

文章编号:1008-1542(2020)05-0399-09

基于改进的隐式广义预测控制在燃气发电锅炉主汽压中的应用

王 胜, 陈雨薇, 徐 帅, 章家岩, 冯旭刚

(安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽马鞍山 243032)

摘 要:针对燃气发电锅炉主汽压控制系统存在非线性、模型参数不确定等问题,提出了一种改进的隐式广义预测控制策略。首先,使用遗忘因子递推最小二乘法进行模型参数辨识,建立主汽压的离散数学模型;其次,在常规广义预测控制理论上建立主汽压的隐式广义预测控制系统,简化控制算法,通过在目标函数中增加 PI 结构,提高系统的鲁棒性。仿真结果表明,相比串级 PID 和常规隐式广义预测控制,所提控制策略在模型适配时调节时间最多减少 20 s,模型失配时超调量最多减少 5.08%,调节时间最多降低 36 s,系统鲁棒性和抗干扰能力增强;工程应用表明,使用所提策略后主汽压控制偏差在 ± 0.2 MPa 之间,控制精度显著提高。改进的隐式广义预测控制较好地满足了工业生产中主汽压的控制要求,具有较高的研究和应用价值。

关键词:系统辨识;燃气发电锅炉;主汽压;遗忘因子递推最小二乘法;隐式广义预测控制

中图分类号:TM621.2 文献标识码:A doi:10.7535/hbkd.2020yx05003

Application of improved implicit generalized predictive control in main steam pressure of gas-fired power generation boiler

WANG Sheng, CHEN Yuwei, XU Shuai, ZHANG Jiayan, FENG Xugang

(College of Electrical Engineering and Information, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243032, China)

Abstract: Aiming at the problems of non-linearity and variable model parameters of the main steam pressure control system of gas-fired power generation boiler, an improved implicit generalized predictive control strategy was proposed. First, the forgetting factor recursive least square method was used to identify the model parameters, and a discrete mathematical model of the main steam pressure was established. Second, an implicit generalized predictive control system for main steam pressure was established on the basis of conventional generalized predictive control theory, which simplified the control algorithm and

收稿日期:2020-06-01;修回日期:2020-09-07;责任编辑:冯 民

基金项目:安徽省自然科学基金(1908085ME134);安徽省重点研究与开发计划项目(1804a09020094);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0054);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0060)

第一作者简介:王 胜(1995—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事工业炉窑燃烧优化控制方面的研究。

通讯作者:冯旭刚教授。E-mail:312983779@qq.com

王胜,陈雨薇,徐帅,等.基于改进的隐式广义预测控制在燃气发电锅炉主汽压中的应用[J].河北科技大学学报,2020,41(5):399-407.

WANG Sheng, CHEN Yuwei, XU Shuai, et al. Application of improved implicit generalized predictive control in main steam pressure of gas-fired power generation boiler[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(5): 399-407.

improved the robustness of the system by adding a PI structure to the objective function. The simulation results show that, compared with the cascade PID and conventional implicit generalized predictive control, the proposed control strategy reduces the adjustment time by 20 s at most when the model is adapted; the overshoot decreases by up to 5.08% and the adjustment time decreases by up to 36 s when the model is mismatched, and the system robustness and anti-interference ability are improved. The engineering application shows that the main steam pressure control deviation is within ± 0.2 MPa, and the control accuracy is significantly improved in the proposed strategy. The improved implicit generalized predictive control has high research and application value in the main steam pressure control in industrial production.

Keywords: system identification; gas-fired power generation boiler; main steam pressure; forgetting factor recursive least squares method; implicit generalized predictive control

中国钢铁企业冶金自备电厂燃气锅炉使用企业副产煤气作为燃料,由于煤气的热值和压力受高炉、焦炉、转炉的生产状况影响,导致炉膛内燃烧状态不稳定,主汽压波动范围较大,不利于锅炉的安全稳定和经济运行^[1-2]。针对冶金自备电厂燃气发电锅炉的主汽压控制问题进行研究,最大限度地提高燃烧效率,对企业安全生产、节能降耗具有重要意义^[3-4]。

现阶段冶金自备电厂对于锅炉主汽压的控制主要采用常规 PID 方法, PID 控制具有结构简单、易于工程实施等优点^[5-6]。但随着时间的推移,锅炉设备条件和工况不断变化,原本整定的 PID 参数无法适应被控对象的变化,导致运行状况偏离生产要求^[7]。目前研究人员对于将智能控制理论引入到主汽压控制进行了大量的理论与实践研究。崔志强等^[8]针对主汽压系统精确模型不易确定的问题,将微分器与 RBF 神经网络算法结合,设计主汽压神经网络控制器,在控制过程中不需要对象的模型信息,取得了一定的控制效果。程加堂等^[9]将寻优者算法应用到 PID 参数优化中,通过计算寻优者个体适应度和最优位置,对主汽压系统 PID 参数进行寻优,并与粒子群算法和遗传算法优化的 PID 参数进行现场应用对比,结果表明寻优者优化算法提高了主汽压的响应速度。李兴如等^[10]利用炉膛辐射能信号反映燃料量变化的快速性,作为主汽压串级 PID 控制器的中间被调量,利用萤火虫算法对 PID 参数寻优,系统稳定性得到了一定的提高。

上述研究表明,主汽压系统存在大时滞和模型不确定的特点,目前主要采用智能控制算法整定 PID 参数^[11]或建立主汽压控制系统数学模型,但大部分只停留在理论研究阶段,工程上应用不多,主要是因为实际工业现场环境复杂、工况多变,上述方法常会因为参数的不确定性而达不到满意的控制效果。本文利用隐式广义预测控制(IGPC)不需要反复求解 Diophantine 方程、能减少计算时间的优点,将 PI 型的反馈结构引入到 IGPC 的目标函数中以提高系统的鲁棒性,并通过仿真和工程应用进行验证。

1 主汽压控制模型构建

1.1 主汽压控制原理分析

主汽压控制系统主要分为单回路控制系统或串级回路控制系统^[12]。单回路控制系统具有设计简洁、控制参数整定方便的优点,可以克服燃料量或燃料热值变化造成的内扰和负荷变化造成的外扰,但系统响应速度较慢,其结构如图 1 所示。

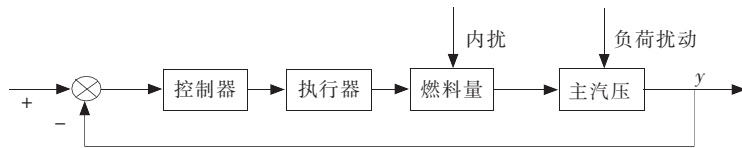


图 1 主汽压单回路控制系统结构图

Fig.1 Structure diagram of main steam pressure single loop control system

当系统受到内扰或者负荷扰动时,主汽压偏离设定值,控制器通过执行器调节煤气量,改变燃烧状态,使主汽压恢复稳定。为提高锅炉主汽压控制系统的响应速度和稳定性,在实际中通常采用串级回路控制方案,如图 2 所示。

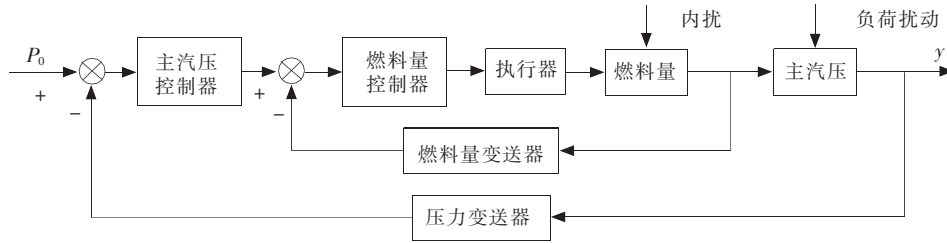


图 2 主汽压串级回路控制系统结构图

Fig.2 Structure diagram of main steam pressure cascade loop control system

主汽压串级控制的副回路采用燃料量控制器,用于克服由煤气量或煤气热值变化造成的内部扰动,主回路采用主汽压控制器,用于克服由发电机组负荷变化造成的外部扰动^[13-14]。当系统受到内扰时,炉膛内燃料燃烧释放的热量发生变化,副回路将检测装置得到的热量信号传递给燃料量控制器,控制煤气阀门开度,调节进入锅炉的燃料量,改变炉膛燃烧状况,从而实现主汽压稳定。当系统受到外扰时,主汽压产生变化,检测装置将主汽压信号传递给主汽压控制器,主汽压控制器通过副回路调节锅炉的燃料供应量使主汽压恢复稳定。

1.2 主汽压模型辨识

遗忘因子递推最小二乘辨识法 (FFRLS) 采用带控制量的自回归积分滑动平均模型 (CARIMA 模型)^[15-16],选取煤气量为输入 $u(k)$,主汽压为输出 $y(k)$ 。对于单输入、单输出 (SISO) 的离散系统,选取主汽压 CARIMA 模型为

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_0 u(k-1) + b_1 u(k-2) + \xi(k),$$

式中 $\xi(k)$ 为系统的白噪声。

FFRLS 的性能指标函数为

$$J = \sum_{k=1}^L \lambda^{L-k} [y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}]^2, \tag{1}$$

式中: λ 为遗忘因子 ($0 \leq \lambda \leq 1$); $\boldsymbol{\varphi}(k)$ 为由 $u(k)$ 和 $y(k)$ 组成的系统输入输出向量; $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 为主汽压模型辨识参数的估计值; L 为辨识数据组数。

针对式(1)的目标函数,为使其取得极小值,经推导可得 FFRLS 的辨识公式如下:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)], \\ \mathbf{K}(k) &= [\mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)] / [\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)], \\ \mathbf{P}(k) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k)] \mathbf{P}(k-1) / \lambda, \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{P}(0) = \alpha \mathbf{I}$, \mathbf{I} 为单位矩阵, α 为充分大的正实数; $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0) = \boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为零向量。

采集现场实际运行的 3 600 组高炉煤气量、转炉煤气量、焦炉煤气量和主汽压数据,根据 3 种煤气热值比例,按照 1 : 2 : 4 统一换算为高炉煤气量,记作总燃料量。对前 3 000 组数据进行剔除异值等预处理后,作为输入数据和输出数据建立主汽压系统数学模型,剩下的 600 组数据用于模型精确性验证。采用 FFRLS 进行参数辨识,设置初值 $\mathbf{P}(0) = 10^6 \mathbf{I}$,遗忘因子 $\lambda = 0.99$, $\alpha = 0.5$, $\xi(k)$ 取均值为 0 的白噪声,主汽压控制系统参数辨识的结果如图 3 所示,后 600 组数据的主汽压实际值与辨识输出值如图 4 所示。

由图 3 可知,系统在 $k = 500$ 左右时,各参数估计值基本达到稳定,辨识的结果为 $a_1 = -1.892$, $a_2 = 0.903$, $b_0 = -0.51$, $b_1 = 0$ 。可得到系统离散数学模型为

$$y(k) = 1.892y(k-1) - 0.903y(k-2) - 0.51u(k-1) + \xi(k).$$

由图 4 可知,主汽压实际值与辨识输出值之间的最大偏差小于 0.2 MPa,所建系统模型与实际系统十分接近,且广义预测控制对模型的类型和精度要求不高,因此辨识模型可以满足精确要求。

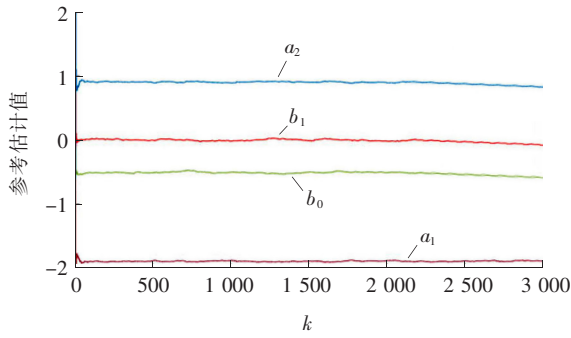


图3 参数辨识估计值

Fig.3 Parameter identification estimate

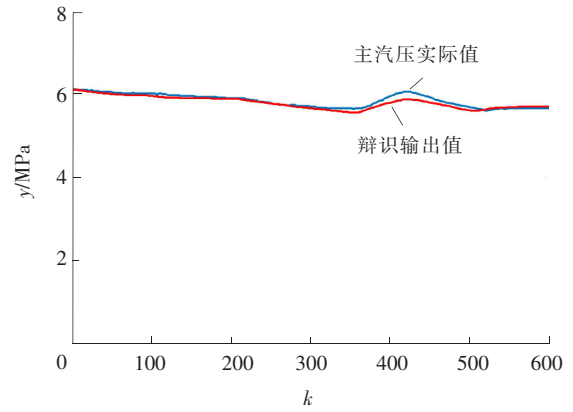


图4 主汽压实际值与辨识输出值

Fig.4 Main steam pressure actual value and identification output value

2 PI型IGPC控制策略设计

2.1 GPC控制原理

1) 预测模型

主汽压 GPC 控制系统的预测模型采用以下 CARIMA 模型:

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta,$$

式中: $y(k)$, $u(k)$ 分别为系统输出(主汽压)、输入(煤气量); d 为主汽压系统的时延; $\Delta = 1 - z^{-1}$, 为差分算子, 且

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a},$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_{n_b}z^{-n_b},$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}.$$

2) 滚动优化

GPC 控制目标是使主汽压系统预测输出与参考轨迹的差值最小, 选取系统的目标函数为

$$J = \sum_{j=1}^n [\hat{y}(k+j) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2, \quad (2)$$

式中: n 和 m 分别为预测长度和控制长度; \hat{y} 为主汽压预测值; λ 为控制加权常数; w 为参考轨迹。

3) 输出预测

为了得到未来 $(k+j)$ 时刻的预测输出值, 引入 Diophantine 方程, 具体可参考文献[17—19], 第 j 步的主汽压输出预测值为

$$\hat{y}(k+j) = G_j(z^{-1})\Delta u(k+j-d-1) + F_j(z^{-1})y(k) + E_j(z^{-1})C(z^{-1})\xi(k+j),$$

其中:

$$G_j(z^{-1}) = E_j(z^{-1})B_j(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + \dots + g_jz^{-j},$$

$$E_j(z^{-1}) = 1 + e_{j,1}z^{-1} + \dots + e_{j,j-1}z^{-(j-1)},$$

$$F_j(z^{-1}) = f_{j,0} + f_{j,1}z^{-1} + \dots + f_{j,n_a}z^{-n_a}.$$

GPC 输出主汽压的未来预测值包括 k 时刻的已知量和未知量两部分, 已知量用 $f(k+j)$ 表示, 写成矩阵形式:

$$f = H\Delta u(k) + Fy(k),$$

式中:

$$H = \begin{bmatrix} G_1 - g_1 \\ z(G_1 - z^{-1}g_1 - g_0) \\ \vdots \\ z^{-n+1}(G_n - z^{-n+1}g_{n-1} - \dots - z^{-1}g_1 - g_0) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}=[F_1, F_2, \dots, F_n]^T。$$

则最优输出预测值矩阵形式为

$$\hat{\mathbf{Y}}=\mathbf{G}\Delta\mathbf{U}+\mathbf{f}, \tag{3}$$

式中:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{Y}} &= [\hat{y}(k+1), \hat{y}(k+2), \dots, \hat{y}(k+n)]^T, \\ \Delta\mathbf{U} &= [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+n)]^T, \\ \mathbf{f} &= [r(k), r(k+1), \dots, r(k+n)]^T, \\ \mathbf{G} &= \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \dots & 0 \\ g_1 & g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{n-1} & g_{n-2} & \dots & g_0 \end{bmatrix}。 \end{aligned}$$

4)最优控制率

根据式(2),GPC 目标函数的矩阵形式可写为

$$\mathbf{J}=(\mathbf{Y}-\mathbf{W})^T(\mathbf{Y}-\mathbf{W})+\lambda\Delta\mathbf{U}^T\Delta\mathbf{U}。 \tag{4}$$

对式(4),用 $\hat{\mathbf{Y}}$ 代替 \mathbf{Y} ,并对 $\Delta\mathbf{U}$ 进行求导,可得 GPC 最优控制率:

$$\Delta\mathbf{U}=(\mathbf{G}^T\mathbf{G}+\lambda\mathbf{I})^{-1}\mathbf{G}^T(\mathbf{W}-\mathbf{f})。$$

下一刻控制量输入为

$$u(k)=u(k-1)+\mathbf{g}^T(\mathbf{W}-\mathbf{f}), \tag{5}$$

其中 $\mathbf{g}^T=[1\ 0\ \dots\ 0](\mathbf{G}^T\mathbf{G}+\lambda\mathbf{I})^{-1}\mathbf{G}^T$,即 $(\mathbf{G}^T\mathbf{G}+\lambda\mathbf{I})^{-1}\mathbf{G}^T$ 的第 1 行。

根据 GPC 滚动优化原理,要求出每一时刻的局部最优目标,并反复在线进行优化,计算出局部最优解。滚动优化环节由于反复在线计算,当主汽压控制系统模型参数存在时变和失配时,能起到减小误差的作用。

2.2 IGPC 控制器设计

IGPC 是在 GPC 的基础上改进而来,利用系统的输入和输出数据,通过直接在线辨识得到最优控制率中的参数,避免使用 Diophantine 方程反复求解矩阵 \mathbf{G} 和 \mathbf{f} ,减少复杂的计算过程,提高响应速度。

1)矩阵 \mathbf{G} 的求解

根据式(3)可得 n 个并列预测器为

$$\begin{cases} \hat{y}(k+1)=g_0\Delta u(k)+f(k+1)+E_1\xi(k+1), \\ \hat{y}(k+2)=g_1\Delta u(k)+g_0\Delta u(k+1)+f(k+2)+E_2\xi(k+2), \\ \vdots \\ \hat{y}(k+n)=g_{n-1}\Delta u(k)+\dots+g_0\Delta u(k+n-1)+f(k+n)+E_n\xi(k+n)。 \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可知, $\hat{y}(k+n)$ 包含了最优控制率 $\Delta\mathbf{U}$ 内矩阵 \mathbf{G} 的所有元素,IGPC 通过简化计算过程只计算 $\hat{y}(k+n)$ 得到 \mathbf{G} 。令:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k) &= [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \dots, \Delta u(k+n-1), 1], \\ \boldsymbol{\theta}(k) &= [g_{n-1}, g_{n-2}, \dots, g_0, f(k+n)]^T, \end{aligned}$$

则 $\hat{y}(k+n)$ 可简写为

$$\hat{y}(k+n)=\mathbf{X}(k)\boldsymbol{\theta}(k)+E_n\xi(k+n)。$$

采用 FFRLS 估计参数向量 $\boldsymbol{\theta}(k)$,得到:

$$\begin{cases} F=y(k)-\mathbf{X}(k-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1), \\ M=\lambda_1+\mathbf{X}(k-n)\mathbf{P}(k-1)\mathbf{X}^T(k-n), \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(k)=\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)+\mathbf{K}(k)F, \\ \mathbf{K}(k)=\mathbf{P}(k-1)\mathbf{X}^T(k-n)M^{-1}, \\ \mathbf{P}(k)=\frac{1}{\lambda_1}[\mathbf{I}-\mathbf{K}(k)\mathbf{X}(k-n)]\mathbf{P}(k-1), \end{cases} \tag{7}$$

式中: λ_1 为遗忘因子, $0<\lambda_1<1$; $\mathbf{K}(k)$ 为权因子; $\mathbf{P}(k)$ 为正定的协方差阵。

由上述公式可得到 $\theta(k)$, 即矩阵 \mathbf{G} 中的元素 g_0, g_1, \dots, g_{n-1} 和 $f(k+n)$ 。

2) 求解预测向量 f

在 k 时刻的 n 步估计值为

$$\hat{y}(k+n|n) = \mathbf{X}(k)\hat{\theta}(k)。$$

在 $k+1$ 时刻的 f 为

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f(k+1) \\ f(k+2) \\ \vdots \\ f(k+n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{y}(k+2|n) \\ \hat{y}(k+3|n) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+n+1|n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} e(k+1), \quad (8)$$

式中 $e(k+1) = y(k+1) - \hat{y}(k+1|k)$ 。

使用式(7)、式(8)分别求解矩阵 \mathbf{G} 和 \mathbf{f} , 然后计算得到最优控制率 ΔU , 再通过式(5)求出下一时刻的控制量。

2.3 PI型IGPC控制器设计

文献[20]在球磨机制粉系统的IGPC控制中也加入了比例调节器, 通过在系统的输出函数中增加比例调节器使设定值与实际值的偏差实时改变, 提高系统的跟随性能, 而本文在目标函数内增加比例结构, 使其在系统模型参数变化时起到调剂作用, 进一步增强系统鲁棒性。在目标函数中增加比例结构为

$$J = \sum_{j=1}^n [k_p (\Delta e(k+j))^2 + k_i e(k+j)^2] + \sum_{j=1}^m \lambda(j) [\Delta u(k+j-1)]^2,$$

式中: k_p 为比例因子; k_i 为积分因子。误差序列满足:

$$e(k+j) = w(k+j) - \hat{y}(k+j)。$$

PI型IGPC在 $k+j$ 时刻的输出主汽压预测值为

$$\hat{y}(k+j) = G_j \Delta u(k+j-1) + F_j y(k) + H_j \Delta u(k-1)。$$

令 $f(k+j) = F_j y(k) + H_j \Delta u(k-1)$, 则上式可表示为

$$\hat{y}(k+j) = G_j \Delta u(k+j-1) + f(k+j)。$$

使用预测值代替实际值, 偏差和偏差增量为

$$e(k+j) = w(k+j) - f(k+j) - G_j \Delta u(k+j-1),$$

$$\Delta e(k+j) = [\Delta w(k+j) - \Delta f(k+j)] - [G_j \Delta u(k+j-1) - G_{j-1} \Delta u(k+j-2)]。$$

将偏差和偏差增量代入目标函数中, 并且 $\partial J / \partial \Delta u = 0$ 得:

$$\Delta U = (\lambda \mathbf{I} + k_p \mathbf{G}_p^T \mathbf{G}_p + k_i \mathbf{G}_i^T \mathbf{G}_i)^{-1} [k_p \mathbf{G}_p^T (\Delta w(k) - \Delta f(k)) + k_i \mathbf{G}_i^T (w(k) - f(k))], \quad (9)$$

式中:

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} g_{i0} & 0 & \cdots & 0 \\ g_{i1} & g_{i0} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{i,n-1} & g_{i,n-2} & \cdots & g_{i0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G}_p = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_1 - g_0 & g_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{n-1} & g_{n-2} & \cdots & g_0 \end{bmatrix},$$

令

$$\begin{cases} \mathbf{R}_p = (\lambda \mathbf{I} + k_p \mathbf{G}_p^T \mathbf{G}_p + k_i \mathbf{G}_i^T \mathbf{G}_i)^{-1} k_p \mathbf{G}_p^T, \\ \mathbf{R}_i = (\lambda \mathbf{I} + k_p \mathbf{G}_p^T \mathbf{G}_p + k_i \mathbf{G}_i^T \mathbf{G}_i)^{-1} k_i \mathbf{G}_i^T, \end{cases}$$

则式(9)可以转化为

$$\Delta U(k) = \mathbf{R}_p \Delta E(k) + \mathbf{R}_i E(k)。 \quad (10)$$

将式(10)代入到输入表达式中, 可得输入量 $U(k)$ 为

$$U(k) = U(k+1) + \mathbf{R}_p \Delta E(k) + \mathbf{R}_i E(k)。$$

进一步简化目标函数,令

$$S = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & & \\ -1 & \ddots & & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & \cdots & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

令 $G_p = SG_i, \Delta w = Sw, \Delta f = Sf$, 代入式(9), 则得到:

$$\Delta U = (\lambda I + k_p G_i^T S^T S G_i + \lambda I + k_i G_i^T G_i)^{-1} \times [k_p G_i^T S^T (Sw(k) - Sf(k)) + k_i G_i^T (w(k) - f(k))],$$

令 $\xi = k_i I + k_p S^T S$, 可得控制量增量 ΔU 为

$$\Delta U = (\lambda I + G_i^T \xi G_i)^{-1} G_i^T \xi (w - f). \tag{11}$$

由式(11)可知, 在 IGPC 的目标函数内增加 PI 结构, 可以在不增加计算量的前提下提高主汽压控制系统的鲁棒性。

3 仿真分析

为验证 PI 型 IGPC 控制策略的有效性, 根据所建立的燃气发电锅炉主汽压的 CARIMA 模型进行仿真研究, 模型表达式为

$$y(k) - 1.892y(k-1) + 0.903y(k-2) = -0.51u(k-1) + \xi(k). \tag{12}$$

根据文献[21]的参数整定方法, 经过多次仿真实验验证, 预测控制参数取 $n=8, m=5, \lambda=0.85$; 比例因子和积分因子根据经验试凑法分别取 0.5 和 0.4, 控制量增量的约束为 $-0.2 \leq \Delta U \leq 0.2$, 控制输入的约束为 $0 \leq u(k) \leq 1$, 主汽压设定值 $y_r = 5.9$ MPa。

在主汽压模型参数适配时, 采用式(12)作为主汽压模型, 对 PI 型 IGPC 与串级 PID、常规 IGPC 控制进行仿真对比, 在 $t=400$ s 和 $t=600$ s 时向系统加入幅值为 1.2 的脉冲干扰信号以测试系统的抗干扰性能, 仿真波形如图 5 所示。

由图 5 可知, 当主汽压控制系统模型适配时, PI 型 IGPC、串级 PID 和常规 IGPC 的输出波形均无超调, 3 种控制策略下的调节时间分别为 290, 300 和 310 s。当施加扰动后, 常规 IGPC 控制输出波形出现一定超调, 且超调时间较长; 串级 PID 超调较小, 能快速恢复; PI 型 IGPC 施加扰动后基本无超调, 一直保持在稳定状态。对比可知, PI 型 IGPC 抗干扰性能更好, 响应速度更快。

式(13)为系统参数失配情况下的主汽压控制模型, 对该模型进行仿真对比。

$$y(k) - 1.79y(k-1) + 0.83y(k-2) = -0.75u(k-1) + \xi(k). \tag{13}$$

同样在 $t=400$ s 和 $t=600$ s 时向系统加入幅值为 1.2 的脉冲干扰信号以测试模型失配时系统的抗干扰能力, 仿真波形如图 6 所示。

由图 6 可知, 当主汽压控制系统模型参数失配时, 常规 IGPC 控制输出波形出现超调, 超调量为 5.08%, 调节时间为 330 s, 施加扰动后超调量较大, 恢复时间较长; 串级 PID 基本无超调, 但达到设定值的时间变长, 为 310 s, 施加扰动后, 超调量大, 为 5.78%, 恢复时间较常规 IGPC 控制明显缩短; PI 型 IGPC 输出波形达到设定值的调节时间为 294 s, 基本无超调, 在施加扰动后仅出现少量波

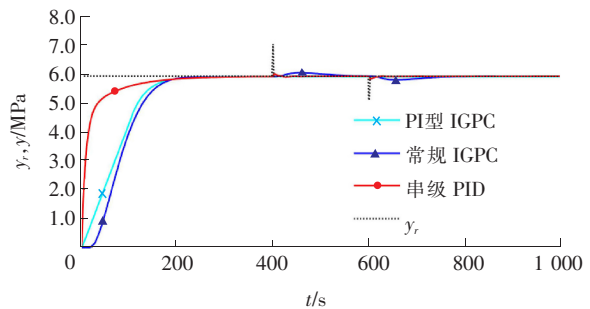


图 5 模型适配时控制效果对比

Fig.5 Comparison of control effects during model adaptation

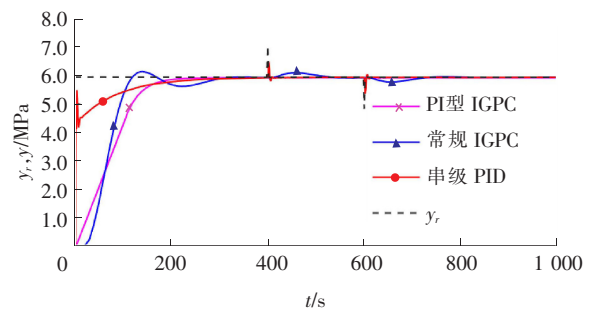


图 6 模型失配时控制效果对比

Fig.6 Comparison of control effects when model mismatch

动,基本保持在平稳状态。对比可知,PI型IGPC在模型失配时鲁棒性更强。

4 工程应用

本文设计的优化控制系统由操作员站和现场控制器两部分组成,指导思想是:保持锅炉原有DCS控制系统、各种检测仪表和控制装置硬件条件不变,在JX-300XP DCS中加入控制权切换的功能程序,系统架构如图7所示。优化控制系统与原DCS控制系统通过工业以太网进行连接,交换机的作用是将DCS中通过检测装置采集到的各参数数据传输给优化控制系统,使其能对锅炉燃烧状况进行监测,并对运行状态进行控制。

将优化系统在冶金自备电厂150t燃气发电锅炉进行运行控制。主汽压设定值为5.9MPa。采集系统投运前和投运后的主汽压实时曲线,采集时间均为8h,主汽压曲线如图8、图9所示。

由图8可知,优化系统投运前,主汽压实时曲线波动剧烈,主汽压值在4.2~6.3MPa,上下波动幅值达到2.1MPa;图9为采用优化控制系统后的主汽压实时曲线,主汽压值在5.7~6.1MPa之间波动,基本稳定在设定值5.9MPa左右,满足控制精度±0.2MPa的要求。与工业现场原先的PID加手动调节方法相比,采用优化控制系统后,主汽压能较好地稳定在设定值附近,波动范围小,系统控制精度显著提高。

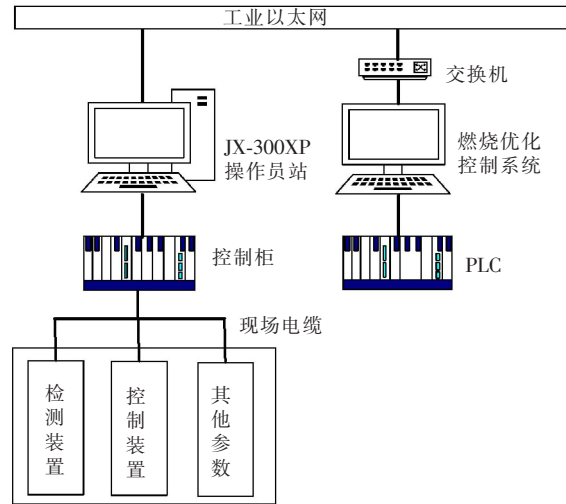


图7 优化控制系统架构
Fig.7 Optimized control system architecture

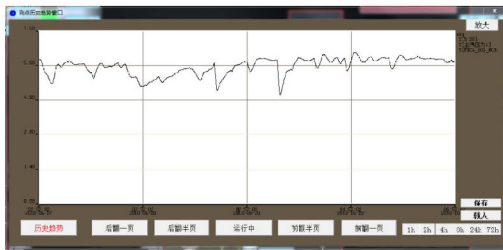


图8 投运前主汽压曲线
Fig.8 Main steam pressure curve before commissioning

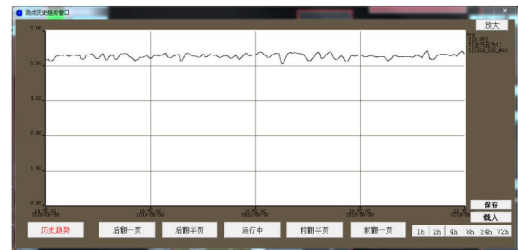


图9 投运后主汽压曲线
Fig.9 Main steam pressure curve after commissioning

5 结 语

针对GPC在滚动优化环节计算量大、影响时效性的问题,引入IGPC,并对算法进行改进,设计PI型IGPC主汽压控制策略。仿真结果表明,在模型适配和模型失配时,该控制策略比串级PID和常规IGPC控制方法调节时间更短,超调量更小,系统抗干扰和鲁棒性更强。工程运行结果表明,相比原有的PID控制系统,优化后的系统对主汽压的控制精度明显提高,较好地满足了工业生产对主汽压的控制要求。

目前该系统只考虑了煤气流量对主汽压控制的影响,对于其他因素(诸如煤气品质、主蒸汽流量、助燃空气流量等)的影响还需做进一步的研究。

参考文献/References:

[1] WEI M L, ZHAO X L, FU L, et al. Performance study and application of new coal-fired boiler flue gas heat recovery system[J]. Applied Energy, 2017, 188: 121-129.

- [2] ZAJAC G, SZYSLAK-BARGLOWICZ J, SLOWIK T, et al. Emission characteristics of biomass combustion in a domestic heating boiler fed with wood and Virginia mallow pellets[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, 26(7):4663-4670.
- [3] 刘彤,张鑫,黄圣伟,等.钢铁工业自备电厂余热资源的回收利用[J].*钢铁研究学报*,2014,26(11):29-33.
LIU Tong, ZHANG Xin, HUANG Shengwei, et al. Recovery of residual heat resources from owned power plant in the iron and steel industry [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014,26(11):29-33.
- [4] 夏新华,高宗和,徐帆,等.基于煤气调度的高耗能企业自备电厂发电优化调度[J].*电力系统自动化*,2016,40(22):160-167.
XIA Xinhua,GAO Zonghe,XU Fan,et al.Gas scheduling based generation dispatching of self-provided power plants for energy-intensive enterprises[J].*Automation of Electric Power Systems*,2016,40(22):160-167.
- [5] SHAH P,AGASHE S. Review of fractional PID controller[J]. *Mechatronics*, 2016, 38:29-41.
- [6] MAHMOODABADI M J, JAHANSHAHI H. Multi-objective optimized fuzzy-PID controllers for fourth order nonlinear systems[J]. *Engineering Science & Technology*, 2016, 19(2):1084-1098.
- [7] 韩海宁. 蚁群算法在平台锅炉 PID 参数优化中的应用[J]. *化工管理*, 2019(9):148-149.
HAN Haining. Application of ant colony algorithm in optimization of PID parameters of platform boiler[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2019(9):148-149.
- [8] 崔志强,刘吉臻,刘金琨.基于微分器的燃料-汽压系统直接神经网络控制[J].*动力工程学报*,2012,32(6):445-449.
CUI Zhiqiang, LIU Jizhen, LIU Jinkun. Direct neural network control for a fuel-steam pressure system based on differentiator[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2012,32(6):445-449.
- [9] 程加堂,艾莉,熊燕.搜寻者优化算法在锅炉主汽压控制系统中的应用[J].*热能动力工程*,2016,31(6):80-84.
CHENG Jiatang, AI Li, XIONG Yan. Application of seeker's optimization algorithm in boiler main steam pressure control system[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2016,31(6):80-84.
- [10] 李兴如,王东风,韩璞.基于 GSO 的锅炉主蒸汽压力串级 PID 优化控制[J].*计算机仿真*,2016,33(8):382-386.
LI Xingru, WANG Dongfeng, HAN Pu. Cascade PID control of main steam pressure based on glowworm swarm optimization [J]. *Computer Simulation*, 2016,33(8):382-386.
- [11] 高锦,章家岩,冯旭刚,等.基于失配补偿 Smith-RBF 神经网络的主蒸汽压力控制技术[J].*重庆大学学报*,2019,42(7):105-113.
GAO Jin, ZHANG Jiayan, FENG Xugang, et al. Main steam pressure control technique based on mismatch compensation Smith predictor and RBF neural network [J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(7): 105-113.
- [12] 袁岑颖,蒋薇,董红萍,等.上汽超超临界机组 DEH 主汽压控制策略分析与优化[J].*电力与能源*,2018,39(3):409-412.
YUAN Cenjie, JIANG Wei, DONG Hongping, et al. Analysis and optimization of main steam pressure control strategy for supercritical unit DEH system in Shanghai steam turbine factory [J]. *Power & Energy*, 2018, 39(3):409-412.
- [13] 何国安,张学延,张卫军.汽轮发电机组轴系振动研究进展及趋势[J].*热力发电*,2016,45(11):1-4.
HE Guoan, ZHANG Xueyan, ZHANG Weijun. Research status and development trends of turbo-generator shaft system vibration[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(11):1-4.
- [14] 郑中原,赵鹏,姜玲,等.基于云平台的发电机组节能减排实时监控[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(7):148-154.
ZHENG Zhongyuan,ZHAO Peng,JIANG Ling,et al.A real-time monitoring and control system for energy saving and emission reduction of generator set based on cloud platform[J].*Power System Protection and Control*,2019,47(7):148-154.
- [15] 鲍海静,张韬,张静.基于遗忘因子递推最小二乘法的伺服系统转动惯量辨识方法[J].*上海电气技术*,2017,10(3):5-9.
BAO Haijing, ZHANG Tao, ZHANG Jing. Servo system rotational inertia identification method based on forgetting factor recursive least square method[J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2017, 10(3):5-9.
- [16] IKEDA Y. Building dynamic property change under an earthquake evaluated by the forgetting factor recursive least squares method[J]. *AIJ Journal of Technology & Design*, 2012, 18(38):51-54.
- [17] 薛阳,高丽.关于丢番图方程 $(20n)^x + (99n)^y = (101n)^z$ [J].*延安大学学报(自然科学版)*,2016,35(3):16-19.
XUE Yang,GAO Li.On the Diophantine equation $(20n)^x + (99n)^y = (101n)^z$ [J].*Journal of Yan'an University(Natural Science Edition)*, 2016,35(3):16-19.
- [18] DENG M J. A note on the Diophantine equation [J]. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 2014, 89(2): 316-321.
- [19] 蔡惠京.关于线性丢番图方程的 Frobenius 问题[J].*数学理论与应用*,2019,39(2):1-19.
CAI Huijing. On the Frobenius problem of the linear Diophantine equation[J]. *Mathematical Theory and Applications*, 2019,39(2):1-19.
- [20] 门洪,李项楠,史冬琳.P-隐式广义预测控制在球磨机制粉系统中的应用[J].*化工自动化及仪表*,2013,40(6):734-737.
MEN Hong, LI Xiangnan, SHI Donglin. Proportional implicit GPC control in ball pulverizing system[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2013,40(6):734-737.
- [21] 陈增强,吴瑕,孙明玮,等.时滞系统的自抗扰广义预测控制的性能分析[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2018,49(8):1960-1970.
CHEN Zengqiang, WU Xia, SUN Mingwei, et al. Performance analysis of active disturbance rejection generalized predictive control for time-delay systems[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2018,49(8):1960-1970.