文章编号：1673–1522（2010）03-0263–04

基于模糊免疫 PID 控制的力矩电机 PWM 调速系统

郭　霞[1]，李海涛[2]，马新星[3]

（1. 91796 部队；2. 91856 部队，辽宁 葫芦岛 125000；
3. 海军航空工程学院 新装备培训中心，山东 烟台 264001）

摘　要：针对某型单轴速率转台使用的直流力矩电机，设计了专门的 PWM 驱动电路。采用模糊免疫 PID 控制代替传统 PID 控制的方法，调节 PWM 波的占空比，实现对力矩电机伺服系统的控制。仿真结果表明，采用模糊 PID 控制能够比传统 PID 控制能更加有效地提高系统的响应速度，具有良好的抗干扰能力，提高了系统运行的稳定性和鲁棒性。

关键词：模糊；免疫；PID；PWM；力矩电机

中图分类号：TM921.52　　**文献标志码：**A

直流力矩电机是一种能够长期处于堵转工作的低转速、大转矩的特殊电机。它具有反应速度快、转矩和转速波动小、线性度好、能在很低转速下稳定运行的优点。因此，直流力矩电机被作为转台伺服系统的首选。脉宽调速电路（PWM）电流容易连续控制、谐波少、效率高，电动机损耗和发热都很小，低速性能好，稳定精度高，系统通频带宽，能快速响应，抗干扰力强，适应转台的驱动控制系统。

常规的 PID 控制系统由于其算法简单、鲁棒性较好和可靠性高，被广泛应用于工业过程控制，尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。而实际控制过程中，系统具有非线性、时变的特点，有的参数未知或缓慢变化，有的存在滞后和随机干扰，有的无法获得精确数学模型等，应用传统 PID 控制不能获得理想的控制效果。生物免疫系统具有天然的鲁棒性，Takahashi 于 1997 年提出了可应用于反馈控制器中的两种免疫反馈控制机制，其中的一种为效应 T 细胞和被激活的 B 细胞之间的免疫规律[1]。模糊控制作为智能控制的一种，实质是对人脑的一种模拟，它在复杂、大滞后、难以建立精确数学模型的非线性控制过程中表现出了优越的性能，具有不依赖于控制对象的数学模型、鲁棒性好、简单实用等优点。免疫原理、模糊控制理论和传统 PID 控制器相结合，能显著的改善系统的动态和稳态性能[2-3]。在某型速率转台的研制当中，我们采用了一种中型直流力矩电机作为转台伺服电机，采用自行研制的 PWM 驱动器作为驱动部件，提出了基于模糊免疫 PID 控制的直流电机 PWM 调速系统，控制器的输出直接调节 PWM 波的占空比，实现对力矩电机伺服系统的控制。

1 直流力矩电机模型

系统采用的伺服电机是 J200lYX04 型永磁直流力矩电机，为中功率力矩电机。电机电枢回路电压平衡方程为：

$$U_a(t)=L_a\frac{\mathrm{d}I_a(t)}{\mathrm{d}t}+R_aI_a(t)+E_a(t)。\tag{1}$$

转矩平衡方程式：

$$T_m=T_0+T_L+J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}。\tag{2}$$

电磁转矩与反电势分别为：

$$T_m=K_mI_a；\tag{3}$$

$$E_a=K_e\omega。\tag{4}$$

综合式(1)~(4)，经拉普拉斯变换后整理得到：

$$I_a(s)=\frac{1}{L_as+Ra}[U_a(s)-E_a(s)]；\tag{5}$$

$$T_m=K_mI_a(s)；\tag{6}$$

收稿日期：2009-12-29

作者简介：郭　霞（1973–），女，工程师，大学。

$$E_a = K_e\omega(s)\,; \tag{7}$$

$$\omega(s)=\frac{1}{Js}(T_m(s)-T_0(s)-T_L(s))\,。 \tag{8}$$

式(1)~(8)中：K_e、K_m 为常数；T_L 为负载转矩。

2 PWM 驱动系统的设计

针对力矩电机研制的驱动卡，采用 INTERSIL 公司的 HIP4080A 芯片作为功率 MOSFET 的驱动集成电路。同时，设计了保护电路，板上还设置了 PWM 脉宽调制波形发生电路，既能接受来自工控机的数字 PWM 信号，作为单独的驱动功能模块，也能直接用在要求较低的场合，控制直流电机的运动。

驱动系统采用 IR 公司生产的 IRF530N 功率 MOSFET。该型 MOSFET 功率管的驱动功率小，工作速度高，开关时间短，热稳定性好，抗干扰能力强。IRF530N 与 HIP4080A 芯片的连接关系如图 1 所示。双极性 PWM 控制系统的增益 K_{PWM} 定义为：$K_{PWM}=U_S/U_{DP}$，其中，U_{DP} 为控制信号电压的最大值[4]。

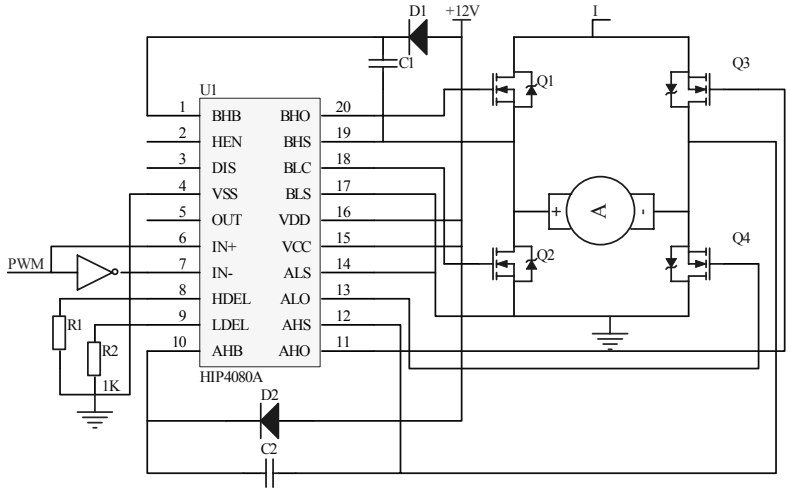


图 1　HIP4080A 与 MOSFET 连接关系图

3 模糊免疫 PID 控制器的设计

作为一种成熟的控制方式，PID 控制因其结构简单，可靠性好被广泛应用。然而，转台系统模型并非完全精确，环境和温度的改变导致参数的不确定性，加上干扰和负载变化等因素，常规的 PID 控制往往达不到理想的效果。本文针对系统的特点采用了模糊免疫控制和 PID 控制相结合的控制方式。

3.1 生物免疫系统机理

免疫系统中最重要的细胞是淋巴细胞，主要有 B 细胞和 T 细胞。B 细胞从骨髓中产生，主要功能是产生抗体，执行特异体液免疫功能，其过程由 T 细胞调节；T 细胞由胸腺产生，执行特异细胞免疫和免疫调节功能。T 细胞分抑制 T 细胞（TS）和辅助 T 细胞（TH），分别用于抑制和帮助 B 细胞对某一刺激的反应。T 细胞在免疫反应中起着关键作用，因此可以借鉴 T 细胞的反馈调节机理。抗原进入机体后，将信息传递给 TH 细胞和 TS 细胞，TS 细胞抑制 TH 细胞的产生。在 TH 细胞和 TS 细胞的共同刺激下，B 细胞产生抗体来清除抗原，抗原较多时，TH 细胞也较多，而 TS 细胞却较少，从而产生的 B 细胞也会多些。随着抗原的减少，体内 TS 细胞增多，它抑制了 TH 细胞的产生，则 B 细胞也随着减少。最终，免疫反馈系统趋于平衡。

3.2 模糊免疫控制器

基于上述的T细胞的反馈调节机理，可以用如下的几个方程[5]来构建免疫反馈控制器，这些方程包含了抗体、抗原、辅助T细胞和抑制T细胞。定义第 k 代的抗原数量为$\varepsilon(k)$，由抗原刺激的TH细胞的输出为$TH(k)$，TS细胞对B细胞的影响为$TS(k)$，则B细胞接受的总刺激为

$$S(k)=TH(k)-TS(k)\,, \tag{9}$$

$$TH(k)=k_1\varepsilon(k)\,, \tag{10}$$

$$TS(k)=k_2 f[\Delta S(k)]\varepsilon(k)\,。 \tag{11}$$

若以抗原的数量 $\varepsilon(k)$作为偏差 $e(k)$，B 细胞接受的总刺激 $S(k)$作为控制输入 $u(k)$，则有如下的反

馈控制规律

$$u(k)=K\{1-\eta f[\Delta u(k)]\}e(k), \tag{12}$$

式中：$K=k_1$；$\eta=k_1/K_2$；f 是一选定的非线性函数。在式(12)中，参数 K 控制反应速度，参数 η 控制稳定效果。考虑常规的 P 型控制器的控制算法为

$$u(k)=K_{\mathrm{p}}e(k), \tag{13}$$

式中，K_{p} 为比例增益。

将式(12)与式(13)比较可知，基于免疫反馈机理的控制器是一个非线性的 P 型控制器，其比例增益 $K_{\mathrm{p}}=K\{1-\eta f[\Delta u(k)]\}$，它随着控制器输出的变化而变化。控制器的性能在很大程度上依赖于参数 K，η 和非线性函数的选取。

模糊控制器是构造非线性函数逼近器的一种有效方法。考虑到设计 P 型免疫反馈控制规律时选取参数值 K、η 和非线性函数 f 的困难，用一个模糊控制器来实现抑制项 f。本系统中的模糊控制器有两个输入变量和一个输出变量。两个输入变量分别是 P 型免疫控制器的输出 $u(k)$ 和输出变化 $\Delta u(k)$；输出变量是 TS 细胞的抑制量 $f[u(k),\Delta u(k)]$。每个输入变量被 2 个输出模糊集模糊化，它们分别是“正”（P）和“负”（N），见图 2。输出变量被 3 个输出模糊集模糊化，它们分别是“正”（P）“零”（Z）和“负”（N），见图 3。以上隶属度函数定义在（-∞，+∞）。

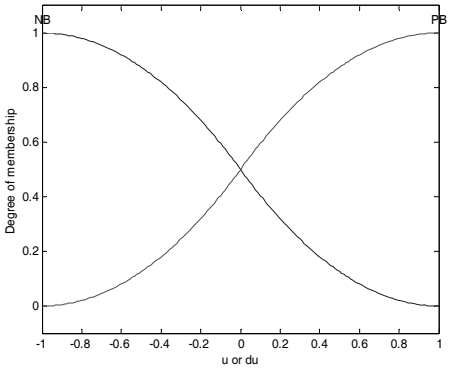


图 2　输入变量 u、du 的隶属函数

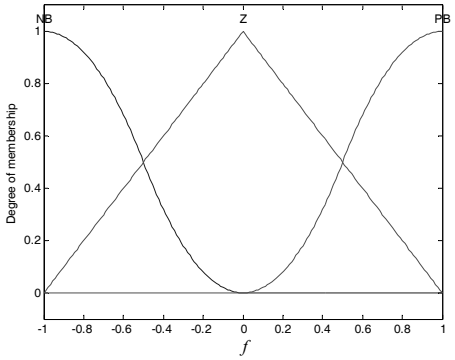


图 3　控制器输出 $f[u(k),\Delta u(k)]$ 的隶属函数

模糊控制器使用以下规则[6]：

R1：if $u(k)$ is P and $\Delta u(k)$ is P，then $f[u(k),\Delta u(k)]$ is N

R2：if $u(k)$ is P and $\Delta u(k)$ is N，then $f[u(k),\Delta u(k)]$ is Z

R3：if $u(k)$ is N and $\Delta u(k)$ is P，then $f[u(k),\Delta u(k)]$ is Z

R4：if $u(k)$ is N and $\Delta u(k)$ is N，then $f[u(k),\Delta u(k)]$ is P

以上各规则中，使用 Zadeh 的模糊逻辑 AND 和 OR 操作，并采用常用的重心反模糊器得到模糊控制器的输出 $f[u(k),\Delta u(k)]$。

最后，模糊免疫 PID 控制器的输出为：

$$u(k)=u(k-1)+K\{1-\eta f[\Delta u(k)]\}\times g(e(k)), \tag{14}$$

式中：

$$g(e(k))=K_p[e(k)-e(k-1)]+K_i'e(k)+K_d'[e(k)-2e(k-1)+e(k-2)]。$$

4 试验结果与结论

本文针对所采用的直流力矩电机进行了仿真研究。力矩电机参数为：电枢电阻 R=7.5 Ω，L=16 mH，J_a=0.005 kg·m^2，J_L=0.02 kg·m^2，堵转电流 I_a=4 A，堵转力矩 T_a=16.5 N·m。PWM 驱动卡的增益 $K_{\mathrm{PWM}}=U_{\mathrm{S}}/U_{\mathrm{DP}}$=12，PWM脉宽调制波的频率为20 kHz。采样时间为3 ms，采用模糊免疫PID控制器，取 K=0.50，η =0.90，仿真时间为15 s。当输入指令信号为阶跃输入信号时，系统的速度响应如图4、5所示，分别为单独采用PID控制和采用模糊免疫PID控制器的响应曲线。图6为加入干扰的模糊免疫PID控制器的响应曲线。仿真结果表明：采用模糊免疫PID控制器的系统响应速度大大加快，起始时的振荡消失，并且很快达到稳态，同时其抗干扰能力也很强，具有良好的鲁棒性。

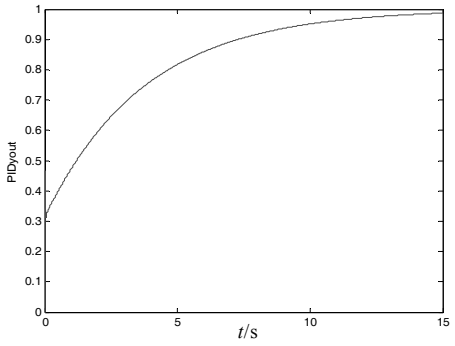


图 4　PID 控制算法的阶跃响应

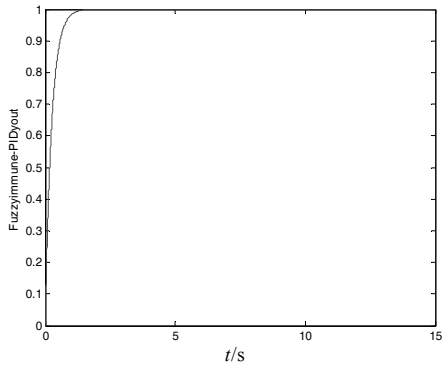


图 5 模糊免疫 PID 控制算法的阶跃响应

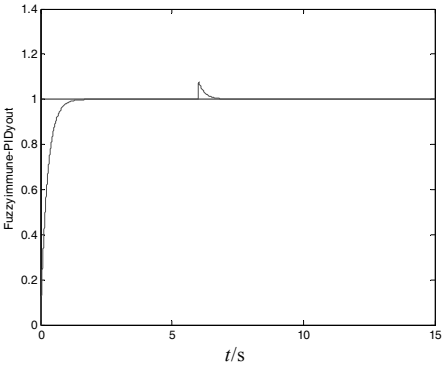


图 6 加入干扰后的阶跃响应曲线

参考文献：

[1] TAKAHASHI K, YAMADA T. Self-tuning immune feedback controller for controlling mechanical systems[C]//Proc 1997 1st IEEE, ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics. Tokyo, 1997:102-105.

[2] DONG HWA KIM. Intelligent tuning of pid controller for multivariable process using immune network model based on fuzzy set[C]//10th IEEE International Fuzzy Systems Conference. Seoul, 2001:94-96.

[3] DONG HAWS KIM. Tuning of a PID controller using an artificial immune network model and local fuzzy set[C]//IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Joint 9th. Vancouver, 2001:2698-2703.

[4] 秦继荣, 沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993:30-34.

[5] 李涛. 计算机免疫学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 195-199.

[6] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004:94-146.

PWM Speed Regulating System of DC Torque Motor Based on Fuzzy Immune-PID Control

GUO Xia[1]，LI Hai-Tao[2]，MA Xin-xing[3]

（1．The 91796th Unit of PLA；2. The 91856th Unit of PLA，Huludao Liaoning 125000，China；
3．New Equipment Training Center，NAAU，Yantai Shandong 264001，China）

Abstract: A PWM drive card was designed aiming at a certain type of DC torque motor used in the speed turntable. A fuzzy immune-PID control method was used instead of the traditional PID method, in order to modulate the PWM waves, and then the control for servo system of torque motor was realized. The simulation results show that, compared with the traditional PID method, the responding time is greatly reduced by using the fuzzy immune-PID control method. And the system gets good anti-interference ability, of which dynamic and steady performances are also improved.

Key words: fuzzy; immune; PID; PWM; torque motor