

# 遗传算法在电石炉系统 PID 参数优化中的应用

Application of Genetic Algorithm in PID Parameters Optimization in CaC<sub>2</sub> Furnace System

张雪峰 王芳林 陈 龙

(西安电子科技大学机电工程学院,西安 710071)

**摘要:** 针对电石炉控制系统的特点,设计出一种最优 PID 控制器。该控制器以系统响应的超调量、上升时间及调节时间为性能指标,利用遗传算法通过对 PID 参数进行实数编码、选择合适的适应度函数、自适应的交叉概率和变异概率,对 PID 控制器的参数进行了优化,最终得到一组 PID 参数的最优值。对比仿真试验的结果表明,设计出的最优 PID 控制器性能优于常规的 PID 控制器。这种最优 PID 控制器用于电石炉控制系统中可达到良好的动态性能和鲁棒性能。

**关键词:** 遗传算法 参数优化 PID 控制器 电石炉

中图分类号: TP273+.1

文献标识码: A

**Abstract:** Aiming at the characteristics of the Calcium Carbide (CaC<sub>2</sub>) furnace control system, an optimal PID controller has been designed. By taking the overshoot, rise time, and setting time of system response as the performance indexes, and by means of the genetic algorithm with real number encoding, appropriate fitness function, adaptive crossover, and mutation probability, the PID parameters were optimized. Finally, a group of optimal PID parameters were obtained. In comparison with simulated experiments, the results show that the performance of the optimal PID controller is better than that of the conventional PID controller. The optimal PID controller offers excellent dynamic performance and robustness in CaC<sub>2</sub> furnace control system.

**Keywords:** Genetic algorithm Parameter optimization PID controller CaC<sub>2</sub> furnace

## 0 引言

PID 控制是连续系统控制理论中技术成熟、应用广泛的一种控制方式。其控制效果的好坏取决于参数的整定和优化。自 PID 控制被提出以来,控制器参数的整定方法就一直是人们研究的热点问题之一。1942 年 Ziegler-Nichols 方法<sup>[1]</sup>被提出,并得到了广泛的应用和改进。这种方法是根据系统的频域或时域响应曲线,测得相关参数,进而通过经验公式计算得到 PID 控制器参数,适用于参数的离线调整。该方法属于经验公式法,具有一定的鲁棒性。但只能适用于满足经验公式条件的对象,整定出的结果往往不是最优值,只是利用了较少的系统动态特性信息,所以得到的控制器性能具有局限性。

遗传算法是一种基于自然选择和基因遗传学原理的群体寻优搜索方法<sup>[2-3]</sup>。它通过适应度函数来决定寻优方向,对控制对象的先验知识要求少。同时,对于适应度函数,它既不要求连续,也不要求可导。因此在实际控制中是一种较为理想的 PID 参数整定方法。

本文利用遗传算法通过对参数的编码、选择合适的适应度函数以及交叉和变异率,对 PID 控制器的参

数进行了优化,设计出一种应用于电石炉系统的最优 PID 控制器,使其能达到良好的动静态性能。

## 1 基于遗传算法的 PID 参数优化

### 1.1 参数的确定及编码

离散的 PID 控制器可表示为:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{i=1}^k e(i) + k_d [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

取参数  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  为待优化的变量。先用试凑法确定使系统临界稳定的参数范围,然后对变量进行编码。由于 Hamming 悬崖的存在,二进制编码对于函数优化问题存在严重缺陷<sup>[4]</sup>。本文采用实数编码的遗传算法。初始种群的大小选为 30。

### 1.2 适应度函数的选取

在每一代种群中,将适应度较高的个体选择出来,根据适者生存原理,淘汰适应度较低的个体,以优化种群。

以电弧炉系统电流性能指标超调量  $\sigma$ 、上升时间  $t_r$  及调节时间  $t_s$  为基础,电流输出值的目标函数选用下面的形式:

$$J_l = w_1 \left( 1 - \frac{\sigma_m - \sigma}{\sigma_m} \right)^2 + w_2 \left( 1 - \frac{t_{rm} - t_r}{t_{rm}} \right)^2 + w_3 \left( 1 - \frac{t_{sm} - t_s}{t_{sm}} \right)^2 \quad (2)$$

式中： $\sigma_m$ 、 $t_{rm}$ 、 $t_{sm}$  分别为电石炉输出电流的超调量、上升时间和调节时间的给定最大值； $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  分别为其权系数，要求  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。在这三个性能指标中，较重要的是超调量，其次是上升时间和调节时间，所以在这里分别取  $w_1 = 0.6$ ， $w_2 = 0.3$ ， $w_3 = 0.1$ 。适应度函数取为：

$$F = J_m - J \quad (3)$$

式中： $J_m$  为每一代中的最大目标函数值。

### 1.3 交叉和变异

交叉是在遗传操作中，将新复制产生的个体以交叉率  $P_c$  选取进入匹配池，在匹配池中随机两两匹配，匹配的个体随机选取交叉位，采用两点交叉，从而产生新的个体，达到增大搜索空间的目的。 $P_c$  太大，会使适应值高的个体很快被破坏； $P_c$  太小，搜索会停滞不前。这里采用带有适应性的交叉率：

$$P_c = 0.9 - 0.3 \frac{t}{G} \quad (4)$$

式中： $t$  为当前遗传代数； $G$  为最大遗传代数。

变异是模仿生物的基因突变，以很小的变异率  $P_m$  将新个体进行变异，避免使进化过程在早期就陷入局部解而进入终止过程，以提高遗传算法的搜索效率和全局搜索能力。这里取  $P_m = 0.1$ 。

### 1.4 参数优化的流程

电石炉 PID 调节器参数遗传优化的流程如图 1 所示。用遗传算法对电石炉电极 PID 调节器参数整定时，首先产生一个初始种群，其个体总数用  $n$  表示。然后，利用选择、交叉和变异方法以及适应度函数的计算方法，根据图 1 就可以获得 PID 调节器最优的参数  $k_p^*$ 、 $k_i^*$ 、 $k_d^*$ 。

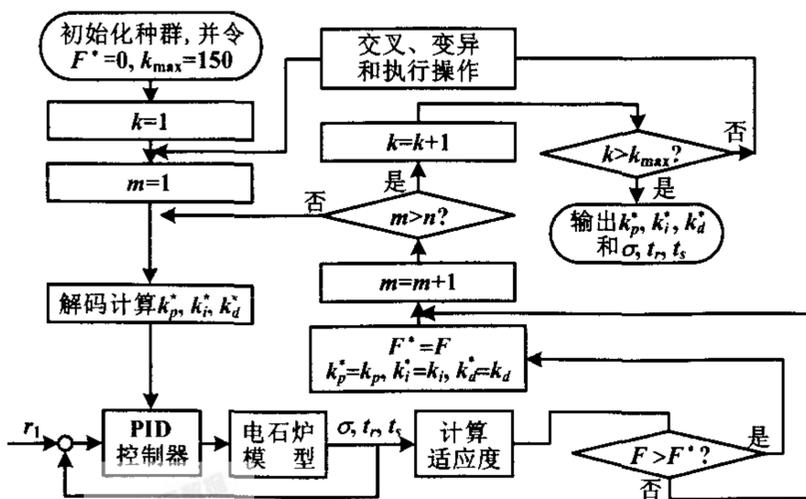


图 1 PID 参数遗传优化流程图

Fig. 1 Flowchart of GA optimization for PID parameters

## 2 仿真算例

### 2.1 控制模型

这里采用文献[5]中给出的一个电弧炉电极位置-电流模型，该模型由三个 MISO(多输入单输出)模型组成。这里只给出其中一相模型的表达式，具体形式如下：

$$I_1(k) = 1.069 I_1(k-1) - 0.147 I_1(k-2) - 1.055 h_1(k) + 1.491 h_1(k-1) - 0.446 h_1(k-2) + 0.203 h_2(k) - 0.211 h_2(k-1) - 0.818 h_3(k) + 1.169 h_3(k-1) - 0.361 h_3(k-2) \quad (5)$$

式中： $I_1(k)$  为三相电极中第 1 相电极的电流； $h_i(k)$  为第  $i$  ( $i=1,2,3$ ) 相电极的位置。

### 2.2 遗传优化结果

取最大遗传代数为 150 代，根据图 1 所示，并基于式(5)的模型在 Matlab 中编制相应的仿真程序，仿真计算得到的最优参数值为： $k_p^* = 0.394 1$ ， $k_i^* = 0.390 9$ ， $k_d^* = 0.016 2$ 。目标函数  $J$  的优化过程如图 2 所示。可以看出，经过大约 75 代以后，目标函数已经趋于稳定值。

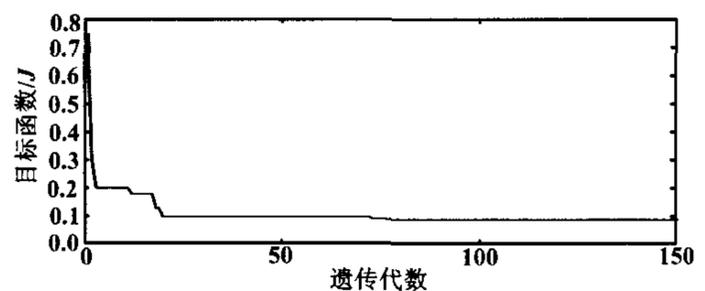


图 2 目标函数 J 的优化过程

Fig. 2 Optimization process of objective function J

### 2.3 系统仿真结果

为了比较常规 PID 控制与基于遗传算法的 PID 控制特性，仿真时还采用了一种基于经验法整定的 PID 控制。仿真时，对电石炉模型输入端加入单位阶跃，并在系统进入稳态后加入了一个持续 1 s 的脉冲扰动。电石炉系统电极电流的仿真输出响应如图 3 所示。图

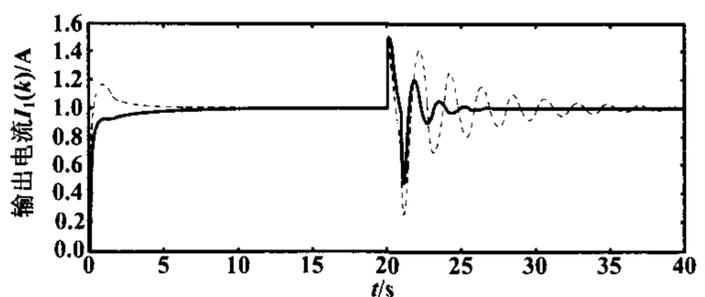


图 3 系统仿真结果

Fig. 3 Results of systematic simulation

(下转第 33 页)

PID 控制几乎不产生超调量,整个过渡过程更加平稳,且过渡时间也比常规 PID 控制短。总的来说,基于 BP 神经网络整定的 PID 控制的品质优于常规 PID 控制。说明基于 BP 神经网络整定的 PID 控制器能较好地解决相应快速性和稳定性的矛盾,适用于大延迟过程的控制。

### 3.2 75% 负荷时的仿真研究

在 75% 负荷时,保持各控制器的参数不变,仍为 100% 负荷时的数值。同样对仿真模型施加  $\theta_{sp} = 10^\circ\text{C}$  的阶跃变化,系统的响应曲线如图 4 所示。可以看出,基于 BP 神经网络整定的 PID 的控制系统的品质大大优于常规 PID 控制系统。比较图 3 和图 4 可知,对象动态特性大幅度变化时,基于 BP 神经网络整定的 PID 的控制系统不敏感,控制性能几乎没有变化。而常规

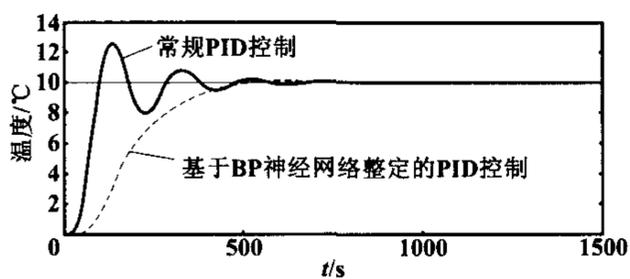


图 3 100% 负荷时的响应曲线

Fig. 3 The response curves at 100% load

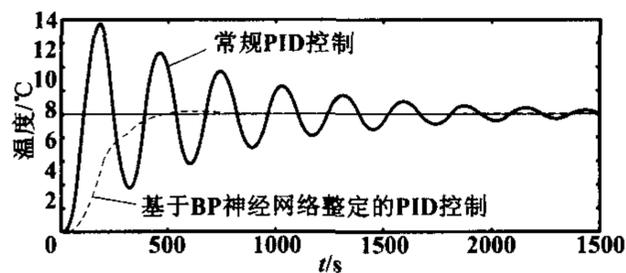


图 4 75% 负荷时的响应曲线

Fig. 4 The response curves at 75% load

### (上接第 30 页)

中实线所示为本文设计的基于遗传优化的最优 PID 控制响应,虚线为常规 PID 控制响应。

### 3 结束语

从图 3 的仿真结果中可以看出,本文提出的基于遗传算法设计出的最优 PID 控制器,从系统动态响应和稳定性方面以及系统的抗扰动能力,都具有优良的控制性能和鲁棒性。该方法可实际应用于电石炉控制系统的 PID 控制器的参数整定。

#### 参考文献

- 1 Ziegler J G, Nichols N B. Optimum settings for automatic controllers

PID 控制系统的控制品质明显变差,波动较大,过渡过程时间延长。说明相对于常规的 PID 控制,基于 BP 神经网络整定的 PID 控制表现出较强的自适应能力和鲁棒性。

### 4 结束语

火电厂锅炉过热汽温调节系统为大延迟、大惯性、时变性和非线性的被控对象,常规串级 PID 控制系统难以保证控制品质。该文提出了将 BP 神经网络和 PID 控制器相结合,利用 BP 网络的任意非线性逼近特性及很强的自学习能力,使得 PID 控制器具有参数自整定功能,弥补了常规 PID 控制在解决控制对象非线性、参数时变系统中的不足。该方法具有稳态精度高、过渡过程短、抗干扰性好、鲁棒性强、结构简单、适应性强的特点,是值得推广应用的。

#### 参考文献

- 1 易继锴,侯爱彬. 智能控制技术[M]. 北京:北京工业大学出版社,1999:102-107,130-137.
- 2 杨献勇. 热工过程自动控制[M]. 北京:清华大学出版社,2000:187-191.
- 3 范永胜,徐治皋,陈来九. 基于动态机理分析的锅炉过热汽温自适应模糊控制系统[J]. 中国电机工程学报,1997,17(1):23-28.
- 4 范伊波,巨林仓,胡勇,等. 基于自适应神经网络的过热汽温智能控制[J]. 动力工程,1998,18(2):7-10.
- 5 肖军,任挺进,李东海,等. 基于 PSD 算法的单神经元 PID 控制器在汽温控制中的应用[J]. 自动化仪表,2004,25(1):4-7.

修改稿收到日期:2006-06-21。

第一作者王万召,男,1972 年生,2005 年毕业于华北电力大学自动化系控制理论与控制工程专业,获硕士学位,工程师;主要从事火电厂热工自动控制系统方面的研究工作。

[J]. Trans. ASME,1942, 64:745-768.

- 2 王蕾,宋文忠. PID 控制[J]. 自动化仪表,2004, 25(4):1-6.
- 3 王伟,张晶涛,柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报,2000,26(5):347-355.
- 4 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 5 Anna Soffia Hauksdóttir. System identification of a three-phase submerged-arc ferrosilicon furnace[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(4):377-387.

修改稿收到日期:2006-08-04。

第一作者张雪峰,女,1977 年生,现为西安电子科技大学在读硕士研究生;主要研究方向为智能控制、机电一体化技术。