

# 基于量子遗传算法的水轮机调速器 PID 参数优化

张 海 丽, 张 宏 立

(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:**水轮机调速器 PID 的参数整定对水轮发电机组安全可靠运行具有重要作用,并直接影响电力系统向用户供电的质量及可靠性。为改善水轮发电机组的动态调节品质,利用量子遗传算法对水轮机调速器 PID 参数实施优化,并将量子遗传算法与传统遗传算法的计算结果进行了比较。仿真结果表明,量子遗传算法(QGA)不但提高了全局的搜寻能力,而且还避免了早熟收敛的问题,有效地解决了传统遗传算法中海明悬崖、计算精度等问题,为水轮机调速器 PID 参数优化研究提供了新的途径。

**关键词:**水轮机调速器;量子遗传算法;遗传算法;PID 控制;参数优化

**中图分类号:**TV734.1 **文献标志码:**A

水轮机调速器是水轮机控制系统的重要设备,而水轮机参数的整定直接关系到水轮机调节系统的稳定运行及调节品质,进而会影响到电能质量。随着超高压远距离输电的大规模互联电力系统的日益发展,高水头大容量水轮机组和容量抽水蓄能机组的出现,对水轮机调节系统的调节品质提出了更高的要求,从而对调速器 PID 参数的优化设计也提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。

以往,对水轮机调速器的参数优化通常采用的方法一般有梯度法、单纯形法、正交试验法等。这些方法各有优点,同时也存在明显的缺陷。譬如,梯度法要求目标函数连续可导;而单纯形法,对于在变量较多,且目标函数形态比较复杂时,其寻优效率不高;正交试验法则需有一定的试验经验,对参数的初始值具有依赖性。

本文应用量子旋转门更新个体的量子遗传算法作为调节参数空间寻优方法,对应不同的工况选出不同的参数,使系统随时运行在最优或次最优状态。该方法克服了上述常用优化方法中的缺点,有效地消除了对参数初值的依赖性,不仅不会陷入局部极值点,且寻优效率也得到大大提高,改善了收敛性,而且具有较强的鲁棒性及稳定性,是一种较好的参数寻优方法。

## 1 水轮机 PID 调速系统

水轮机调速系统是一个包含水力、机械、电气的复杂控制系统,受控对象具有非最小相位、变结构变参数、非线性等特性,这会给动态模型的建立和系统分析带来困难。调速器的作用是根据负荷的变化,不断地调节机组的有功功率输出,使机组的转速(频率)维持在规定范围内,以保证电能的质量和系统的安全。目前,广泛采用的水轮发电机组调速器并联 PID 控制规律结构<sup>[2]</sup>如图 1 所示。

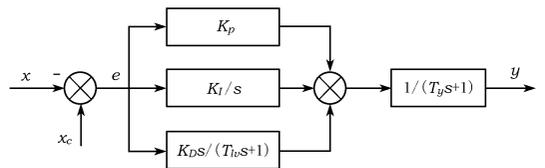


图 1 具有并联 PID 控制规律的调速器

图 1 中,  $x, y$  表示机组转速的相对值和导叶主接力器行程变化的相对值;  $x_c$  为机组转速的控制指令;  $e$  为机组转速相对值与机组转速控制信号形成的转速误差信号;  $T_y$  为导叶接力器响应时间常数;  $K_p, K_I, K_D$  分别为比例、积分和微分增益;  $T_D$  为实际微分环节的时间常数;  $s$  为拉氏算子。

收稿日期:2013-05-05

基金项目:自治区研究生科研创新项目资助(XJGR12013033)

作者简介:张海丽,女,硕士研究生,主要从事电气工程方面的研究。E-mail:425287215@qq.com

并联 PID 调速器的数学模型为:  $u(t) = K_p(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$ 。位置型数字 PID 与模拟并联 PID 相似,将位置型数字写微分方程改写为差分方程,即可得到离散化的数字 PID 表达式:

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

式中,  $K_p = k_p; K_i = k_i T; K_D = k_d / T; T$  为采样周期,其中,  $e(k), e(k-1)$  分别为第  $k$  次和第  $k-1$  次采样周期的输入偏差;  $u(k)$  为第  $k$  次采样周期位置型数字 PID 算式的输出数字量<sup>[3]</sup>。

## 2 量子遗传算法的 PID 参数优化

### 2.1 量子遗传算法简介

量子遗传算法是量子计算与遗传算法相结合的算法。它以量子计算的一些概念和理论为基础,用量子比特编码表示个体,用量子门实现个体的调整,更新种群完成进化搜索,具有种群规模小但不影响算法的性能;同时,兼有收敛速度快和全局寻优能力强等特点,是一种十分高效的并行算法<sup>[4]</sup>。

#### 2.1.1 量子遗传算法编码

在量子遗传算法中,采用基于量子位的编码方式。一个量子位可由其概率幅定义为  $\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$ ,同理,  $m$  个量子位可定义为  $\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \dots & \alpha_m \\ \beta & \beta_2 & \dots & \beta_m \end{bmatrix}$ ,其中,  $|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1, i = 1, 2, \dots, m$ 。这种描述的优点在于可以表达任意量子叠加态。由于量子系统能够描述叠加态,因此,与传统的进化算法相比,基于量子位编码的进化算法具有更好的种群多样性<sup>[5]</sup>。当  $|\alpha_i|^2$  或  $|\beta_i|^2$  趋近于 0 或 1 时,多样性将逐渐消失,量子染色体即会收敛到一个确定态。

#### 2.1.2 量子旋转门

在量子计算中,通过对量子位状态实施一系列的酉变换,即可实现逻辑变换功能。在一定的时间间隔内,实现逻辑变换的量子装置称为量子门。量子门是在物理上实现量子计算的基础。量子门通过对量子比特实施一种么正变换,来控制量子态的演化和传递,进而实现种群的进化。在实际应用中,根据不同的要求选择不同的量子门,最常用的量子门是量子旋转门。

$$|\varphi'\rangle = R|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \theta) \\ \sin(\varphi + \theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  是选择角度。QGA 是一种概率搜索算法,只是其个体表示具有量子比特的形式,而在量子遗传算法中,量子门操作等效于一般遗传算法中的选择、交叉、变异的操作。量子旋转门的调整策略见表 1。

表 1 量子旋转门调整策略 ( $\theta_i$ )

$x_i$	$b_i$	$f(x) \geq f(b)$	$\Delta\theta_i$	$s(\alpha_i\beta_i)$			
				$\alpha_i\beta_i > 0$	$\alpha_i\beta_i < 0$	$\alpha_i = 0$	
0	0	False	0	0	0	0	0
0	0	True	0	0	0	0	0
0	1	False	0	0	0	0	0
0	1	True	$0.05\pi$	-1	+1	$\pm 1$	0
1	0	False	$0.01\pi$	-1	+1	$\pm 1$	0
1	0	True	$0.025\pi$	+1	-1	0	$\pm 1$
1	1	False	$0.005\pi$	+1	-1	0	$\pm 1$
1	1	True	$0.025\pi$	+1	-1	0	$\pm 1$

表 1 中,  $f(x)$  是目标函数;  $s(\alpha_i\beta_i)$  是  $\theta_i$  的符号;  $b_i$  和  $x_i$  分别是最优解和当前解中的  $i$  个值。例如,当  $f(x) \geq f(b), x_i = 1, b_i = 0$  时,可将  $\Delta\theta_i$  设置为  $0.025\pi$ ,而  $s(\alpha_i\beta_i)$  可依  $\alpha_i\beta_i$  的具体情况分别设置 +1、-1 或 0,以增大量子态  $|1\rangle$  的概率幅。 $\Delta\theta_i$  的值直接影响到收敛速度,但如果取值过大,就容易引起早熟收敛。 $s(\alpha_i\beta_i)$  的符号决定了收敛到全局最优解的方向。

### 2.2 基于 QGA 的 PID 参数优化

本文的仿真对象为某混流式水轮发电机组,是将水轮机和电机单管的引水系统结合起来<sup>[7]</sup>。

机械液压系统的传递函数为

$$G_J = \frac{1}{0.02s^2 + 0.2s + 1} \quad (3)$$

引水系统和水轮机模块的传递函数为

$$G_s = \frac{-3s + 1}{1.5s + 1} \quad (4)$$

发电机模块的传递函数为

$$G_f = \frac{1}{8s + 2} \quad (5)$$

对象传递函数为

$$G_0 = \frac{-3s + 1}{0.2s^4 + 13.24s^3 + 13.04s^2 + 8.25s + 2.4} \quad (6)$$

以利用 QGA 优化水轮机调速器 PID 控制为例,参数步骤流程<sup>[8]</sup>:

(1) 种群初始化。将全部  $n$  条染色体的  $2mn$  个概率幅都初始化为  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ,  $K_p, K_i, K_d$  参数可能的解所出现的概率相同。它表示在  $t = 0$  代,每条染色体以相同的概率  $\frac{1}{\sqrt{2^m}}$  处于可能状态的线性叠加态之中。

(2) 测试 (collapse) 初始化的各个个体 ( $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ), 得到确定的各个解。

(3) 对各确定解进行适应度评估。采用不同的评价函数意味着对控制过程的侧重点不同, PID 参数整定问题即是求评价函数最优值的问题。

(4) 记录最优个体和对应的适应度 (以最优个体作为下一代的进化目标)。

(5) 判断  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  参数是否为最优解, 若满足最优解则退出, 否则继续计算。

(6) 根据不满足最优解的值, 继续对种群所产生的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  实施测量, 得到确定的各个解。

(7) 通过评价函数计算各个个体的适应度值。

(8) 运用量子旋转门 (Qgate) 更新  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  染色体的种群。染色体更新的伪码程序如下<sup>[4]</sup>:

Precedure update (q)

Beginning i ← 0

While (i < m) do

Begin i ← i + 1

Determine  $\theta_i$  with the lookup table

Obtain  $(\bar{\alpha}_i, \bar{\beta}_i)$  as:  $[\bar{\alpha}_i, \bar{\beta}_i]^T = U(\theta_i)[\alpha_i,$

$\beta_i]^T$

End

$q \leftarrow \bar{q}$

End

(9) 记录最优个体 ( $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ) 和对应的适应度, 并且以图表和数据的形式显示出优化后的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 。GA 与 QGA 优化操作对比情况如表 2 所示。

(10) 将迭代次数  $t$  加 1, 返回步骤 6。

表 2 GA 与 QGA 优化操作比较

项目	QGA	GA
初始化	随机产生种群	$ \varphi_{q_i}^0\rangle = \sum_{k=1}^{2m} \frac{1}{\sqrt{2^m}}  s_k\rangle$
解码	需解码公式	直接生成二进制解集
种群更新	选择、交叉、变异	量子旋转门

### 3 计算机仿真实验与结果

水轮机调节系统由调速器和调节对象组成, 调速器包括 PID 调节器和电液随动系统 2 个部分<sup>[9]</sup>; 调节对象包括引水系统、水轮机、发电机及其所在的电网等。水轮机调节系统的原理如图 2 所示<sup>[10]</sup>。

混流式水轮发电机组中每一环节的传递函数如 2.2 节所述。在 Simulink 中, 根据所选模型参数搭建系统框图, 通过 Matlab 编程对水轮机调节系统进行仿真计算; 经过 100 代进化, GA 及 QGA 所整定后的 PID

阶跃响应如图 3 所示, 所得到的优化参数及指标性能如表 3 所示。

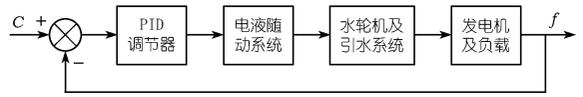


图 2 水轮机调节系统原理

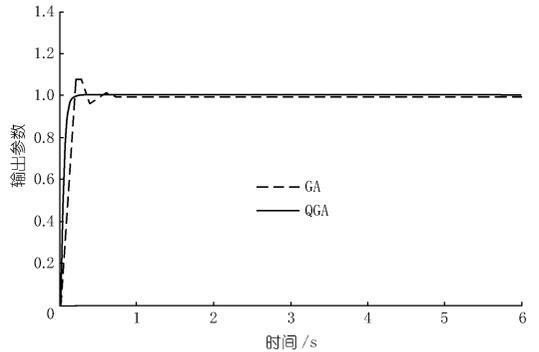


图 3 整定后的 PID 阶跃响应

表 3 GA 和 QGA 优化的结果

优化方法	性能指标					运行时间/s	
	$K_p$	$K_i$	$K_d$	$M_p/\%$	$t_s/s$		fitness
GA	7.2312	0.6214	0.2047	0.096	0.73	0.0307	296
QGA	9.3132	0.5594	0.5713	0	0.15	0.1483	12

如图 3 所示, QGA 比 GA 的阶跃响应速度更快, 鲁棒性更强, 稳定性也更好。表 3 中, 给出了用于水轮机调速器 PID 参数优化的两种不同算法的比较结果。可以看出, QGA 的各项性能指标均优于 GA, QGA 实现了无超调优化, 调节时间比 GA 大约快 5 倍; 在运行时间方面, 2 种算法都是并行算法, 迭代次数一定, QGA 的运行速度是 GA 的 30 倍, 体现出 QGA 的高效性。

### 4 结语

目前, 水轮机调速系统一般采用 PID 控制, 而控制参数的整定多是根据经验公式或现场反复试验获取, 往往不易获得最佳参数。本文采用量子遗传算法整定水轮机调速系统 PID 最优参数调节, 避免了采用传统遗传算法容易陷入局部最优值的缺陷。本文的创新点在于将 QGA 中量子旋转门的 PID 参数种群用于水轮机调速器 PID 参数进行更新优化, 避免过早进入局部最优, 水轮机调速器 PID 的参数整定, 对水轮发电机组安全可靠地运行具有相对重要的作用。仿真结果表明, QGA 所整定的水轮机调速器的 PID 调节参数性能指标良好, 过渡过程平滑快速、稳定准确, 这对水轮机调节系统的稳定运行及调节品质起到了极大的作用, 从而可以使电能质量得以提高。

- sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1986, 112(8): 804 - 820.
- [7] AL Wahab R M, EI - Kedrah M A. Using fibers to reduce tension cracks and shrink/swell in compacted clay. Geoenvironment 2000 [J]. Geotechnical Special Publication, ASCE, 1995, 46: 791 - 805.
- [8] M H Maher, Y C HO. Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(8): 1381 - 1393.
- [9] 徐远杰, 王观琪, 李健. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan - Chang 本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1032 - 1036.
- [10] 张欣, 丁秀丽, 李术才. ABAQUS 有限元分析软件中 Duncan - Chang 模型的二次开发[J]. 长江科学院院报, 2005, 4(22): 45 - 51.

(编辑: 郑毅)

## Triaxial test and numerical analysis on fiber reinforced laterite clay

ZHANG Jinli<sup>1,2</sup>, YUAN Man<sup>1,2</sup>, JIANG Zhengguo<sup>3</sup>, YANG Qing<sup>1,2</sup>, LIU Dawei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Guangdong Provincial Comprehensive Transportation Survey & design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510115, China)

**Abstract:** Triaxial compressive tests were carried out on fiber reinforced laterite clay that contains various fiber contents and lengths. It was observed that increasing of fiber lengths and contents increases compressive strength and absorbed strain energy and the curves of stress - strain show a segmented feature at a certain strain level. The stress - strain curves of fiber reinforced laterite clay could be expressed by the combination of hyperbola and straight lines, and the parameters of stress - strain curves were obtained by linear and nonlinear fitting. The three dimensional calculation model of triaxial tests was established by ABAQUS software. Based on the test cases, a large quantity of calculation was carried out for the model. There was a good consistency between the results of numerical calculations and experimental results, verifying the correctness of the proposed stress - strain relation.

**Key words:** polypropylene fiber; laterite clay; triaxial test; model of hyperbola - straight line; landfill

(上接第 46 页)

### 参考文献:

- [1] 沈祖诒. 水轮机调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [2] Han K H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem[C] // Evolutionary Computation, 2000. Proceedings of the 2000 Congress on. IEEE, 2000, (2): 1354 - 1360.
- [3] 沈祖诒. 水轮机调节系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [4] 史峰, 王辉, 郁磊. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2011.
- [5] 李士勇, 李盼池. 量子计算与量子优化算法[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2009.
- [6] Wozniak L, Collier F, Foster J. Digital simulation of an impuletur - bine; the bradley lake project[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1991, 6(1): 39 - 46.
- [7] 孙美凤, 尚华, 陆靖滨. 水轮机调节系统可视化仿真模型研究[J]. 人民长江, 2012, 43(1): 83 - 86.
- [8] 万星, 李伟. 基于自适应遗传算法的 PID 调速系统参数优化[J]. 水力发电, 2009, 35(3).
- [9] 李建新, 柳利军. 一种基于遗传算法的 PID 优化控制策略[J]. 现代电子技术, 2005.
- [10] 李琪飞, 李仁年. 水轮机 PID 调速器最近参数整定及寻优方法[J]. 排灌机械, 2006, 24(4): 33 - 36.

(编辑: 赵秋云)

## Optimization of PID parameters of turbine governor based on quantum genetic algorithm

ZHANG Haili, ZHANG Hongli

(Electrical Engineering College, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** PID parameter tuning of turbine governor plays a significant role in the safe and reliable operation of hydro - generating sets, and exerts a direct impact on the quality and reliability of power supply to consumers. In order to improve the quality of dynamic adjustment of generator sets, the PID parameters are optimized by using quantum genetic algorithm (QGA), the calculation results of QGA and the traditional genetic algorithm are also compared. The simulation results show that, not only does the QGA improve the capability of global search, but also it avoids the problem of premature convergence. The QGA can solve effectively the problems of the Hamming cliff, calculating accuracy and other issues appeared in the traditional genetic algorithm, and can provide a new way for the optimization of PID parameters of turbine governor.

**Key words:** turbine governor; quantum genetic algorithm; genetic algorithm; PID control; parameter optimization