

遗传算法在水电机组调速器 PID 参数优化中的应用

孟安波¹, 叶鲁卿¹, 殷 豪², 梁宏柱¹, 傅 闯¹, 程远楚¹

(1. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华北水利水电学院 动力系, 河南 郑州 450008)

摘要: 水轮发电控制是一个复杂的动态过程, 特别是对大型机组, 控制策略和优化算法的选取对机组的性能尤为重要. 为了获取不同工况下水轮发电机组调速器的优化参数, 首先建立了一种机组的非线性全数字仿真模型. 结合调节系统的特点, 提出了一种新的反映系统综合性能指标的适应度函数, 利用遗传算法对自适应变参数 PID 调速器的 3 个参数 b_1 , T_0 , T_n 进行了优化. 具体实施优化过程中, 采用了 C++ Builder 编制遗传算法主程序; 使用了 Matlab 中的 Simulink 工具箱建立机组仿真模型, 交互接口通过 Matlab 中的引擎 Engine 来实现. 仿真实验表明: 与正交实验法寻优结果相比较, 在机组的不同运行状态、不同工况下遗传算法都能获得更为理想的寻优效果. 同时, 该优化方法已经应用于某巨型电站的调速器中.

关键词: 遗传算法; 正交实验法; 自适应变参数 PID 调速器; 非线性全数字仿真模型

中图分类号: TV75 **文献标识码:** A

Application of genetic algorithm in adaptive governor with variable PID parameters

MENG An-bo¹, YE Lu-qing¹, YIN Hao², LIANG Hong-zhu¹, FU Chuang¹, CHENG Yuan-chu¹

(1. School of Hydropower & Digitalization Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China;

(2. Department of Power Engineering, North China Institute of Water Conservation and Hydroelectric Power, Zhengzhou Henan 450008, China)

Abstract: The hydraulic generating control, especially for the giant generating unit, is a complex and dynamic process. The performance of hydraulic generating unit depends mostly on how to identify the appropriate control strategy and optimization algorithm of the adaptive control parameters. A full digital nonlinear model for the governing system was first built for obtaining the PID control parameters. A new fitness function, which reflects the integrated performance index of hydroelectric regulation system, was created and applied to genetic algorithm for optimizing the control parameters of this kind of adaptive governor with variable PID parameters. The whole control algorithms are mainly composed of two parts: the main programming of genetic algorithm was realized by C++ Builder, the model of hydraulic generating unit was built by the Simulink tool box in Matlab and their interactive interface was implemented through the engine provided by Matlab. The simulation results show that, compared with the traditional orthogonal method, the genetic algorithm is more effective in any operating state and any set point and the results have now been applied to a huge hydropower plant.

Key words: genetic algorithm; orthogonal method; adaptive governor with variable PID parameters; nonlinear full digital simulation model

1 引言(Introduction)

长期以来, 传统的水电机组调速器的控制模式都是采用线性定常参数 PID 调节, 一般只设置一套或者两套 PID 参数. 由于水电调速系统具有非线性、时变、非最小相位的特点, 不仅系统参数多变, 其结构亦有变化. 特别是对于如三峡水电站这样的巨型机组而言, 若以固定 PID 参数应用于水电机组整个控制域, 很明显无法获取全工作域的最优调节.

近年来, 在水电控制领域, 尽管出现了以模糊控制、神经网络控制等智能控制为基础的许多先进控制策略^[1,2], 但是, 大多处于理论研究阶段, 离实际应用还有一定的距离. 对水电机组而言, 选择的控制策略应在保证机组在整个工作域内具有良好的动态品质的前提下, 算法尽量简单, 实时性好. 为此, 本文在控制策略上采用了适应式变参数 PID 控制策略^[3,4]. 其主要思想就是: 随着工况点(水头和出力)

的变化,相应改变调速器PID参数 b_i, T_d, T_n (其中 b_i 为暂态转差系数、 T_d 为缓冲时间常数、 T_n 为加速度时间常数),以获取全工作域的最优性能.为满足实时性要求,还必须对各工况点对应的PID参数进行离线的优化整定.因而,建立起符合实际的机组模型并选择一种合适的优化算法是上述控制策略实现的关键所在.

常见的用于调速器参数优化的算法有正交试验法、梯度法、单纯性法等,虽然各有优点,但同时也存在着明显的不足.正交实验法对初始参数依赖性强,且试验误差大;梯度法需要目标函数连续可导;单纯性法容易陷入局部最小.由于遗传算法对优化对象的数学模型、初始参数、变量个数等都没有特殊限制,因而能有效克服上述传统优化方法的诸多不足.因此,本文对自适应变参数PID的优化采用了遗传算法,具体实施优化过程中,采用了C++ Builder编制遗传算法程序,使用了Matlab中的Simulink工具箱建立机组调速系统的全数字仿真模型,交互接口通过Matlab中的引擎Engine来实现.仿真结果表明:与正交实验法相比,遗传算法不仅有效克服了陷入局部极小值的可能,而且寻优效率高,具有很强的鲁棒性.

2 遗传算法的基本思想和特点 (Basic idea and characteristics of genetic algorithm)

遗传算法(GA)的基本思想是基于Darwin的进化论和Mendel的遗传学说^[5].遗传算法将代表问题的求解表示成染色体(chromosome),从而构成称之为种群(population)的群染色体.然后将它们置于问题的环境中,根据适者生存的原则,从中选择出适应环境的染色体,进行复制(selection),即再生,通过交换(crossover)、变异(mutation)两种基因操作算子产生出更能适应环境的种群,这样一代代不断进化,最后收敛到一个最适应环境的个体上,从而求得问题的最优解.

与传统搜索方法相比,遗传算法具有以下特点:

- 1) 遗传算法处理的是待优化参数的编码,而非参数本身;
- 2) 遗传算法使用的复制、交叉、变异3个算子都是随机操作,而非确定性规则;
- 3) 遗传算法不要求导或其他辅助知识,而只需要影响搜索方向的目标函数和相应的适应度函数,因而有极强的鲁棒性和广泛的适应性;

数,因而有极强的鲁棒性和广泛的适应性;

4) 遗传算法采用种群的方式组织搜索,因而可同时搜索解空间的多个区域,并相互交流信息.虽然每次只执行了与种群规模population成比例的计算,但实质上进行了大约 $O(\text{population}^3)$ 次的有效搜索.

3 自适应变参数PID调节的遗传算法实现 (Realization of the GA in adaptive governor with variable parameters)

3.1 遗传算法的程序流程 (Flow chart of GA)

由于C++ Builder具有快速强大的编译器及完善的各种应用程序接口,因此本文选择C++ Builder作为遗传算法实现的编程语言.图1是结合某水轮机调节系统实例给出的遗传算法流程框图,程序流程图中的参数 $p_crossover, p_mutation, generations, population$ 分别表示GA的交叉概率、变异概率、繁殖代数数和种群规模.

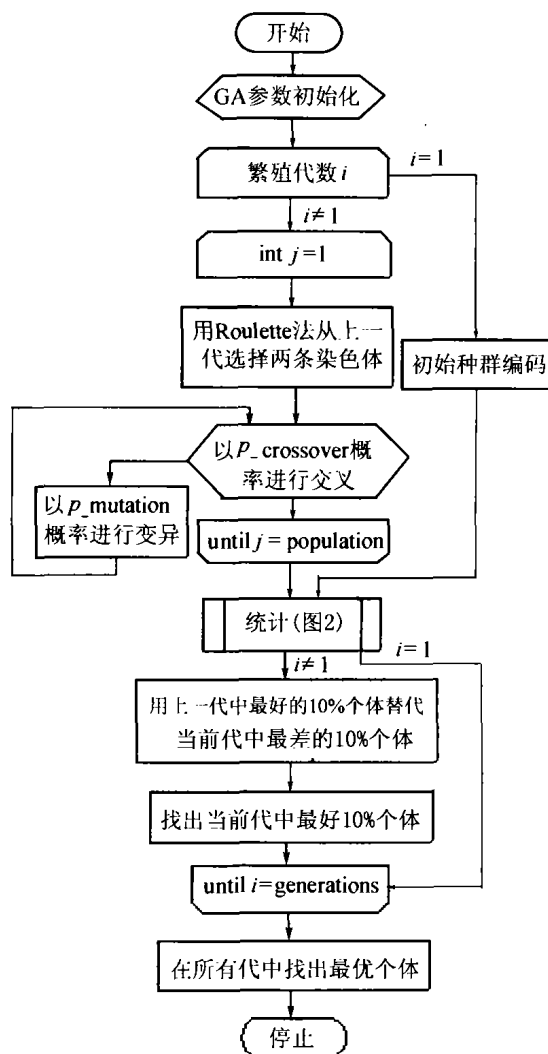


图1 遗传算法主程序流程图

Fig. 1 Flow chart in the main GA program

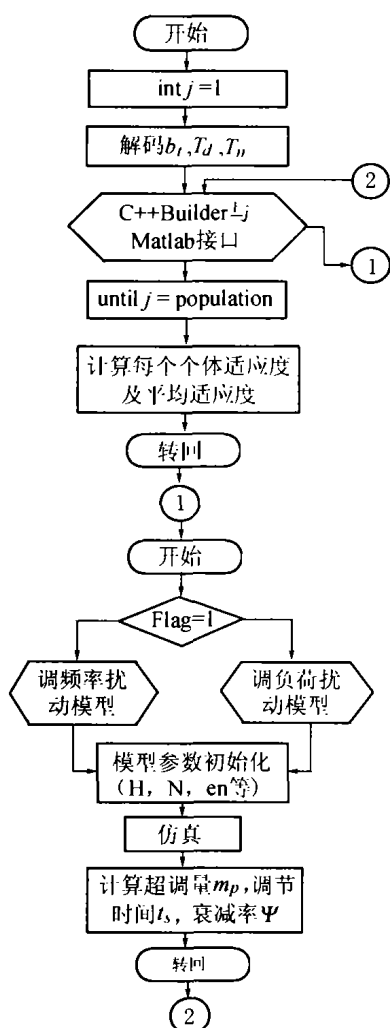


图2 统计和C++ Builder与Matlab接口子程序
Fig. 2 Flow chart of the subroutine Statistics and socket between C++ Builder and Matlab

3.2 遗传算法分析(Analysis of GA)

1) 初始参数.

由于自适应参数PID要求水轮机调节系统在不同工况下都要有一组相应的最佳PID参数,所以初始化参数很多,主要包括遗传算法控制参数、机组运行工况参数、机组运行状态参数和调节系统的特有参数.其中控制参数主要有种群规模(population)、染色体长度($l_chromosome$)、繁殖代数(generations)、交叉概率($p_crossover$)、变异概率($p_mutation$);机组运行工况参数为水头 H 和出力 N ;机组运行状态参数为表征空载、负载的特征参数;调节系统特有参数为机组惯性时间常数 T_a ,水流惯性时间常数 T_w ,机组综合自调节系数 e_n 等.

2) 初始种群.

自适应参数PID调速器需要优化的参数有3个,即暂态转差系数 b_t ,缓冲时间常数 T_d ,加速度时间常数 T_n ,尽管遗传算法对它们的初始值有限

制,但作者经过多次实验发现:如果随机产生初始种群,将只有极少数个体使得调节系统稳定,绝大多数个体将使系统变得发散.为了解决这个问题,减小遗传算法的搜索空间,可以根据先验知识对其确定搜索空间,对于缺乏先验知识的电站,可由斯坦因经验公式

$$\begin{cases} b_t = \frac{1.5 T_w}{T_a}, \\ T_d = 3 T_w, \\ T_n = 0.5 T_w \end{cases} \quad (1)$$

初步确定一个基准点,然后分别向左右两边展开,形成遗传算法的搜索空间.本文采用的另一个策略是:由于相邻工况点的PID参数最优值是逐步变化的,故下一个工况点的初始种群可由上一个相邻工况点得出的最优值左右展开获取.实践证明:这样选择的初始种群大大提高了遗传算法的搜寻能力.

3) 编码.

本文采用二进制编码,根据精度要求,每个参数可用10位二进制位表示,所以,表达3个参数 b_t , T_d , T_n 的染色体最终由30位二进制位串构成.

4) 解码.

解码时,首先把每条染色体均匀截开,根据每个参数的搜索范围分别进行解码,其解码公式如下:

$$\text{decode}_i = \min_i + \frac{\text{bin}_i}{2^p - 1} (\max_i - \min_i), \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

其中: p 为每个参数的编码长度(本文取 $p = 10$), $\min_i$, $\max_i$ 分别为 b_t , T_d , T_n 搜索空间内的最小值和最大值, bin_i 是对应的二进制整数.

5) 适应度函数的选择.

适应度函数用以评价群体中每个个体的性能,遗传算法就是根据适应度决定各个个体在下一代中生存的概率,对水轮机调节系统而言,优化PID参数的目标就是使得在各个工况下频率或负荷扰动时,反映系统性能指标的超调量 m_p 最小和调节时间 t_s 最短以及衰减率 Ψ 最大.很明显,这是一个多变量、多目标的组合优化问题.由于各个目标相互影响,相互制约,因此,合适选择一种反映调节系统综合性能指标的适应度函数尤为关键.由于传统上给出的性能指标要么只能单方面反映某个指标,要么没有考虑过渡过程的波动情况,因此使用传统性能指标很难达到理想效果.对此,本文针对水轮机调节系统多目标函数提出了一种新的反映综合性能指标的适应度函数.

一般来讲,评价调节系统性能的目标函数主要有3个:

$$f_1(b_1, T_d, T_n) = m_p, \quad (3)$$

$$f_2(b_1, T_d, T_n) = t_s, \quad (4)$$

$$f_3(b_1, T_d, T_n) = \Psi. \quad (5)$$

式(3)~(5)中的 f_1, f_2, f_3 分别表示超调量 m_p 、调节时间 t_s 和衰减率 Ψ 在PID参数下的函数.对应指标,即约束条件为

$$m_p < T_1, t_s < T_2, \Psi > 0. \quad (6)$$

$$F(b_1, T_d, T_n) = \begin{cases} \theta, \\ K_1 \left(1 - \frac{m_p}{T_1}\right) + K_2 \left(1 - \frac{t_s}{T_2}\right), \\ K_\Psi \left[K_1 \left(1 - \frac{m_p}{T_1}\right) + K_2 \left(1 - \frac{t_s}{T_2}\right) \right], \end{cases} \quad m_p < T_1 \text{ and } t_s < T_2 \text{ and } 0 < \Psi < 75\%.$$

现对上述建立的适应度函数作进一步分析:

情况1 当 $m_p \geq T_1$ 或 $t_s \geq T_2$ 或 $\Psi \leq 0$ 时.

这种情况表明:要么超调量太大,要么调节时间太长,要么系统不收敛.因此无论哪种情况,都说明该个体极差,故适应度应取一极小的数,以保证其在下一代选择中以极大的概率被淘汰.本文取 $\epsilon = 0.0001$.

情况2 当 $m_p < T_1$ 且 $t_s < T_2$ 且 $75\% \leq \Psi \leq 1$ 时.

由于 $75\% \leq \Psi \leq 1$,说明扰动后系统衰减很大,振荡较轻微,这时只需关心超调量和调节时间而不考虑衰减率.由此建立起的适应度函数

$$K_1 \left(1 - \frac{m_p}{T_1}\right) + K_2 \left(1 - \frac{t_s}{T_2}\right)$$

反映了超调量和调节时间综合性能指标.其中 K_2 本文称为 t_s 的强化因子, K_1 称为 m_p 的弱化因子,它们反映了对调节时间 t_s 和超调量 m_p 的重视程度.经过多次实验,发现:两个约束条件中超调量比调节时间更容易得到满足.因此适应度函数应体现这一点,使得 t_s 一旦满足要求,个体的适应度应相应变得大一些,从而使该个体对应的二进制位串获得更大的繁殖机会,这样就保护了那些 t_s 性能好的位串.根据经验,本例中 K_2 取为3, K_1 取为1.最后的仿真也证明了这种策略的有效性.仔细观察情况2下的适应度函数,还发现两点:一是超调量 m_p 和调节时间 t_s 愈小,其适应度愈大;二是该适应度函数有效地消除了 t_s 物理量单位,使得整个适应度函数变成了一个无量纲的纯数,避免了由于时间单位的不同引起的混淆.

式(6)中的 T_1, T_2 分别表示 m_p 和 t_s 的约束值,可根据实际情况灵活确定. $\Psi > 0$ 表示系统衰减, $\Psi \leq 0$ 表示系统等幅振荡或发散,这种情况当然是不允许的.另外,当 Ψ 超过75%时,系统衰减幅度很大,此时可不考虑该性能指标;相反,则必须加以考虑,以避免波动次数超标.

由于遗传算法要求从目标函数向适应度函数映射需要满足两条原则:一是适应度函数必须非负;二是目标函数的优化方向对应适应度函数的增大方向.为此本文建立起的适应度函数可表示为

$$\begin{aligned} m_p &\geq T_1 \text{ or } t_s \geq T_2 \text{ or } \Psi \leq 0, \\ m_p &< T_1 \text{ and } t_s < T_2 \text{ and } 75\% \leq \Psi \leq 1, \end{aligned} \quad (7)$$

情况3 当 $m_p < T_1$ 且 $t_s < T_2$ 且 $0 < \Psi < 75\%$ 时.

适应度函数在情况2下增加了一个反映系统衰减的折扣系数取 K_Ψ ,取

$$K_\Psi = e^{\Psi-1}. \quad (8)$$

其中衰减率 Ψ 是指响应曲线经过一个周期峰值衰减的百分数,实际上它和波动次数反映了响应曲线的同一种性能.当 $0 < \Psi < 75\%$,说明过渡过程系统衰减较小,振荡较大,这时除了考虑超调量和调节时间,还必须对衰减率加以考虑.由式(8)可见,随着衰减率的增大,折扣系数 K_Ψ 呈现出指数上升.其值的范围满足 $e^{-1} < K_\Psi < e^{-0.25}$.

从以上分析可知,整个适应度函数充分反映了3个指标的综合性能.由于随着超调量 m_p 和调节时间 t_s 减小以及衰减率 Ψ 增大,其适应度愈大,这也很好地满足了目标函数的优化方向对应适应度函数的增大方向的原则,最后的仿真结果也证明了该适应度函数的有效性.

6) 复制操作.

为了防止上一代中已经搜索到的最优结果丢失,本文把上一代群体中适应度最大的10%不参加复制、交叉、变异3种操作,而直接进入下一代群体.另外90%由3种遗传算子产生,具体产生的方法用轮盘赌选择法.

7) 交叉操作与变异操作.

在遗传算法中,交叉概率 $p_{\text{crossover}}$ 和变异概率 p_{mutation} 的选取非常重要,直接影响算法的收敛性.交叉概率越大,产生新个体的机会越大,搜索效率越高,但取得过大,则搜索到的较好个体可能会

机组惯性时间常数 $T_a = 9.863$ s, 水流惯性时间常数 $T_w = 2.6329$ s, 机组综合自调节系数 e_n (空载频率扰动和全甩负荷时 $e_n = 0.05$, 负荷扰动时 $e_n = 0.45$)。遗传算法用到的控制参数: 种群规模 $\text{population} = 60$, 染色体长度 $l_{\text{chromosome}} = 30$, 繁殖代数 $\text{generations} = 30$, 交叉概率 $p_{\text{crossover}} = 0.85$, 变异概率 $p_{\text{mutation}} = 0.02$ 。要求优化出的 PID 参数 b_1, T_d, T_n 在任何工况下都应保证调节系统有的优良品质。在本仿真试验中, 对 m_p, t_s 的计算, 本文采用的是通用的国际标准。就 m_p 而言, 是指响应曲线第一次越过稳态值而达到峰值时, 超越部分的幅值与稳态值之比, 当空载频率扰动时, 稳态值取频率扰动量, 而负荷扰动与全甩负荷时取基准频率 50 Hz; t_s 是指从扰动开始进入允许误差带的时间, 在空载和负荷扰动时, 本文取其绝对值为 0.075 Hz, 而全甩负荷时取 0.5 Hz。

限于篇幅, 下面仅给出几个典型的工况点在空载、负载和全甩负荷下的扰动响应曲线。另外, 仿真曲线中还给出了用正交实验法得出的相应曲线, 其中曲线 1 代表遗传算法, 曲线 2 代表正交实验法。

1) 空载和甩全负荷。

由于在同一水头下, 甩全负荷和空载工况使用同一套 PID 参数, 因此, 仅需优化出相应的空载 PID 参数即可。另外, 在甩全负荷时, 机组的仿真模型还必须接入导叶两段关闭模块。图 6, 图 7 分别表示 81 m 水头下空载频率扰动曲线和甩全负荷的过渡过程曲线。其中

遗传算法的寻优结果: $b_1 = 0.232, T_d = 1.856, T_n = 0.786$ 。空载时 $m_p = 14\%, t_s = 8.82$; 全甩负荷时 $m_p = 46.78\%, t_s = 31.68$ s;

正交实验法优化结果: $b_1 = 0.4, T_d = 3.6, T_n = 0.4$ 。空载时 $m_p = 15.5\%, t_s = 12.3$; 全甩负荷时 $m_p = 48.82\%, t_s = 36.44$ s。

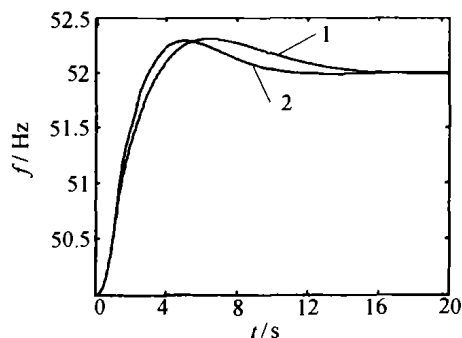


图 6 81 m 水头空载 + 2 Hz 的频率扰动曲线
Fig. 6 Frequency curve under the condition of 81 m head and no load with +2 Hz disturbance

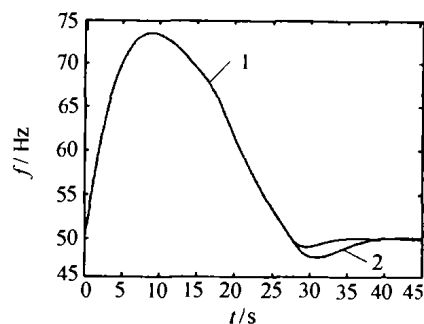


图 7 81 m 水头甩全负荷过渡过程曲线
Fig. 7 Frequency curve under the condition of full load rejection

2) 负荷扰动。

a) 出力 $N = 30\% N_r$, 水头 $H = 61$ m 且负荷扰动 - 10% 时 (见图 8)。

遗传算法优化结果: $b_1 = 0.164, T_d = 2.52, T_n = 0.461, m_p = 1.193\%, t_s = 4.14$ s;

正交实验法优化结果: $b_1 = 0.2, T_d = 3.6, T_n = 0.4, m_p = 1.268\%, t_s = 7$ s。

b) 当出力 $N = 10\% N_r$, 水头 $H = 81$ m, 且负荷扰动 - 10% 时 (见图 9)。

遗传算法优化结果: $b_1 = 0.102, T_d = 1.022, T_n = 0.286, m_p = 0.334\%, t_s = 2.04$ s;

正交实验法优化结果: $b_1 = 0.22, T_d = 2.8, T_n = 0.2, m_p = 0.804\%, t_s = 6.72$ s。

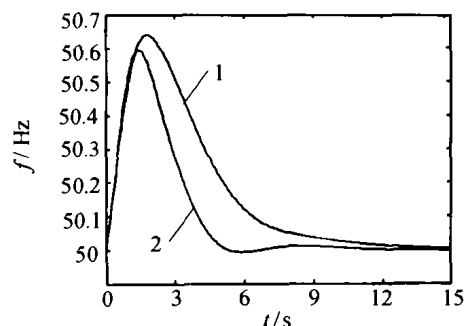


图 8 $H = 61$ m, $N = 30\% N_r$ 时甩 10% 的负荷扰动曲线
Fig. 8 Frequency curve under the condition of 61 m head and 30% initial load with -10% disturbance

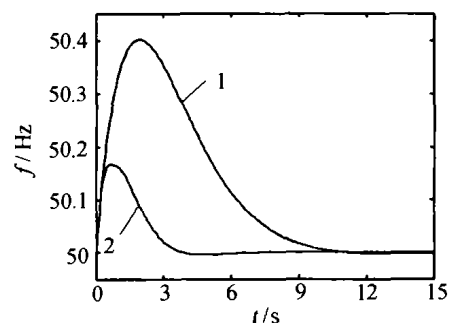


图 9 $H = 81$ m, $N = 10\% N_r$ 时甩 10% 的负荷扰动曲线
Fig. 9 Frequency curve under the condition of 81 m head and 10% initial load with -10% disturbance

5 结论(Conclusion)

就水电控制系统而言,传统的性能指标运用于遗传算法效果并不太理想,经常会出现超调量、调节时间满足要求,而波动次数超标的情况,本文提出的适应度函数充分反映了系统的综合性能,并有效地解决了上述问题.从仿真结果曲线上可以看出:遗传算法在各个运行状态下的每个工况点都能得到满意的结果,其寻优能力明显优于正交实验法,显示出了良好的适应性和鲁棒性.相信随着对遗传算法进一步研究,必将进一步推动遗传算法在水电控制系统中的广泛应用.

参考文献(References):

- [1] JING Lei, YE Luqing. An intelligent discontinuous control strategy for hydroelectric generating unit [J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 1998, 13(1): 84 - 89.
- [2] 张建明. 模糊控制器在水轮机调节系统中的应用[J]. 大电机技术, 1993, 8(4): 56 - 61.
(ZHANG Jianming. Application of fuzzy controller in hydro-electric regulating system [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 1993, 8(4): 51 - 61.)
- [3] YE Luqing. Microprocessor-based adaptive governor with variable PID parameters for hydroelectric generating unit [C] // *Mini-and Micro-computers and Their Applications*. Bari, Italy: University of Bari Press, 1984, (6): 122 - 129.
- [4] YE Luqing, WEI Shouping, LI Zhaozhui, et al. An intelligent self-improving strategy and its microprocessor-based implementation to a hydro-turbine governor [J]. *Canadian J of Electrical and Computer Engineering*, 1990, 15(4): 130 - 138.
- [5] WANG Q J. Using genetic algorithms to optimize model parameters [J]. *Environmental Modeling and Software with Environment Data News*, 1997, 12(1): 27 - 34.

作者简介:

孟安波 (1971 —), 男, 华中科技大学博士研究生, 目前主要研究方向为水电站建模、仿真、优化及现代控制策略等, E-mail: meng-an-bo@sohu.com;

叶鲁卿 (1935 —), 男, 华中科技大学博士生导师, 教授, 目前主要研究方向为水电机组现代控制策略, 微机调速器, 控制系统可靠性分析, 智能控制-维护-管理集成系统等;

殷豪 (1972 —), 女, 华北水利水电学院动力系讲师, 1999 年研究生毕业于华北水利水电学院水利水电工程专业, 目前主要研究方向为水电站计算机监控;

梁宏柱 (1977 —), 男, 2003 年研究生毕业于华中科技大学获电力系统及其自动化专业, 目前主要研究方向为水电机组智能控制策略及其应用;

傅闯 (1973 —), 男, 2003 年于华中科技大学获系统集成与分析专业博士学位, 目前主要研究方向为智能控制-维护-管理系统(ICMMS)及其在水电厂中的应用;

程远楚 (1962 —), 男, 武汉大学动力系硕士生导师, 副教授, 2002 年于华中科技大学获水利水电工程专业博士学位, 目前主要研究方向为水电机组的控制与仿真.