方法的鲁棒性,考虑模型参数的不确定性,上述所设计的控制系统参数不变,但是被控对象的参数改为: $K=1, T=230, \tau=60$ s。

由于 EID 方法将建模误差对系统输出的影响也等价到输入端,视为一个内在的扰动,通过内环在线估计和补偿的机制,对模型不准确引起的输出误差进行补偿和抵消,从而使得方法具有一定的鲁棒性。由仿真结果图 7 可知,在模型不准确(存在参数不确定性)的情况下,所提方法具有较好的适用性。

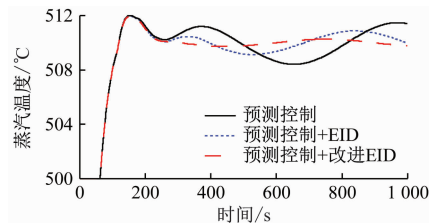


图 7 考虑参数不确定的输出仿真结果

Fig. 7 Simulation output of the system with parameter uncertainty

5 结论

针对火力发电机组中再热汽温控制系统中存在的时滞和扰动问题,提出了一种基于扰动估计与补偿的预测控制方法。通过对扰动的估计和预测,设计了扰动主动补偿策略,抑制了时变扰动对再热汽温控制系统的影响;通过对系统状态的预测,设计了预测反馈控制策略,使得系统输出有效地跟踪了再热汽温的设定值。仿真结果表明:与基于模型预测控制、基于传统等价输入干扰方法的预测控制相比,所提方法可获得更优的控制性能。

参考文献:

[1] 叶青,王朝阳,易广宙,等. 超超临界二次再热尾部三烟道锅炉汽温动态特性及协同优化控制[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 117-125, 184.

- YE Qing, WANG Chaoyang, YI Guangzhou, et al. Dynamic characteristics and coordinate control optimization of steam temperatures for an ultra-supercritical double-reheat boiler with three rear ducts[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2023, 43(2): 117-125, 184.
- [2] 孙明,董泽. 二次再热机组汽温系统的串级自抗扰预测控制[J]. **中国电机工程学报**, 2019, 39(18): 5415-5423.
- SUN Ming, DONG Ze. Cascade active disturbance rejection predictive control for superheated steam temperature of ultra-supercritical double-reheat unit[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2019, 39(18): 5415-5423.
- [3] 王海,张继东,赵俊杰,等. 基于复杂热力系统动态特性的机组两级再热汽温多变量解耦控制方法[J]. **锅炉技术**, 2022, 53(5): 9-14.
- WANG Hai, ZHANG Jidong, ZHAO Junjie, et al. Multivariable decoupling control method for steam temperature of two-stage reheat units based on dynamic characteristics of complex thermal system[J]. **Boiler Technology**, 2022, 53(5): 9-14.
- [4] 王东风,李玲,王玉华. 电站锅炉再热蒸汽温度的燃烧器摆角和喷水减温协调预测控制[J]. **动力工程学报**, 2018, 38(7): 558-563, 571.
- WANG Dongfeng, LI Ling, WANG Yuhua. Coordinated predictive control of boiler reheated steam temperature using tilter and attemperator[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2018, 38(7): 558-563, 571.
- [5] 陈宝林,陈刚,马青鹏. 两级再热器出口汽温优化预测控制研究[J]. **计算机仿真**, 2020, 37(11): 60-64.
- CHEN Baolin, CHEN Gang, MA Qingpeng. Research on predictive control of steam temperature optimization of two-stage reheater[J]. **Computer Simulation**, 2020, 37(11): 60-64.
- [6] 赵东华,潘维加,刘攀,等. 火电厂锅炉再热汽温优化控制仿真[J]. **计算机仿真**, 2019, 36(9): 142-146.
- ZHAO Donghua, PAN Weijia, LIU Pan, et al. Simulation of optimal control of boiler reheated steam temperature in thermal power plant[J]. **Computer Simulation**, 2019, 36(9): 142-146.
- [7] 崔晓波,刘久斌,朱红霞,等. 基于自抗扰 Smith 预估补偿方法的超临界机组再热汽温控制研究[J]. **发电技术**, 2018, 39(4): 367-372.
- CUI Xiaobo, LIU Jiubin, ZHU Hongxia, et al. Research on reheated steam temperature control of supercritical unit based on active disturbance rejection controller smith predictive compensation method[J]. **Power Generation Technology**, 2018, 39(4): 367-372.
- [8] 孙胡彬,杨建国,金宏伟,等. 基于贝叶斯优化-随机森林回归的燃煤锅炉 NO_x 预测模型[J]. **动力工程学报**, 2023, 43(7): 910-916.
- SUN Hubin, YANG Jianguo, JIN Hongwei, et al. NO_x prediction model for coal-fired boiler based on Bayesian optimization-random forest regression[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2023, 43(7): 910-916.
- [9] 熊飞飞,黄景涛,茅建波. 一种自适应阶梯式广义预测控制方法[J]. **控制工程**, 2022, 29(11): 2145-2151.
- XIONG Feifei, HUANG Jingtao, MAO Jianbo. An adaptive staircase generalized predictive control[J]. **Control Engineering of China**, 2022, 29(11): 2145-2151.
- [10] 赵晖,陈勇. 基于内模控制器的再热汽温控制应用[J]. **应用能源技术**, 2013(12): 55-57.
- ZHAO Hui, CHEN Yong. Application of internal model control on reheat steam temperature[J]. **Applied Energy Technology**, 2013(12): 55-57.
- [11] 王林,李军,曾卫东,等. 基于改进目标函数的机组汽温变结构预测控制[J]. **中国电机工程学报**, 2023, 43(14): 5483-5489.
- WANG Lin, LI Jun, ZENG Weidong, et al. Variable structure predictive control of unit steam temperature based on improved objective function[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2023, 43(14): 5483-5489.
- [12] 陈东旭,韩中合,郭董阳,等. 超临界二氧化碳燃煤热电联产系统热力性能及灵活性分析[J]. **动力工程学报**, 2023, 43(2): 214-221, 236.
- CHEN Dongxu, HAN Zhonghe, GUO Dongyang, et al. Thermal performance and flexibility analysis of a supercritical carbon dioxide coal-fired cogeneration system[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2023, 43(2): 214-221, 236.
- [13] 牛海明,邱忠昌,黄焕袍. 1 000 MW 二次再热超超临界机组再热汽温控制策略及工程应用[J]. **中国电力**, 2017, 50(9): 138-142.
- NIU Haiming, QIU Zhongchang, HUANG Huanpao. The reheat steam temperature control strategy for the 1 000 MW ultra-supercritical double-reheat unit and its application[J]. **Electric Power**, 2017, 50(9): 138-142.
- [14] DU Youwu, CAO Weihua, SHE Jinhua, et al. Disturbance rejection and control system design using improved equivalent input disturbance approach[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2020, 67(4): 3013-3023.