

doi:10.16104/j.issn.1673-1891.2021.04.012

# 多电机同步控制建模与仿真

王萍

(安徽三联学院,安徽合肥 230601)

**摘要:**采用偏差耦合控制结构控制 4 台永磁同步电机同步运动时,由于控制器结构复杂,计算量大,而且传统的 PID 控制算法不能在线实时调整参数,动态响应慢。因此,对 4 电机同步运动控制结构和控制算法进行改进,采用环形耦合控制结构和免疫单神经元 PID 控制器控制整个同步运动系统。仿真结果表明:该控制结构复杂度低、跟踪性能和稳态性能良好,抗干扰性强。

**关键词:**环形耦合;免疫单神经元 PID;永磁同步电机

**中图分类号:**TM301.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1673-1891(2021)04-0066-04

## Modeling and Simulation of Multi Motor Synchronous Control

WANG Ping

(Anhui Sanlian University, Hefei, Anhui 230601, China)

**Abstract:** When the deviation coupling control structure is used to control the synchronous movement of four permanent magnet synchronous motors, the structure of the controller is complex and the amount of calculation is large. Moreover, the traditional PID control algorithm cannot adjust the parameters online and in real time, and the dynamic response is slow. Therefore, the four motor synchronous motion control structure and control algorithm are improved, and the ring coupling control structure and immune single neuron PID controller are used to control the whole synchronous motion system. The simulation results show that the control structure has moderate complexity, good tracking performance and stabilizing performance, and strong anti-interference.

**Keywords:** ring coupling; immune single neuron PID; permanent magnet synchronous motors

### 0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motors, PMSM)以其结构简单、运行可靠、效率高等优势在数控机床、机器人等领域得到广泛应用。随着现代工业的发展,在实际的自动化生产中,一台电机往往不能满足工业现场的生产需求,需要多台电机保持一定比例同步或者按特定关系同步协同运动<sup>[1]</sup>,并且对多电机同步控制精度提出了更高的要求,以进一步提高系统的可靠性和产品质量。因此,围绕多台永磁同步电机协调控制的研究具有重要的理论和现实意义。

针对多电机同步控制,传统的非耦合控制结构有:并行控制、主从控制、虚拟主轴控制<sup>[2]</sup>,各轴之间相互独立。20 世纪 80 年代, Koren<sup>[3]</sup>提出了交叉

耦合控制策略,这种两轴运动状态相互耦合,提高了系统的同步性能。2003 年 Perez-Pinal 等<sup>[4]</sup>提出了偏差耦合控制,这种控制方式适用于多电机系统,缺点是随着电机数量的增多,计算量按电机数量的平方次增加,控制结构也愈加复杂。针对以上控制结构的弊端,2010 年,刘然等<sup>[5]</sup>提出环形耦合控制,保证了系统的同步性能,降低了同步控制结构的复杂度。

PMSM 控制系统是一个强耦合、多变量的非线性系统,建立合理的数学模型是分析的基础,也是其难点,传统的控制方法主要有矢量控制和直接转矩控制。鉴于矢量控制调速范围宽,能获得良好的动、静态性能,因此,采用定子励磁电流  $i_d = 0$  转子磁场定向的矢量控制方法。

目前,针对多电机同步控制,众多学者采用先

收稿日期:2021-09-08

基金项目:安徽省教育厅高校自然科学重点项目(KJ2020A0807)。

作者简介:王萍(1985—),女,安徽淮南人,讲师,硕士,研究方向:运动控制理论与技术。

进的控制理论,如自适应全局滑模算法<sup>[6]</sup>、自抗扰控制<sup>[7]</sup>、粒子群算法<sup>[8]</sup>等取代传统的 PID 控制,以提高同步控制系统的鲁棒性和动态响应。本文针对 PMSM 控制系统的非线性、各输入量之间的强耦合性,采用一种免疫单神经元 PID (Immune Single Neuron PID, ISNPID) 控制器,将生物的免疫反馈机理与单神经元自适应 PID 控制器相结合,以加快学习速率,使得系统具有更快的动态响应速度,更优良的控制性能。

### 1 环形耦合控制结构

图 1 所示为多电机环形耦合控制结构。 $K_i$  为速度补偿器增益,作用是补偿各电机间转动惯量的不同, $K_i = J_{i+1}/J_i (i=1,2,3,4)$ ,其中  $i$  表示电动机序号, $J_i$  表示第  $i$  个电机的转动惯量,当  $i+1>4$  时, $J_{i+1}$  取  $J_1$ 。

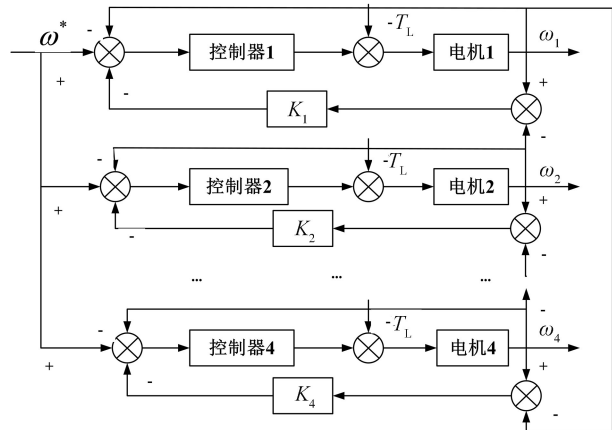


图 1 环形耦合同步控制结构

采用环形耦合控制时,补偿器只根据与其相邻的一台电机的同步误差确定该电机的补偿量,补偿器的复杂度不随电机数量的增加而改变。例如,对于  $n$  台电机来说,环形耦合控制需要进行  $2n$  次比较运算,而偏差耦合控制则需要进行  $n^2$  次比较运算。

## 2 免疫单神经元 PID 算法

### 2.1 单神经元自适应 PID 控制器

图 2 为单神经元自适应 PID 控制器结构。转换器的输入值为给定值  $y_d(k)$ ,系统输出为  $y(k)$ ,转换器的输出为神经元学习所需要的 3 个状态量  $x_1(k)$ ,  $x_2(k)$ ,  $x_3(k)$ ,神经元的输出与  $x_i(k)$  和  $w_i(k)$  有关,其控制规律通常采用改进后的有监督的 Hebb 学习规则算法,即将其中的  $x_i(k)$  改为  $e(k) + \Delta e(k)$ ,表达式如式(1)~(3)所示:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k) x_i(k) \quad (1)$$

$$w_i(k) = w_j(k) / \sum_{j=1}^3 |w_j(k)| \quad (2)$$

$$\begin{cases} w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_1 z(k) u(k) (e(k) + \Delta e(k)) \\ w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_2 z(k) u(k) (e(k) + \Delta e(k)) \\ w_3(k) = w_3(k-1) + \eta_3 z(k) u(k) (e(k) + \Delta e(k)) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 。

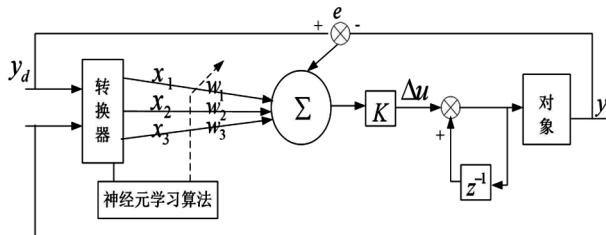


图 2 单神经元自适应 PID 控制器结构

### 2.2 神经元增益的免疫自调整

图 3 所示为体液免疫过程,得出适用于控制系统的免疫调节器的基本模型为:定义第  $k$  代的抗原量浓度为  $\varepsilon(k)$ ,由抗原刺激的  $T_H$  细胞输出为  $T_H(k)$ ,  $T_S$  细胞对 B 细胞的影响为  $T_S(k)$  (这里主要考虑  $T_S$  对 B 细胞的抑制),则第  $k$  代 B 细胞的量浓度可表示为

$$B(k) = T_H(k) - T_S(k) \quad (4)$$

$$T_H(k) = K_1 \varepsilon(k) \quad (5)$$

$$T_S(k) = K_2 \{f[\Delta B(k)]\} \varepsilon(k) \quad (6)$$

式中: $K_1$  为  $T_H$  细胞促进因子; $K_2$  为  $T_S$  细胞抑制因子; $\Delta B(k) = B(k) - B(k-1)$ ,为 B 细胞量浓度的变化; $f(\cdot)$  为非线性函数,与 B 细胞量浓度的变化有关,表示在第  $k$  代时,B 细胞分泌产生的抗体和抗原相互作用得到的免疫效果。

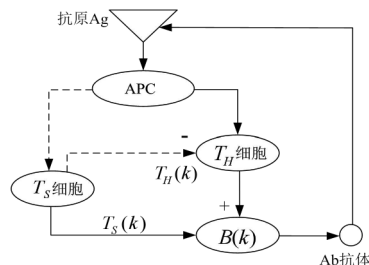


图 3 免疫反馈机理示意

由式(4)~(6),可得 B 细胞的量浓度与抗原量浓度的关系式:

$$B(k) = K_1 \varepsilon(k) - K_2 \{f[\Delta B(k)]\} \varepsilon(k) = K' \{1 - \eta f[\Delta B(k)]\} \varepsilon(k) \quad (7)$$

式中: $K' = K_1$ ;  $\eta = K_2/K_1$ ,表示  $T_S$  与  $T_H$  作用的比例系数。

将抗原量浓度  $\varepsilon(k)$  表示偏差  $e(k)$ ,B 细胞的量浓度  $B(k)$  表示控制输入  $u(k)$ ,有下列控制规律:

$$u(k) = K' \{ 1 - \eta f [ \Delta u(k) ] \} e(k) \quad (8)$$

比例增益为

$$\overline{K'} = K' \{ 1 - \eta f [ \Delta u(k) ] \} \quad (9)$$

在  $K$  的自调整中引入免疫调节机理,选择免疫调节函数<sup>[9]</sup>:

$$K = f(e) = k_m (1 - \eta \exp(-\alpha e^2)) \quad (10)$$

式中: $k_m$  为比例系数,控制免疫调节反应速度; $\eta$  为控制稳定效果; $\alpha$  为影响免疫调节曲线的坡度。

### 3 仿真研究

#### 3.1 仿真模型

采用环形耦合控制结构在 MATLAB/Simulink 仿真软件中建立 4 电机同步控制系统仿真模型,如图 4 所示。单台 PMSM 仿真模型如图 5 所示,包含 PMSM 模块、电机测量模块、逆变器模块、空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 模块、PID 控制器模块,其中速度环采用的是 ISNPID 控制器。ISNPID 控制器仿真模型利用 S 函数对其进行建模,如图 6 所示。

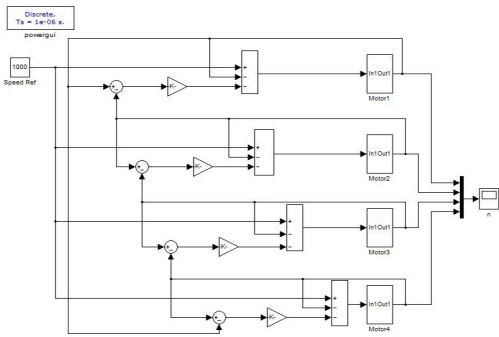


图 4 4 电机环形耦合控制仿真模型

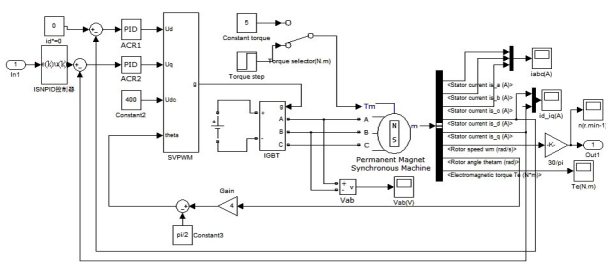


图 5 单台 PMSM 仿真模型

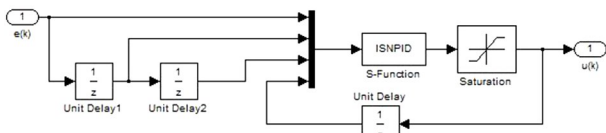


图 6 ISNPID 控制器仿真模型

#### 3.2 仿真参数

4 台 PMSM 的参数设置如表 1 所示。表 1 中, $n_N$  为电机给定参考转速; $T_N$  为负载转矩; $R_s$  为电枢

电阻; $L_d$  和  $L_q$  分别为交直轴同步电感; $\psi_f$  为转子磁场磁通; $J$  为转动惯量; $P$  为极对数。此外,直流母线电压  $U_{dc} = 400 \text{ V}$ ,逆变器开关频率  $10 \text{ KHz}$ 。

表 1 4 台电机参数

参数	电机 1	电机 2	电机 3	电机 4
$n_N / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 000	1 000	1 000	1 000
$T_N / (\text{N} \cdot \text{m})$	5	5	5	5
$R_s / \Omega$	2.9	3.0	3.1	3.2
$L_d / \text{mH}$	8.5	8.7	8.9	9.1
$L_q / \text{mH}$	8.5	8.7	8.9	9.1
$\psi_f / \text{Wb}$	0.17	0.19	0.20	0.22
$J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$0.765e-3$	$0.77e-3$	$0.782e-3$	$0.80e-3$
$P$	4	4	4	4

采用常规 PID 控制器,速度环的 PID 控制器参数为  $K_p = 0.05, K_i = 1.4, K_d = 0$ ;电流环的 2 个 PID 控制器参数相同,  $K_p = 200, K_i = 40, K_d = 0$ 。ISNPID 控制器  $w_1(0) = w_2(0) = w_3(0) = 0.1, \eta_p = 0.9, \eta_i = 0.2, \eta_d = 0$ ,比例因子  $k_m = 0.2$ ,函数坡度  $\alpha = 0.1 \times 10^{-4}$ ,控制稳定度  $\eta = 0.1$ 。

### 4 实验结果

整个系统 4 台电机的给定参考转速为  $n_N = 1\,000 \text{ r/min}$ ,仿真时间为  $1 \text{ s}$ 。启动时 4 台电机加上相同的负载  $T_N = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,在  $t = 0.08 \text{ s}$  时,将电机 1 和 3 的负载转矩由  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$  分别突变为  $7 \text{ N} \cdot \text{m}$  和  $9 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,其余 2 台电机保持不变。

4 电机速度环分别采用常规 PID 控制和 ISNPID 控制,仿真得到 4 电机跟踪误差和同步误差曲线,如图 7 和 8 所示。

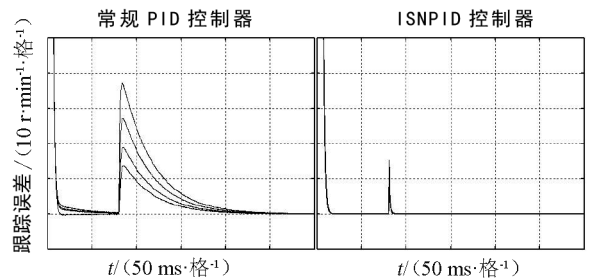


图 7 跟踪误差仿真结果对比

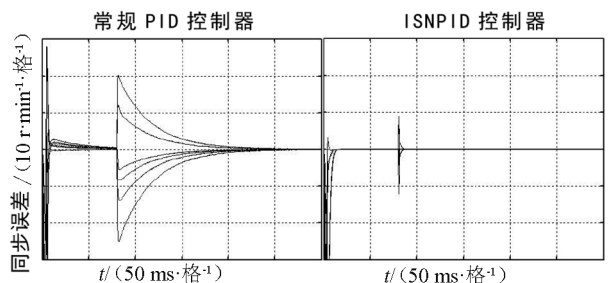


图 8 同步误差仿真结果对比

从图中可以看出,在电机启动阶段2种控制器都具有较快的响应速度,调节时间短,无超调,系统稳定性良好;在负载发生突变时,2种控制器均能对突变做出响应,对比之下,ISNPID控制的4台电机速度变化量更小,调节时间更快,能迅速消除突变引起的转速误差,达到同步运行的稳定状态,体现出较好的鲁棒性。

## 5 结语

在4电机同步控制系统中运用环形耦合控制结

构,大大降低了控制系统的复杂度。采用ISNPID控制器对速度环进行控制,解决了传统PID控制器不能在线实时调整参数的缺点,有效抑制了负载扰动、电机参数不匹配等因素的影响。对比仿真结果表明,环形耦合控制结构下的ISNPID控制算法具有较快的响应速度,能有效抑制负载突变对同步控制系统稳定性的影响,使系统具有良好的跟踪性能和同步性能,保证多电机同步控制系统的控制精度和稳定性。

## 参考文献:

- [1] 叶宇豪,彭飞,黄允凯.多电机同步运动控制技术综述[J].电工技术学报,2021,36(14):2922-2935.
- [2] 王毅波,曹宽.多电机同步控制技术发展简介[J].微特电机,2019,47(8):69-73.
- [3] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing system[J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 1980, 102(12):265-272.
- [4] PEREZ-PINAL F, CALDERON G, ARAUJO-VARGAS I. Relative coupling strategy[J]. IEEE, 2003, 2(6):1162-1166.
- [5] 刘然,孙建忠,罗亚琴,等.多电机滑模环形耦合同步控制策略研究[J].中国机械工程,2010,21(22):2662-2665.
- [6] HUANG Z L, LI Y M, SONG G Q, et al. Speed and phase adjacent cross-coupling synchronous control of multi-exciter in vibration system considering material influence[J]. IEEE Access, 2019, 7:63204-63216.
- [7] 王兴亮,李德,杜超,等.基于改进自抗扰控制的三电机同步系统研究[J].电气传动自动化,2020,42(2):1-7.
- [8] 侯崎山,明灿坤,等.基于粒子群-模糊PID的织网机主动穿线板多电机协同控制[J].东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(1):70-76.
- [9] CASTROL N D, TIMMIS J I. Artificial immune systems as a novel soft computing paradigm[J]. Soft Computing, 2003, 7:526-544.