

# 基于自适应遗传算法的协调控制系统优化

谢 谢 ,刘吉臻 ,曾德良 ,刘继伟

( 华北电力大学 控制与计算机工程学院 北京 102206)

摘 要: 针对火电单元机组的协调控制系统,提出了一种基于自适应遗传算法的多变量鲁棒 PID 控制器参数寻优方法。以控制器设定跟踪性能为优化目标,鲁棒性能为动态约束,采用具有自适应交叉概率和变异概率的遗传算法寻优 PID 控制器参数。仿真结果表明,与传统遗传算法寻优所得 PID 控制器相比,基于自适应遗传算法的鲁棒 PID 控制器具有良好的负荷跟随性和更优的鲁棒性。

关 键 词: 自适应遗传算法; 协调控制系统; 鲁棒性; PID 控制器

中图分类号: TM621; TP202 文献标识码: A

## 引 言

传统的火力发电需更积极的参与电网的调峰调频,这就要求火电机组的协调控制系统具有良好的鲁棒性和负荷跟随性。协调控制系统是一个复杂的多变量、强耦合、非线性、时变系统,许多先进的控制策略针对该系统进行了研究,如鲁棒控制<sup>[1]</sup>,模糊多模型控制等<sup>[2]</sup>,但这些先进的控制策略设计复杂,且不易实现,现场效果并不理想。而 PID 控制器由于其结构简单,在工程上易于实现且方便现场人员的操作而被广泛应用于工业过程控制中,因此,研究协调控制系统中 PID 控制器优化意义重大。

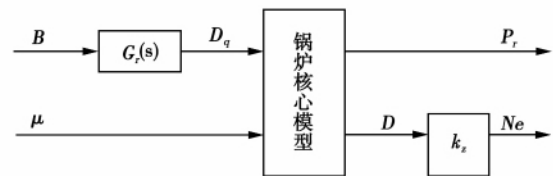
文献[3]将控制器的抗干扰性能作为寻优目标,利用最佳保持策略遗传算法寻优协调控制系统的 PID 参数,分析了控制系统的鲁棒性,但该文未考虑遗传算法中交叉概率和变异概率对优化结果的影响,且只定性的分析了控制系统的鲁棒性;文献[1]利用环路成形  $H_\infty$  方法设计鲁棒控制器,并将其转换为多变量 PID 控制器,该方法虽能定量计算出控制系统的鲁棒裕度,但其设计步骤复杂,由于 PID 为高阶鲁棒控制器降阶所得,故其会丧失高阶鲁棒控制器的高频性能。

为提高遗传算法的全局搜索能力和收敛速度,

本研究采用具有自适应交叉概率和变异概率的遗传算法寻优 PID 参数;为控制鲁棒性能,将定量的鲁棒裕度作为寻优约束,仿真结果表明,所设计的协调控制系统具有良好的鲁棒性和负荷跟随性。

## 1 单元机组协调控制系统模型

以文献[4]中 500 MW 汽包炉模型为研究对象,其单元机组协调控制系统模型结构如图 1 所示。



B—燃料量;  $D_q$ —锅炉有效吸热量;  $P_T$ —主蒸汽压力;  $\mu$ —汽机调节阀开度;  $D$ —主蒸汽流量;  $N_e$ —负荷;  $k_z = 500/1650$ —主蒸汽流量到负荷的标定系数;  $G_r$ —燃料动态环节。

图 1 500 MW 单元机组协调控制系统模型结构

燃料动态环节包含磨煤机动态和水冷壁动态,可表示为:

$$G_r = G_m G_s = \frac{1}{35s + 1} e^{-30s} \cdot \frac{1}{5s + 1}$$

锅炉核心模型可由以下非线性方程描述:

$$\dot{P}_T = 1.2803 (P_b - P_T)^{1/2} - 0.0895 P_T \mu$$

$$\dot{P}_b = -0.1422 (P_b - P_T)^{1/2} + 0.161 D_q$$

$$D = 101.9778 P_T \mu$$

其中  $P_b$  为汽包压力。

上述非线性模型在工作点的线性模型可描述为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_T \\ \Delta N_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta \mu \end{bmatrix}$$

收稿日期:2010 - 07 - 23; 修订日期:2010 - 11 - 12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51036002)

作者简介:谢 谢(1984 -),女,江西景德镇人,华北电力大学博士研究生。

100% 负荷点, 负荷 500 MW, 主汽压 16.17 MPa, 燃料量指令为 1.00, 阀门开度为 1.00, 在该点线性化模型为:

$$G_{11} = \frac{0.09104}{175s^4 + 165.7s^3 + 30.71s^2 + 0.9432s + 0.005626} e^{-30s}$$

$$G_{12} = \frac{-1.448s - 0.09104}{s^2 + 0.7182s + 0.005626}$$

$$G_{21} = \frac{2.813}{175s^4 + 165.7s^3 + 30.71s^2 + 0.9432s + 0.005626} e^{-30s}$$

$$G_{22} = \frac{500s^2 + 314.3s - 1.776 \times 10^{-15}}{s^2 + 0.7182s + 0.005626}$$

### 2 基于自适应遗传算法的 PID 参数寻优

遗传算法是一种模拟进化算法<sup>[5]</sup>, 具备随机搜索和全局优化的能力, 具有极高的鲁棒性和广泛适用性。对于遗传算法的研究中, 参数选择是很重要的一方面, 这些参数需随着遗传进程而自适应变化, 这种有自组织性能的遗传算法具有更高的鲁棒性、全局最优性和效率。文献[7]提出一种交叉概率和变异概率随父串的适应度自适应变化方法, 利用该方法的寻优步骤如下<sup>[6]</sup>:

(1) 确定如图 2 所示的协调控制系统结构, 由于燃料量对负荷和主汽压力的动态特性近似, 故炉侧对机侧采用静态解耦控制器  $K$ , 根据 100% 负荷的线性模型, 计算得  $K = -1$ ;

(2) 由图 2 知, 寻优参数为 3 个控制器的系数, 确定每个参数的大致范围和编码长度  $L = 7$ , 进行实数编码;

(3) 随机产生  $n$  个个体构成初始种群  $P(0)$ , 取  $n = 30$ ;

(4) 将种群中各个体解码成对应的参数值, 用此参数求代价函数值  $J$ , 求适应函数值  $f = 1/J$ ;

(5) 应用复制、自适应交叉和自适应变异算子对种群  $P(t)$  进行操作, 产生下一代种群  $P(t+1)$ ; 自适应交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} p_c = \frac{k_1(f_{\max} - f_c)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f_c \geq f_{\text{avg}} \\ p_c = k_2 & f_c < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p_m = \frac{k_3(f_{\max} - f_m)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f_m \geq f_{\text{avg}} \\ p_m = k_4 & f_m < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $k_2 \geq k_1, k_4 \geq k_3$  为 0~1 之间的常数;  $f_c$  一个别被选中进行交叉操作个体的较大适应度;  $f_m$  为进行

变异操作个体的适应度。  $f_{\max}$ —当前代中个体的最大适应度  $f_{\text{avg}}$ —一个体的平均适应度。

(6) 重复步骤(3)和步骤(4), 直至参数收敛或达到预定的指标, 取进化代数  $G = 100$ ;

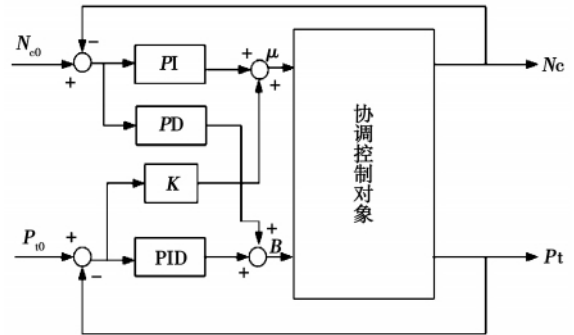


图 2 协调控制系统结构

### 3 鲁棒性量化计算及鲁棒 PID 控制设计

若系统具有图 3 所示的不确定性结构<sup>[9]</sup>, 则表示该不确定系统的输入端和输出端分别存在乘性扰动和逆乘性扰动。该系统可描述为<sup>[8]</sup>:

$$G_{\Delta} = \{ (I - \Delta_1)^{-1} G (I + \Delta_2) : \Delta_1, \Delta_2 \in H_{\infty}, \Delta = \begin{bmatrix} \Delta_1 & 0 \\ 0 & \Delta_2 \end{bmatrix} \}$$

在满足  $\|\Delta\|_{\infty} \leq 1/\gamma$  的条件下, 闭环系统鲁棒稳定的充要条件是:

$$\varepsilon = \mu_{\Delta} \left( \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I + GK)^{-1} [I \ G] \right) < \gamma \quad (3)$$

因此  $\varepsilon$  可作为量化系统鲁棒性的指标。

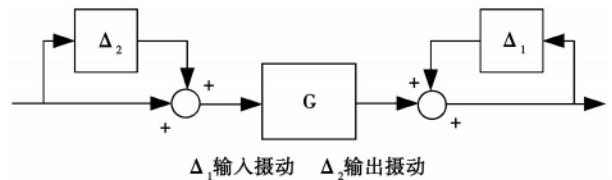


图 3 模型不确定性结构

本研究在考虑协调系统对负荷指令响应的跟随性同时, 需保证主汽压力波动在合理的范围内, 因此将负荷指令扰动对负荷和主汽压的影响综合考虑到性能指标中, 采用时间与绝对误差乘积积分 (ITAE) 作为性能指标。

综上所述, 协调控制系统的鲁棒 PID 控制器的设计可归纳为如下优化问题:

$$\min_k J = w_1 E_1 + w_2 E_2$$

优化目标:

$$= \int_0^{\infty} (w_1 t |e_1(t)| + w_2 t |e_2(t)|) dt$$

约束条件:

$$\mu_{\Delta} \left( \begin{bmatrix} I \\ K \end{bmatrix} (I + GK)^{-1} [I \ G] \right) < \gamma_m$$

式中:  $E_1$ 、 $E_2$ —在负荷设定值扰动时,负荷与主汽压相对于设定值的 ITAE 值。 $w_1$ 、 $w_2$ — $E_1$  和  $E_2$  对应的权值。 $\gamma_m$ —给定鲁棒裕度,通常  $\gamma_m$  取值在 3~5 之间时,控制系统可以取得较好的鲁棒性和抗干扰性能,若  $\gamma_m$  值过大,则系统鲁棒性变差,若  $\gamma_m$  值过小,则系统性能变差。

为将鲁棒约束嵌入遗传算法,代价函数值  $J$  可表示为:

$$J_1 = wJ$$

$$\text{其中 } \mu = \begin{cases} 1, & 3 \leq \gamma_m \leq 5 \\ 100, & \gamma_m < 3, \gamma_m > 5 \end{cases}$$

### 4 仿真验证

针对协调系统在 100% 负荷的线性模型,分别利用自适应遗传算法寻优鲁棒 PID 控制器  $G_1$  (方法一) 和传统遗传算法寻优 PID 控制器  $G_2$  (方法二),分别对应的鲁棒裕度  $\gamma_{m1}$  和  $\gamma_{m2}$ ,分别表示为:

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1.8972 + \frac{0.0136}{s} + \frac{0.4134s}{4.134s + 1} & 4.2116 + \frac{0.488s}{1 + 4.88s} \\ -1 & 2.94 + \frac{0.1468}{s} \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{m1} = 4.9997$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} 2.6213 + \frac{0.0313}{s} + \frac{0.4828s}{4.828s + 1} & 3.1964 + \frac{0.6277s}{1 + 4.88s} \\ -1 & 2.8541 + \frac{0.1527}{s} \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{m2} = 33.4323$$

分别将控制器  $G_1$  和  $G_2$  用于协调控制系统的非线性模型,从 100% 负荷降至 90% 负荷,主汽压力保持不变,协调控制系统响应如图 4 所示,目标函数随优化过程的变化如图 5 所示。

为比较上述两种控制器的鲁棒性,分别将中控制器  $G_1$  和  $G_2$  用于协调系统的非线性模型,从 90% 负荷降至 80% 负荷,响应曲线如图 6。两种方法设计的协调控制系统鲁棒指标如图 7 所示。

由图 4~图 7 可知:利用方法一设计所得控制器和方法二设计所得控制器同样具有良好的负荷跟随能力,虽前者在压力控制上稍差于后者,但仍能将

压力控制在合理的范围内;目标函数的差异主要是由于鲁棒约束存在导致的,在鲁棒性能方面,方法一所得控制器鲁棒性能良好,明显好于方法二所得控制器。

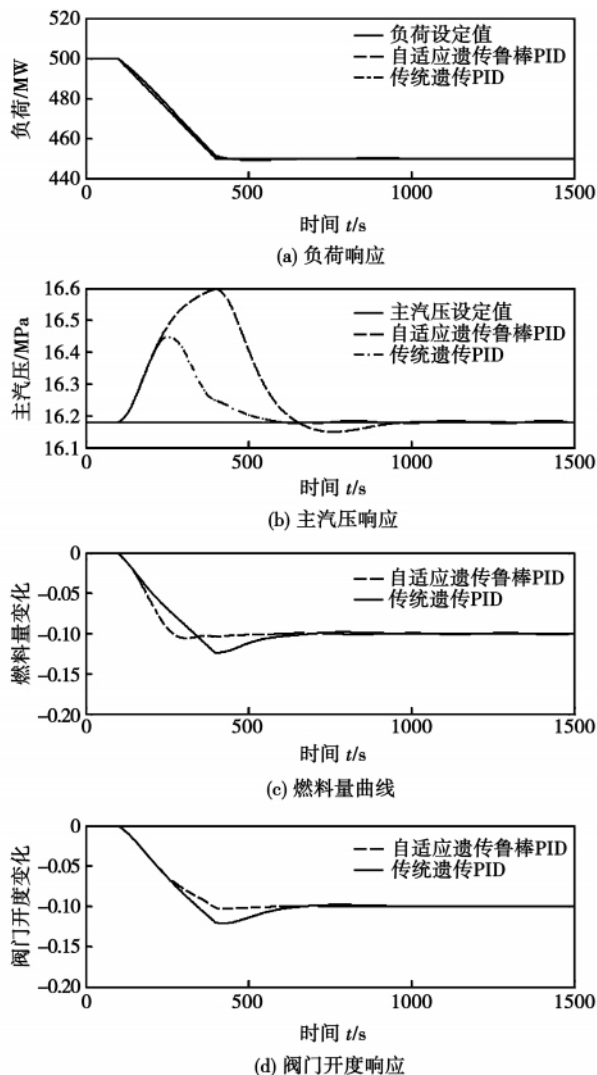


图 4 500 MW 负荷设定值扰动响应曲线

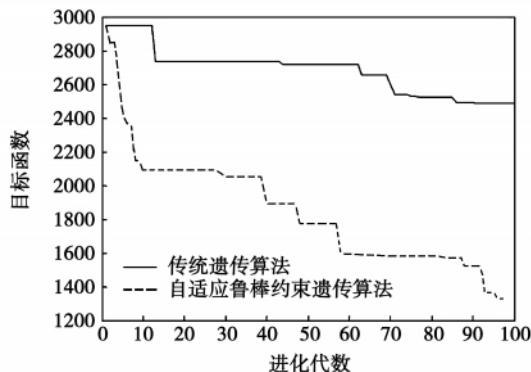


图 5 目标函数优化过程

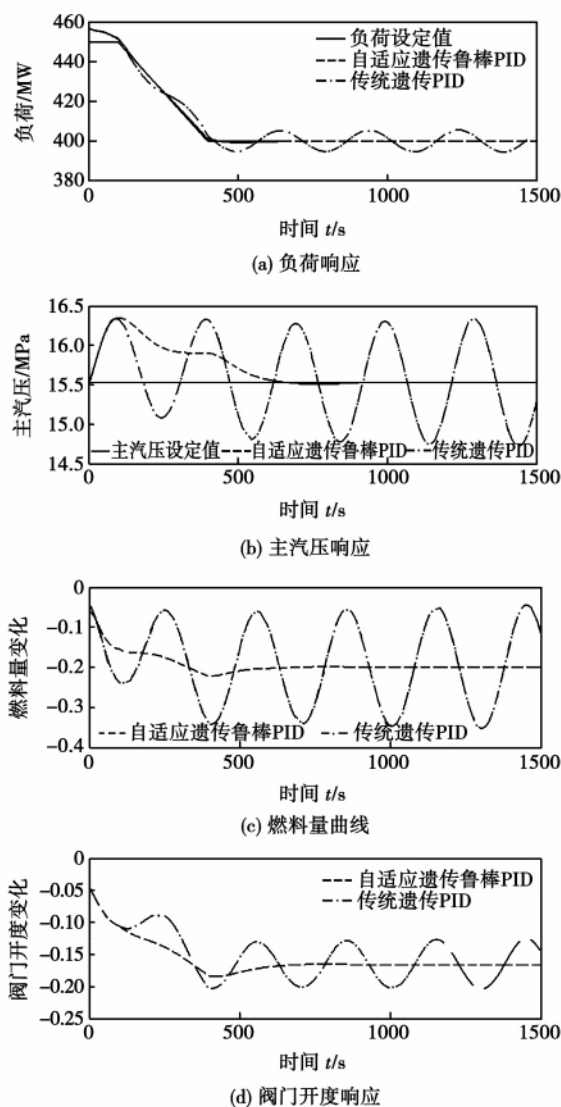


图6 450 MW 负荷设定值扰动响应曲线

## 5 结 论

本研究提出的基于自适应遗传算法的协调控制系统鲁棒 PID 控制器具有良好的负荷跟踪能力,与基于传统遗传算法的 PID 控制器相比,在主汽压控制上,虽超调偏大,但仍在合理的范围之内,在系统的鲁棒性能上,具有优异的鲁棒性,这是牺牲主汽压

力控制的动态品质换取的。所提出的方法在系统的控制品质和鲁棒性能之间取得良好的平衡,达到预期设计的要求。

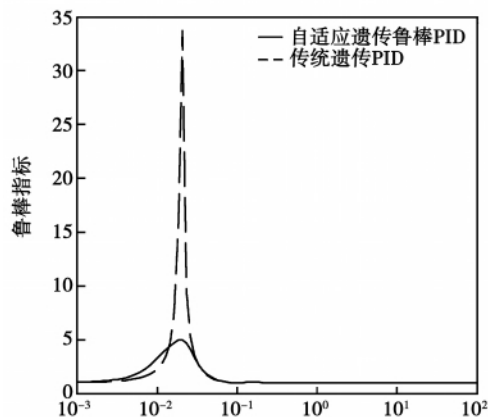


图7 鲁棒指标比较

## 参考文献:

- [1] 谭文,牛玉广,刘吉臻.非线性锅炉-汽轮机系统的鲁棒控制[J].控制理论与应用,1999,16(6):863-867.
- [2] 刘吉臻,陈彦桥,曾德良,等.500 MW 单元机组模糊多模型协调控制系统[J].动力工程,2003,23(6):2790-2794.
- [3] 薛亚丽,李东海,吕崇德.基于遗传算法的机炉协调系统 PID 控制器优化[J].热能动力工程,2006,21(1):80-83,87.
- [4] 曾德良,刘吉臻.汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增量预测模型[J].中国电机工程学报,2000,20(12):75-79.
- [5] 席裕庚,柴天佑,恽为民.遗传算法综述[J].控制理论与应用,1996,13(6):697-708.
- [6] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防出版社,2002.
- [7] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(4):656-667.
- [8] WEN TAN, CHEN TONGWEN, MARQUEZ HORACIO J. Robust controller design and PID tuning for multivariable processes[J]. Asian Journal of Control, 2002, 4(4):439-451.
- [9] 金鑫,谭文,李志军,等.典型工业过程鲁棒 PID 控制器的整定[J].控制理论与应用,2005,22(6):947-953.

(陈 滨 编辑)

## 更 正

由于排版和校对工作的疏忽,2011年第3期322页的最后一行文字“普遍认为,TBC的主要破坏形式是在涂层间热氧化物周围,其粘结涂层上面的陶瓷涂层剥离和破裂”应删除。特此向读者和译者致歉。

——《热能动力工程》编辑部

mal power plant featuring a large inertia and uncertainty to any model etc. The main control loops adopted the MFAPC algorithm while the auxiliary control loops employed the conventional PID (proportional, integral and differential) control. The simulation results have verified the effectiveness of the cascade control tactics. **Key words:** pseudo gradient vector, prediction control, superheated steam temperature, cascade control system

基于自适应遗传算法的协调控制系统优化 = **Optimization of a Coordinated Control System Based on the Self-adaptive Genetic Algorithm** [刊, 汉] XIE Xie, LIU Ji-zhen, ZENG De-liang, LIU Ji-wei (College of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 432 ~ 435

For coordinated control systems for elementary units in thermal power plants, presented was a searching method for optimizing the parameters of a multi-variable robust PID (proportional, integral and differential) controller based on the self-adaptive genetic algorithm. With the tracking performance of the controller at the set point serving as the optimization target and the robust performance as a dynamic constraint, the genetic algorithm involving a self-adaptive crossover and variation probability was employed to search optimal parameters of the PID controller. The simulation results show that compared with the PID controller optimized by using the traditional genetic algorithm, the robust PID one based on the self-adaptive genetic algorithm enjoys better load follow-up characteristics and a superior robustness. **Key words:** self-adaptive genetic algorithm, coordinated control system, robustness, PID (proportional, integral and differential) controller

支持向量机灰熔点预测模型研究 = **Study of a Support Vector Machine-based Model for Predicting Melting Points of Ash** [刊, 汉] ZHAO Xian-qiao (Shandong Electric Power Academy, Jinan, China, Post Code: 250002), WU Sheng-jie, HE Guo-liang (Shandong Zhanhua Thermal Power Co. Ltd., Zhanhua, China, Post Code: 256800), WANG Chun-lin (Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 26(4). - 436 ~ 439

To the demand of ash melting point calculation of blended coal in power plants, a model for melting points of ash was established and a contrast study was conducted by using the support vector machine algorithm and BP (back propagation) neural network algorithm. The model in question used the ash composition as an input and the melting point of ash as an output. It was employed to predict the ash melting points of a single coal and blended one. Then, the prediction results were compared with the test ones. The errors of the model based on the support vector machine were 0.57% and 1.94% respectively in predicting the single coal and blended one while those of the model based on the BP neural network were 1.925% and 10.43% respectively in predicting the above-mentioned two