

双模糊免疫比例积分微分下的水力 发电机组调速器研究

余向阳^{1,2}, 杜小宁¹, 田军伟¹, 黄永宣¹, 南海鹏²

(1. 西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安; 2. 西安理工大学水利水电学院, 710048, 西安)

摘要: 针对一般水力发电机组调速器不能根据系统的动态过程自动调整比例、微分、积分增益的缺点, 以水轮机调速器为控制对象, 提出了一种基于双模糊免疫比例积分微分(PID)控制算法. 该方法在常规免疫PID算法的调节比例增益的基础上, 将微分增益调节系统中的采样时刻偏差的微分作为抗原数量, 建立了调节微分增益的模糊免疫系统. 采用2个模糊免疫系统分别调节比例、微分增益, 并通过模糊推理求解积分参数的变化量. 仿真实验表明, 所提算法在系统设计工况、系统参数摄动及外部干扰的情况下, 能将水力发电机组的超调量降低28%, 调节时间缩短5%.

关键词: 模糊免疫; 模糊推理; 比例积分微分; 水力发电机组

中图分类号: TM62 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1229-04

Study on PID Hydraulic Turbine Governor with Double Fuzzy Immune Algorithm

Yu Xiangyang^{1,2}, Du Xiaoning¹, Tian Junwei¹, Huang Yongxuan¹, Nan Haipeng²

(1. Institute of System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Institute of Water Resource and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to overcome the flaw of conventional immune PID algorithm that only proportional gain is adjusted by the immune system, a new double fuzzy immune PID control method based on the common immune PID is proposed taking a hydraulic turbine governor as an example. In the method in addition to the regulation of proportional gain in conventional immune PID algorithm, a fuzzy immune system for adjusting derivative gain is created by taking the derivative of sampling time deviation in derivative gain regulation system as the quantity of antigens. Two fuzzy immune systems are used to regulate the proportional gain and derivative gain respectively and the change of the integral gain is derived by fuzzy reasoning. The simulation result shows that the overshoot of the hydraulic turbine governor is reduced by 28% and setting time is shortened by 5% under the designed system work condition, parameters perturbation and external disturbances.

Keywords: fuzzy immune; fuzzy reasoning; proportional-integral-derivative; hydraulic turbine governor

由于比例积分微分(PID)控制简单且控制效果比较好, 所以在工业控制中得到了广泛的应用. 但是, 水轮机调速系统存在的时滞、死区和饱和等非线性环节, 使得固定参数的PID很难满足现代电力系

统的要求. 为了解决这个问题, 人们开始研究参数随运行工况而自动调整的PID控制, 这种自调整参数PID控制模式^[1-4]有二种: 一种是基于模型的PID参数自调整方法, 属于辨识的自适应PID控制^[4]; 另

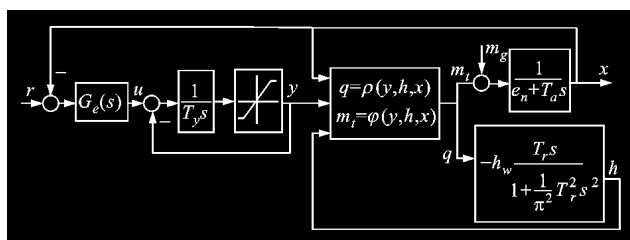
一种是无模型 PID 参数自调整方法,属于人工智能控制^[1-3],但是计算量大、收敛速度慢。

目前,基于免疫算法的 PID 控制方法引起了人们的关注,大部分研究均以引入免疫机制来改变比例增益^[5-8],通过模糊推理来模拟免疫算法中的非线性函数,结合各种优化策略对微分、积分增益参数进行优化,但它们均做不到微分、积分增益的自动调节,因此也难以全面提高系统的控制性能。

针对上述问题,本文结合免疫反馈机理,提出了一种双模糊免疫 PID 控制算法,它使得 PID 的 3 个调节参数根据系统的动态响应进行实时调整,从而使系统获得良好的控制性能和鲁棒性。

1 水轮机调节系统的仿真模型

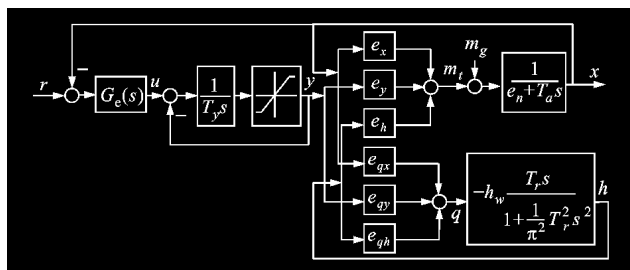
水轮机调节系统是一个复杂的控制系统,其中包括发电机、机械随动系统、水轮机及引水系统等,结构如图 1 所示。从图中可以看出,水轮机调速系统是一个非线性、非最小相位的系统,其模型参数随工况而变。



T_a : 机组惯性时间常数; T_r : 水锤压力波反射时间

图1 水轮机调速系统结构图

水轮机及引水系统(见图1)的工况参数经线性化之后,可获得带饱和非线性系统,该系统的传递函数依次为控制器、机械随动系统(带饱和非线性)、水轮机和引水系统以及发电机,如图2所示。



$e_x, e_y, e_h, e_{qh}, e_{qv}, e_{qx}$ 是与系统运行工况相关的线性系数

图2 水轮机调速系统系统图

2 双模糊免疫 PID 控制

2.1 免疫原理

免疫 PID 控制器是借鉴生物系统的免疫机理而设计出的一种非线性控制器,免疫系统原理如图

3 所示。基于 T 细胞反馈调节原理并考虑简单的反馈机理,可定义第 k 代的抗原数量为 $\epsilon(k)$,由抗原刺激的 T_H 细胞的输出为 $T_H(k)$, T_S 细胞对 B 细胞的影响力为 $T_S(k)$,则 B 细胞接收到的刺激总数为

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k) \quad (1)$$

式中: $T_H(k) = k_1 \epsilon(k)$; $T_S(k) = k_2 f(s(k), \Delta s(k)) \epsilon(k)$ 。

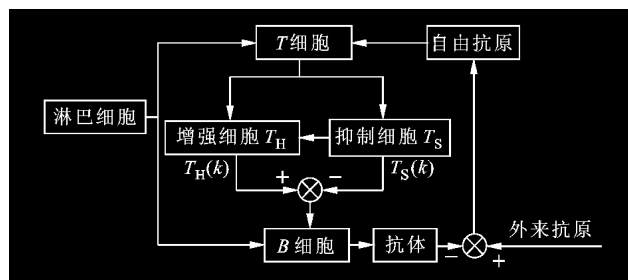


图3 免疫系统原理图

2.2 双免疫 PID 原理

本文提出的基于双模糊免疫 PID 在 2 种免疫系统下分别得到比例和微分增益,并用模糊系统调节积分增益,控制系统结构如图 4 所示,其中包括比例增益调节系统和微分增益调节系统。

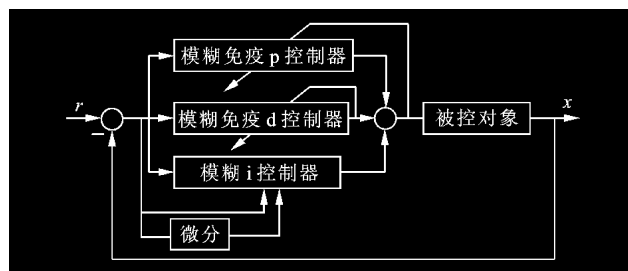


图4 控制系统结构

在比例增益调节系统中,将第 k 个采样时刻的给定值与输出值的偏差 $e(k)$ 所对应的免疫系统定义为第 k 代的抗原数量 $\epsilon(k)$,将第 k 个采样时刻的控制器输出 $u(k)$ 所对应的免疫系统定义为第 k 代 B 细胞接收到的 $S(k)$,则反馈控制规律可设计为

$$u(k) = K_p(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))e(k) = k_p e(k) \quad (2)$$

从而得到

$$k_p = K_p(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))) \quad (3)$$

式中: $K_p = k_1$ 为控制响应速度参数; $\eta = k_2/k_1$ 为控制响应稳定性参数; $f(u(k), \Delta u(k))$ 为 T_S 细胞的抑制量,是关于 $u(k)$ 和 $\Delta u(k)$ 的非线性函数。从式(3)知,随 η 增大,系统的超调量减小,合理地调整 k 和 η ,可使控制系统具有较快的响应速度和较小的超调量。

在微分增益调节系统中,将第 k 个采样时刻

$e(k)$ 的微分 $e_c(k)$ 所对应的免疫系统定义为第 k 代的 $\epsilon(k)$, 将第 k 个采样时刻的微分控制器输出 $u_d(k)$ 所对应的免疫系统定义为第 k 代 B 细胞接收到的 $S(k)$, 则反馈控制规律可设计为

$$u_d(k) = k_d e_c(k) \quad (4)$$

从而得到

$$k_d = K_d(1 - \eta_d f(u_d, \Delta u_d)) \quad (5)$$

式中: $K_d = k_1$ 为控制响应速度参数; $\eta_d = k_2/k_1$ 为控制响应的稳定性参数. 随 η 增大, 系统超调量减小.

式(3)、式(5)分别是比例增益、微分增益调节式, 由此可知, 基于双模糊免疫机理的控制器是一个非线性的 PID 控制器, 其输出为

$$\begin{aligned} u(k) = & u(k-1) + k_p((e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + \\ & k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))) = \\ & u(k-1) + k_p((e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + \\ & k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2))) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例、积分和微分系数.

控制器的性能在很大程度上依赖于参数 K_p 、 η 、 K_d 、 η_d 和非线性函数 $f(\cdot)$.

2.3 双模糊免疫 PID 原理

本文的模糊控制器具有 2 个输入变量 (x_1, x_2) 和 1 个输出变量, 用它们来逼近非线性函数 $f(x_1, x_2)$. 比例参数控制系统的 2 个输入变量分别是免疫 PID 控制器的输出 $u(k)$ 和输出变量 $\Delta u(k)$, 输出变量是 T_s 细胞的抑制量 $f(u(k), \Delta u(k))$. 微分参数控制系统的 2 个输入变量分别是免疫控制器的输出和输出变化 $\Delta u_d(k)$, 输出变化是 T_s 细胞的抑制量 $f(u_d(k), \Delta u_d(k))$. 在这 2 个系统中, 每个输入变量被模糊集模糊化为“正”(P)、“负”(N) 2 个量, 输出变量被模糊集模糊化为“正”(P)、“零”(Z) 和“负”(N) 3 个量. 上述隶属度函数均定义在 $(-\infty, +\infty)$ 区间. 模糊控制器采用了 4 条规则, 如表 1 所示^[8].

表 1 模糊控制器规则

x_2	x_1	
	P	N
P	N	Z
N	Z	P

规则中使用 Zadeh 模糊逻辑 AND 和常用的 mom 反模糊化方法, 可获得模糊控制器的输出 $f(\cdot)$.

2.4 模糊控制器

利用双模糊免疫 PID 控制可实现比例参数和微分参数的自动调节, 但对积分参数却无济于事.

本文采用模糊控制算法来调整积分参数, 即以系统偏差 e 和偏差微分 e_c 为模糊系统的输入, 以积分增益的增量为模糊系统的输出, e 和 e_c 的隶属函数采用等腰三角形函数且均匀分布^[2]. 本文算法的模糊规则经过了遗传算法(经积分增益调整)的优化, 结果如表 2 所示.

表 2 经积分增益调整后的模糊规则

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

注: 模糊变量的论域为零(ZO)、正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、负大(NB)、负中(NM)、负小(NS).

本文首先采用遗传算法对 PID 参数和模糊免疫参数进行离线优化, 得到初始值, 然后采用模糊及免疫算法对参数进行自适应调整.

3 算 例

为了验证本文算法的有效性, 采用基于双模糊免疫 PID 对水轮发电机组进行了负荷扰动和频率扰动仿真, 并针对水轮机的参数对系统的响应进行了仿真研究. 在算例中, 以混流式水轮机实际工况要求的相关参数进行计算, 得到 $T_a = 6$ s, $T_y = 0.1$ s, $T_r = 0.3$ s, $e_y = 0.55$, $e_{qy} = 0.68$, $e_h = 1.43$, $e_{qh} = 0.45$, $e_n = 1.5$, $e_{qx} = 0$, $e_x = -0.5$, $b_p = 0$. PID 参数的初值是以遗传算法寻优求得的, 即 $k_p = 2.4$, $k_i = 0.5$, $k_d = 1.6$, $\eta_d = 0.3$, $\eta = 0.4$. 在起始时刻增加 10%(5 Hz) 的频率扰动, 发电机电压的频率响应如图 5 所示. 从中可以看出, 当系统参数在设计工况时, 模糊免疫 PID 控制的响应特性稍优于常规免疫 PID 控制^[7].

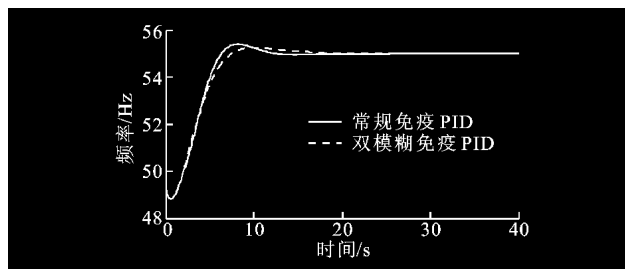


图 5 系统参数不变时的频率响应曲线

当水轮机的运行工况发生变化,即水轮机的参数为 $e_{qh}=0.35, e_h=1.32, e_{qy}=0.81, e_y=0.7, e_x=-0.6, e_{qx}=0$ 时,模糊免疫PID控制的响应特性优于常规免疫PID控制(见图6).当发电机组运行到第5s时,突甩75%负荷的频率响应如图7所示,从中发现,双模糊免疫PID的控制性能要比常规免疫PID控制性能更好.

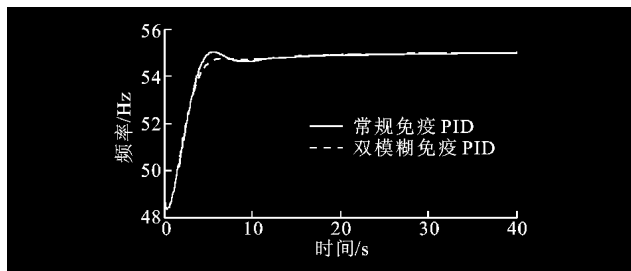


图6 系统参数变化后频率响应曲线

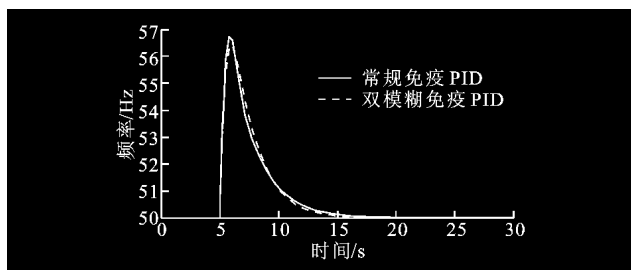


图7 负荷扰动时的频率响应曲线

4 结 论

从仿真结果可以看出,双模糊免疫系统PID控制的3个调节参数均可根据系统动态过程进行调节,而且比其他变参数PID控制的计算量更小,所以它在工业现场应用具有一定优势.当参数发生变化时,系统动态品质的劣化程度也比较小,这说明系统具有较强的鲁棒性.在动态响应的过程中,由于系统采用了能自适应调整控制参数的双模糊免疫PID控制,所以它比常规PID系统具有更广泛的适应性和更好的控制效率.

参考文献:

[1] Mudi R K, Pal N R. A robust self-tuning scheme for

PI- and PD-type fuzzy controllers [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1999, 7 (1): 2-16.

[2] 南海鹏. 基于遗传算法的水轮机智能PID调速器研究[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 107-112.

Nan Haipeng. A study of intelligent PID hydraulic turbine governor based on genetic algorithms [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(1): 107-112.

[3] Yesil E, Guzelkaya M, Eksin I. Self tuning fuzzy PID type load and frequency controller [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(3): 377-390.

[4] Huang S N, Tan K K, Lee T H. A combined PID/adaptive controller for a class of nonlinear systems [J]. Automatica, 2001, 37(4): 611-618.

[5] Xu Changbo, Liu Congcong, Bi Zhenfu, et al. PID self-tuning immune fuzzy control of steam temperature control system in fossil-fired power plant [C]// Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 3973-3977.

[6] Kim D H. Tuning of PID controller using gain/phase margin and immune algorithm [C]// 2005 IEEE Mid-Summer Workshop on Soft Computing in Industrial Applications. Piscataway, USA: IEEE, 2005: 69-74.

[7] 谈英姿, 沈炯, 吕振中. 免疫PID控制器在汽温控制系统中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 148-152.

Tan Yingzi, Shen Jiong, Lu Zhenzhong. Study of immune PID controller for superheated steam temperature control system [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22(10): 148-152.

[8] 高宪文, 赵亚平. 焦炉模糊免疫自适应PID控制的应用研究 [J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1346-1349.

Gao Xianwen, Zhao Yaping. Application research on fuzzy immune adaptive PID control in coke oven [J]. Control and Decision, 2005, 20(12): 1346-1349.

(编辑 苗凌)