

DOI: 10.19666/j.rlfed.202211189

基于改进等价输入干扰观测器的主蒸汽温度系统阶梯式动态矩阵控制

宋美艳¹, 赵亮¹, 王宾¹, 陈宏君², 王炎初²

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211002)

[摘要] 由于频繁而广泛的负荷变化引起的未知扰动以及对发电效率和运行安全的严格控制要求, 主蒸汽温度的控制变得越来越具有挑战性。为此, 针对高阶动态扰动响应迟滞的问题, 提出一种以阶梯式动态矩阵控制算法 (SDMC) 为核心的抗干扰控制方案, 从根本上解决了主蒸汽温度控制系统的大滞后、大惯性以及多扰动的问题。实例仿真表明, 提出的改进等价输入扰动观测器 (IEIDO) 可实现对不可测扰动和未知模型动态的实时估计与补偿, 而 SDMC 既能够保证主蒸汽温度控制系统的快速性和稳定性, 又能够根据引入的可测扰动前馈补偿实现干扰的抑制。因此, 所提出的方案可以保证机组运行的安全性、稳定性、经济性和灵活性, 在电力行业有着广阔的应用前景。

[关键词] 预测控制; 主蒸汽温度控制; 阶梯式动态矩阵; 等价输入干扰观测器

[引用本文格式] 宋美艳, 赵亮, 王宾, 等. 基于改进等价输入干扰观测器的主蒸汽温度系统阶梯式动态矩阵控制[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 113-120. SONG Meiyuan, ZHAO Liang, WANG Bin, et al. Stair-like dynamic matrix control for main steam temperature system based on improved equivalent input disturbance observer[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 113-120.

Stair-like dynamic matrix control for main steam temperature system based on improved equivalent input disturbance observer

SONG Meiyuan¹, ZHAO Liang¹, WANG Bin¹, CHEN Hongjun², WANG Yanchu²

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Nanjing Nanrui Jibao Electric Co., Ltd., Nanjing 211002, China)

Abstract: Control of main steam temperature (MST) is becoming more and more challenging because of unknown disturbances caused by frequent and extensive load changes and strict control requirements for the efficiency and safety. To this end, considering the sluggish responses to the disturbances caused by high order dynamics, an anti-disturbance control scheme with stair-like dynamic matrix control (SDMC) algorithm as the core is proposed to solve fundamentally the control problem of large delay, big inertia and multiple disturbances in MST. This study aims to provide technical support for the clean and efficient use of coal and the large-scale consumption of renewable energy sources in China. A simulation example shows that the proposed improved equivalent input disturbance observer (IEIDO) can realize real-time estimation and compensation of disturbances, while SDMC can not only ensure the rapidity and stability of the steam temperature control system, but also achieve disturbance suppression according to the introduction of measured disturbance feed-forward compensation technology. Therefore, the proposed scheme can guarantee the safety, stability, economy and flexibility of the unit operation, which has a promising application future in power industry.

Key words: predictive control; main steam temperature control; stair-like dynamic matrix; equivalent input disturbance observer

我国是世界上最大的能源生产和消费国之一, 随着现代工业和国民经济的快速发展, 电力消费在

终端能源消费的比例将进一步增长^[1]。新能源电厂受制于自然因素, 所以目前我国电力供应方式仍

收稿日期: 2022-11-29 网络首发日期: 2023-01-12

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ 20-H39)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ 20-H39)

第一作者简介: 宋美艳 (1979) 女, 工程师, 主要研究方向为电站控制系统, songmeiyuan@tpri.com.cn。

以火力发电为主,并且能源结构仍以煤炭为主。火电厂热工控制系统十分复杂,具有大滞后、非线性、多扰动和强耦合等特点,严重影响了热工系统的控制品质。串级PID控制^[2]是一种经典的主蒸汽温度控制策略,但随着火电机组参数提高,系统复杂度增加,变量间耦合性增强,干扰的种类也大量增加,基本的串级PID控制难以满足主蒸汽温度系统控制要求,因此需要引入更先进的控制策略来解决这些问题。

研究人员围绕改进串级PID控制器进行了一些研究:文献[3]将模糊控制与PID控制器结合,实现了快速稳定的汽温调节;文献[4]将自抗扰策略引入串级PID控制,克服了控制对象的不确定扰动,增强了系统的鲁棒性和抗干扰性能;文献[5]针对主蒸汽温度对象的迟延环节,设计Smith预估器进行补偿,减小了串级PID控制器的控制量波动;文献[6]提出了基于径向基函数(RBF)神经网络模糊推理的PID串级控制系统,改善了系统动态性能和控制精度。随着各种控制理论的发展,研究者将新的控制理论应用于主蒸汽温度控制系统,设计了大量先进主蒸汽温度控制器:文献[7]采用内模控制器,给出一种内模控制系统结构及参数整定方法,提高了主蒸汽温度控制系统的稳定性及控制性能;文献[8]根据定量反馈理论设计了边界稳定的鲁棒控制器,保证了主蒸汽温度控制系统的鲁棒性;文献[9]提出一种基于反演滑模控制和自适应算法相结合的主蒸汽温度优化控制策略,提高了系统稳定性和抗干扰能力;文献[10]针对火电机组过热蒸汽温度被控对象特性,将滑模控制应用到串级过热蒸汽温度控制系统中,使控制系统的抗扰动性能得到显著改善;文献[11]采用状态空间法分析系统,设计了无静差状态反馈控制,并引入状态观测器提高闭环系统的鲁棒性。

模型预测控制(model predictive control, MPC)一般简称预测控制,在工业慢对象控制中表现突出,成为了一种典型且极具影响力的先进控制算法。最初的预测控制算法是Richalet等人^[12]提出的模型预测启发控制,以及Cutler等人^[13]提出的动态矩阵控制,所采用的脉冲响应模型或阶跃响应模型都是基于实验获得的非参数模型,不需要进行模型辨识。为增强控制系统对纯迟延和不确定参数的鲁棒性,以提高控制系统鲁棒性为目的的自适应控制与原始预测控制融合,发展出基于参数模型的预测

控制算法,如Keyser等人^[14]提出的扩展时域预测自适应控制,Clarke等人^[15]提出的广义预测控制等。这些预测控制算法采用参数模型,需要进行参数辨识,而基于参数辨识模型的控制理论为分析预测控制的稳定性、抗干扰性能等提供了理论基础。基于前人的研究,文献[16]针对主蒸汽温度控制系统,考虑各种扰动因素,提出一种基于动态矩阵控制的主蒸汽温度预测控制策略。文献[17]在预测控制中引入神经网络,使得主蒸汽温度控制系统能够适应控制环境的变化。文献[18]设计了针对火电厂过热蒸汽温度控制的自适应模型预测控制器,改善了系统动态性能。文献[19]提出一种基于隐式广义预测控制(IGPC)的主蒸汽温度预测控制策略,提高了控制系统的鲁棒性。

研究者将预测控制应用于滞后很大的慢对象,在实验室构建的仿真系统中取得了很好的控制效果。但实际工业过程不同于实验环境,存在大量的未知干扰,预测控制只对定值扰动抑制作用强,而在实际工业过程实现满意的控制效果,需要提高对未知干扰的抑制能力。等价输入干扰估计器可以将系统未知干扰转化到系统的控制输入通道,以便进行扰动抑制。文献[20]使用等价输入干扰补偿的改进型重复控制系统参数优化设计方法,实现对非周期扰动的有效抑制和周期性参考输入的高精度跟踪控制。文献[21]设计了一种基于等价输入干扰方法改进的双闭环调速控制器,实现了高精度控制。文献[22]提出一种基于等价输入扰动的自适应无源控制方法(EID-APBC)。文献[23]提出一种基于等效输入扰动(EID)估计的提高伺服系统抗扰性能的新方法。文献[24]针对磁悬浮球系统控制性能下降问题,提出一种基于等价输入干扰滑模观测器的模型预测控制(MPC+EIDSMO)方法。文献[25]针对飞行仿真转台系统易受外界影响的问题,提出一种带有等价输入干扰估计器的改进型近似微分复合控制策略,并给出了给定参数整定条件。本文综合改进的等价输入干扰估计器和阶梯式动态矩阵控制算法,有效提升了主蒸汽温度控制系统的抗干扰能力和设定值跟踪性能。

本文在主蒸汽温度控制系统模型结构基础上,给出了带前馈补偿的阶梯式动态矩阵控制算法,并引入改进的等价输入干扰观测器进行扰动抑制;最后针对模型预测和干扰估计的融合算法进行仿真分析,验证了算法的有效性。

1 主蒸汽温度控制系统模型结构

主蒸汽温度控制系统一般由两级喷水减温器以及低温过热器、屏式过热器、高温过热器组成^[26], 如图 1 所示。

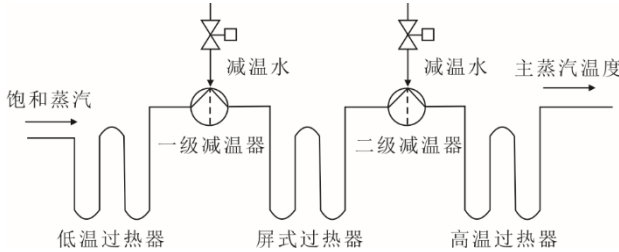


图 1 主蒸汽温度控制系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the main steam temperature control system

由图 1 可见, 从锅炉产生的饱和蒸汽先后经过低温过热器、屏式过热器、高温过热器加热, 最终进入汽轮机做功, 主蒸汽指高温过热器出口的蒸汽。对主蒸汽温度进行控制由 2 个喷水减温器实现, 一级减温器位于低温过热器和屏式过热器之间, 提供的减温水量较大, 对主蒸汽温度进行粗略调节, 二级减温器位于屏式过热器和高温过热器之间, 对主蒸汽温度进行精细调节, 保证最终主蒸汽温度维持在设定值附近允许范围内, 这样实现系统安全稳定运行。

针对多级过热器和喷水减温器汽温系统, 火电机组广泛采用分段的串级 PID 控制策略。一般取喷水减温器后的温度, 作为导前温度来构成串级控制的副回路信号, 整个主蒸汽温度控制系统的控制效果很大程度都是由惰性区特性决定的, 对副回路进行复杂的先进控制算法设计对整体系统性能提升非常有限, 同时又急剧增加整体系统的复杂度。为了简化最终控制系统结构, 副回路仍简单采用比例控制器, 主回路采用更先进的控制算法进行设计。这样对于主回路控制器来说, 其控制对象为副回路与惰性区串联构成的广义对象, 其结构如图 2 所示。

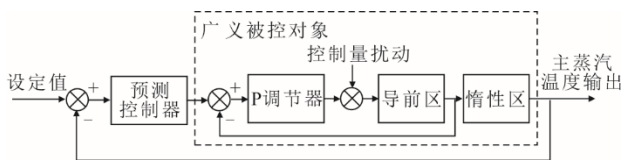


图 2 基于预测控制算法的蒸汽温度串级控制

Fig.2 Block diagram of the steam temperature cascade control based on predictive control algorithm

由图 2 可见, 整个广义对象中, 由于副回路的

扰动经过快速调节后已经明显减弱, 主回路可以将副回路控制看作微弱的模型失配, 按照计算得到的广义对象设计控制器参数即可, 不需要对副回路扰动进行额外考虑。本文主要以 37% 负荷工况下的广义主蒸汽温度对象为例进行研究, 取该文献^[27]中主蒸汽温度对喷水扰动响应特性的模型, 并参考其中串级 PID 控制器参数, 副回路控制器比例带取 0.248, 得到广义主蒸汽温度对象传递函数 $G_{eq}(s)$ 为:

$$G_{eq}(s) = \frac{0.953}{1.305s + 1} \cdot \frac{1.048}{(56.6s + 1)^4} \quad (1)$$

2 基于改进等价输入干扰补偿的阶梯式动态矩阵控制

2.1 阶梯式动态矩阵控制

动态矩阵控制 (dynamic matrix control, DMC) 作为一种经典预测控制算法, 只需通过阶跃响应实验即可建立非参数的阶跃响应模型, 其原理简单, 在工业生产过程中得以广泛运用。但是 DMC 的控制律求解存在求逆运算, 在一定程度上增加了分散处理器 (DPU) 的运算负荷, 实时性无法保证。因此, 为了降低计算量, 防止执行机构频繁动作, 引入阶梯式因子 $\beta (\beta > 0)$ 构成阶梯式动态矩阵控制 (stair-like DMC, SDMC)^[28]。SDMC 将控制增量呈阶梯形式施加到被控对象, 控制增量向量 $\Delta u_M(k)$ 中第 1 步用 δ 表示, 则 M 个控制增量可表示为:

$$\Delta u(k + j - 1) = \beta^{j-1} \delta, j = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

预测输出 $\tilde{y}_{PM}(k)$ 为:

$$\tilde{y}_{PM}(k) = \tilde{y}_{p0}(k) + G\delta \quad (3)$$

其中, $G = [a_1, a_2 + a_1\beta, \dots, a_{P+} + a_{P-1}\beta + \dots + a_{P-M+1}\beta^{M-1}]^T$ 。

性能指标函数 $J(k)$ 为:

$$\min J(k) = \|\omega_p(k) - \tilde{y}_{PM}(k)\|_Q^2 + \lambda(1 + \beta^2 + \beta^4 + \dots + \beta^{2(M-1)})\delta^2 \quad (4)$$

式中: $\omega_p(k)$ 为参考输入, 其柔化因子为 α 。

因此可推导出控制增量 δ 为:

$$\delta = \frac{G^T Q (\omega_p(k) - \tilde{y}_{p0}(k))}{G^T Q G + \lambda(1 + \beta^2 + \beta^4 + \dots + \beta^{2(M-1)})} \quad (5)$$

在施加 $\Delta u(k) = \delta$ 作用后, 计算 $k+1$ 时刻预测输出和当前的实际输出之间的误差, 即为:

$$e(k + 1) = y(k + 1) - \tilde{y}_1(k + 1|k) \quad (6)$$

式中: $y(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的实际输出; $\tilde{y}_1(k+1|k)$ 为 k 时刻施加控制量 δ 后的 $k+1$ 时刻预测输出。

用误差校正基本预测输出 $\tilde{y}_{p1}(k)$, 即:

$$\tilde{y}_{COR}(k + 1) = \tilde{y}_{p1}(k) + he(k + 1) \quad (7)$$

其中:

$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+1)=[\tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+1|k+1), \dots, \tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+P|k+1)]^T$
 式中: $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+1)$ 为基于 $k+1$ 时刻校正后的预测输出; $\mathbf{h}=[h_1, h_2, \dots, h_p]$ 为误差校正系数向量。基本预测输出 $\tilde{\mathbf{y}}_{p1}(k)=\tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k)+\mathbf{a}\Delta\mathbf{u}(k)$, \mathbf{a} 为模型阶跃响应系数向量, $\mathbf{a}=[a_1, a_2, \dots, a_N]^T$ 。

$\tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+1)$ 除第 1 项外, 其余各项分别是没有施加 $\Delta\mathbf{u}(k+1)$ 时对 $k+2$ 到 $k+P$ 时刻的基本预测输出, 作为 $\tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k+1)$ 的前 $P-1$ 项, 即:

$$\tilde{\mathbf{y}}_0(k+1+i|k+1)=\tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+1+i|k+1), \quad i=1, 2, \dots, P-1 \quad (8)$$

其中, $\tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k+1)$ 最后 1 项用 $\tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+P|k+1)$ 近似, 写成矩阵形式为:

$$\tilde{\mathbf{y}}_{p0}(k+1)=\mathbf{S} \cdot \tilde{\mathbf{y}}_{\text{COR}}(k+1) \quad (9)$$

\mathbf{S} 为移位矩阵, 即:

$$\mathbf{S}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}_{P \times P} \quad (10)$$

最终得到 $k+1$ 时刻基本预测输出, 回到预测模型再次计算, 由下一时刻基本预测值继续求解控制律完成下一时刻的控制器输出和误差校正。

2.2 改进等价输入扰动抑制策略

1 个单输入单输出的线性时不变对象, 可能存在作用于对象或作用于控制量的扰动, 状态空间模型分别为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}\mathbf{u}(t)+\mathbf{B}_d\mathbf{d}(t) \\ \mathbf{y}(t)=\mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}[\mathbf{u}(t)+\mathbf{d}_e(t)] \\ \mathbf{y}(t)=\mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (12)$$

等价输入干扰 (equivalent input disturbance, EID) 定义为: 使式(11)和式(12)对象控制量和初始状态都为零, 那么式(11)所表示对象的输出为在扰动 $\mathbf{d}(t)$ 作用下得到的 $\mathbf{y}(t)$, 式(12)所表示对象的输出为在扰动 $\mathbf{d}_e(t)$ 作用下得到的 $\mathbf{y}(t)$, 此时如果对于所有的 $t \geq 0$, 上述两式中的 $\mathbf{y}(t)$ 都相等, 那么 $\mathbf{d}_e(t)$ 即为 $\mathbf{d}(t)$ 的等价输入干扰。也就是说, 将作用于对象的干扰等价到了控制量上。该方法在解耦、非线性补偿以及扰动补偿等方面具有良好效果, 其原理可以参考文献[23]。基于 EID 估计器的扰动补偿策略的结构如图 3 所示。

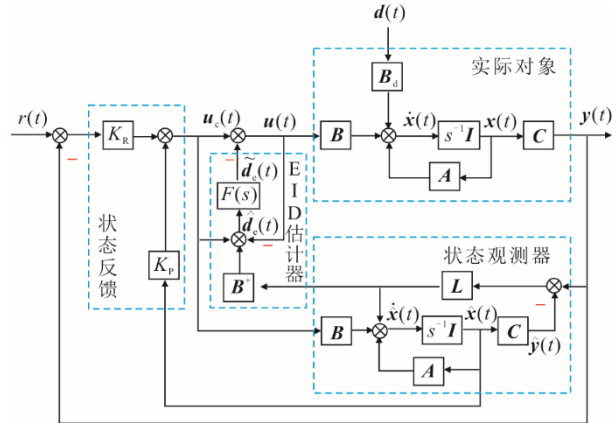


图 3 基于 EID 观测器的扰动补偿策略结构

Fig.3 Structural diagram of the disturbance compensation strategy based on EID observer

常规 EID 的 \mathbf{d}_e 估计值可推导出:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{d}}_e(t) &= \mathbf{B}^+ \mathbf{L} \mathbf{C} \Delta \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}_c(t) - \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{B}^+ &= (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T, \Delta \mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

基于 EID 估计器的扰动补偿策略可以提高控制系统的抗干扰性能, 但在补偿扰动时, 为了平滑补偿作用及保证运算因果关系的正确性, 在 EID 估计值上加入 1 个一阶惯性滤波器 $F(s)$, 由于该环节存在 90° 的相位滞后, 会对控制性能产生一定的限制, 本文对 EID 观测器进行改进, 消除一阶惯性滤波器的限制。

通过简化 EID 观测器的形式得到新的扰动估计值 $\tilde{\mathbf{d}}_e^*(t)$, 改进 EID 估计器扰动补偿策略结构如图 4 所示。

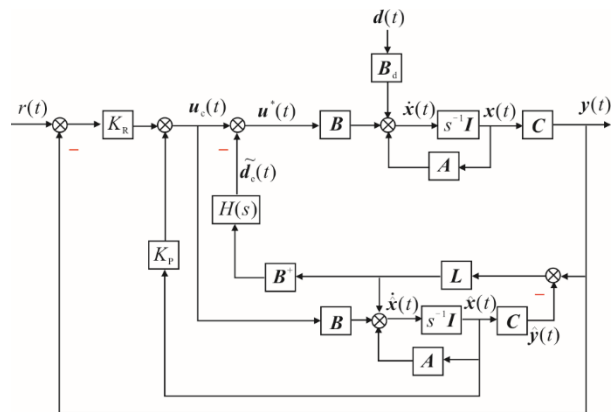


图 4 改进 EID 估计器扰动补偿策略结构

Fig.4 Structure of the disturbance compensation strategy based on improved EID (IEID) estimator

$$\tilde{\mathbf{D}}_e^*(s) = H(s) \mathbf{B}^+ \mathbf{L} \mathbf{C} \Delta \mathbf{X}(s) \quad (14)$$

式中: $H(s)$ 为待设计的传递函数; $\tilde{\mathbf{D}}_e^*(s)$ 为新的扰动估计值 $\tilde{\mathbf{d}}_e^*(t)$ 的拉氏变换; $\Delta \mathbf{X}(s)$ 为 $\Delta \mathbf{x}(t)$ 的拉氏变换。则最终的控制量为:

$$\mathbf{u}^*(t) = \mathbf{u}_c(t) - \tilde{\mathbf{d}}_e^*(t) \quad (15)$$

常规 EID 的估计值可改写为:

$$\hat{D}_e(s) = B^+ LC \Delta X(s) + H(s) B^+ LC \Delta X(s) = [H(s) + I] B^+ LC \Delta X(s) \quad (16)$$

对比式(14)和式(16)可得, $|H(j\omega)| \gg 1, \forall \omega \in [0, \omega_r)$, 时可以保证改进后的 $\tilde{D}_e^*(s) \approx \hat{D}_e(s)$ 。也就是说, 通过适当设计 $H(s)$ 就可以保证在干扰频率范围内 IEID 观测器与原来估计值近似。

令设定值为 0 并加入 1 个外部扰动, 如果外部扰动理论上可以等效为 $d_e(t)$, 那么定义扰动估计的偏差为:

$$\Delta d_e(t) \approx d_e(t) - \tilde{d}_e^*(t) \quad (17)$$

结合被控对象(A, B, C)和式(14)可得出:

$$\Delta \dot{x}(t) = (A - LC) \Delta x(t) + B[\tilde{d}_e^*(t) - \tilde{d}_e(t)] \quad (18)$$

这样, 可将图 4 等效成图 5 的结构。

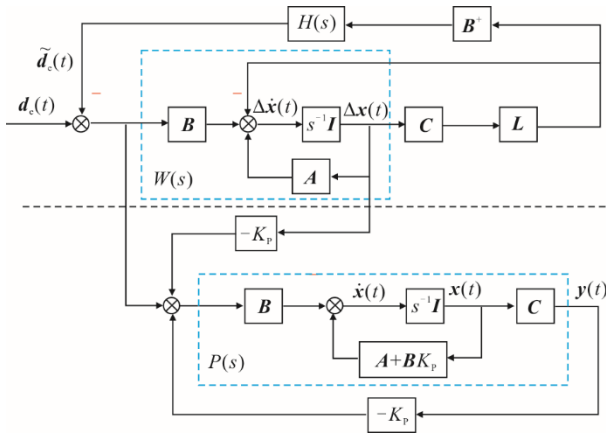


图 5 图 4 的等效结构

Fig.5 Equivalent configuration of Fig.4

为了后续表述的方便, 定义图 5 中蓝色虚线框部分传递函数为 $W(s)$ 和 $P(s)$ 。进一步可将图 5 表示为从 IEID 到被控对象输出的开环形式 (图 6)。

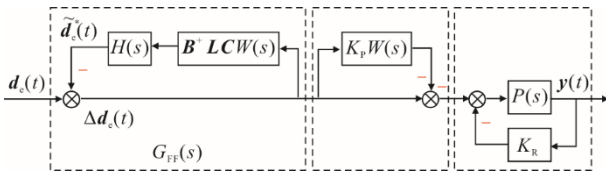


图 6 从 EID 到系统输出结构

Fig.6 Structural diagram from EID to system output

从 IEID 到系统输出的传递函数可以由图 6 的 3 个虚线框部分相串联求得, $G_{FF}(s)$ 部分即所设计的 IEID 补偿环节与状态反馈部分是完全独立的, 相当于在原有的状态反馈控制律基础上加入了完全独立的扰动校正项, 则 $G_{FF}(s)$ 传递函数形式为:

$$G_{FF}(s) = \frac{1}{1 + H(s)B^+LCW(s)} = \frac{1}{1 + H(s)[1 - E(s)]} \quad (19)$$

代入 $W(s)$ 运算可构造出 $E(s)$, 即:

$$E(s) = 1 - B^+ LC [sI - (A - LC)]^{-1} B = B^+ (sI - A) [sI - (A - LC)]^{-1} B \quad (20)$$

状态观测器具有对偶性^[29], 通过完全调节法^[30]设计状态观测器增益 L 一定可以确保 1 个足够大的 L 满足 $[sI - (A - LC)]^{-1} B \approx 0$ 。所以此时 $E(s)$ 也会非常小, 之前提到 $H(s)$ 要满足 $|H(j\omega)| \gg 1, \forall \omega \in [0, \omega_r)$ 。所以 $G_{FF}(s)$ 在频域中有 $|G_{FF}(j\omega)| \approx 0, \forall \omega \in [0, \omega_r)$, 可得 $\Delta D_e(s) = G_{FF}(s) D(s) \approx 0, \Delta D_e(s)$ 和 $D_e(s)$ 为 $\Delta d_e(t)$ 和 $d_e(t)$ 的拉氏变换。这就意味着扰动估计的偏差经过补偿后, 几乎不会对反馈控制过程产生影响, 同时意味着 EID 估计器可以快速地跟踪 $d_e(t)$ 理论值, 所以 IEID 策略可以在系统处于稳态和动态调节过程都能取得良好的扰动抑制效果。

实际应用时, 如何保证扰动抑制策略的稳定性, 关键就在于 $H(s)$ 的设计。为了分析过程简便, 以 1 个二阶系统为例, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0]$, 假如观测器设计 2 个相同极点 $-p_0$, 则观测器增益为 $L = \begin{bmatrix} 2p_0 \\ p_0^2 \end{bmatrix}$, 取 $F(s) = \frac{1}{Ts + 1}$, 从 IEID 观测器和原始 EID 观测器的形式不难看出, 当 $H(s) = \frac{F(s)}{1 - F(s)} = \frac{1}{Ts}$ 时, IEID 观测器又回到了原始 EID 观测器的形式, 由图 6 可得, 从 $d_e(t)$ 到 $\tilde{d}_e^*(t)$ 传递函数为:

$$G_{dis}(s) = B^+ LC [sI - (A - LC)]^{-1} B H(s) = \frac{p_0^2}{(s + p_0)^2} \frac{1}{Ts} = \frac{K}{s(s + p_0)^2} \quad (21)$$

取 $p_0=10$ 时绘制 $G_{dis}(s)$ 的根轨迹如图 7 所示。由图 7 可见, 当 $K > 2000$ 不稳定, 即 $T > 0.05$ 。

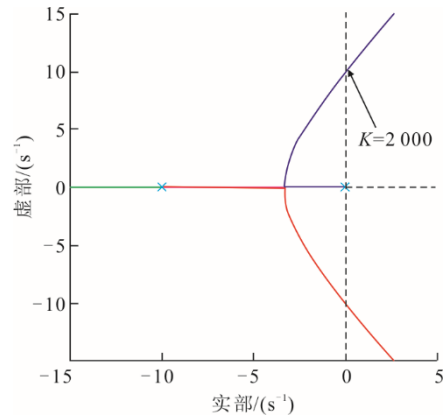


图 7 IEID 传递函数根轨迹

Fig.7 Root locus of the IEID transfer function

为了解决上述问题，在 $H(s)$ 中引入 1 个稳定的零点，即：

$$H(s) = \frac{\Theta(s+1)}{s} \quad (22)$$

式中： Θ 为正实数。同样绘制 $p_0=10$ 时从 $d_e(t)$ 到 $\tilde{d}_e^*(t)$ 的系统根轨迹，结果如图 8 所示。由图 8 可见，根轨迹始终在左半平面，这就使得在极点配置时只要 $p_0>0$ 使得观测器稳定，无论 p_0 和 Θ 是何关系都不会影响扰动抑制环节的的稳定，为了满足 $|H(j\omega)| \gg 1, \forall \omega \in [0, \omega_r)$ 的要求， Θ 要远大于 1。经过上述改进，得到了 $H(s)$ 的形式，解决了原始 EID 策略中的滤波器参数和状态观测器增益参数相互耦合的问题。

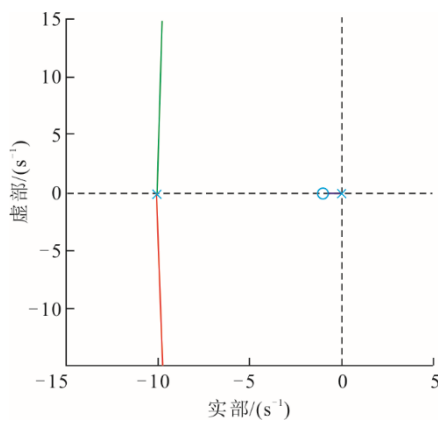


图 8 IEID 传递函数根轨迹 (带零点)

Fig.8 Root locus of the IEID transfer function with zero

2.3 基于改进等价输入干扰补偿的阶梯式动态矩阵控制

IEID 扰动补偿策略，可以提高现有控制器的抗干扰能力，SDMC 对模型精度要求不高，可以实时进行控制律优化求解，考虑将该策略与 SDMC 控制器结合，在不可测干扰进入预测控制回路前抵消，可以使得实际预测模型更接近于标称预测模型，提高控制系统的鲁棒性和抗干扰能力。

综上所述，提出一种 IEID-SDMC 复合控制策略，其控制结构如图 9 所示。IEID 策略中原本采用状态反馈控制器，使用 SDMC 替代。通过对外部扰动进行补偿，使得实际对象与理论模型动态特性尽可能接近，SDMC 实现基本的反馈控制，得到复合控制律。

3 仿真实验

以在第 1 节中介绍的 37% 负荷广义被控对象为例进行阶跃响应仿真实验，采样周期 1 s，SDMC 参数取值： $N=1000, P=600, M=5, \alpha=0.9, q=1, \lambda=1,$

$h=1, \beta=0.9$; IEID 参数取值： $\Theta=210, L=[0.530 \ 0 \ 0.117 \ 0 \ 0.013 \ 0 \ 0.000 \ 9 \ 0.000 \ 2]^T$ 。

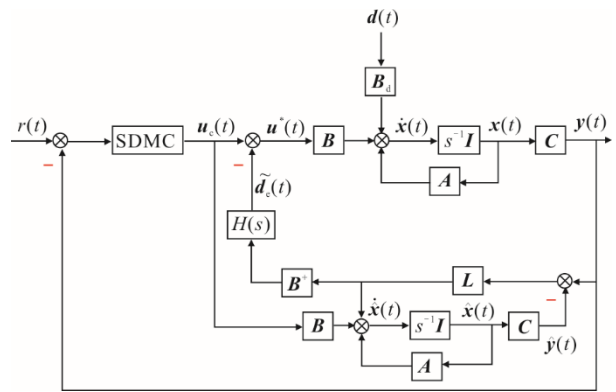


图 9 IEID-SDMC 复合控制结构

Fig.9 Block diagram of the composite control combining IEID and SDMC

基于式(1)的等效后过热汽温模型，采用 IEID-SDMC 策略，并与 DOB-SDMC 和 SDMC 2 种策略进行抗扰动性能比较，其中 DOB 滤波器结构为：

$$Q(s) = \frac{1}{(10s+1)^5} \quad (23)$$

同样，保持 37% 标称工况下的 IEID 和 SDMC 参数设置。待受控系统调节平稳后加入减温水阀阶跃扰动信号，结果如图 10 所示，由图 10 可见，加入扰动补偿后的 IEID-SDMC 策略与 DOB-SDMC 都可以快速消除干扰，较之 SDMC 抗干扰性能好。

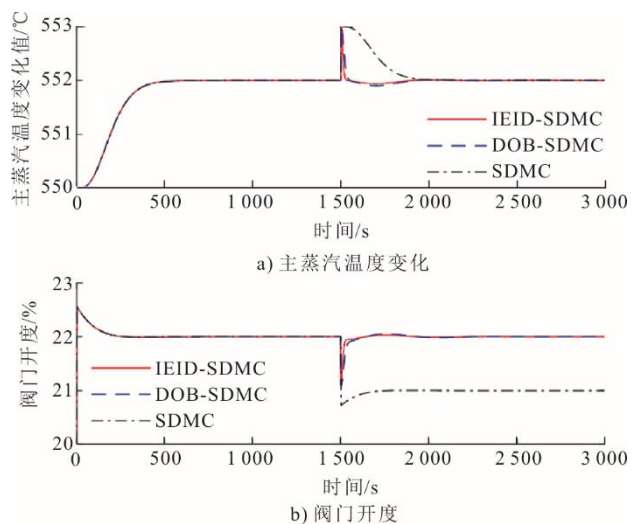


图 10 3 种控制策略下抗阶跃扰动效果对比

Fig.10 Comparison of step disturbance rejection under three control strategies

在 1500 s 时加入 1 个幅度为 0.2 的减温水阀正弦形式周期性扰动，仿真结果如图 11 所示，由图 11 可见，加入周期性扰动后原来的 SDMC 已经无法抑

制扰动, 2种扰动补偿策略依然取得了很好的控制效果, 而基于 IEID 的扰动估计预测控制策略对扰动抑制要更好一些。

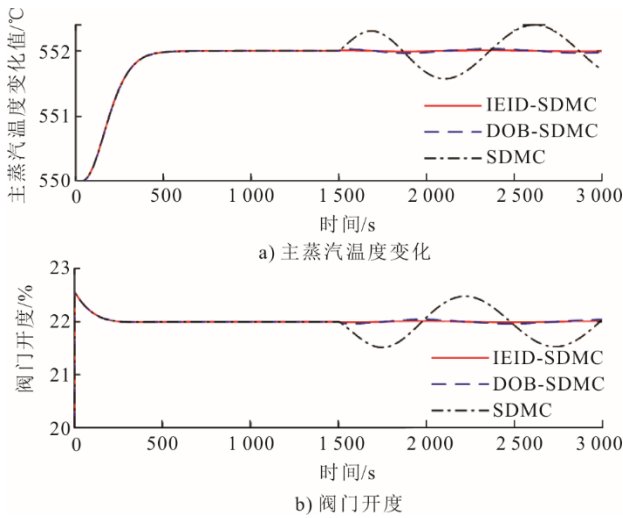


图 11 3种控制策略下抗周期扰动效果对比

Fig.11 Comparison of periodic disturbance rejection under three control strategies

在同样的位置加入均值为 0、方差为 0.2 的减温水阀非周期形式随机扰动, 仿真结果如图 12 所示, 由图 12 可以看出, IEID 相较于 DOB, 对随机扰动的抑制效果明显更优。

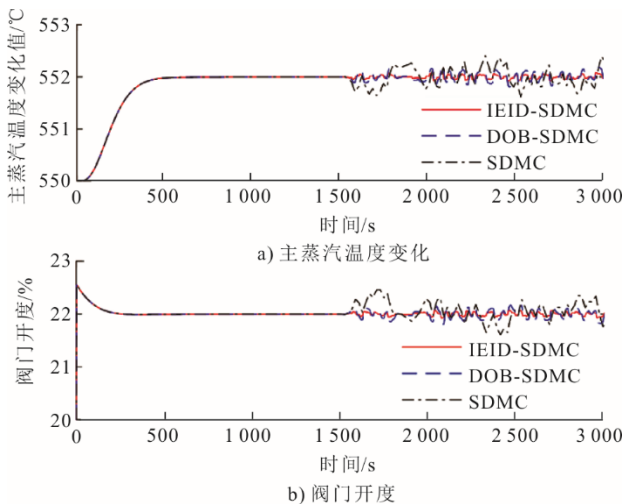


图 12 3种控制策略下抗非周期扰动效果对比

Fig.12 Comparison of aperiodic disturbance rejection under three control strategies

4 结 语

针对原始扰动抑制策略中等价输入干扰观测器和受控对象状态观测器的参数设计存在耦合, 在某些条件下会引起系统不稳定的问题, 通过引入一个稳定零点的改进策略, 保证了扰动抑制环节的整体稳定性, 从而实现等价输入干扰观测器观测器和

受控对象状态观测器的参数独立整定。此外, 针对可测不可控的干扰信号, 以前馈的形式引入阶梯式动态矩阵控制算法 (SDMC) 中, 通过 IEID-SDMC 相结合的方式有效提升了主蒸汽温度控制系统对可测和不可测干扰的抑制能力, 同时针对主蒸汽温度的大惯性特点, SDMC 可以有效地降低运算复杂度, 提高设定值跟踪性能, 仿真表明所提改进型抗扰控制算法具有良好的工业应用前景。

[参 考 文 献]

- [1] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键点综述及相关建议[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172-3186.
SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, et al. Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3172-3186.
- [2] SUN Z, LIU C, LI M, et al. Application of anti integral saturation cascade PID control algorithm in superheated steam temperature control[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2087(1): 012038.
- [3] LIU Y J, WU Y L. Adaptive fuzzy PID control applied in boiler system of power plant[C]//Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology IV: Selected, Peer Reviewed Papers from the 2014 4th International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology (ICFMM 2014), June 19-20, 2014, Guilin, China. 2014: 787-790.
- [4] 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 steam temperature system of double reheat unit[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 39(18): 5415-5423.
- [5] HUANG H P, YU J A, SU Q, et al. 660 MW Single auxiliary ultra-supercritical unit main stream's temperature control strategy optimization studies[C]//Proceedings of 2014 2nd International Conference on Manufacturing (Manufacturing 2014), 2014: 325-330.
- [6] 杨科科, 任宁宁. 基于 RBF 网络模糊推理的火电厂主汽温 PID 串级控制系统[J]. 精密制造与自动化, 2021(4): 22-26.
YANG Keke, REN Ningning. PID cascade control system of main steam temperature in fossil-fuel power station based on RBF network fuzzy inference[J]. Precision Manufacturing & Automation, 2021(4): 22-26.
- [7] LI J, LI W W, QI P, et al. Applied research on main steam temperature control based on internal model control[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1769: 507-507.
- [8] 王杰, 周永年, 刘金锋. 基于 QFT 的火电厂主汽温控制系统的设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(17): 4537-4539.
WANG Jie, ZHOU Yongnian, LIU Jinfeng. Design and simulation of fresh steam temperature control system in power plant based on QFT[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(17): 4537-4539.
- [9] 王耀和, 王胜, 张林, 等. 基于反演滑模的火力发电机组主汽温自适应控制策略[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 60-67.

- WANG Yaohe, WANG Sheng, ZHANG Lin, et al. Self-adaptive control strategy for main steam temperature of thermal power unit based on back stepping sliding mode[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 60-67.
- [10] MARDLIJAH, NAJAR A M, ARIF D K. Comparison between PID Controller and fuzzy sliding mode control(FSMC) on super heater system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1218: 012055.
- [11] 刘建江, 李政, 倪维斗, 等. 基于 H_∞ 理论的状态变量控制在主蒸汽温度控制中的应用[J]. 动力工程, 2000, 20(3): 669-673.
LIU Jianjiang, LI Zheng, NI Weidou, et al. The application of state variable control based on H_∞ Theory in superheat steam temperature control[J]. Power Engineering, 2000, 20(3): 669-673.
- [12] RICHALET J, RAULT A, TESTUD J L, et al. Model predictive heuristic control: applications to an industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5): 413-428.
- [13] CUTLER C R, RAMAKER B L. Dynamic matrix control: a computer control algorithm[C]// Proceedings of the 1980 Joint Automatic Control Conference, San Francisco, Aug. 13-15, 1980: WP5-B.
- [14] KEYSER R D, CAUWENBERGHE A V. Extended prediction self-adaptive control[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1985, 18(5): 1255-1260.
- [15] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control: part I. The basic algorithm[J]. Automatica, 1987, 23(2): 137-148.
- [16] 章家岩, 高锦, 冯旭刚. 火力发电锅炉主汽温控制系统的动态矩阵控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 96-102.
ZHANG Jiayan, GAO Jin, FENG Xugang. Main steam temperature control of thermal power boiler based on dynamic matrix control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 96-102.
- [17] 苏焯, 凌路加, 段亚灿, 等. 基于神经网络预测控制的主汽温优化控制[J]. 计算机仿真, 2021, 38(9): 114-118.
SU Ye, LING Lujia, DUAN Yacan, et al. Optimization control of main steam temperature based on neural network predictive control[J]. Computer Simulation, 2021, 38(9): 114-118.
- [18] 钱虹, 冯裕卿. 针对过热汽温控制的自适应预测控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(5): 1002-1009.
QIAN Hong, FENG Yuqing. Design of adaptive predictive controller for superheated steam temperature control[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(5): 1002-1009.
- [19] 冯旭刚, 张泽辰, 刘圣晶, 等. 基于 IGPC 的火力发电机组主汽温预测控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3307-3316.
FENG Xugang, ZHANG Zechen, LIU Shengjing, et al. Predictive control strategy for main steam temperature of thermal power unit based on IGPC[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3307-3316.
- [20] 廖常超, 周兰, 潘昌忠, 等. 基于等价输入干扰补偿的改进型重复控制系统参数优化设计[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(4): 653-662.
LIAO Changchao, ZHOU Lan, PAN Changzhong, et al. Parameter optimization design of modified repetitive control system based on equivalent input disturbance compensation[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(4): 653-662.
- [21] 陈露瑶, 方明星, 孙晴. 基于等价输入干扰改进的无刷直流电机控制器[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 82-84.
CHEN Luyao, FANG Mingxing, SUN Qing. Improved BLDCM controller based on equivalent input interference[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(2): 82-84.
- [22] 杨帆, 张峰毓, 李东东. 直流微电网基于等价输入干扰的自适应无源控制[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 236-242.
YANG Fan, ZHANG Fengyu, LI Dongdong. Adaptive passivity-based control for DC micro-grid based on equivalent input disturbance[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(1): 236-242.
- [23] SHE J H, FANG M, OHYAMA Y, et al. Improving disturbance-rejection performance based on an equivalent-input-disturbance approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 380-389.
- [24] 王军晓, 陈林杰, 俞立. 基于等价输入干扰滑模观测器的磁悬浮球系统模型预测控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(1): 137-146.
WANG Junxiao, CHEN Linjie, YU Li. Model predictive control of magnetic levitation ball system based on equivalent input disturbance sliding mode observer[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(1): 137-146.
- [25] 任彦, 赵冠华, 谭文博, 等. 基于EID估计的复合控制在转台中的应用[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(10): 3724-3731.
REN Yan, ZHAO Guanhua, TAN Wenbo, et al. Application of compound control for flight simulator with EID estimator[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(10): 3724-3731.
- [26] 吕正鑫. 模糊控制算法研究及在火电厂主汽温控制的应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2019: 1.
LYU Zhengxin. Research on fuzzy control algorithm and its application in main steam temperature control of thermal power plant[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [27] 范永胜, 徐治皋, 陈来九. 基于动态特性机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 1997(1): 23-28.
FAN Yongsheng, XU Zhigao, CHEN Laijiu. Study of adaptive fuzzy control of boiler superheated steam temperature based on dynamic mechanism analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 1997(1): 23-28.
- [28] 罗国娟, 吴刚, 薛美盛, 等. 基于阶梯式动态矩阵控制的电烤箱温度控制系统[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(增刊 1): 150-153.
LUO Guojuan, WU Gang, XUE Meisheng, et al. Oven temperature control system based on stair-like dynamic matrix control[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(Suppl.1): 150-153.
- [29] 李政潭. 基于等价输入干扰的永磁牵引驱动系统传感器故障容错控制[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021: 1.
LI Zhengtan. Sensor fault-tolerant control of permanent magnet traction drive system based on equivalent-input-disturbance[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2021: 1.
- [30] KIMURA H. A new approach to the perfect regulation and the bounded peaking in linear multivariable control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(1): 253-270.

(责任编辑 杜亚勤)