

免疫单神经元 PID 控制在永磁交流 伺服系统中的应用

王科, 刘新正

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统 PID 调节不易在线实时调整参数, 难以有效控制复杂和时变系统的不足, 以及单神经元 PID 控制不能实时调整增益、响应慢的缺点, 介绍了一种通过免疫反馈机理实现增益自适应的单神经元自适应 PID, 并将其应用于永磁交流伺服系统. 系统转速环控制器采用基于单神经元的自适应 PID 控制算法, 实现 PID 参数的在线实时调整. 在单神经元中引入免疫反馈机理, 实现增益自适应, 提高其响应速度. 仿真和实验结果表明, 该算法可以在一定程度上增强系统的抗扰动能力, 改善系统的速度控制效果, 使转速的超调更小、振荡减弱、响应速度加快、稳态误差减小, 提高了系统的动态和稳态性能.

关键词: 永磁同步电动机; 交流伺服系统; 单神经元 PID; 免疫

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)04-0076-06

Application of Immune Single Neuron PID Regulator in Permanent Magnet Synchronous Machine AC Servo System

WANG Ke, LIU Xinzhen

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is difficult for the traditional PID regulator to adjust parameters online in controlling complicated timevarying systems, and the gain is unable to be adjusted automatically and the response rate is lower for the single neuron PID regulator. A new single neuron adaptive PID regulator based on immune feedback mechanism is proposed and applied to PMSM AC servo system. The single neuron adaptive PID algorithm is employed as the speed closed-loop controller of servo system to fulfill real-time adjustment of the PID parameters, and the immune feedback mechanism is embedded to achieve self-adjustment of the gain coefficient and enhance the response rate. The simulations and experiments show that the control strategy effectively increases anti-disturbance capabilities and improves speed control effects of the system, thus the overshoot and oscillation get less, the response rate heightens, and the steady state error becomes smaller speed control, leading to better dynamical and steady state performances of speed control.

Keywords: permanent magnet synchronous machine; AC servo system; single neuron PID regulator; immune

永磁交流伺服系统大多采用矢量控制方法^[1-2], 其速度环通常都采用传统的增量式数字 PID 算法进行控制, 具有算法简单、可靠性高等优点. 但是, 传

统 PID 参数的设定比较困难, 需要经验丰富的设计者依据实际效果调整确定, 且其参数一旦确定便不能在线实时调整, 难以有效控制永磁交流伺服这类

非线性、强耦合、参数时变的复杂系统,无法完全满足系统速度环的快速、无超调、无静差、抗干扰的性能要求^[3]. 因此,各种智能的控制方法已经成为人们的研究热点^[4-10]. 这些研究在一定程度上改善了系统的控制效果,但依旧存在各自缺点,有的算法复杂,有的参数调整较难,有的实现困难,因而大多还处于研究阶段.

传统 PID 调节器参数整定与系统性能指标密切相关,而单神经元具有自学习和自适应的能力,且结构简单,易于工程实现. 本文将两者结合,在永磁交流伺服系统的转速环控制器中采用基于单神经元的自适应 PID 控制算法,实现调节器参数的在线实时调整. 同时,在单神经元中引入免疫反馈机理,实现增益自调整,提高其响应速率. 仿真和实验结果验证了所采用策略的可行性和有效性,表明本文算法可以弥补传统 PID 控制的不足以及单神经元 PID 控制动态响应慢的缺点,明显改善永磁交流伺服系统的速度控制效果,提高系统的动态和稳态性能.

1 永磁交流伺服系统结构

图 1 所示为采用矢量控制的永磁交流伺服系统的原理框图,系统由位置调节器、转速调节器、电流调节器、坐标变换、空间矢量脉宽调制、电流检测、转速和位置检测等环节组成,包含电流环、转速环和位置环. 转速环控制器采用单神经元 PID 算法控制.

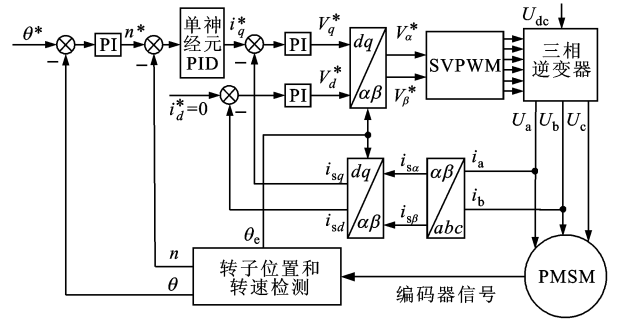


图 1 矢量控制永磁交流伺服系统原理框图

2 单神经元自适应 PID 控制

单神经元自适应 PID 控制器的结构如图 2 所示. 转换器的输入为系统给定 $r(k)$ 和系统的输出 $y(k)$, 转换器的输出是与误差 $e(k)$ 有关的神经元输入状态量 x_1, x_2, x_3 , 神经元的输出 $I(k)$ 取决于 x_i 及连接权值 w_i . 单神经元自适应 PID 控制规律可表示为

$$\Delta u(k) = K\{w_1(k)e(k) + w_2(k)[e(k) - e(k - 1)] + w_3(k)[e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)]\} = K \sum_{i=1}^3 w_i(k)x_i(k) \tag{1}$$

式中: $\Delta u(k)$ 为第 k 次采样的控制器输出的增量; K 为单神经元的比例系数.

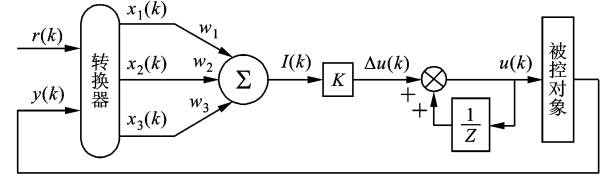


图 2 单神经元 PID 控制结构框图

传统的增量式数字 PID 控制规律可表示为 $\Delta u(k) = K_1 e(k) + K_P [e(k) - e(k - 1)] + K_D [e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)]$ 式中: K_P, K_I, K_D 分别为比例、积分、微分系数.

对比式(1)和式(2)可以看出,虽然两者的形式完全相同,但传统增量式数字 PID 控制的参数预先确定且在控制过程中不变,而单神经元自适应 PID 控制的连接权值 w_i 可通过神经元的自学习,根据控制对象参数的变化进行自适应调整,因而有很强的鲁棒性和容错性^[3,8].

单神经元自适应 PID 控制器采用有监督 Hebb 学习规则,为了保证算法的收敛性和鲁棒性,规范化处理后的单神经元自适应 PID 控制表示为^[3]

$$\Delta u(k) = K \sum_{i=1}^3 w'_i(k)x_i(k) \quad w'_i(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|} \quad \left. \begin{aligned} w_1(k+1) &= w_1(k) + \eta_1 e(k)u(k)x_1(k) \\ w_2(k+1) &= w_2(k) + \eta_P e(k)u(k)x_2(k) \\ w_3(k+1) &= w_3(k) + \eta_D e(k)u(k)x_3(k) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中: η_P, η_I 和 η_D 分别为比例、积分和微分学习速率,由仿真分析或实际系统现场实验确定.

3 神经元比例系数的免疫自调整

单神经元自适应 PID 控制算法中,神经元比例系数 K 的选取非常重要,其取值不同将显著影响系统的动态响应和稳定性. K 值偏大会使系统超调过

大, K 值偏小会使响应变慢. 若能在单神经元 PID 控制算法中加入适当的改进, 使得 K 值能够根据控制效果在线调整, 当系统误差较大时, 适当增大 K 值, 使响应尽快逼近给定值, 当误差减小时适当减小 K 值, 避免系统超调和振荡, 则将使系统获得更好的控制效果. 生物免疫系统的细胞增长和抑制机理与此相仿, 且在大量干扰和不确定性环境中都具有强鲁棒性和自适应性, 将免疫调节机制用于 K 值的在线实时调整, 可有效改进控制系统的性能.

免疫反馈调节机理可用图 3 表示. 抗原 Ag 进入机体后, 被抗原呈递细胞 (APC) 消化, 接着 T_H 细胞被激活并释放淋巴因子, 促使 B 细胞产生抗体 Ab 以清除抗原. APC 也能激活 T_S 细胞, T_S 细胞会对 T_H 细胞和 B 细胞产生抑制作用. 当抗原较多时, 机体内 T_H 细胞相对较多, T_S 细胞相对较少, 产生的 B 细胞会较多. 随着抗原的减少, 体内 T_S 细胞逐渐增多, 抑制 T_H 细胞和 B 细胞产生, 使得 B 细胞也随着减少, 经过一段时间后, 免疫系统便趋于平衡^[8-10].

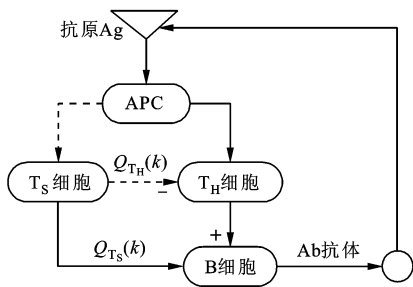


图3 免疫反馈机理示意图

如果分别用 $Q_B(k)$ 、 $Q_{T_H}(k)$ 、 $Q_{T_S}(k)$ 、 $Q_{Ag}(k)$ 表示第 k 代的 B 细胞、 T_H 细胞、 T_S 细胞以及抗原的数量, 则一个简单的免疫反馈机理模型如下

$$\left. \begin{aligned} Q_B(k) &= Q_{T_H}(k) - Q_{T_S}(k) \\ Q_{T_H}(k) &= K_1 Q_{Ag}(k) \\ Q_{T_S}(k) &= K_2 Q_{Ag}(k) f[\Delta Q_B(k)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: k_1 为 T_H 细胞的促进因子; k_2 为 T_S 细胞的抑制因子; $f(x)$ 为非线性函数, 与 B 细胞数量的变化有关.

如果将 $Q_{Ag}(k)$ 看作控制系统偏差 $e(k)$, $Q_B(k)$ 作为控制器的输出 $u(k)$, 式(4)经过变形后可以得到以下基于免疫反馈机理的控制规律^[8]

$$u(k) = K_\delta \{1 - \eta f[\Delta u(k)]\} e(k) \quad (5)$$

式中: K_δ 为控制响应速度, $K_\delta = k_1$; η 为控制稳定效果, $\eta = k_2/k_1$.

实际上, 基于免疫反馈机理的控制器是一个非线性 δ 控制器, 其比例增益为

$$K'_\delta = K_\delta \{1 - \eta f[\Delta u(k)]\} \quad (6)$$

将免疫反馈机理用于单神经 PID 控制, 可使单神经元比例系数 K 值自调整, 加快其学习速率. 选择免疫调节函数为^[10]

$$K = k_m (1 - b \exp(-ae^2)) \quad (7)$$

式中: b 为控制稳定效果; k_m 为比例系数, 控制免疫调节反应速度; a 为影响免疫调节曲线的坡度.

4 仿真研究

为了验证所采用控制方法的有效性, 本文在 MATLAB/Simulink 环境下, 建立了基于 $i_d = 0$ 的转子磁链定向矢量控制系统的仿真模型^[11], 如图 4 所示. 仿真分析时, 系统中转速环分别采用传统 PID 和单神经元自适应 PID 等两种控制策略, 图中仅显示后者. 根据实验系统的配置, 仿真模型中电机及功率驱动的主要参数设置为电机功率 1.2 kW, 额定电流 5 A, 零速转矩 4 N·m, 定子电阻 $R_s = 0.95 \Omega$, 转子磁链 $\phi_f = 0.175$ Wb, 转动惯量 $J = 0.65 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数 $p_n = 4$, 逆变器开关频率 15 kHz, 直流母线电压 $u_{dc} = 311$ V. 传统 PID 的参数分别设定为 $K_I = 215$ 、 $K_P = 0.3$ 和 $K_D = 0.1 \times 10^{-3}$, 并将其分别作为单神经元连接权值 w_1 、 w_2 和 w_3 的初值; 单神经元的学习速率取 $\eta_1 = 1.2$ 、 $\eta_p = 0.01$ 和 $\eta_d = 0.05$, 免疫调节函数中系数为 $k_m = 1.05$ 、 $b = 0.5$ 、 $a = 0.5 \times 10^{-4}$.

4.1 空载变速仿真

考虑到电机有 4 N·m 的零速转矩, 故空载实验时均设置电机负载转矩为 4 N·m. 电机以给定 150 r/min 起动, 0.05 s 突变为 1 050 r/min, 转速环采用不同 PID 算法控制时的转速波形如图 5 所示. 可以看出, 本文所建立的永磁交流伺服系统具有较好的动、稳态性能. 转速环采用传统 PID 控制时, 转速波形有约 14.3% 的超调, 3 次明显的振荡, 调节时间约 25 ms, 稳态误差约 0.1 r/min. 转速环采用免疫型单神经元自适应 PID 控制后, 转速响应的超调减小约 12.1%, 系统振荡次数有所增加, 大约 4 次, 但振荡幅值有所减小, 同时系统稳定所需时间显著减少, 需要约 8 ms, 稳态误差也减小为 0.05 r/min 左右.

综上所述, 免疫型单神经元自适应 PID 控制可以改善系统的速度控制效果, 使转速的超调更小、振荡减弱、响应速度加快、稳态误差减小.

4.2 突加负载仿真

设定电机以 1 050 r/min 起动,初始负载转矩设定为 6 N·m(即施加 2 N·m 的实际负载),在 0.05 s 时负载转矩突变为 8 N·m,转速波形如图 6

所示。可以看出,突加负载时,采用传统 PID 控制出现大约 9.5% 的转速下降,有 2 次明显的振荡,调节时间约为 6 ms,而采用免疫型单神经元自适应 PID 控制的转速响应受负载突变的影响明显减小,转速

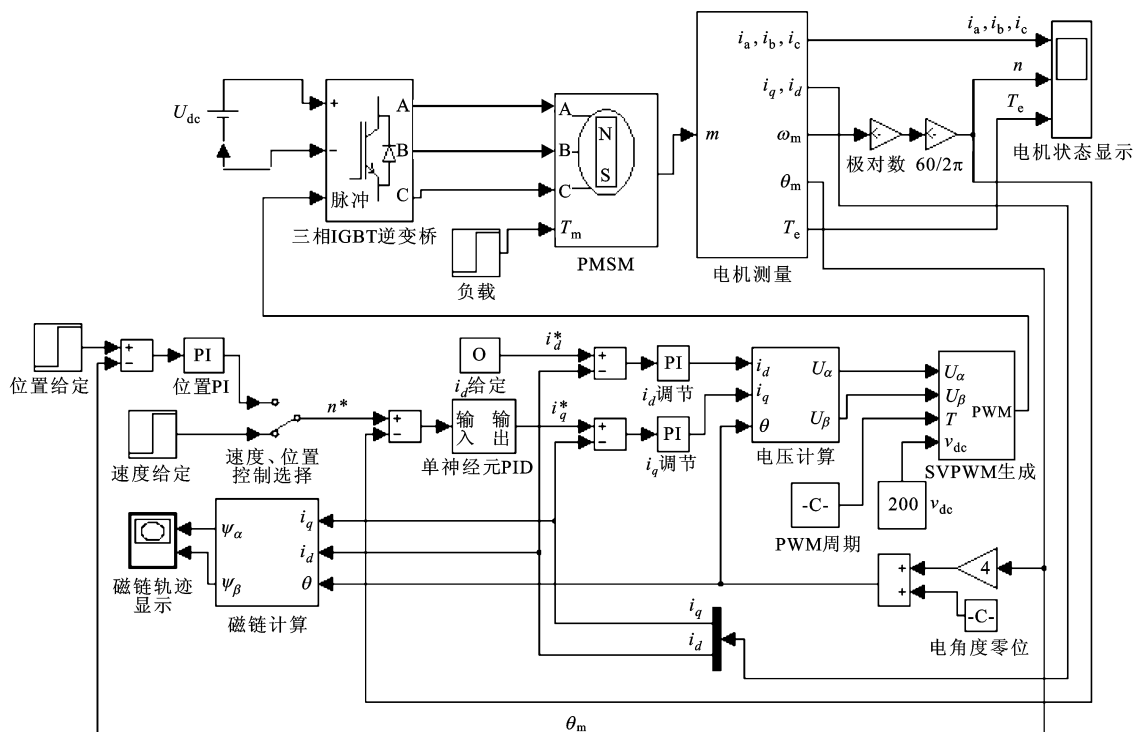
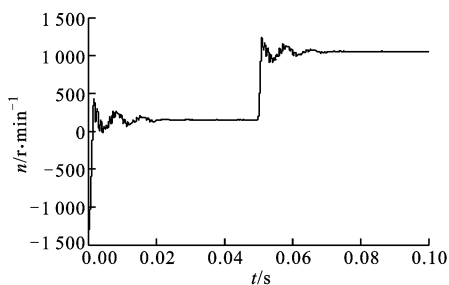
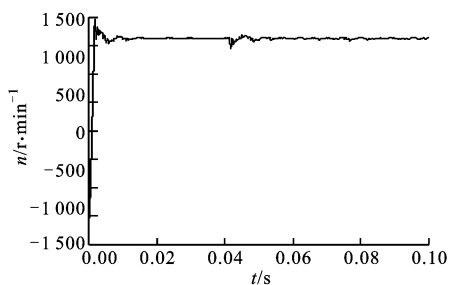


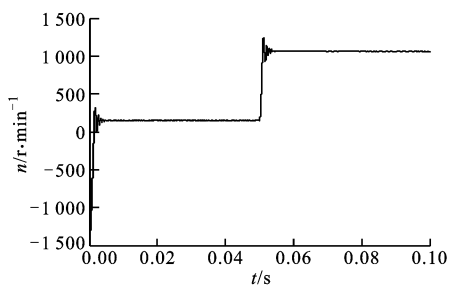
图 4 永磁交流伺服系统仿真模型



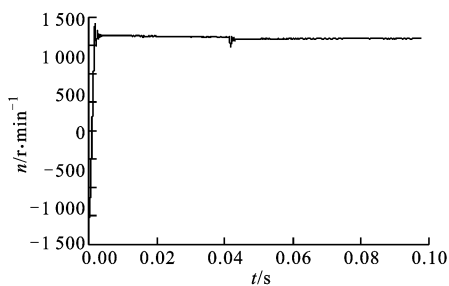
(a)采用传统 PID 算法



(a)采用传统 PID 算法



(b)采用免疫型单神经元自适应 PID 算法



(b)采用免疫型单神经元自适应PID算法

图 5 转速环采用不同 PID 算法时的空载变速仿真结果

图 6 转速环采用不同 PID 算法时的突加负载仿真结果

下降约 4.7%，只有 1 次较明显的振荡，调节时间需要约 2.5 ms。

结果说明，免疫型单神经元自适应 PID 控制在一定程度上可以提高系统的抗负载扰动能力，使得负载突变时的转速波动减小，恢复速度更快。

5 实验验证

本文设计实现的永磁交流伺服系统实验平台如图 7 所示，主要包括 DSP 控制板、功率驱动板、编码器接口电路板等，其中逆变器选用智能功率模块 (IPM)PS21265，控制电路以 DSP TMS320F2812 为核心。

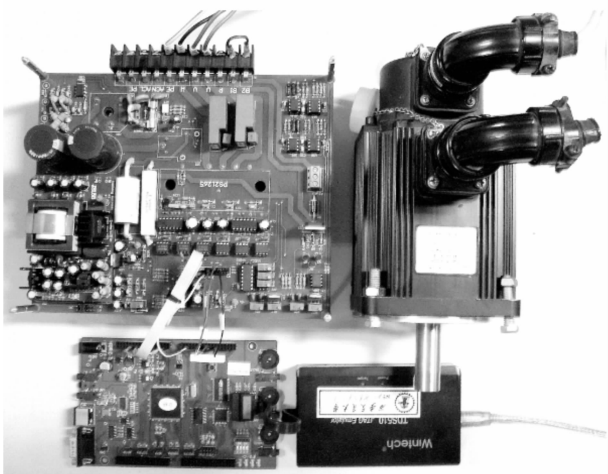


图 7 系统实验平台实物图

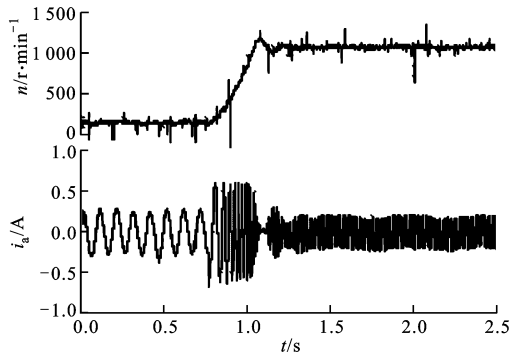
实验用电机是一台三相 8 极永磁同步电动机，额定功率为 1.2 kW，额定电流为 5 A，最高转速为 3 000 r/min，电机内部集成了 2500 线的光电编码器。

5.1 空载变速实验

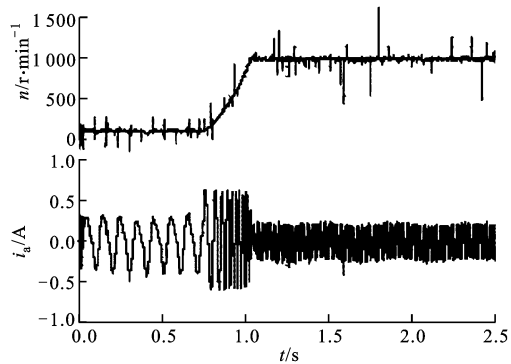
图 8 是转速环采用不同 PID 算法控制，转速由 150 r/min 上升为 1 050 r/min 时的转速和电流波形。可以看出，采用传统 PID 算法的转速曲线有约 11.4% 的超调和 2 次明显的振荡，电流冲击较大，系统稳定需要约 450 ms，稳态误差在 6 r/min。转速环采用免疫型单神经元自适应 PID 算法控制时，转速的超调大约为 9.5%，只有 1 次不太明显的振荡，电流冲击也较小，系统稳定需要大约 270 ms，稳态误差为 4 r/min。

与空载变速的仿真结果相比，实际系统的响应速度明显慢于仿真系统的响应速度，系统的稳态转速误差也明显大于仿真的稳态转速误差。这主要是由于永磁交流伺服系统实际上是一个复杂、时变的

强耦合非线性系统，仿真模型是对实际系统的理想简化，仿真参数不可能和实际系统完全一致，并且未考虑实际系统参数的变化及环境等的影响。总的来看，实验结果进一步证明了免疫型单神经元自适应 PID 可以改善速度控制效果，使系统的超调更小、振荡减弱、响应速度加快、稳态误差减小。



(a)采用传统 PID 算法



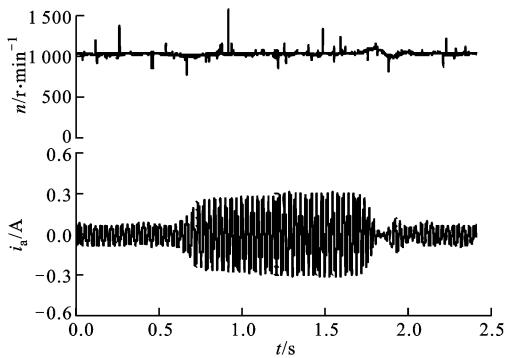
(b)采用免疫型单神经元自适应 PID 算法

图 8 转速环采用不同 PID 算法的空载变速实验结果

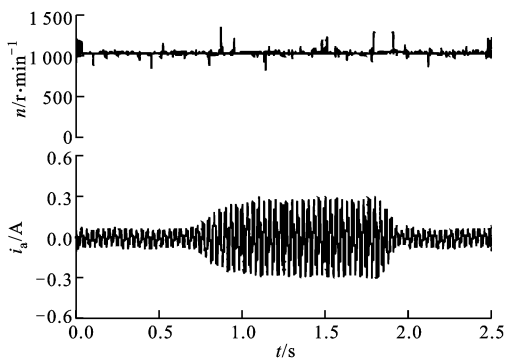
5.2 突加突卸负载实验

图 9 是转速环采用不同 PID 控制算法，电机在 1 050 r/min 运行时突加突卸负载时的转速和电流波形。可以看出，转速环采用传统 PID 算法控制时，突加负载时有大约 6.5% 的转速下降，2 次振荡，调节时间约 200 ms，同时电流也有明显的突变和振荡。采用免疫型单神经元自适应 PID 算法时，突加负载时转速波动减小，有 5.1% 的转速下降，1 次不明显的振荡，调节时间约 120 ms，同时电流变化较为平稳。

与突加负载的仿真结果对比，可以看出，实验结果与仿真结果还有明显的差距，尤其是系统的响应速度非常慢，但实验结果进一步验证了本文算法可以提高系统的抗负载扰动能力，改善系统的动、稳态性能。



(a)采用传统PID算法



(b)采用免疫型单神经元自适应PID算法

图9 转速环采用不同PID算法的突加、突卸负载实验结果

6 结 论

本文针对传统PID控制及单神经元PID控制的不足,在永磁交流伺服系统的转速环控制器中引入免疫型单神经元自适应PID算法,通过免疫反馈机理实现单神经元自适应PID控制的增益自调整。仿真及实验表明,转速环采用免疫型单神经元自适应PID算法可以明显改善永磁交流伺服系统的速度控制效果,使得转速超调更小,稳态精度更高,提高了系统的动、稳态性能。

参考文献:

[1] PILLAY P, KRISHNAN R. Control characteristics and speed controller design for a high performance permanent magnet synchronous motor drive[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(1): 170-175.

[2] HARNEFORS L. Design and analysis of general rotor-flux-oriented vector control systems [J]. IEEE

Trans on Industrial Electronics, 2001, 48(2): 383-390.

[3] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 149-176.

[4] LI S, LIU Z. Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor system with variations of load inertia[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3050-3059.

[5] CHENG Kuangyao, TZOU Yingyu. Fuzzy optimization techniques applied to the design of a digital PMSM servo drive [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19(4): 1085-1099.

[6] LIN Faa-Jeng, LIN Chih-Hong. A permanent-magnet synchronous motor servo drive using self-constructing fuzzy neural network controller [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(1): 66-72.

[7] 张昌凡, 王耀南, 何静. 永磁同步伺服电机的变结构智能控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 13-17.

ZHANG Changfan, WANG Yaonan, HE Jing. Variable structure intelligent control for PM synchronous servo motor drive [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 13-17.

[8] 王伟, 高晓智, 王常虹. 免疫调节增益的单神经元PID控制器[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(1): 74-79.

WANG Wei, GAO Xiaozhi, WANG Changhong. New single neuron PID controller based on immune tuning [J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(1): 74-79.

[9] 张玲, 回立川. 免疫单神经元控制器的研究与应用[J]. 控制工程, 2007, 14(1): 76-77.

ZHANG Ling, HUI Lichuan. Immunity single neuron PID controller and its application [J]. Control Engineering of China, 2007, 14(1): 76-77.

[10] 谈英姿, 沈炯, 吕震中. 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, LÜ Zhenzhong. Study of immune PID controller for superheated steam temperature control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 148-152.

[11] SARITHA B, JANKIRAMAN P A. MATLAB simulation of current control of PMSM using single sensor technology [C] // International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-5.

(编辑 杜秀杰)