

多开关磁阻电机无轴传动系统同步控制方法

杨瑞

(郑州科技学院, 郑州 450064)

摘要: **目的** 解决多开关磁阻电机同步控制中输出功率不平衡的问题, 提高印刷业的生产效率和产品质量。**方法** 在传统交叉耦合同步策略的基础上, 提出一种基于神经元变结构 PID 控制的同步控制方法, 该控制策略用一个神经元控制器实现变结构 PID 控制, 同时用另一个神经元控制器实时调整变结构 PID 控制器的参数, 从而保证 2 台开关磁阻电机的输出功率相同。**结果** 通过仿真数据分析, 其达到稳态的调节时间和动态响应时间比现有的同步控制小, 且抗干扰能力也得到了提高。**结论** 该策略可提高多电机同步控制系统的同步跟随性能和抗干扰性能, 增强多电机无轴传动的同步协调控制能力。

关键词: 开关磁阻电机; 同步控制; 神经元变结构 PID 控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0178-05

Synchronous Control Method for Multi-switch Reluctance Motors with Shiftless Drive

YANG Rui

(Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the unbalanced output power for multi-switch reluctance motor (SRM) synchronous control, in order to improve the production efficiency and product quality in the printing industry. On the basis of traditional cross-coupled synchronous strategy, a synchronous control method based on the neuron variable structural PID control was proposed. Such control strategy achieved the variable structural PID control with one neuron controller and adjusted the parameters of the variable PID controller in real time with another neuron controller, so as to ensure that the output powers of two SRMs were the same. According to the analysis on the simulation data, the adjustment time and dynamic response time taken to reach the stable state were shorter than those of the existing synchronous control and its anti-disturbance performance was also improved. The proposed strategy can improve the synchronous tracing performance and anti-disturbance performance of the multi-motor synchronization control system and enhance the synchronous coordination control ability of multiple motors with shaftless drive.

KEY WORDS: switch reluctance motor; synchronous control; neuron variable structural PID control

目前, 在造纸、印染、装订等高精度、高转速传动系统中, 能否获得较好的控制效果和动态品质, 多电机同步控制的性能优劣一直是最核心的问题, 并且多电机同步技术的性能好坏直接影响着系统的可靠性和产品的质量^[1-6]。开关磁阻电机 (SRM) 作为一种新型的调速电机, 调速系统不仅具有交流电机的调速性能, 同时也具备直流电机调速系统的优点, 是继变频调速系统、无刷直流电动机调速系统的最新一代无极调速系统^[7-10]。另外, 它的结构简单坚固、调速

范围宽和调速性能优异, 且在整个调速范围内都具有较高效率和系统可靠性高等优点。为了实现 SRM 的变频调速, 目前比较常用的是直接转矩控制算法, 但由于其高饱和特性, SRM 驱动系统是一个时变非线性系统, 且转矩输出是定子电流和转子位置的非线性函数^[11-12], 提高了直接转矩控制的难度。

随着高性能调速系统的发展, 单一、低功率电机调速系统逐步被大功率、大惯量调速系统所替代。为了提高电机的功率范围, 目前比较常用的方法是采用

收稿日期: 2016-10-21

作者简介: 杨瑞 (1984—), 女, 本科, 郑州科技学院讲师, 主要研究方向为集成电路工程。

多电机并联同步运行。由于电机等元器件存在离散性,即相同标称参数的元器件,其真实参数不可能完全一致,因此必须从控制上解决多电机同步控制的问题。已有的控制算法通常采用交叉耦合控制算法,虽然该方法可有效改善多轴调速系统的同步控制,但由于电机参数的存在差异性,对功率输出并不能起到平衡作用,容易造成一台电机功率长期过大的情况^[12-13]。另外,该控制策略采用的仍然是常规 PID 控制器,虽然该算法结构简单、便于控制实现,但是,SRM 是一个多变量、强耦合的复杂非线性系统,采用常规 PID 控制器并不能取得满意的效果。为了获得较好的控制效果,文中以四相 8/6 极 SRM 电机为例,将提出一种基于神经元变结构 PID 控制的双 SRM 同步控制算法,在传统的交叉耦合同步策略的基础上,利用神经元变结构 PID 控制不需要建立被控对象的精确数学模型的优点^[14-15],增加一个电磁转矩神经元变结构 PID 控制器,从而可以保证 2 台 SRM 输出功率相同。最后通过仿真结果验证了算法的可行性。

1 开关磁阻电机的数学建模

对于四相 8/6 极 SRM 电机,当不计磁滞、涡流及绕组间互感时, $k(1,2,3,4)$ 相电机的基本电压方程可表示为^[13]:

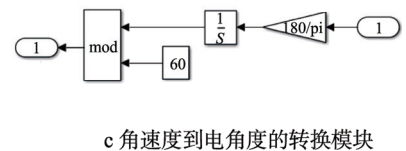
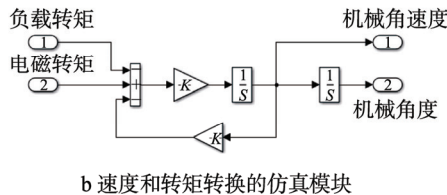
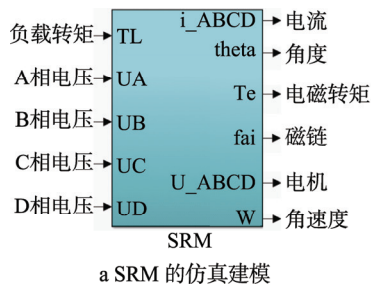


图 1 四相 8/6 极 SRM 的数学建模

Fig.1 Simulation model of four-phase 8/6 pair SRM

2 多开关磁阻电机的同步控制方法

2.1 同步控制方法

当电机带载运行时,由于电机参数的差异性将会导致 2 台电机的输出功率不一致,严重的情况下可能会导致单台电机负载转矩过重而烧毁。为了避免此类事故的发生,需要保证 2 台电机输出功率保持平衡。电机瞬时输出功率可以用式 (5) 表示,即:

$$P_{ei} = \omega_{ei} T_{ei} \quad (5)$$

式中: P_{ei} 为瞬时功率; ω_{ei} 为当前速度; T_{ei} 为瞬时电磁转矩。从式 (5) 可以看出,要保证单台电机的输出功率相同,在转速相同的情况下尽量保持瞬时电磁转矩相同。为此,文中将提出一种基于神经元变结构 PID

$$u_k = Ri_k + \frac{d\psi_k}{dt}, \quad (1)$$

式中: u_k , i_k , ψ_k 分别为第 k 相相电压、相电流和磁链。

由于各相绕组磁链是绕组电流 i_k 和转子位置角 θ 的函数,故第 k 磁链 ψ_k 为:

$$\psi_k = \psi(i_k, \theta) \quad (2)$$

根据力学定律可知,电机在负载作用下的机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3)$$

式中: ω_m 为电机的机械角速度; J 为转动惯量; B 为阻尼系数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩。根据机电能量转变原理,电磁转矩 T_e 等于磁场储能对机械角位移的偏导,因此有^[12]:

$$T_e = \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = \frac{\partial (\int_0^i \psi(\theta, i) di)}{\partial \theta} \quad (4)$$

式中: i 为相电流。以上给出了四相 8/6 极 SRM 的数学模型。为了便于后期的仿真分析,根据式 (1) — (4) 所示的表达式在 Matlab 仿真软件上建立的仿真模型见图 1。其中,电磁转矩和第 k 相相电流采用的查表法进行计算得到的。

控制的同步控制方法,具体见图 2。其中,瞬时转矩的计算是根据电流和位置角的数据,采用查表法和相关表达式得到的。从图 2 可以看出,采用此控制框图可提高系统的同步速度,减小转矩误差,提高鲁棒性。

2.2 神经元变结构 PID 控制

为了改善常规 PID 控制器的控制性能,文中考虑将具有自学习功能的神经元控制与比例控制相结合,设计一种神经元变结构 PID 控制算法,具体控制框图见图 3。

为了便于分析神经元 PID 控制算法,对于图 3,首先定义神经元 1 的 3 个输入状态变量为:

$$\begin{cases} x_1(k) = r(k) \\ x_2(k) = r(k) - y(k) = e(k) \\ x_3(k) = x_2(k) - x_2(k-1) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $r(k)$ 为 k 时刻神经元 1 的输入量; $y(k)$ 为 k 时刻神经元 1 的实际输出量和; $e(k)$ 为 k 时刻神经元 1 的误差量。

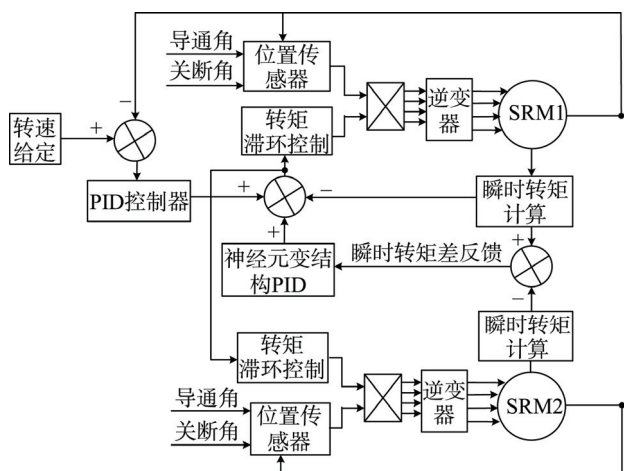


图 2 基于神经元变结构 PID 的同步控制方法

Fig.2 Synchronic control method based neuron variable structural PID

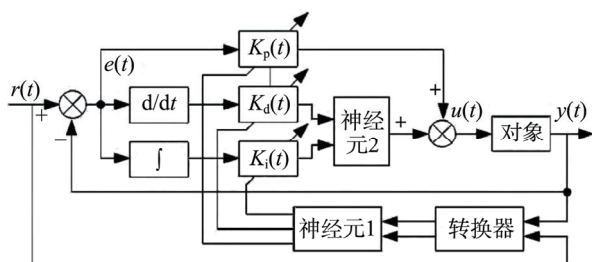


图 3 神经元变结构 PID 控制

Fig.3 Diagram of neuron variable structural PID

采用将神经元 1 的在线自学习功能,文中根据被控对象的动态特性在线调整并输出变结构 PID 控制器的 3 个可调参数 K_p , K_i , K_d , 采用的调整算法定义为:

$$K_p(k) = K_1 |w_1(k)| / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \quad (7)$$

$$K_i(k) = K_2 |w_2(k)| / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \quad (8)$$

$$K_d(k) = K_3 |w_3(k)| / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \quad (9)$$

式中: 可调参数 K_1 , K_2 , K_3 为神经元 1 的比例增益; $w_1(k)$, $w_2(k)$, $w_3(k)$ 为 k 时刻神经元 1 的权值增益。根据神经元算法的基本特性,采用神经元 1 的权值调整算法为:

$$w_i(k) = w_i(k-1) + \eta_i e(k) x_i(k) \quad (10)$$

式中: $\eta(k)$, $i=1,2,3$ 为神经元 1 的学习速率。对于神经元 2 算法,定义系统的 2 个输入状态变量为:

$$\begin{cases} x_1(k) = K_d(k)(e(k) - e(k-1)) \\ x_2(k) = K_i(k)(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \end{cases} \quad (11)$$

为了能够实现常规 PID 控制算法的变结构控制,

设 $\alpha(k)$ 为 K_i 和 K_d 的调整系数,且有:

$$\alpha(k) = \begin{cases} \frac{|w_1(k)|}{|w_1(k)| + |w_2(k)|}, & 0 < \varepsilon \leq |e(k)| \\ 0, & \varepsilon > |e(k)| \end{cases} \quad (12)$$

式中: $w_1(k)$, $w_2(k)$ 为 k 时刻神经元 2 的权值增益。

定义神经元 2 算法的输出控制量为:

$$u(k) = u(k-1) + \alpha(k) K K_d(k) (e(k) - e(k-1)) + (1 - \alpha(k)) K K_i(k) \cdot (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (13)$$

式中: K 为神经元 2 的比例增益。

由式(13)可以发现,当被控对象的输入误差较大时, $u(k)$ 可以通过在线调节 $\alpha(k)$ 的值以权衡常规 PID 控制中的微分环节积分环节的作用。另外,当被控对象的输入当误差较小时,此时可以取消常规 PID 控制中的微分环节,从而实现了常规 PID 控制的变结构控制功能。采用的神经元 2 权值调整算法为:

$$w_i(k) = w_i(k-1) + \eta_i e(k) x_i(k) \quad (14)$$

式中: $\eta(k)$, $i=1,2$ 为神经元 2 的学习速率。

综上所述,神经元变结构 PID 的控制器可以写为:

$$u(k) = u(k-1) + K_p(k) e(k) + \alpha(k) K K_d(k) \cdot (e(k) - e(k-1)) + (1 - \alpha(k)) K K_i(k) \cdot (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (15)$$

从式(15)可看出,神经元变结构 PID 控制算法结构比较简单,便于控制器的实现。

3 仿真研究

为了验证所提控制算法的有效性,以图 1 中的四相 8/6 极开关磁阻电机为例,根据图 2 所示的控制框图,在 Matlab/Simulink 环境下搭建基于神经元变结构 PID 的双开关磁阻电机同步控制系统仿真模型。由于电机参数存在差异,仿真参数设置为:电机 SMR1 的定子电阻为 $R=1.4 \Omega$,转动惯量为 $J=0.013 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,电机 SMR2 的定子电阻为 $R_2=1.6 \Omega$,转动惯量设置为 $J=0.012 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,其余电机参数相同。

3.1 稳态性能分析

为了说明所提控制算法的稳态性能,在仿真中参考转速设置为 600 r/min, SMR1 的负载转矩 T_L 为 35 N·m, SMR2 的负载转矩 T_L 为 38 N·m,图 4 给出了给出采用传统交叉耦合控制和基于神经元变结构 PID 同步方法的仿真结果,图 4 中 T_{av} 为瞬时电磁转矩量的平均值。

从图 4a 可以看出,采用传统交叉耦合控制算法时,双 SRM 同步控制系统的输出电磁转矩差别比较大,这将会导致其中一台 SRM 的输出功率较大,进而会可能损坏电机。相反,从图 4b 可以看出,基于神经元变结构 PID 控制的同步控制系统具有较好的

控制性能, 2台电机的输出电磁转矩基本相同, 保证了2台电机输出功率的平衡性。

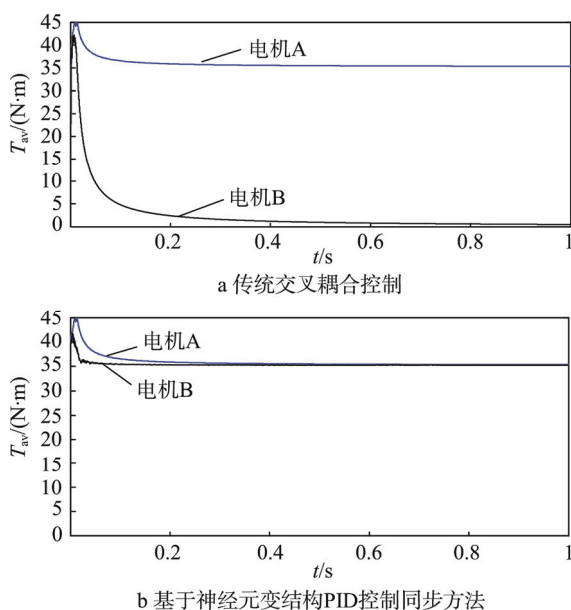


图4 负载转矩不同时的仿真结果

Fig.4 Simulation results on the condition of different load torque

3.2 动态性能分析

为了验证所提控制算法的鲁棒性, 图5给出了当2台电机负载转矩不同时 SMR2 突加负载的仿真结果, 仿真条件设置与图4的参数设置相同, SMR2 在0.2 s时刻给电机突加一个15 N·m的扰动, 在0.3 s时刻取消此扰动。

从图5b可以看出, 当扰动取消后, SMR2 能够快速准确地与电机 SMR1 达到同步, 这说明所提控制

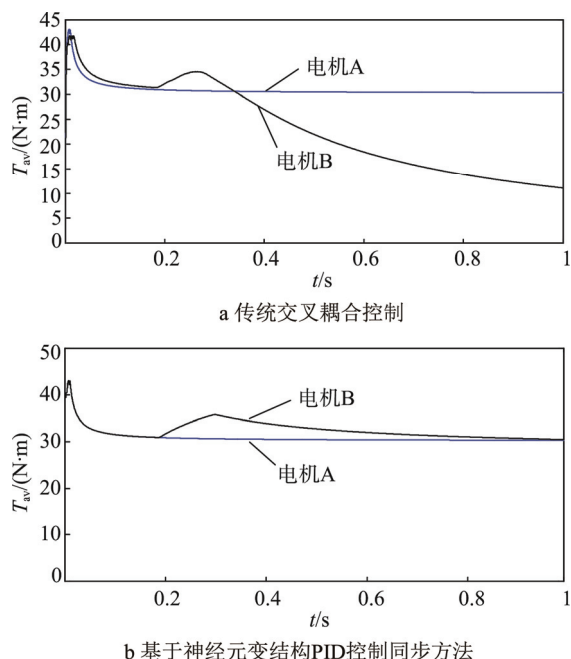


图5 电机 SMR2 突加负载时的仿真结果

Fig.5 Simulation results on the condition of different load torque for SMR2

算法具有较快的动态响应速度和抗扰动能力, 且2台电机的输出电磁转矩基本保持相同。

4 结语

为了解决当采用传统交叉耦合同步策略时, 双开关磁阻电机可能会出现输出功率不平衡的问题, 利用神经元变结构PID控制自身特有的优点, 文中提出了一种基于神经元变结构PID控制的同步控制策略。通过仿真分析表明, 相比传统同步控制算法, 所提出的控制算法对负载变化具有较快的动态响应速度, 提高了系统的鲁棒性和抗扰动能力。

参考文献

- [1] 卫宏, 周国平, 申冬琴. 凹印机电子轴传动多电机同步控制策略[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 134—139.
WEI Hong, ZHOU Guo-ping, SHEN Dong-qin. Multi-motor Synchronous Control Strategy of Electronic Shaft Driving in Gravure Printing Machine[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 134—139.
- [2] 朱火美, 蒲洪彬, 李伟光. 数控瓦楞纸板印刷模切机伺服配置设计与评价研究[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 85—88.
ZHU Huo-mei, PU Hong-bing, LI Wei-guang. Servo Configuration and Evaluation of Numerical Printing and Die-cutting Machinery of Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 85—88.
- [3] 曹家勇, 陈幼平, 詹琼华, 等. 开关磁阻电动机控制技术的研究现状和发展趋势[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(1): 1—5.
CAO Jia-yong, CHEN You-ping, ZHAN Qiong-hua, et al. A Review of Control Technology of Switched Reluctance Motor[J]. Electric Machines and Control, 2002, 6(1): 1—5.
- [4] 武吉梅, 王伟鹏, 王月英. 印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2007, 28(6): 66—68.
WU Ji-mei, WANG Wei-peng, WANG Yue-ying. Modeling and Simulating of the Tension Control System of Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(6): 66—68.
- [5] 陈文革, 蒋文燕, 黄学林. 我国凹版印刷机的现状及发展方向[J]. 包装工程, 2008, 29(4): 169—171.
CHEN Wen-ge, JIANG Wen-yan, HUANG Xue-lin. Present Situation and Development Direction of Gravure Press in Our Country[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(4): 169—171.
- [6] 曹玲芝, 李春文, 牛超, 等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 586—592.

- CAO Ling-zhi, LI Chun-wen, NIU Chao, et al. Synchronized Sliding-Mode Control for Multi-Induction Motors Based on Adjacent Cross-coupling[J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5): 586—592.
- [7] 钟锐, 徐宇柘, 陆生礼. 基于新模型的双开关磁阻电动机同步控制方法[J]. *微特电机*, 2011, 39(5): 58—61.
- ZHONG Rui, XU Yu-zhe, LU Sheng-li. Synchronic Control Method for Double Switched Reluctance Motors Based on a New Model[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2011, 39(5): 58—61.
- [8] KRISHNAMURTHY M, EDRINGTON C S, EMADI A, et al. Making the Case for Applications of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Products[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(3): 659—675.
- [9] WANG X Y, PAN H, GUO Z. Double Switch Reluctance Motors Synchronization Control System[C]// *Chinese Control and Decision Conference*, 2008: 3754—3756.
- [10] CHEN Hao, XIE Gui-lin. The Parallel Drive System of the Double Switched Reluctance Motors for Locomotive Traction Application[C]// *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2001: 1483—1487.
- [11] 俞普德, 陈昊, 邱亮, 等. 双开关磁阻伺服电动机并联传动系统的研究[J]. *电机与控制应用*, 2009, 36(11): 30—34.
- YU Pu-de, CHEN Hao, QIU Liang, et al. Research on Parallel Drive System of Double SRSD[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2009, 36(11): 30—34.
- [12] 李永亮, 李大鹏, 张旭隆. 双 SRM 无位置控制系统在采煤机中的应用[J]. *电力电子技术*, 2012, 46(10): 73—74.
- LI Yong-liang, LI Da-peng, Zhang Xu-long. Application on Sensorless Control of Double SRM to Shearer[J]. *Power Electronics*, 2012, 46(10): 73—74.
- [13] CARDENAS R, PENA R, PEREZ M, et al. Power Smoothing Using a Fly-wheel Driven by a Switched Reluctance Machine[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(4): 1086—1093.
- [14] 周晓华, 王琦, 王荔芳, 等. 静止无功补偿器的神经元变结构 PID 控制策略[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(10): 61—65.
- ZHOU Xiao-hua, WANG Qi, WANG Li-fang, et al. Neuron Variable Structural PID Control Strategy for SVC[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(10): 61—65.
- [15] 严家玉, 王宁. 适用于非线性对象的神经元变结构 PID 控制[J]. *江南大学学报(自然科学版)*, 2008, 7(2): 132—136.
- YAN Jia-yu, WANG Ning. Neuron Variable Structural PID Control for Nonlinear System[J]. *Journal of University of The South(Natural Science Edition)*, 2008, 7(2): 132—136.