

用微粒群算法实现水轮机调节器参数的优化设计

刘 清

(南京师范大学 数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 目前水轮机调节系统 PID 参数整定一般都是根据经验公式或现场反复试验获取, 它往往不易获得最佳参数. 为了保证获得最优水轮机 PID 调节器参数, 本文研究了利用微粒群优化 (PSO) 算法进行参数优化设计的新方法. PSO 算法是一种新的仿生优化方法, 具有结构和运算简单的优点. 仿真试验结果表明, 用微粒群算法优化水轮机调节器参数, 可以获得满意的控制精度和效率. 与改进的遗传算法优化结果相比, 各项控制性能指标 (如调节时间、负调、超调量等) 都优于遗传算法整定的 PID 调节器.

[关键词] 微粒群优化, 水轮机, PID 调节器, 参数优化

[中图分类号] TP273 TP214 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2005) 03-0041-04

Optimization Design of Hydro Turbine Governor Parameters by PSO Algorithm

LU Qing

(School of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 21004, China)

Abstract In general, PID control algorithm remains the most popular approach to hydro turbine governor systems. To gain optimization parameters of hydro turbine PID governor, this paper interprets the approach of optimization designing that uses the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. PSO is a new evolutionary algorithm and is simple in structure and easy to operate. When parameters of hydro turbine PID governor are optimized by using PSO algorithm, the experiments show excellent results in term of control accuracy and effectiveness. The results are superior to the ones obtained by improved genetic algorithm in term of response time, output overshoot and undershoot for a step reference.

Key words particle swarm optimization, hydro turbine, PID governor, optimizing parameters

0 引言

PID 调节器由于结构简单、容易实现以及鲁棒性好等特点, 在目前工业控制中仍然占据着重要的地位. PID 调节器控制性能的好坏与调节器的参数整定有很大关系, 在调节系统组成已定的情况下, 参数优化对调节质量起着十分关键的作用. 目前我国投入运行的水轮机调速器仍多数采用 PD 调节规律, 能否选择到水轮机调节器的最优参数, 使系统具有优良的动态品质, 是保证电能质量、机组安全运行的一个非常重要的问题. 水轮机调速器参数优化常用的方法有: 梯度法、正交试验法、遗传算法等. 这些算法各有其优点, 但也存在明显的不足, 如: 采用梯度法必须是目标函数连续可导^[1]; 正交

试验法需要一定的实践经验对初始参数进行选择, 并且不能保证试验得到的参数就一定是最优的^[2]; 简单遗传算法虽然可以克服上述方法的缺点^[3], 但是, 简单遗传算法的某些参数如交叉率、变异率选择不当, 会对 PID 参数优化的精度产生不良影响. 虽然有一些改进遗传算法的应用^[4, 5], 但由于遗传算法要涉及到繁琐的编码解码过程以及较大的计算量, 所以参数优化的过程仍然显得比较复杂.

为此, 本文研究了采用微粒群算法对水轮机调节器参数优化的设计方法. 仿真试验结果表明, 采用微粒群算法对水轮机调节器参数进行优化设计, 可以获得满意的控制精度和效率.

收稿日期: 2005-03-25

作者简介: 刘清 (1962-), 博士, 副教授, 主要从事智能控制与现场总线测控系统的研究与开发. E-mail: Liuqing@njnu.edu.cn

1 问题描述

1.1 水轮机调节系统

水轮机调节系统是一个典型的时变、非最小相位系统,而且又是一个参数随工况点改变而变化的非线性系统.其被控对象由液压随动系统、水轮机

及引水系统、发电机和负载组成^[1],我国目前仍广泛采用 PID 调节规律对其进行控制.该系统单机带孤立负荷 PID 调节结构图如图 1 所示,其中: mt 为水轮机输出力矩; mg_0 为扰动或负载; f 为给定信号; x 为机组转速.

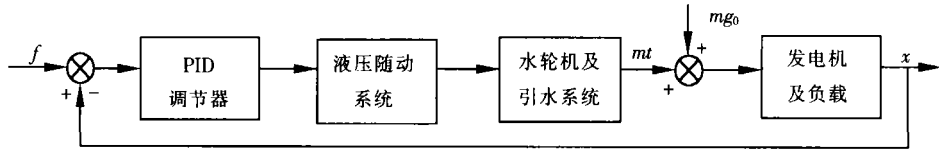


图 1 水轮机 PID 调节系统结构图

1.2 调节对象与目标

调节对象为某混流式水轮机发电机组,采用单机单引水系统,按刚性水锤小波动情况考虑,其传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{e_y - (e_{gy}e_h - e_{qh}e_y)T_w s}{1 + e_h T_w s}$$

液压随动系统的传递函数 $G_2(s)$ 和水轮发电机组的传递函数 $G_3(s)$ 为 $G_2(s) = \frac{1}{1 + T_y s}$ 和

$$G_3(s) = \frac{1}{T_a s + e_n}.$$

式中: e_y 为水轮机力矩对导叶开度传递系数; e_h 为水轮机力矩对水头的传递系数; e_{gy} 为水轮机流量对导叶开度传递系数; e_{qh} 为水轮机流量对水头的传递系数; T_w 为水流惯性时间常数; T_a 为机组惯性时间常数; T_y 为接力器反应时间; e_n 为机组综合自调节系数.

PID 调节器的传递函数 $C(s)$, 其表示形式为:

$$C(s) = K_p + K_i/s + K_d s \tag{1}$$

式中, K_p, K_i, K_d 分别为 PID 控制器的比例、积分、微分系数.

PID 参数优化的目标是寻找一组优化参数 $\theta = [K_p, K_i, K_d]$, 使得水轮机调节系统在快速响应的同时又满足超调量小、调节时间短等性能目标. 本文采用系统的调节时间 T_s 作为优化主目标, 以时间误差平方积分 (ISTE) 为辅助优化目标, 共同构成了目标性能评价函数 f_{object} 即使得:

$$f_{\text{object}} = m_0 \ln(T_s) \tag{2}$$

$$\text{且 } m_0 \ln(\text{ISTE}) = m_0 \ln \left[\int_0^T [e(\theta, t)]^2 dt \right] \tag{3}$$

成立, 即: 使得调节时间最短且随时间变化的误差平方最小.

2 微粒群优化算法 (PSO)

2.1 PSO 算法原理

PSO 算法起源于对简单社会的模拟, 最初设想是模拟对鸟群觅食的过程, 后来发现 PSO 是一种很好的优化工具. PSO 优化算法与其它进化算法相类似, 也是将寻优的参数组合成群体, 通过对环境的适应度来将群体中的个体向好的区域移动. 与其它进化算法不同, 在描述个体时, 将其看成是 D 维寻优搜索空间的一个没有体积的微粒 (点), 结合微粒的历史最佳位置和群体历史最佳位置信息, 以一定的速度向目标值逼近. 第 i 个微粒可以表示成 D 维向量, $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$, 微粒的速度表示成 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$, 这个微粒经历的最佳位置 (对应于最好的适应度) 表示为 $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]$, 也称为 P_{best} . 群体所有微粒经历的最好位置的索引号用 g 表示, 记为 P_g , 也称为 g_{best} . 第 i 个微粒从 n 代进化到 $n + 1$ 代, 通过下式进行更新:

$$v_{id}^{n+1} = w v_{id}^n + c_1 r_1 (p_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 r_2 (p_{gd}^n - x_{id}^n) \tag{4}$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \tag{5}$$

式中, w 表示惯性权重, 它使微粒保持运动惯性, 使其具有扩展搜索空间的趋势, 有助于新区域的搜索. c_1, c_2 均为正实数, 称为加速度常数, 它们表示将每个微粒推向 P_{best} 和 P_{best} 的统计加速度的权重. r_1, r_2 为在区间 $[0, 1]$ 变化的随机数.

2.2 PSO 算法流程

通过模拟鸟群的觅食过程, PSO 算法的计算流程可描述如下:

step 0 设置有关参数, 如种群规模 m , 惯性权重 w , 加速度常数 c_1, c_2 , 结束的条件等.

step 1 初始化群体中的微粒, 包括微粒的初始位置和初始速度.

step 2: 评价各微粒的适应度函数值 f_{fitness}

step 3: 对每个微粒, 将其适应度值与历史最好位置 P_{best} 相比较, 如果当前适应度值更优, 则用当前适应度值更新 P_{best}

step 4: 将每个微粒的适应度值与群体经历过的历史最佳位置 g_{best} 相比较, 如果当前群体中最好的适应度值较好, 则将其置为新的 g_{best} , 同时记录其索引号.

step 5: 根据算式 (4) 更新各微粒的位置和速度.

step 6: 计算优化性能指标, 如果达到结束条件, 则返回当前最佳微粒的结果, 算法结束; 否则返回 step2 继续下一循环.

2.3 基于 PSO 的 PID 参数整定目标函数的选择

利用 PSO 对 PID 控制器的参数进行优化整定, 其关键和难点在于目标函数的选择. 本文利用主目标和辅助目标相结合的方法来确定如 (3) 式所示的目标函数 f_{object} 是基于这样的考虑: 在调节时间 T_s 满足要求的情况下, ISTE 性能指标可能比较大, 这种情况下的系统响应也是不满足要求的, 因此在满足主目标稳定时间 T_s 的情况下, 用 ISTE 性能指标来约束目标函数 f_{object} . 此外, 在不同的控制器整定场合中, 可能要根据具体的问题来选择相应的优化目标函数. 在编程实现时, 目标函数 f_{object} 的计算过程为将当前可行解作为 PID 控制器的参数, 在实验时间内计算得到相应的性能指标.

3 仿真实验与结果

为验证本文提出的用 PSO 算法优化水轮机调节器参数的有效性, 对图 1 所示的控制系统进行了计算机仿真研究. 在仿真过程中, 为检测控制算法的鲁棒性, 选取了两种典型的工况进行仿真试验, 并与改进的遗传算法优化参数的结果进行了比较.

工况 1^[4]: $T_y = 0.3 \text{ s}$ $T_a = 6.0 \text{ s}$ $T_w = 1.6 \text{ s}$
 $e_n = 1.0$ $e_h = 1.46$ $e_y = 0.74$ $e_{qy} = 1.066$
 $e_{qh} = 0.491$ 系统传递函数为:

$$H_1(s) = \frac{-1.9088s + 0.74}{1.4141s^3 + 6.7493s^2 + 7.0859s + 1}$$

经过双线性变化离散后, 其对应的传递函数为:

$$H_1(Z) = \frac{(-1.008z^2 + 0.083z + 0.956) \times 10^{-3}}{z^3 - 2.819z^2 + 2.645z - 0.8262}$$

工况 2^[5]: $T_y = 0.1 \text{ s}$ $T_a = 6.0 \text{ s}$ $T_w = 1.5 \text{ s}$
 $e_n = 1.5$ $e_h = 1.5$ $e_y = 1.0$ $e_{qy} = 1.0$
 $e_{qh} = 0.5$ 传递函数为:

$$H_2(s) = \frac{-1.5s + 1}{0.6375s^3 + 7.338s^2 + 9.775s + 1.5}$$

经过双线性变化离散后, 其对应的传递函数为:

$$H_2(z) = \frac{(1.606z^2 + 0.238z + 1.402) \times 10^{-3}}{z^3 - 2.611z^2 + 2.243z - 0.631}$$

仿真实验中, PSO 参数取为: $w = 1.2 \sim 0.1$ 表示惯性权重从 1.2 逐渐线性衰减到 0.1; 加速度常数取为 $c_1 = 0.5$ $c_2 = 0.5$ 种群规模为 $m = 20$ 因本文针对 PID 控制器的 3 个参数寻优, 故取 $D = 3$ 仿真实验在 Matlab 6.1 环境中进行, 程序均采用 M 函数编写, 实验结果如下:

(1) 在工况 1 下, 采用正交交叉的遗传算法优化, 得到的 PID 参数为: $K_p = 2.157$ $K_i = 0.385$ $K_d = 1.836$ 而采用 PSO 算法优化, 得到的 PID 参数为: $K_p = 1.9569$ $K_i = 0.2842$ $K_d = 1.4484$ 图 2 为调节系统在频率扰动 5% 时的响应曲线. 从图 2 可以看出, 在调节时间没有变化的情况下, 系统的超调有较大的减少, 而负调量也有一定的降低.

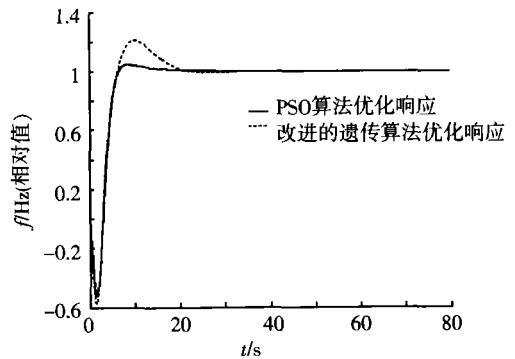


图 2 工况 1 仿真响应曲线

(2) 在工况 2 下, 采用自适应变化的变异概率和交叉概率, 遗传算法优化, 得到的 PID 参数为: $K_p = 2.44$ $K_i = 0.5410$ $K_d = 1.72$ 而采用 PSO 算法优化, 得到的 PID 参数为: $K_p = 2.7332$ $K_i = 0.4060$ $K_d = 1.2594$ 图 3 为调节系统在频率扰动 10% 时的响应曲线. 从图 3 可以看出, 在调节时间有一定缩短的情况下, 系统的超调有较大的减少.

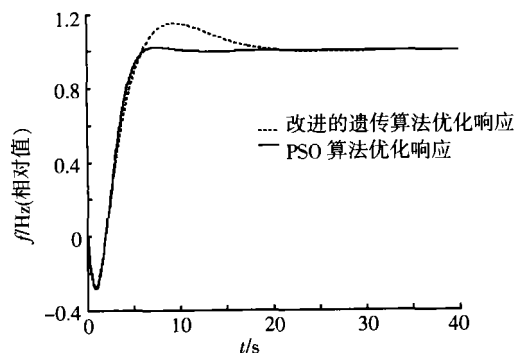


图 3 工况 2 仿真响应曲线

在参数优化的过程中,与 GA (遗传算法)类似,PSO 也是一种基于迭代的随机搜索算法,但两者存在以下不同: PSO 一般采取实数编码,而不需要像 GA 那样进行变量的二进制编码(或者采用针对实数的遗传操作)。PSO 算法迭代过程中不需要诸如交叉、变异等的遗传操作,而是根据微粒的速度来决定搜索路径。PSO 直接取目标函数本身作为适应度函数,根据目标函数值也就是适应值进行迭代搜索,而 GA 在求解极小值问题时需完成从目标函数到适应度函数的变换。PSO 需要调节的参数不多,且参数的选择对寻优结果影响不大^[6],尤其是算法在引入收敛因子^[7]后,完全可按经验值设置参数即可获得较好的收敛性。而用 GA 对优化问题进行寻优时,如何选取合适的选择率、交叉率、变异率和保留率等诸多控制参数,需要根据实际情况作多次测试和比较,算法的收敛效果在很大程度上取决于这些参数的选取。两者的信息共享机制不同,在遗传算法中各染色体间互相共享信息,因此整个种群比较均匀地向最优区域移动。而在 PSO 中,只有群体中的当前最优微粒向其它的微粒提供信息,属于单向的信息流动,整个搜索更新过程是跟随当前最优解的过程,与 GA 相比,大多数情况下所有微粒更快地收敛于最优解。

仿真实验表明,用 PSO 算法进行水轮机调节系统的 PID 参数优化,所用时间只有遗传算法的 1/3 另外,由于 PSO 算法的寻优结果优于遗传算法,所以,经过 PSO 算法优化参数的水轮机调节系统的动态响应优于采用遗传算法优化得到的结果。

4 结语

PSO 是一种新型仿生优化方法,本文将其与控制系统优化设计相结合,用于水轮机调节器参数的优化设计。从仿真实验结果看出,采用 PSO 优化方法对水轮机调节系统的 PID 参数进行优化整定,其效果要远好于采用改进的遗传算法优化整定的结果。在保证系统的调节时间基础上,超调有较大的减少,且参数优化的时间大大缩短,所以,针对水轮机这种参数随工况点而变化的系统,其实用性较强。

[参考文献]

- [1] 沈祖诒. 水轮机调节系统分析 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1991. 157-193
- [2] 金波, 朱世强. 用正交试验法整定 PID 控制器参数 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(6): 682-683
- [3] 龚崇权, 蔡维由. 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, 26(15): 57-59
- [4] 廖忠, 沈祖诒. 基于正交交叉操作的遗传算法及在水轮机调速器参数优化中的应用 [J]. 大电机技术, 2003(5): 61-64
- [5] 南海鹏, 王涛, 等. 基于改进遗传算法的水轮机调速器参数优化 [J]. 水利学报, 2002, 33(10): 57-61
- [6] Ayed Saman, Imtiaz Ahmad, Sabah Almadani. Particle swarm optimization for task assignment problem [J]. Microprocessors and Microsystems, 2002, 22(10): 363-371
- [7] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Recent approach to global optimization problems through Particle Swarm Optimization [J]. Neural Computing, 2002, 1(2): 235-306

[责任编辑: 刘健]