

# 基于实数型遗传算法的水轮机调节系统设计优化

徐 昕, 耿 清 华

(国电大渡河流域水电开发有限公司 国电大渡河检修安装有限公司, 四川 成都 610064)

**摘要:**遗传算法(GA)是一种模仿生物进化过程的随机全局搜索方法,它借鉴了生物界的自然选择和遗传学上的迭代自适应性。提出了一种基于实数型遗传算法的水轮机调节系统的PID参数优化设计,与常规PID整定方法相比,具有简便精确的特点,避免了根据传统方法整定不出最优参数,及单纯形法容易陷入局部最小值的缺点。用实数型遗传算法整定出来的PID参数,超调量小,时间迅速,具有良好的性能指标。

**关键词:**遗传算法;实数编码;PID参数优化;仿真实验;水轮机调节系统

中图分类号:TV734

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.17.021

PID控制算法简单,具有鲁棒性的特点,因而被广泛应用于工业控制系统设计中。水轮机调节系统是一个非线性、同时也是时变性的最小相位系统,具有一定的鲁棒性。对水轮机调速器一般采用PID或PI调节规律,而且需要对PID控制的比例系数 $K_p$ 、微分系数 $K_d$ 以及积分系数 $K_i$ 进行设计和整定。因此,要设计出理想的参数,会有很大的难度。

在经典遗传算法以及改进遗传算法中,大多采用的是二进制编码对PID的3个参数进行整定;然而二进制编码串较长,编码和解码在操作上就会浪费很多时间,并且码串过长也会降低算法的搜索效率。另外,因为水轮机调节系统是时变并且是非线性的,所以用实数编码会更加自然直观,而且计算精度也不会受到编码方式的影响<sup>[1-4]</sup>。

综上所述,本文通过引入实数编码,提出了基于实数型遗传算法的水轮机调节系统的设计优化方案,以着重解决二进制编码存在的时间精度问题。

## 1 常规水轮机调节系统

PID控制器是一种线性控制器,根据设定值 $r(t)$ 和实际输出值 $y(t)$ 构成控制偏差 $e(t) = y(t) - r(t)$ 。通过线性组合,将偏差的比例 $P$ 、积分 $I$ 和微分 $D$ 构成控制量,对被控对象进行控制,故称其为PID控制

器。其控制规律可表示为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

相应的传递函数为

$$G(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (2)$$

式中, $K_p$ 为比例系数, $K_i$ 为积分系数, $T_i$ 为积分时间常数, $T_d$ 为微分时间常数。其中,积分作用 $K_i$ 可以消除静差,提高控制精度,改善系统的静态特性;比例作用 $K_p$ 能对给定值与输出值间产生的偏差及时做出反应;微分作用 $K_d$ 用来减小超调量,使系统加速得到稳定,以改善系统的动态特性。通过调整 $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 就能够让系统准确、快速地趋于平稳,达到满意的控制效果。

随着自动控制理论的发展,PID控制器从原来的模拟PID发展到了数字PID。数字PID控制算法可分为位置式PID算法和增量式PID算法。

PID控制器为多目标函数,可以用以下公式对其进行描述,即

$$\begin{aligned} \min f(x) &= (\sigma(x), t(x)) \\ x &= (T_i, K_p, T_d) \\ x &\in \Omega \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $f(x)$ 为多目标函数PID的最优解; $\sigma$ 为超调量;

$t$  为调节时间。多目标函数超调量最小、调节时间最短的解即为该多目标函数的最优解。对于水轮机调节系统,不特别强调获取最优解,而是根据具体情况来寻求水轮机调节的满意解。因为满意解是满足设计指标要求的一个可行解。

## 2 基于实数型遗传算法的水轮机调节系统

### 2.1 遗传算法概述

遗传算法起源于生物进化论,是一种自适应搜索算法,也是一种迭代式算法。在求解过程中,该算法首先定义一个初始变量群体,一代代地寻找问题的最优解,直到满足收敛依据或预先设定的迭代次数为止。

遗传算法的模式主要包括编码、初始群体产生、遗传算子、适应度评价、遗传参数以及终止条件等要素。首先,是根据实际问题来确定编码形式和适应度评价函数等,然后再确定初始群体的大小,并对其适应度进行评价,利用选择、交叉和变异等算子产生下一代个体,如此循环反复直至满足收敛条件。图 1 所示是遗传算法的具体步骤。

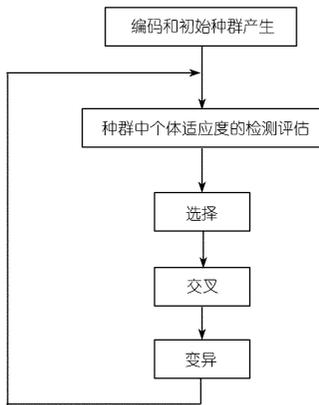


图 1 遗传算法步骤

### 2.2 遗传参数的确定

根据水轮机调速器调节参数的工作范围,确定调节参数  $K_p$  的取值范围为  $0 \sim 20$ ,  $K_i$  的取值范围为  $0 \sim 10$ ,  $K_d$  的取值范围为  $0 \sim 5$ ; 然后根据精度的标准要求,对其进行编码。在本文中采用的是实数型编码。

因为需要编程来实现各过程,所以确定由计算机随机产生初始种群。针对十进制编码而言,先产生  $0 \sim 1$  之间均分布的随机数,然后按下式产生初始种群的初值,即

$$X_0 = X_{\min} + \alpha \Delta x \quad (4)$$

式中,  $X_{\min}$  为水轮机调节系统各调节参数的下限值;  $\Delta x$  为水轮机调节系统各调节参数的变化范围;  $\alpha$  为  $[0, 1]$  区间的随机数。

一般说来,初始群体的大小会对遗传优化的最终

结果以及算法的执行效率产生影响。当初始群体大小  $N$  较小时,遗传算法的优化性能不好;如果  $N$  比较大的话,则更容易找到全局最优解,但是同时也就增加了每次迭代所需的时间,这样就会使收敛速度减慢。根据以往的经验,初始种群的取值范围  $N$  为  $20 \sim 100$ ,然而对于水轮机调节系统来说,考虑到其计算的复杂程度,将初始种群的大小  $N$  取为 30。

交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  对遗传算法的多样性和收敛性会产生影响,  $P_c$  和  $P_m$  过大会降低收敛速度,使整个过程变成纯粹的随机搜索,从而导致算法发散;如果  $P_c$  和  $P_m$  太小,又会使群体的更新程度不够,这样就容易陷入局部极值点。本文经试算,确定取  $P_c$  为 0.90,  $P_m$  为 0.033。

对于迭代终止条件的选择则比较灵活,可以根据具体情况而定。一般而言可选择当进化超过指定的代数,或当得到的解达到要求的满意程度,或搜索停滞时结束搜索过程。

### 2.3 适应度函数的确定

一般的寻优方法都是在约束条件下,可求出满足这个条件的一组参数,然后从该组参数中寻找一个最好的参数。主要从以下 3 方面来衡量一个控制系统的性能指标,即准确性、稳定性和快速性。上升时间反映着系统速度的快慢,上升时间越短,控制就进行得越快,表明系统的品质也就越好。

如果单纯追求水轮机调节系统的动态特性,得到的调节参数很可能使控制信号过大,在实际应用中,也会因水轮机调节系统中固有的饱和特性而导致系统不稳定。为了防止控制量过大,使控制效果更好,在目标函数中不仅加入了控制量的平方项,还加入了上升时间,即以控制量、误差和上升时间作为约束条件,选用下式作为参数选取的最优指标,即

$$J = \int_0^{\infty} [w_1 | e(t) | + w_2 u^2(t)] dt + w_3 t_u \Rightarrow \min \quad (5)$$

式中,  $e(t)$  为系统误差;  $u(t)$  为控制器输出;  $t_u$  为上升时间;  $w_1, w_2, w_3$  为权值。

为了避免超调,采用了惩罚功能,即一旦产生超调,则将超调量作为最优指标的一项,此时最优指标为

$$\text{若 } e(t) < 0 \quad J = \int_0^{\infty} [w_1 | e(t) | + w_2 u^2(t) + w_4 | e(t) |] dt + w_3 t_u \quad (6)$$

因为适应度函数同目标函数相关,所以目标函数确定以后,就取适应度函数  $f(x) = \frac{1}{J}$  进行参数寻优。

水轮机调节系统的最优控制参数也就是在满足约束条



$$G_g(S) = \frac{1}{9.2S + 1}$$

其中,  $T_y$  取 0.01, 在遗传算法中, 使用的样本个数为 30, 交叉概率和变异概率分别为  $P_c = 0.9$ ,  $P_m = 0.033$ 。根据水轮机调速器调节参数的工作范围, 确定调节参数  $K_p$  的取值范围为 0 ~ 20;  $K_i$  的取值范围为 0 ~ 10;  $K_d$  的取值范围为 0 ~ 5;  $w_1, w_2, w_3$  和  $w_4$  的取值分别为 0.999, 0.001, 2.0 和 100。

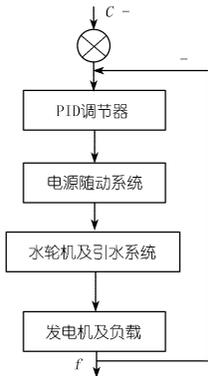


图 5 水轮机调节系统的原理框图

在 MATLAB 中, 所编写的遗传算法的源程序经过了 100 代的进化, 获得的优化参数如下:  $K_p$  为 5.083 1;  $K_i$  为 1.152 7;  $K_d$  为 0.543 3; 性能指标  $J$  为 23.07。PID 阶跃响应图和适应度函数值  $J$  的优化过程分别见图 6 和图 7。

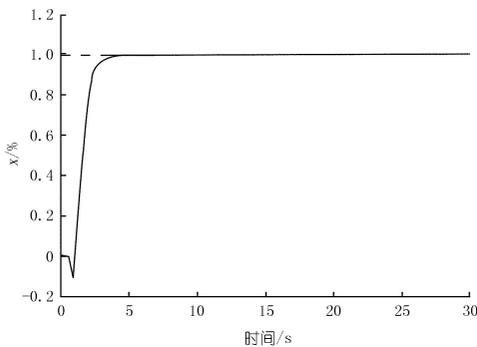


图 6 遗传算法 PID 阶跃响应

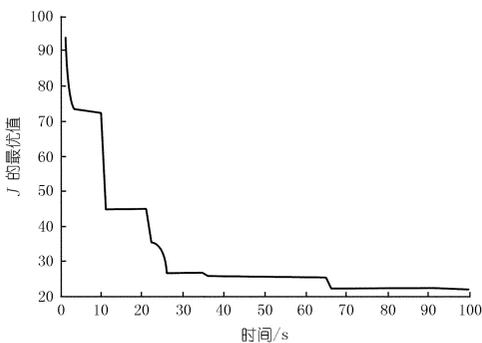


图 7 代价函数值  $J$  的优化过程

从图 6 和图 7 中可以看出, 遗传算法的超调量基

本上为 0, 整定时间大约为 6 s。根据仿真结果可以看出, 遗传算法的整定效果要明显优于传统的斯坦因公式 PID 的控制效果。

## 4 结语

在对水轮机调节系统进行建模之后, 利用 MATLAB 软件中的 Simulink 工具箱进行仿真计算。从仿真计算结果可以看出, 常规的 PID 控制作用下的水轮机调节系统具有比较大的超调量, 稳定时间比较长并且稳定后有误差, 虽然这些误差也是在允许的范围, 但总体来说控制效果并不十分理想。

由于水轮发电机组各个环节所具有的非线性特性, 水轮机传递系数随工况而改变的时变性, 以及随时都有可能发生的电力系统负荷扰动等因素的影响, 将使常规 PID 控制下的水轮机调节系统难以适应时时都在变化着的水轮机的运行工况。

为了解决这个问题, 引入了基于实数型遗传算法的水轮机调节系统, 并将其与常规的方法相结合, 以期达到更理想的控制效果。从仿真结果可以看出, 将两者相结合的控制方式能够获得满意的效果, 系统的超调量和稳定误差都几乎为 0, 稳定时间也只需要 6 s。可见, 基于实数型遗传算法的水轮机调节系统能使控制系统的调节过程平稳、调节品质更高。

随着电子计算机技术的进一步发展以及遗传算法理论的完善, 基于实数型遗传算法的水轮机调节系统将会越来越多地在实际生产中得到应用。

## 参考文献:

- [1] 龚崇权. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [2] 饶洪德. 基于遗传算法的水轮机调节系统 PID 参数优化整定[J]. 水利水电技术, 2005, (1).
- [3] 龚崇权. 基于遗传算法的水轮机调节系统最优参数整定[J]. 电力系统自动化, 2002, (15).
- [4] 丁寅磊. 基于遗传算法的 PID 控制器参数优化研究[D]. 保定: 华北电力大学(保定), 2008.

(编辑: 赵秋云)

(下转第 103 页)



- [16] 孙跃,胡津.金属腐蚀与控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003. (编辑:常汉生)
- [17] 大连工学院无机化学教研室.无机化学[M].北京:人民教育出版社,1978,507-511.

## Study on absorption dynamics and mechanism of sand - steel - slag to acidic Cr ( VI )

DONG Shuangkuai, ZHU Xinping, ZHANG Yuying, JIA Hongtao, HUANG Chunping

(College of Pratacultrual and Environment Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Taking the sand - steel - slag as an adsorbent, the process conditions and mechanisms of acidic Cr<sub>6+</sub> removal in waste water was studied. The results show that the optimal removal conditions are pH of 0.8 ~ 1.5, temperature of 20°C ~ 25°C, sand - steel - slag adsorbent of 5g and the initial waste water input of 150 ~ 200mL. Cr<sub>6+</sub> removal amount has a linear relationship with slag solution stewing time, the correlative coefficients of the intra - particle diffusion model, quasi - one rate equation, quasi - two rate equation, Langmuir and Freundlich isotherm model are greater, which is monolayer adsorption mode and has better adsorption. The mechanism analysis show that the adsorption process of sand - steel - slag to acidic Cr<sub>6+</sub> can be divided into 4 stages; reduction phase (lowering drug), hydration phase, precipitation phase, adsorption stage. The maximum adsorption capacity of sand - steel - slag is 45.872mg/g, accounting for a smaller proportion of sand - steel - slag, so it can be used to prepare mortar and concrete, etc. after adsorption.

**Key words:** steel - slag; Cr<sub>6+</sub>; process conditions; absorption dynamics; Cr(VI) wastewater

(上接第 86 页)

## Design optimization of turbine regulating system based on real coded genetic algorithm

XU Xin, GENG Qinghua

(Maintenance and Installation Co., Ltd., China Guodian Dadu River Hydropower Development Co., Ltd., Leshan 614900, China)

**Abstract:** Genetic algorithm is a stochastic global search method that simulates biological evolution and draws upon biological natural selection and genetic adaptive iteration. An optimized design of PID controller parameters of the turbine regulating system based on real coded genetic algorithm is proposed. Compared with the conventional PID parameter tuning methods, the real coded genetic algorithm is more convenient and accurate in that it overcomes the defects that conventional methods are unable to work out the optimal parameters and that the simplex algorithm could cause a local minimum. PID parameters tuning by real coded genetic algorithm has the advantages of small overshoot and high speed, which contributes to the good performance of the turbine regulating system.

**Key words:** genetic algorithm; real coding; optimization of PID parameters; simulation test; turbine regulating system

· 简讯 ·

## 《人民长江》杂志入选 2014 年版中文核心期刊

近日,《中文核心期刊要目总览》2014 年版编委会发布通知,由长江水利委员会主办的《人民长江》入编 2014 年版《中文核心期刊要目总览》,该书已由北京大学出版社出版。这是继

《人民长江》杂志 1992 年首次入选《中文核心期刊要目总览》以来,连续第 7 次入选。

(长江)