

网络出版时间:2013-08-26 17:53

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130826.1753.028.html>

考虑非线性的水轮机调节系统协同进化 模糊 PID 仿真

吴罗长,余向阳,南海鹏,李郁侠

(西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

[摘要] **【目的】**针对水轮机调节系统常规 PID 控制存在的适应性不足问题,采用模糊 PID 控制作为水轮机调节系统的基本控制策略,为水轮机调节系统的有效控制提供支持。**【方法】**采用基于模型综合特性曲线的非线性水轮机模型,建立水轮机调节系统模糊 PID 控制仿真模型,通过协同进化算法同时优化模糊 PID 控制的 3 个比例因子和模糊规则,并以实例验证所建水轮机调节系统的控制性能。**【结果】**通过对不同工况点的优化得出一组适合于全工况的通用有效模糊规则。与常规 PID 相比,协同进化模糊 PID 仿真控制使调节时间缩短了 28%,超调量减少了 49%,振荡次数减少了 50%。**【结论】**引入了非线性水轮机模型,使得系统建模更加合理,仿真结果更加真实可信。采用协同进化模糊 PID 的水轮机调节系统的控制性能优于常规 PID 控制,该控制策略能使系统良好地适应运行工况的变化。

[关键词] 水轮机调节系统;非线性模型;协同进化算法;模糊 PID

[中图分类号] TV734.4

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2013)09-0229-06

Simulation of coevolutionary fuzzy-PID in nonlinear hydro-turbine regulating system

WU Luo-chang, YU Xiang-yang, NAN Hai-peng, LI Yu-xia

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】** To handle the lack of adaptability in PID control, using the fuzzy-PID as hydro-turbine regulating system basic control strategy was introduced to hydro-turbine governor system. **【Method】** Nonlinear hydro-turbine model based on the model-synthetical characteristic curve was applied to model the hydro-turbine governor system fuzzy-PID simulation model, and the parameters and fuzzy rules were optimized by co-evolutionary algorithm and verified the control performance of the hydro-turbine regulating systems by examples. **【Result】** The universal effective fuzzy rules suitable for hydro-turbine regulatory system was obtained through different operation point fuzzy-PID control optimal rules by co-evolutionary algorithm. The regulating time reduced by 28%, the overshoot decreased by 49% and the number of oscillations was cut down by 50%. **【Conclusion】** The introduction of a nonlinear model of hydro-turbine made system modeling more rational and the simulation results were more authentic. Coevolutionary fuzzy-PID control performance of the hydro-turbine regulatory system was superior to conventional PID control and this control strategy would enable the regulatory system to well adapt to changes in the operating conditions.

[收稿日期] 2013-03-15

[基金项目] 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20096118110012)

[作者简介] 吴罗长(1978—),男,福建周宁人,讲师,在读博士,主要从事水力发电过程控制研究。E-mail: wulcle@139.com

Key words: hydro-turbine regulating system; nonlinear model; coevolutionary algorithm; fuzzy-PID

水轮机调节系统常规定参数的 PID 控制很难满足现代电力系统的要求,这就要求人们研究出参数能根据工况变化而自动调整的智能 PID 控制^[1-2]。模糊控制由于其控制算法运算简单、鲁棒性强,对处理水轮机调节系统这样具有非线性、时变特性系统的控制问题具有良好的控制效果^[3-6]。采用模糊 PID 控制作为水轮机调节系统的基本控制策略,是解决水轮机调节系统控制问题最具发展前景的方向之一^[7-8]。

许多学者在进行研究时,对水轮机调节系统的仿真模型主要采用线性化建模^[3-9],这种方式在应用于较小扰动、额定工况点附近等条件下的仿真时,尚可达到要求。但众所周知,水轮机的工况经常发生变化,特别是当系统发生较大扰动时,水轮机的非线性特性尤其明显,很显然线性模型已经不能满足此时的仿真要求,原有的模型必须进行改进^[10]。

本研究采用基于模型综合特性曲线的非线性水轮机模型^[11],使得仿真分析结果更加真实可信;通过协同进化算法对不同工况下的模糊 PID 比例因子和模糊规则进行寻优^[8,12-13],使水轮机调节系统能够良好地适应运行工况的变化;通过仿真研究,旨在为建立水轮机调节系统模糊 PID 控制的通用规则提供参考。

1 水轮机调节系统数学模型

水轮机调节系统是由压力引水管道、水轮机、发电机和调速器等单元组成的复杂非线性反馈控制系统^[14]。本研究的对象是混流式水轮机调节系统,水轮机采用非线性数学模型,引水系统为单机单管,压力管道中按刚性水击考虑,发电机作为具有一定惯性的旋转刚体考虑。水轮机调节系统原理框图如图 1 所示。

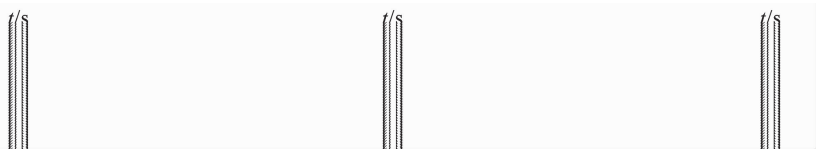


图 1 水轮机调节系统原理框图

Fig. 1 Diagram of hydro-turbine regulating system

本研究主要考虑水轮机环节的非线性因素,其余环节按传统方式处理。图 1 中,将其余各环节传递函数离散化,结合水轮机非线性模型,构成系统仿真模型。针对水轮机环节的非线性,目前较通用的方法仍然是以模型特性试验曲线为基础,采用水轮机特性数表来描述水轮机的非线性特性^[11]。

利用流量特性数表 $Q_{11} = f_1(n_{11}, \alpha)$ (Q_{11} 为单位流量, n_{11} 为转速, α 为导叶开度) 和力矩特性数表 $M_{11} = f_2(n_{11}, \alpha)$ (M_{11} 为单位力矩), 以及导叶开度与

接力器关系数表 $\alpha = f(Y)$ (Y 为接力器行程), 就可以对水轮机的非线性特性进行描述。描述水轮机非线性数学模型的框图如图 2 所示。图 2 中, y, x, h, m, q 分别为接力器行程、转速、水头、力矩、流量的偏差相对值; Y, n, H, M, Q 分别为对应的全量值; n_r, H_r, M_r, Q_r 均为额定工况值; Y_0, n_0, H_0, M_0, Q_0 均为初始工况值; Y_m 为导叶接力器最大行程; D_1 为转轮直径。



图 2 基于模型综合特性曲线的非线性水轮机模型框图

Fig. 2 Diagram of nonlinear hydro-turbine based on model synthetical characteristics curves

对于一维数组 $\alpha=f(Y)$ 采用一元插值;对于二维数组 $Q_{11}=f_1(n_{11},\alpha)$ 、 $M_{11}=f_2(n_{11},\alpha)$ 采用二元插值。本研究采用拉格朗日公式插值法。

一般情况下,水轮机制造厂家提供的水轮机模型综合曲线都只给出高效率区内的特性曲线。但在生产实际中,根据电力系统或水利枢纽综合利用的要求,水轮机可能会由一种状态经过过渡过程进入另一种状态运行,比如水轮机甩负荷过程、机组正常开停机过程、机组增减负荷过程、机组进入及摆脱飞逸的过程等。

在上述水力机组的过渡过程中,水轮机将通过非常宽阔的工况区域,这些区域远远超过水轮机制造厂家所提供的模型综合特性曲线区域。因此,为了分析这些过渡过程,就需要有完整的水轮机特性曲线,在现有的模型综合特性曲线的基础上适当地补充特性曲线,尤其是小开度工况区的特性曲线是十分必要的。

和线性水轮机建模相比,该水轮机数学模型有如下特点:

- 1)更全面地考虑了影响水轮机流量、力矩的因素,较真实地反映了水轮机的动态特性。
- 2)由于采取直接对水轮机全特性曲线进行处

理,因而避免了求取水轮机的传递系数。
3)该模型对水轮机的任何工况点都适应,为研究自适应变参数 PID 调节奠定了基础。

2 基于协同进化模糊 PID 的水轮机调节系统的控制原理

本研究采用的基于协同进化算法的模糊 PID 控制由 4 部分组成:协同进化算法、模糊推理系统、PID 控制和调节对象。协同进化算法作为模糊规则的产生器,模糊推理系统的输入为系统误差 e 和误差变化率 e_c ,输出为 3 个 PID 调节参数的调整量 f_p 、 f_i 、 f_d 。这样,PID 就随着系统误差和误差变化率的不同而采用不同的参数进行计算,实现了 3 个 PID 参数的自调整,最后对水轮机模糊 PID 控制系统进行仿真研究^[8]。水轮机模糊 PID 控制系统框图如图 3 所示。图 3 中,

$$e(k)=r(k)-u(k),$$
$$e_c(k)=(e(k)-e(k-1))/T。$$

式中: $e(k)$ 为当前系统误差, $r(k)$ 为当前给定的频率, $u(k)$ 为当前的机组频率, $e_c(k)$ 为当前误差变化率, $e(k-1)$ 为前一时刻系统误差, T 为控制系统的采样周期。

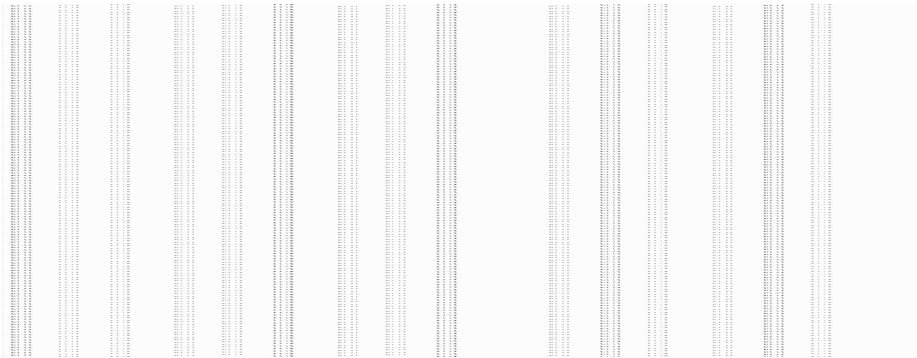


图 3 基于协同进化模糊 PID 的水轮机调节系统控制结构框图

Fig. 3 Diagram of hydro-turbine regulating system control based on coevolutionary fuzzy-PID

经过上述处理后,则模糊推理自调节 PID 控制算法的 PID 参数整定公式如下所示:

$$k_p(k)=k_p(0)+f_p c_p,$$
$$k_i(k)=k_i(0)+f_i c_i,$$
$$k_d(k)=k_d(0)+f_d c_d。$$

式中: $k_p(k)$ 、 $k_i(k)$ 、 $k_d(k)$ 分别为 PID 参数的当前值, $k_p(0)$ 、 $k_i(0)$ 、 $k_d(0)$ 分别为 PID 参数的初始值; f_p 、 f_i 、 f_d 分别为模糊推理得到的 PID 参数的变化值; c_p 、 c_i 、 c_d 为 PID 参数的比例因子。

模糊推理系统的 2 个输入变量(e 、 e_c)及 3 个输出变量(f_p 、 f_i 、 f_d)均为 7 个等级,分别为负大、负

中、负小、零、正小、正中、正大,用 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 表示,每个变量的论域均为 $[-7,7]$,采用均匀分布的三角形隶属度函数。模糊推理采用 Mamdani 推理模型,解模糊采用重心法。

如果 PID 参数的初始值选取不当,由上式计算出的 PID 参数就会过大或过小,从而引起系统的振荡,所以为保证系统稳定,可以采用遗传算法优化或经验公式选取参数初始值。在前期仿真研究中还发现,比例因子的取值对仿真结果有很大影响。因此,须采用协同进化模糊遗传算法同时优化 3 个比例因子和模糊规则。

水轮机模糊 PID 调节系统需要同时优化 3 个比例因子和模糊规则,若采用常规遗传算法,则单个染色体编码包含优化问题的全部变量,过长的染色体会影响算法的收敛速度,且易使算法陷入局部最优解。协同进化算法在传统进化算法的基础上引入生态系统的概念,将待求解的问题映射为相互作用的各物种组成的生态系统,每个物种代表问题解的一部分,各自独立进化,以整个生态系统的进化来达到问题求解的目的^[13-14]。

因此,本研究采用协同进化算法优化比例因子和模糊规则,将水轮机模糊 PID 调节系统映射为由这 2 个物种组成的生态系统,系统框架如图 4 所示。各物种在自己的种群中通过遗传算法独立地进化,而通过选取代表共同构成系统模型的方法来相互协作。对于物种 1,在评估个体适应度时,需计算其对整个系统问题的贡献,因此,从物种 2 中选取 1 个物种个体的代表,与物种 1 中的个体共同组成水轮机调节系统模糊 PID 控制问题的解,并基于该解评估物种 1 中各个体的适应度。物种 2 的进化过程与此相同。2 个物种通过各自的进化和协作,使整个系统的适应度不断得到改善。

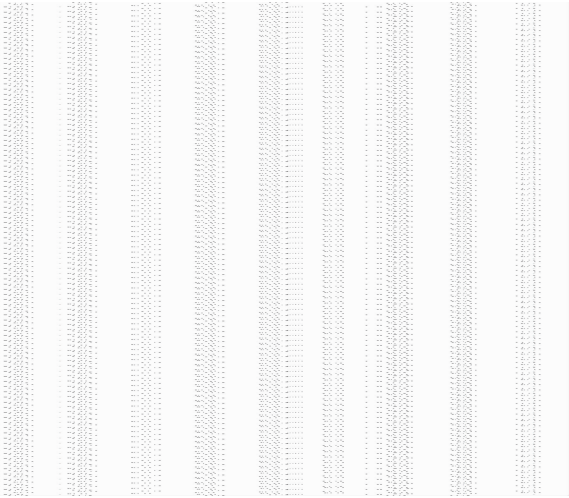


图 4 协同进化算法的框架图

Fig. 4 Diagram of co-evolutionary algorithm

本研究中目标函数选择常用 ITAE 准则,即采用 $\int_0^\infty t|e(t)|dt$ (其中 t 为时间变量, $e(t)$ 为系统误差),该性能指标能够很好地反映系统的响应速度、调节时间、稳态误差和超调量的大小。为了防止控制能量过大,在目标函数中加入控制输出的平方项。在目标函数中引入一光滑因子,对相邻规则之间的

跳变加以限制^[15]。

本研究选择的目标函数为:

$$J = w_1 \int_0^\infty t|e(t)|dt + w_2 \int_0^\infty u^2(t)dt + w_3 C。$$

式中: $e(t)$ 为系统误差, $u(t)$ 为控制器输出, w_1 、 w_2 、 w_3 为权值, C 为光滑因子。

染色体的适应度函数采用目标函数的倒数形式,即 $F=1/J$ 。

3 系统仿真结果与分析

3.1 仿真实例^[11]

某水电站有关参数为:水轮机型号 HL220-LJ-410、额定出力 $N_r=87$ MW,额定水头 $H_r=66$ m,转轮直径 $D_1=4.1$ m,接力器行程最大值 $Y_m=420$ mm,额定转速 $n_r=136.4$ r/min,额定流量 $Q_r=144$ m³/s,初始水头 $H_0=69.67$ m,机组惯性时间常数 $T_a=7.85$ s,水流惯性时间常数 $T_w=1.094$ s,接力器反应时间常数 $T_y=0.1$ s,负载的机械惯性时间常数 $T_b=0$,机组综合调节系数 $e_n=1.5$ 。由模型综合特性曲线获取流量特性数表 $Q_{11}=f_1(n_{11},\alpha)$ 、力矩特性数表 $M_{11}=f_2(n_{11},\alpha)$,及导叶开度与接力器关系数表 $\alpha=f(Y)$ 。

3.2 仿真结果分析

本研究将改变初始工况的开度,初始开度 α_0 从 6 mm 增加到 30 mm(以 2 mm 的间隔作为一个初始工况点),在每个工况点进行 10% 频率扰动的仿真研究,系统仿真采样时间为 0.02 s。研究水轮机调节系统模糊 PID 控制的效果以及模糊规则的寻优,并最终寻找一组通用的模糊规则。

PID 参数的初始值采用遗传算法优化^[5] 获得: $k_p(0)=2.72$, $k_i(0)=0.56$, $k_d(0)=1.04$ 。协同进化的 2 个物种分别进行遗传操作时,初始群体大小均为 100,初始交叉率为 0.95,初始变异率为 0.01。由协同进化遗传算法优化得到各工况的比例因子和模糊规则,获得各工况的模糊规则曲面图和频率扰动响应曲线,并在此基础上寻找一组适用于全工况的比例因子和模糊规则。

对各比例因子在不同工况下的值求取平均值,得到 1 组比例因子为: $c_p=0.2782$, $c_i=0.0524$, $c_d=0.1002$ 。

将所仿真的各工况的模糊规则表中对应位置的编码求取平均值,取整后转变成该整数所对应的语言变量值,得到模糊规则表如表 1~3 所示。

表 1 全工况的 k_p 变化模糊规则表

Table 1 k_p 's change fuzzy rules in all working condition

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM	NS	PS	PM	ZO	NS	NM
NM	NS	ZO	PS	PM	PS	ZO	ZO
NS	ZO	ZO	PM	PB	PM	PS	PS
ZO	PM	PS	PM	PB	PM	PS	PM
PS	PS	PS	PM	PB	PM	ZO	ZO
PM	ZO	ZO	PS	PM	PS	ZO	NS
PB	NM	NS	ZO	PM	PS	NS	NM

表 2 全工况的 k_i 变化模糊规则表

Table 2 k_i 's change fuzzy rules in all working condition

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM	NS	ZO	PM	ZO	NS	NB
NM	NS	PS	PM	PM	PS	ZO	NS
NS	ZO	ZO	ZO	PM	PS	ZO	ZO
ZO	PS	ZO	PS	PB	PS	ZO	PS
PS	ZO	ZO	PS	PM	ZO	ZO	ZO
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PS	NS
PB	NB	NS	ZO	PM	ZO	NS	NM

表 3 全工况的 k_d 变化模糊规则表

Table 3 k_d 's change fuzzy rules in all working condition

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	NM	NM	NS	PS	PM
NM	ZO	ZO	NS	NM	NS	ZO	ZO
NS	NS	ZO	NS	NB	NM	NS	NS
ZO	NM	NM	NS	NB	NS	NM	NM
PS	PS	NS	NS	NM	NB	NS	ZO
PM	PM	ZO	ZO	NS	NM	NS	ZO
PB	PB	PM	PS	NS	NM	NM	PS

使用求得的全工况比例因子和模糊规则对工况点 1~5 进行 10% 频率扰动仿真,同时为了验证所求得的比例因子和模糊规则的有效性,将其用于另一工况点 6($\alpha_0=21$ mm)中。各工况的仿真曲线如图 5 所示,其中实线为模糊 PID 控制,虚线为常规 PID 控制。由仿真结果得出各工况点主要控制指标见表 4。

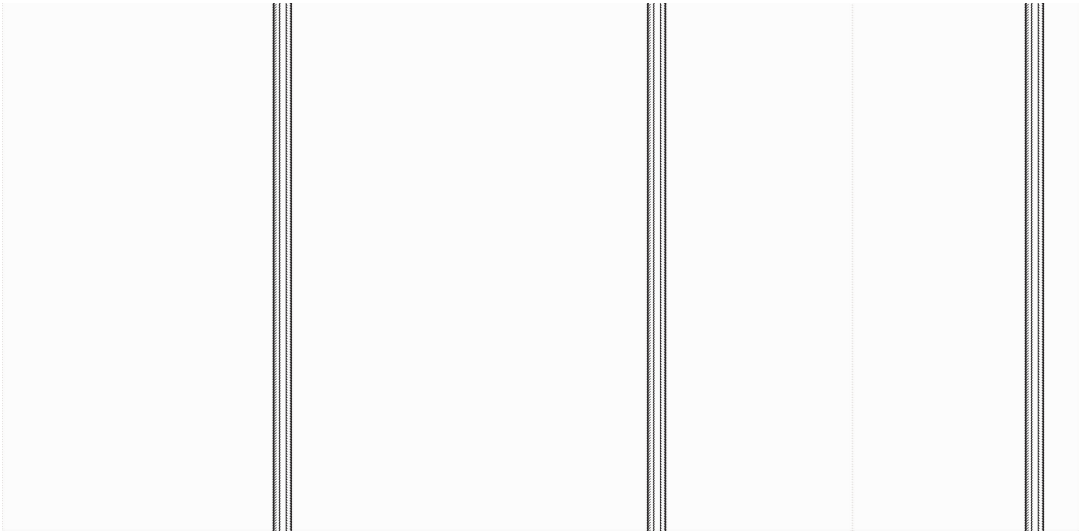


图 5 不同工况下的频率扰动响应曲线的比较

—, 模糊 PID; ----, 常规 PID; a—f. 工况 1($\alpha_0=6$ mm), 工况 2($\alpha_0=12$ mm), 工况 3($\alpha_0=18$ mm),
工况 4($\alpha_0=24$ mm), 工况 5($\alpha_0=30$ mm), 工况 6($\alpha_0=21$ mm)

Fig. 5 Comparison of frequency disturbance response curves under different conditions

—, Fuzzy PID; ----, Conventional PID; a—f. Working condition 1($\alpha_0=6$ mm), Working condition 2($\alpha_0=12$ mm),
Working condition 3($\alpha_0=18$ mm), Working condition 4($\alpha_0=24$ mm), Working condition 5($\alpha_0=30$ mm), Working condition 6($\alpha_0=21$ mm)

表 4 各工况点控制指标的比较

Table 4 Control index comparison for various conditions

工况点 Conditions point	调节时间/s Regulating time		超调量/% Overshoot		振荡次数 Number of oscillations	
	常规 PID Conventional PID	模糊 PID Fuzzy PID	常规 PID Conventional PID	模糊 PID Fuzzy PID	常规 PID Conventional PID	模糊 PID Fuzzy PID
1	21	16	5	1	2	0
2	18	12	4	2	2	1
3	12	10	2	2	1	1
4	7	5	1	0.5	1	0
5	16	10	6	2	2	1
6	15	11	2	1	1	1

综合表 4 各工况点的指标数据可知,与常规 PID 相比,采用模糊 PID 控制时,调节时间缩短了 28%,超调量减少了 49%,振荡次数减少了 50%。说明使用求得的比例因子和模糊规则后,不同工况下的水轮机调节系统模糊 PID 的控制效果明显优于常规 PID 控制。由此可见,在该固定电站内,使用该组比例因子和模糊规则,能使水轮机模糊 PID 控制系统良好地适应工况的不断变化。

4 结 论

本研究通过考虑水轮机环节的非线性特点,引入基于模型特性曲线的水轮机非线性模型,进行水轮机调节系统的非线性建模,使得仿真模型更加合理,仿真结果更加可信;针对模糊 PID 控制的模糊规则难以合理确定的问题,采用协同进化算法同时优化各工况的比例因子和模糊规则,寻找出适合于水轮机调节系统的通用有效模糊规则。本研究结果表明,基于协同进化模糊 PID 的水轮机调节系统的控制性能优于常规 PID 控制。说明该方法应用于水轮机调节系统是有效的,能使系统良好地适应运行工况的变化,也是在水轮机调节系统智能化控制方面的有益尝试,对于推广模糊 PID 控制在水轮机调节系统中的应用具有重要的理论和实践意义。

[参考文献]

- [1] 方红庆,孙美凤,沈祖诒. 水轮机调节系统控制策略综述 [J]. 人民长江,2004,35(1):33-36.
Fang H Q, Sun M F, Shen Z Y. Research on control method of turbine regulation system [J]. Yangtze River, 2004, 35(1): 33-36. (in Chinese)
- [2] 程远楚,田 炜,叶鲁卿,等. 水轮机调速器的智能非线性 PID 控制 [J]. 水电自动化与大坝监测,2004,28(3):28-31.
Cheng Y C, Tian W, Ye L Q, et al. Intelligent nonlinear PID control of hydro-turbine governors [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2004, 28(3): 28-31. (in Chinese)
- [3] 周泰斌,周建中,常 黎. 模糊控制在水轮机调节系统中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(1):10-14.
Zhou T B, Zhou J Z, Chang L. The application of fuzzy control in the hydraulic turbine regulating system [J]. Proceedings of the Csu-epsa, 2003, 15(1): 10-14. (in Chinese)
- [4] 王淑青,李朝晖,张子蓬. 在线学习自适应模糊控制器在水轮机调节中的应用 [J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(4):9-16.
Wang S Q, Li Z H, Zhang Z P. Application of on-line adaptive fuzzy controller to hydraulic turbine system [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(4): 9-16. (in Chinese)
- [5] 卢万里,蔡维由,李 萍. 水轮机调节系统的模糊自适应 PID 控制及仿真 [J]. 水科学与工程技术,2005(1):38-40.
Lu W L, Cai W Y, Li P. Self-adaptive fuzzy-PID controller of hydro-turbine regulating system and its simulation [J]. Hebei Water Resources and Hydropower Engineering, 2005(1): 38-40. (in Chinese)
- [6] 田 勇,沈祖诒. 水轮机调节中高精度模糊控制器的应用 [J]. 水利水电科技进展,2006,26(5):55-58.
Tian Y, Shen Z Y. Application of high precision fuzzy controller to turbine regulation system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(5): 55-58. (in Chinese)
- [7] 余向阳,南海鹏,杨晓萍. 基于遗传算法的水轮机模糊自适应 PID 调速器研究 [J]. 大电机技术,2004(1):63-67.
Yu X Y, Nan H P, Yang X P. Self-tuning PID hydraulic turbine governor based on genetic algorithms [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2004(1): 63-67. (in Chinese)
- [8] 王 涛,余向阳,辛 华,等. 基于协同进化算法的水轮机模糊 PID 调节系统模糊规则的研究 [J]. 水力发电学报,2007,26(2):137-142.
Wang T, Yu X Y, Xin H, et al. Fuzzy rules of hydraulic turbine fuzzy PID governor based on cooperative evolutionary algorithm [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(2): 137-142. (in Chinese)
- [9] Kishor N. Nonlinear predictive control to track deviated power of an identified NNARX model of a hydroplant [J]. Expert Systems with Application, 2008, 35: 1741-1745.
- [10] 丁 聪,把多铎,陈帝伊,等. 混流式水轮机调节系统的建模与非线性动力分析 [J]. 武汉大学学报:工学版,2012,45(2):187-192.
Ding C, Ba D D, Chen D Y, et al. Modeling and nonlinear dynamic analysis of Francis hydro-turbine governing system [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(2): 187-192. (in Chinese)
- [11] 徐枋同,李植鑫. 水电站机组控制计算机仿真 [M]. 北京:中国水利电力出版社,1995.
Xu F T, Li Z X. The hydropower unit control computer simulation [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1995. (in Chinese)
- [12] 刘文远,刘 彬. 基于协同进化的自适应遗传算法研究 [J]. 计算机工程与应用,2011,47(14):31-36.
Liu W Y, Liu B. Adaptive genetic algorithm based on coevolution [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(14): 31-36. (in Chinese)
- [13] 王建学,王锡凡,陈皓勇,等. 基于协同进化法的电力系统无功优化 [J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):124-129.
Wang J X, Wang X F, Chen H Y, et al. Reactive power optimization based on cooperative coevolutionary approach [J]. Proceedings of the Csee, 2004, 24(9): 124-129. (in Chinese)
- [14] 魏守平. 水轮机调节 [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2009:1-2.
Wei S P. Hydraulic turbine regulation [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2009: 1-2. (in Chinese)
- [15] Cho H J, Cho K B, Wang B H. Fuzzy-PID hybrid control: Automatic rule generation using genetic algorithms [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 92: 305-316.