

基于改进遗传算法的直流锅炉主蒸汽温度自校正控制

方彦军, 胡文凯

(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对变负荷下的超(超)临界机组主蒸汽温度控制问题, 提出了一种基于改进遗传算法(GA)的自校正控制策略。采用 GA 辨识被控对象模型参数, 并对种群初始化方法和遗传算子部分结构进行了改进; 采用最小方差率构造控制器, 并结合 GA 设计了自校正控制的运算流程。对某超临界直流锅炉主蒸汽温度控制的仿真结果表明, 所提自校正控制方法具有更快的响应速度和更强的抗干扰能力, 能够满足变负荷下的主蒸汽温度控制需求。

关键词: 锅炉; 主蒸汽温度; 遗传算法; 最小方差率; 自校正控制

中图分类号: TK 229.2

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.022

0 引言

主蒸汽温度是直流锅炉运行中需要监视的一个重要参数, 过高或者过低都会影响机组的安全经济运行。随着高参数、大容量机组逐步参与电网调峰, 机组负荷会发生大幅变动, 主蒸汽温度也将承受剧烈变化^[1]。优化主蒸汽温度控制方法, 提高控制精度和稳定性, 能够减少爆管事故的发生, 提高机组变负荷快速响应能力, 对于机组长期的安全、经济运行具有重要意义。

常规主蒸汽温度控制结合前馈补偿和串级系统等策略^[2], 采用固定参数或分段 PID 构造控制器, 没有完全考虑主蒸汽温度在变负荷下模型变化的影响, 工况复杂时还需手工操作和监督控制, 严重影响了机组的经济性和安全性, 可见常规控制方法在对象模型变化时, 往往达不到理想效果。而自校正控制可以不断测量系统状态, 进而调节控制器参数, 在解决模型不确定控制问题时具有明显优势^[3]。自校正控制思想最早在 1958 年由 Kalman 提出, 并于 1973 年由 Astrom 等发展形成, 该方法具有较好的解决非线性、多模态、变工况控制问题的能力, 因而受到广泛关注并逐步得到推广应用, 如文献[4]采用了自校正模糊控制策略解决多变量非线性控制问题, 文献[5]提出了基于遗传算法(GA)的自校正 PID 用于化工过程温度控制, 仿真试验结果表明, 这些控制策略均比传统方法具有更好的控制效果。

本文将自校正控制方法引入直流锅炉主蒸汽温度控制中, 分别采用 GA 和最小方差率辨识被控对象模型参数和构造控制器, 以满足变负荷下的主蒸汽温度控制要求。为了使辨识过程达到较好的收敛精

度和速度, 对遗传算子、种群初始化方法和概率选择方式等进行了改进, 并将 GA 引入自校正控制系统中, 设计了控制算法的运算流程。最后对某超临界直流锅炉的主蒸汽温度控制进行仿真, 结果表明本文所提自校正控制方法具有较快的响应速度和较强的抗干扰能力。

1 主蒸汽温度控制系统结构

超(超)临界机组主蒸汽温度具有复杂的动态特性, 影响因素包括水燃比、中间点温度和减温水量等, 其中喷水减温是主蒸汽温度的直接调节方式。在减温水量扰动下的主蒸汽温度 θ_1 有较大容积迟延, 而减温器出口蒸汽温度 θ_2 有明显导前作用, 因此可以将主蒸汽温度控制系统构建为以 θ_1 为主参数、 θ_2 为副参数的串级回路, 其结构如图 1 所示。其中, r 为参考输入, $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ 分别表示主、副回路控制器、 γ_1 、 γ_2 分别表示主、副回路测量变送器。

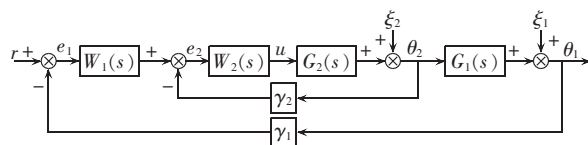


图 1 常规主蒸汽温度串级控制系统结构

Fig.1 Normal cascading control system of main steam temperature

自校正控制是目前研究较为系统的一类自适应控制方法, 它根据控制系统的期望输出、实际输出、控制作用和外部扰动等可测变量实时改变控制器参数, 使系统高性能指标达到最优^[6]。自校正控制系统结构如图 2 所示, 自校正控制器主要包括模型参数估计器、控制器参数设计器和可变参数控制器 3 个部分。

将自校正控制策略引入主蒸汽温度串级系统中, 采用 GA 在线辨识被控对象模型参数, 并根据辨识结果设计控制器参数, 其基本结构如图 3 所示。由

收稿日期: 2011-10-17; 修回日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41176068, 61170024)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(41176068, 61170024)

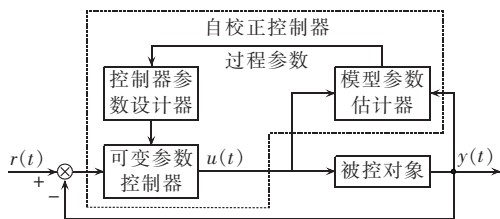


图 2 自校正控制系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of self-tuning control system

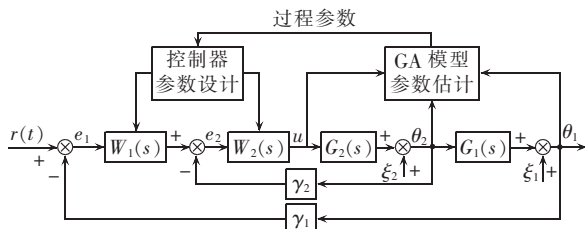


图 3 主蒸汽温度串级自校正控制系统结构

Fig.3 Cascading self-tuning control system of main steam temperature

于串级系统中包含主、副回路 2 个部分,因此需要同时辨识导前区和惰性区对象,并根据辨识结果优化主、副回路控制器参数,最终实现稳定控制。

2 GA 的分析与改进

GA 是一种全局优化搜索方法,利用随机化技术对被编码的参数空间进行高效搜索,具有简单通用、鲁棒性强和搜索效率高等优点^[7],其主要内容包括编码方式、适应度函数、遗传算子、初始种群和遗传参数等。本文采用实数编码问题参数,辨识过程中采用的适应度函数为:

$$F(\hat{\theta}) = \sum_{i=1}^N [\hat{y}(i) - y(i)]^2 \quad (1)$$

其中, $\hat{\theta}$ 为预测模型参数; $\hat{y}(i)$ 为预测输出; $y(i)$ 为实际输出; N 为数据样本总数。为提高算法的收敛速度和精度,对 GA 部分结构进行了改进,其改进策略如下。

2.1 遗传算子

简单 GA(SGA) 选择算子为比例选择,其选择概率与适应度值直接相关,体现不出优秀个体的竞争力。为了使优秀个体繁殖到下一代的概率更大,又防止因其繁殖过多而造成早熟收敛的问题,本文采用线性排序选择,其个体概率计算公式为:

$$P_s(a_j) = \frac{1}{M} \left[\eta^+ - \frac{\eta^+ - \eta^-}{M-1} (j-1) \right] \quad (2)$$

其中, M 为群体大小; j 为降序序号; η^+ 为最佳个体期望数, η^- 为最差个体期望数, $\eta^+ + \eta^- = 2$ 。

交叉算子通过在下一代产生新个体来保持种群的多样性,实数编码 GA 的交叉方法很多,以算术交叉最为简便,本文采用非均匀线性交叉^[8]。设父代个体为 X_1^t 和 X_2^t ,则交叉后产生子代个体为:

$$\begin{cases} X_1^{t+1} = c X_1^t + (1-c) X_2^t \\ X_2^{t+1} = (1-c) X_1^t + c X_2^t \end{cases} \quad (3)$$

其中, t 为当前进化代数; c 为比例因子,其取值在 (0,1) 之间随机产生。

变异算子的作用是保证种群一定程度的多样性,实数变异需要选择一定步长在父代个体的基础上进行加减运算。本文采用高斯变异算子^[9],子代个体的计算公式为:

$$X^{t+1} = X^t + N(0, \sigma) \quad (4)$$

其中, $N(0, \sigma)$ 为高斯分布, σ 为方差。为了使变异步长随遗传代数的增加而减少,本文将 σ 设定为动态参数 $\sigma(t)$, 即:

$$\sigma(t) = 1 - \frac{0.9t}{T} \quad (5)$$

其中, T 为遗传代数。

2.2 初始种群均匀设计

SGA 的初始种群是随机产生的,这种方法容易造成初始种群多样性较小,不利于种群进化,从而导致过早收敛。因此,在无法预知最优解具体区域的情况下,应该使初始种群的个体均匀分布在解空间中,使种群具有较好的多样性,从而降低种群过早收敛或陷入局部最优的概率。本文采用均匀设计方法构造初始种群,先构造均匀设计表^[10],再根据设计表构造初始种群。若需要辨识的参数有 n 个,如果设定种群大小为 m ,则可以构造一个 n 因素 m 水平的均匀设计表,使初始种群个体以散点形式均匀分布在 n 维空间中。

2.3 概率适应性选择

交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 对 GA 的性能有重要影响,在 SGA 中通常以经验法估算,具有很大的盲目性,且固定概率不适用于种群进化特征。为了提高 GA 收敛精度和速度,提出了 P_c 和 P_m 的适应性选择方法。 P_c 初值较大,后逐渐递减; P_m 初值较小,后逐渐增大。概率调整曲线采用 Sigmoid 函数^[11],其计算公式为:

$$P_c^t = P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{1 + e^{-\alpha(t/T - N_s)}} \quad (6)$$

$$P_m^t = P_{m1} + \frac{P_{m2} - P_{m1}}{1 + e^{-\alpha(t/T - N_s)}} \quad (7)$$

其中, P_{c1} 为初始交叉概率, P_{c2} 为终止交叉概率; P_{m1} 为初始变异概率, P_{m2} 为终止变异概率; α 为形状因子,设定为 20; N_s 为分界点,设定为 0.25。采用此概率选择方法,能够适应种群进化前期收敛快而后期收敛慢的特征,提高 GA 搜索性能。

3 自校正控制算法

3.1 单步输出预测模型

由于主蒸汽温度具有大滞后特性,在主蒸汽

温度串级系统惰性区对象中存在纯延时 d , 因此要使输出方差最小, 就必须提前 d 步预测输出量, 再根据预测值来设计控制器参数。单回路最小方差自校正控制系统结构如图 4 所示^[12]。

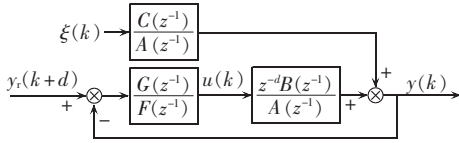


图 4 最小方差自校正控制系统

Fig.4 Self-tuning control system with generalized minimum variance

被控对象模型为受控的自回归滑动平均差分方程(CARMA)模型, 用差分方程可以表示为:

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})\xi(k) \quad (8)$$

其中, $y(k)$ 为系统输出; $u(k)$ 为控制量; $\xi(k)$ 为白噪声; d 为对象纯时延; $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 为被控对象和扰动对象的加权多项式。

$$\begin{cases} A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \cdots + a_{n_a}z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \cdots + b_{n_b}z^{-n_b}, b_0 \neq 0 \\ C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \cdots + c_{n_c}z^{-n_c} \end{cases} \quad (9)$$

$$A = [1, a_1, a_2, \cdots, a_{n_a}]$$

$$B = [b_0, b_1, b_2, \cdots, b_{n_b}]$$

$$C = [1, c_1, c_2, \cdots, c_{n_c}]$$

$k+d$ 时刻预测输出记为 $\hat{y}(k+d|k)$, 则预测误差记为:

$$\tilde{y}(k+d|k) = y(k+d) - \hat{y}(k+d|k) \quad (10)$$

为使性能指标 $E\{\tilde{y}^2(k+d|k)\}$ 最小, d 步预测输出 $\hat{y}(k+d|k)$ 必满足方程:

$$C(z^{-1})\hat{y}(k+d|k) = G(z^{-1})y(k) + F(z^{-1})u(k) \quad (11)$$

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1}) + z^{-d}G(z^{-1}) \quad (12)$$

$$F(z^{-1}) = B(z^{-1})E(z^{-1}) \quad (13)$$

$$E(z^{-1}) = 1 + e_1z^{-1} + e_2z^{-2} + \cdots + e_{n_e}z^{-n_e}$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + g_2z^{-2} + \cdots + g_{n_g}z^{-n_g}$$

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1z^{-1} + f_2z^{-2} + \cdots + f_{n_f}z^{-n_f}$$

其中, 各阶次分别为 $n_e = d-1$, $n_g = n_a-1$, $n_f = n_b + d-1$ 。

3.2 广义最小方差控制律

广义最小方差自校正控制, 在求解控制率的性能指标中引入控制量的加权项, 从而抑制控制作用的剧烈变化^[13], 控制器目标函数设计为:

$$J = E\{[P(z^{-1})y(k+d) - R(z^{-1})y_r(k+d)]^2 + [Q(z^{-1})u(k)]^2\} \quad (14)$$

其中, $E\{\cdot\}$ 表示方差计算; $y(k+d)$ 、 $y_r(k+d)$ 分别为 $k+d$ 时刻系统实际输出及期望输出; $u(k)$ 为控制量; $P(z^{-1})$ 、 $R(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 为实际输出、期望输出和控制量的加权项, 分别具有改善闭环系统性能、柔化期望输出和约束控制量的作用。

在设计控制系统时, 一般可取 $P(z^{-1})=1$ 、 $R(z^{-1})=1$ 和 $Q(z^{-1})=q_0$, 从而在不影响控制精度和稳定性的前提下简化运算。 q_0 需根据实际情况加以调节, q_0 过小则会失去对控制作用的约束, 难以保证稳定性; q_0 过大则无法实现最优控制。使性能指标最小的广义最小方差控制率为:

$$u(k) = \frac{C(z^{-1})R(z^{-1})y_r(k+d) - G(z^{-1})P(z^{-1})y(k)}{q_0 / \{b_0[C(z^{-1})Q(z^{-1}) + F(z^{-1})P(z^{-1})]\}} \quad (15)$$

3.3 基于 GA 的自校正控制流程

使用 GA 在线辨识模型参数时, 采用递推修正策略, 通过辨识修正项来更新模型参数, 其原理为:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \Delta\hat{\theta} \quad (16)$$

其中, $\hat{\theta}(k)$ 为新参数; $\hat{\theta}(k-1)$ 为旧参数; $\Delta\hat{\theta}$ 为参数修正项。该方法既可以改善辨识精度, 又能降低对模型参数范围设定的要求。基于 GA 的自校正控制, 在已知模型结构和阶次等条件下, 首先利用 GA 在线估计模型参数, 再以式(14)作为控制目标函数, 通过广义最小方差率实现控制过程, 具体流程如下。

步骤 1 设置初始值, 包括模型初始参数 $\hat{\theta}(0)$ 、遗传参数; 输入初始数据, 包括期望输出和白噪声等, 并设置加权系数多项式 $P(z^{-1})$ 、 $R(z^{-1})$ 和 $Q(z^{-1})$ 。

步骤 2 采样当前实际输出 $y(k)$ 、期望输出 $y_r(k+d)$ 。

步骤 3 根据上次辨识结果估计参数范围, 利用改进 GA 实时辨识参数修正项 $\Delta\hat{\theta}$, 通过式(16)计算 $\hat{\theta}$, 即得到 $\hat{A}$ 、 $\hat{B}$ 和 $\hat{C}$, 其过程分为以下几步:

- 采用实数编码方式编码修正项 $\Delta\hat{\theta}$;
- 采用均匀设计方法构造初始种群;
- 计算种群各个体的适应度值 $F(\hat{\theta})$;
- 对种群进行选择、交叉和变异操作, 以进化到下一代群体 $P(t+1)$;
- 如果达到最大进化代数, 则完成搜索得到最优解, 否则返回步骤 c。

步骤 4 根据参数辨识结果 $\hat{A}$ 、 $\hat{B}$ 和 $\hat{C}$, 求解丢番方程式(12)、(13), 得到多项式 E 、 F 、 G 的系数。

步骤 5 利用式(15)计算控制量 $u(k)$ 。

步骤 6 令 $k=k+1$, 返回步骤 2, 循环计算。

对于主蒸汽温度串级系统, 主、副回路采用相同流程进行控制, 通过反复迭代计算, 辨识不同工况下的对象模型, 并根据所获模型参数调整控制器参数, 从而最终实现对主蒸汽温度的稳定控制。

4 主蒸汽温度控制仿真

锅炉主蒸汽温度被控对象模型可以用多容惯性传递函数表示, 当阶次较高时, 也可以用带纯迟延的

一阶惯性传递函数替代。仿真试验采用某 600 MW 超临界机组在不同工况下的主蒸汽温度模型^[14](如表 1 所示),包括惰性区和导前区 2 个部分,其模型结构可以表示成式(17)、(18)形式^[15]。

$$G_1(s)=\frac{K}{1+Ts}e^{-\tau s} \tag{17}$$

$$G_2(s)=\frac{K_2}{(1+T_1s)(1+T_2s)} \tag{18}$$

其中, K 、 T 、 τ 分别为惰性区对象模型的比例系数、时间常数和延迟时间; K_2 和 T_1 、 T_2 分别为导前区对象的比例系数和时间常数。控制过程是将传递函数转化为差分方程形式后,对方程系数进行辨识,以便在计算过程中直接利用辨识结果。

表 1 不同负荷下被控对象模型
Tab.1 Models of controlled objects for different loads

负荷	被控对象模型		
	导前区	惰性区	惰性区等效模型
37%	$\frac{-5.072}{(28s+1)^2}$	$\frac{1.048}{(56.6s+1)^8}$	$\frac{1.028}{190s+1}e^{-288.7s}$
50%	$\frac{-3.067}{(25s+1)^2}$	$\frac{1.119}{(42.1s+1)^7}$	$\frac{1.104}{132s+1}e^{-180.7s}$
75%	$\frac{-1.657}{(20s+1)^2}$	$\frac{1.202}{(27.1s+1)^7}$	$\frac{1.186}{87s+1}e^{-117.6s}$
100%	$\frac{-0.815}{(18s+1)^2}$	$\frac{1.276}{(18.4s+1)^6}$	$\frac{1.2588}{59s+1}e^{-80.85s}$

使用改进 GA 辨识被控对象模型时,需要现对 GA 部分参数进行设置,以保证模型参数辨识过程具有较好的收敛精度和速度。鉴于控制过程中数据样本数量较少和在线控制对速度的要求,本文在大量实验基础上确定了 GA 参数设置如下:种群大小 $P=20$;进化代数 $G=40$;选择压力 $S_p=1.6$;初始交叉概率 $P_{c1}=0.6$,初始交叉概率 $P_{c2}=0.9$;初始变异概率 $P_{m1}=0.01$,终止变异概率 $P_{m2}=0.1$ 。

将改进 GA 应用于模型辨识单次测试,采用 37% 负荷下的惰性区模型,构造随机扰动下的数据样本,样本长度 $l=289$,采样周期为 1 s,并与 SGA 辨识结果进行比较。图 5 反映了改进 GA 和 SGA 在进行一次辨识时的目标函数进化曲线。从图中可以看出,改进 GA 比 SGA 更快找到最优解,且搜索到的目标值更好,即改进 GA 具有更好的收敛速度和收敛精度。

仿真试验分无噪声和有噪声 2 种条件进行,采

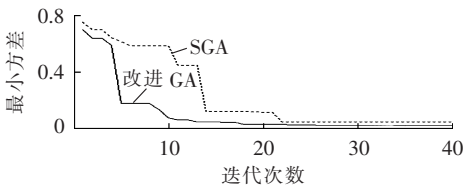


图 5 GA 和 SGA 进化曲线对比
Fig.5 Comparison of evolution curves between GA and SGA

用时间长度为 8000 s 的单位阶跃输入,采样周期为 1 s,有噪声条件下,在主、副回路均引入期望为 0、方差为 1×10^{-4} 的白噪声。对象模型采用 37%、50%、75%、100% 4 组不同负荷下的模型,以模拟实际控制中模型随负荷变化的过程,每段负荷持续 2000 s,并通过阶跃变换对负荷进行切换。考虑到现场锅炉启动时主蒸汽温度并非从 0 开始上升,且初始状态调节过程复杂,为尽可能模拟实际情况,仿真试验仅分析稳定运行后的调节过程和工况切换过程。

模型辨识前需对 CARMA 模型系数初值和修正项范围进行设定,且初值设定宜较小。主回路为一阶模型,系数初值设为 $a_1=0.001$, $b_0=0.001$, $c_1=0$,系数对应修正项范围均设为 $[-0.01, 0.01]$,初始延迟时间 d 设为 10,修正项范围设为 $[-10, 10]$;副回路为二阶模型,系数初值设为 $a_1=a_2=0.001$, $b_0=b_1=0.001$, $c_1=0$,对应修正项范围均设为 $[-0.01, 0.01]$,延迟时间 $d=1$ 不参与辨识。建立好初始条件后,采用改进 GA 实时辨识模型参数,并结合广义最小方差率完成主蒸汽温度的自校正控制过程,同时采用基于 SGA 的自校正控制进行对比分析,无噪和有噪条件下的仿真结果分别如图 6、7 所示。

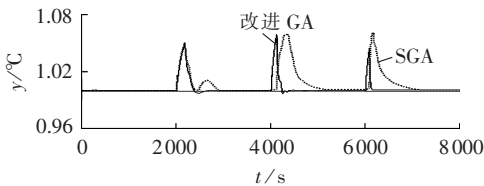


图 6 无噪声条件下主蒸汽温度自校正控制阶跃响应
Fig.6 Response of main steam temperature self-tuning control to step change(without noise)

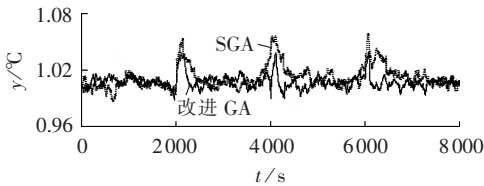


图 7 有噪声条件下主蒸汽温度自校正控制阶跃响应
Fig.7 Response of main steam temperature self-tuning control to step change(with noise)

从图 6 可以看出,无噪声扰动条件下,采用基于改进 GA 的自校正控制比基于 SGA 的自校正控制具有更稳定的控制过程,负荷切换时具有更短的调整时间,各阶段最大动态偏差也更小。改进 GA 在 2000 s、4000 s、6000 s 3 处切换点,恢复到稳定状态的调节时间分别为 523 s、228 s、137 s,最大偏差分别为 4.99%、5.88%、4.43%;SGA 的 3 处切换点调节时间分别为 873 s、1029 s、982 s,最大偏差分别为 4.99%、5.94%、6.04%,即基于改进 GA 的自校正控制具有更强的状态恢复能力,更能适应模型变换的影响。

从图7可以看出,有噪声扰动条件下,采用基于改进GA的自校正控制比基于SGA的自校正控制具有更小的误差。仿真过程中,改进GA的累积方差为29.8820,均方差为0.0037;SGA的累积方差为81.7789,均方差为0.0102。可见,基于改进GA的自校正控制具有更强抗干扰能力。

根据仿真分析结果可知,基于改进GA的主蒸汽温度自校正控制具有更快的响应速度,输出曲线变化趋势更为平稳,在控制过程的各阶段都实现了稳定控制,虽然在模型切换时超调增加,但又迅速回到了稳定状态,没有出现较大波动。而基于SGA的主蒸汽温度自校正控制,其调节品质相对较差,容易出现超调或者调节不足的情况。因此,采用本文所提改进GA进行主蒸汽温度自校正控制具有更好的调节品质,更能满足大型火电机组主蒸汽温度的实际控制需求。

5 结语

本文针对变负荷下直流锅炉主蒸汽温度被控对象模型不确定的特点,设计了减温水扰动下的主蒸汽温度串级自校正控制方法。在自校正控制系统中,引入改进GA实时估计模型参数,并采用最小方差控制率实现稳定控制。通过对某超临界机组在变负荷下的主蒸汽温度控制仿真结果表明,本文所提改进GA具有较好的收敛精度和速度,基于改进GA的自校正控制具有较好的调节品质,能够满足变负荷下的主蒸汽温度控制需求,且该算法计算机实现容易,在实际控制中可以通过C语言和组态语言联合编程实现在线应用。

参考文献:

- [1] GU Junjie, ZHANG Yanjuan, GAO Daming. Application of nonlinear PID controller in main steam temperature control[C]//APPEEC 2009. [S.l.]:IEEE, 2009:27-31.
- [2] ZHU Qidan, ZHANG Jingqiao, WANG Jian. Design of fuzzy and CMAC parallel controller based on GA for main steam pressure in supercharged boiler [C]//Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2008. Yantai, China:IEEE, 2008:4934-4938.
- [3] KIRECCI A, EKER I, DULGER L C. Self-tuning control as conventional method[J]. Electrical Engineering, 2003, 85(2): 101-107.
- [4] XU C, SHIN Y. A self-tuning fuzzy controller for a class of multi-input multi-output nonlinear systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2011, 24(2):238-250.
- [5] ALTINTEN A, KETEVANLIOĞLU F, ERDAĞON S, et al. Self-tuning PID control of jacketed batch polystyrene reactor using genetic algorithm[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 138: 490-497.
- [6] 林卫星, 欧超, 刘小平, 等. 基于PSO的变结构变时滞自校正控

制[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(3):310-316.

- [7] LIN Weixing, OU Chao, LIU Xiaoping, et al. PSO-based self-tuning control for time-varying delay and variable structure system[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(3):310-316.
- [8] KUSUM D, MANOJ T. A new crossover operator for real coded genetic algorithms[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188(1):895-911.
- [9] YALCINOZ T, ALTUN H. Environmentally constrained economic dispatch via a genetic algorithm with arithmetic crossover[C]//2002 IEEE AFRICON. 6th AFRICON Conference. [S.l.]:IEEE, 2002:923-928.
- [10] EIBEN A E, HINTERDING R, MICHALEWICZ Z. Parameter control in evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(2):124-141.
- [11] 何大阔, 王福利, 贾明兴. GA初始种群与操作参数的均匀设计[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2005, 26(9):828-831.
- [12] HE Dakuo, WANG Fuli, JIA Mingxing. Uniform design of initial population and operational parameters of genetic algorithm [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2005, 26(9):828-831.
- [13] 熊军, 高教堂, 都思丹, 等. 变异率和种群数目自适应的GA[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2004, 34(4):553-556.
- [14] XIONG Jun, GAO Duntang, DU Sidan, et al. Genetic algorithm with mutation probability and population size adaptation[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34(4):553-556.
- [15] 庞中华, 崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009:111.
- [16] YAMAMOTO T, INOUE A, SHAH S L. Generalized minimum variance self-tuning pole-assignment controller with a PID structure[C]//Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Control Application. Hawaii, USA:IEEE, 1999: 125-130.
- [17] 谷俊杰, 米翠丽. 基于多模型的内模控制及其在电厂过热汽温中的应用[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(2):83-86.
- [18] GU Junjie, MI Cuili. Internal model control based on multiple models and its application to superheated steam temperature of power plant[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(2):83-86.
- [19] 刘维. 超超临界机组控制方法与应用[M]. 北京:中国电力出版社, 2010:179.

作者简介:



方彦军

方彦军(1957-),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为工业自动化技术在电力系统中的应用;

胡文凯(1987-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为控制理论及应用(E-mail:winking@gmail.com)。

(下转第135页 continued on page 135)

- computation on multi-core PC[J]. Computer Technology and Development,2007,17(10):87-91.
- [18] MICHAEL J Q. MPI 与 OpenMP 并行程序设计 C 语言版[M]. 北京:清华大学出版社,2004:323.
- [19] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:5.
- [20] 韩志伟,刘志刚,鲁晓帆,等. 基于 CUDA 的高速并行小波算法及其在电力系统谐波分析中的应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):98-101.
- HAN Zhiwei,LIU Zhigang,LU Xiaofan,et al. High-speed parallel wavelet algorithm based on CUDA and its application in power system harmonic analysis[J]. Electrical Power Automation Equipment,2010,30(1):98-101.
- [21] 桂勋. 多核并行和设计模式在海量电力暂态数据处理与分析中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- GUI Xun. Application research of multi-core parallel and design pattern on massive transient data processing and analysis in power system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2009.
- [22] 孙金凤. 电力数据压缩传输及解压算法的研究与实现[D]. 北京:北京化工大学,2008.
- SUN Jinfeng. Study and implementation of electric power data compression,transmission and decompression algorithm[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2008.
- [23] 何正友,钱清泉,刘志刚. 一种基于优化小波基的电力系统故障暂态数据压缩方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(6):1-5.
- HE Zhengyou,QIAN Qingquan,LIU Zhigang. An electric power system fault transient data compression method based on optimal wavelet[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(6):1-5.

作者简介:

鲁晓帆(1986-),女,江西九江人,硕士研究生,研究方向为现代信号处理在电力系统中的应用(**E-mail**:luxiaofan1986@yahoo.com.cn);

刘志刚(1975-),男,河南巩义人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为现代信号处理在电力系统中的应用等;

吴峰(1984-),男,浙江金华人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析。

Parallel wavelet packet algorithm based on multi-core system and its application in power data compression

LU Xiaofan,LIU Zhigang,WU Feng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on the multi-core parallel technology, a parallel wavelet packet algorithm is developed in the Pthreads and the OpenMP parallel programming environment of PC with two-core system. The potential concurrency of serial algorithm is analyzed and the wavelet packet decomposition data are grouped and assigned to different threads for parallel processing on the basis of Pthreads. According to different reconstruction objects of wavelet packet, approximate reconstruction and detailed reconstruction are processed in parallel during reconstruction. The loop body is properly decomposed based on OpenMP and the nested and non-nested parallel wavelet packet algorithms are obtained, which are applied in the mass data compression of power system. The speed of parallel algorithm is nearly two times quicker than that of serial algorithm, significantly increasing the calculation speed of wavelet packet in the applications of power system and the compression efficiency of power system data.

Key words: parallelism; OpenMP; Pthreads; wavelet packet; data compression; electric power systems; data processing

(上接第 129 页 continued from page 129)

Self-tuning control based on improved genetic algorithm for main steam temperature of once-through boiler

FANG Yanjun,HU Wenkai

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A self-tuning control based on GA(Genetic Algorithm) is presented for the main steam temperature of ultra-supercritical unit with variable loads, which identifies the model parameters of controlled object. The method of population initialization and the structure of genetic operators are improved. The generalized minimum variance is employed to construct the controller and the calculating procedure of GA-based self-tuning control is designed. The simulative results of main steam temperature control for an ultra-supercritical unit show that, the proposed self-tuning control has quicker response and better anti-interference capability, meeting the demands of main steam temperature control for variable loads.

Key words: boilers; main steam temperature; genetic algorithms; generalized minimum variance; self-tuning control