

doi: 10.7690/bgzd.2020.12.010

基于滑模观测器的 PMSM 有限时间混沌同步控制

王 娜¹, 唐传胜²

(1. 河南工业职业技术学院, 河南 南阳 473000; 2. 南阳理工学院, 河南 南阳 473004)

摘要: 针对非均匀气隙永磁同步电机混沌系统同步过程中易受参数摄动和外部扰动的影响, 存在鲁棒性差等不足, 以永磁同步电机驱动和响应同步误差动态模型为基础, 提出一种基于滑模观测器的有限时间混沌同步控制方法。利用滑模观测器来实现不确定负载的在线观测, 结合滑模理论和有限时间稳定理论, 通过主动控制来实现系统非线性项和线性项的近似解耦, 采用有限时间稳定控制来增强系统的鲁棒性和快速响应能力, 设计出有限时间同步控制方法, 并在有参数摄动和外部扰动情况下进行了仿真验证。仿真结果验证了该控制方法具有更快的动态响应能力和鲁棒性, 更适合复杂环境下 PMSM 混沌系统的同步控制。

关键词: PMSM; 混沌同步; 滑模观测器; 有限时间控制

中图分类号: TP302.1 **文献标志码:** A

Finite-time Chaotic Synchronization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Sliding-mode Observer

Wang Na¹, Tang Chuansheng²

(1. He'nan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China; 2. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: In view of the weakness of robustness in the process of synchronization of non-uniform air-gap permanent magnet synchronous motor (PMSM) chaotic system, which is easily affected by parameter perturbation and external disturbance, based on the dynamic model of PMSM drive and response synchronization error, a finite time chaotic synchronization control method based on sliding mode observer is proposed. The sliding mode observer is used to realize the on-line observation of the uncertain load. Combining the sliding mode theory and the finite time stability theory, the approximate decoupling of the nonlinear and linear terms of the system is realized by active control, the finite time stability control is used to enhance the robustness and fast response of the system, and the finite time synchronization control method is designed, and simulation verification is carried out under the condition of parameter perturbation and external disturbance. Results show that the proposed control method has faster dynamic response and robustness, and is more suitable for synchronization control of PMSM chaotic systems in complex environments.

Keywords: PMSM; chaos synchronization; sliding-mode observer; finite-time control

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)以其结构简单、体积小及高效节能等优点, 在仪器仪表、航空航天、数控机床及医疗器械等领域得到广泛应用。近年来, 其稳定性和可靠性研究受到人们的广泛关注。混沌现象广泛存在于感应电机、永磁同步电机、直流电机、开关磁阻电机等伺服系统中, 国内外学者对其已进行了一定的研究^[1]。Hemati 首次发现了开环系统 PMSM 的混沌现象^[2], Li 等进一步推导出其通用数学模型, 并进行了深入的理论分析^[3-5]。PMSM 混沌系统是一种复杂的多变量、强耦合高维非线性系统, 其混沌特性主要表现为: 随着电机参数的变化, 系统将呈现出转速或转矩的剧烈振荡、控制性能不稳定及系

统不规则的电磁噪声等混沌现象, 将严重影响系统的动态性能。如何抑制这种现象带来的危害, 成为近年来研究的热点之一。另一方面, 电机的混沌行为在某些特殊场合是有益的, 如可以利用电机的混沌现象来提高研磨与搅拌的效率等, 即电机的混沌反控制问题^[6-8]。

目前, 能够用于 PMSM 的混沌同步控制策略主要有反馈同步^[9-10]、自适应同步^[11]、滑模同步^[12]和模糊同步^[13]等。反馈同步依赖于系统的数学模型, 当系统存在不确定性时无法满足系统的要求; 自适应同步通过引入自适应机制, 对系统参数进行在线估计, 以达到更好控制系统的性能, 但是自适应机制的引入必然增加系统的开支, 在一定程度上降低系统的响应能力; 滑模同步则需要满足一定的匹配

收稿日期: 2020-07-26; 修回日期: 2020-08-26

基金项目: 河南省高等学校重点科研项(20B470003、18B470007); 河南省科技攻关项目(202102210298、202102210084)

作者简介: 王 娜(1980—), 女, 河南人, 硕士, 讲师, 从事伺服驱动及控制、机器人控制、非线性系统分析及控制研究。E-mail: hnjzwm@126.com.

条件，且系统存在固有的抖振现象；模糊控制虽具有较强的鲁棒性能，但是其结构复杂，且模糊规则确定在一定程度上依赖于经验，有一定的实现难度。

收敛性也是控制系统的一个重要性能指标。在上述方法中，闭环系统均以指数形式收敛，不能保证系统在有限的时间收敛到系统的平衡点。有限时间稳定控制是一种时间最优控制方法，不仅具有很强的鲁棒性，而且能够保证快速收敛的平衡点^[14]。有限时间稳定控制方法在控制系统中的研究得到了重视^[15-18]。文献[18]提出了统一混沌系统的有限时间稳定控制，但其稳定时间较长，有待进一步改进。

笔者在文献[11,18]的基础上，通过滑模观测器实时估计驱动系统的负载，利用有限时间稳定理论，实现系统的有限时间混沌同步，引入终端吸引子比例因子，提高系统的快速响应能力。

1 PMSM 有限时间同步控制器设计

1.1 理论基础

为满足控制器设计的需要，给出有限时间稳定的定义和几个定理。

定义 对于动态系统 $sX=f(X)$ ，如果存在某一时刻 $T>0$ (T 可能与初始状态的选择有关)，使得下面 2 个条件同时成立： $\lim_{t \rightarrow T} \|X(t)\|=0$ ；当 $t \geq T$ 时， $\|X(t)\|=0$ 恒成立，则该系统有限时间是稳定的。其中 $X \in R^n$ 为 n 维的状态变量， s 为微分算子， $f(x)$ 为光滑的非线性函数。

引理 1^[19] 如果存在连续、正定函数 $V(t)$ 和常实数 $m>0$ 及 $0<\xi<1$ 满足下列条件：

$$sV(t) \leq -mV^\xi(t), \quad \forall t \geq t_0, \quad V(t_0) \geq 0. \quad (1)$$

则对于任意初始时刻 t_0 ，下面的不等式成立：

$$V^{1-\xi}(t) \leq V^{1-\xi}(t_0) - m(1-\xi)(t-t_0), \quad \text{且} \\ \forall t \geq t_1, \quad V(t) \equiv 0. \quad (2)$$

其中 $t_1 = t_0 + V^{1-\xi}(t_0)/m(1-\xi)$ 即为系统稳定所需要时间。

该定理的证明可参见文献[18]，此处不作证明，只对定理进行简单分析。由 t_1 的表达式可知：当系统的参数 t_0 和 ξ 固定时，系统稳定时间与参数 p 成反比，适当增大 m ，可以有效的缩短稳定时间，笔者基于此思想对文献[18]的控制器进行改进。

引理 2^[20] 对于非零、正实数 a 、 b 和 c ，其中 $c \in (0,1)$ ，下列不等式成立：

$$a^c + b^c \geq (a+b)^c. \quad (3)$$

1.2 非均匀气隙 PMSM 混沌模型

经过变换后的永磁同步电动机的无量纲数学模型^[11]为：

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 s x_1 &= -x_2 x_3 - x_1 + v_d \\ \tau_2 s x_2 &= -x_2 - x_1 x_3 - x_3 + v_q \\ \tau_3 s x_3 &= a x_1 x_2 + b x_2 - c x_3 - T_L \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

式中： $(x_1, x_2, x_3) = (i_d, i_q, w)$ ， v_d 、 v_q 和 i_d 、 i_q 分别为变换后 d 轴、 q 轴的电压和电流； w 、 T_L 为变换后的速度和等效负载； a 、 b 、 c 为电机参数； $s=d/dt$ 为微分算子，具体变换步骤可参考文献[11]。

当 $v_d = -12.70$ ， $v_q = 2.34$ ， $T_L = 0.525$ ， $\tau_1 = 7.125$ ， $\tau_2 = 6.45$ ， $\tau_3 = 1$ ， $a = 1.516$ 和 $b = 16$ 时，以参数 c 作为分岔参数 (受定子电阻及磁链影响) 可以作出系统的分岔图 (图 1) 和 $c = 1.8$ 时的典型混沌吸引子 (图 2)。笔者仅作出了 x_1 (即 i_d) 的相图。仿真是基于 Matlab 平台，采用 4 阶 Runge-Kutta 法，采样时间 $T_s = 0.01$ s，初始状态为 $(i_{d0}, i_{q0}, w_0) = (1, 1, 1)$ (图中的 i_d 、 i_q 和 w 均以标么值表示)。

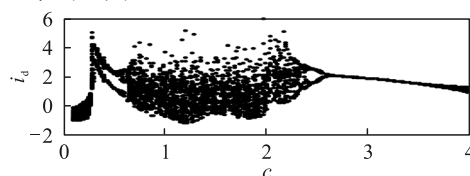


图 1 非均匀气隙 PMSM 状态 i_d 的分岔图

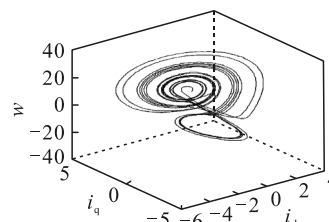


图 2 PMSM 混沌吸引子

1.3 滑模观测器设计

为了能够有效实现等效负载的在线估计，进行以速度和负载为观测对象的负载滑模观测器。根据实际情况，一般控制器频率较高，故可在控制周期内认为负载转矩为以定值，即 $sT_L = 0$ ，由其与速度构建的状态方程可表示为：

$$\left. \begin{aligned} \tau_3 s \hat{x}_3 &= a x_1 x_2 + b x_2 - c x_3 - T_L \\ s T_L &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

则有式(5)构建的滑模观测器为：

$$\left. \begin{aligned} \tau_3 s \hat{x}_3 &= a x_1 x_2 + b x_2 - c \hat{x}_3 - \hat{T}_L + Q \\ s \hat{T}_L &= \gamma Q \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

式中： \hat{x}_3 和 \hat{T}_L 分别为速度和负载估计值；

$Q = \mu \text{sign}(\sigma)$ 和 $\sigma = e_w = \hat{x}_3 - x_3$ 为滑模面; e_w 为速度估计误差; $\mu = -\varepsilon|e_T|$ 为滑模增益, $\varepsilon \geq 1$ 为自适应增益, e_T 为速度估计误差; γ 为反馈增益, $\gamma > 0$ 。

定理 1 对于系统(5), 如果采用如式(6)的滑模观测器, 则系统状态误差将以指数形式趋近于零。

证明 将式(6)与式(5)相减, 可得到滑模观测器的误差方程为:

$$\left. \begin{aligned} \tau_3 s e_w &= -c e_w - e_T + Q \\ s e_T &= \gamma Q \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

取 Lyapunov 函数 $V_0 = \tau_3 \sigma^2 / 2$, 则:

$$s V_0 \leq -c e_w^2 \leq 0. \quad (8)$$

由式(8)可知, 速度估计误差以指数形式逐渐趋近于零。

当滑模观测器进入滑动模态时, 满足 $\sigma = s\sigma = 0$, 即 $e_w = s e_w = 0$, 将其代入式(7)可得: $s e_T = \gamma e_T$, 又 $\gamma > 0$, 故由系统稳定性理论可知, 观测误差将以指数方式趋近于零, γ 决定其趋近速度, 定理得证。

滑模观测器中符号函数的存在不可避免会引起系统的抖振, 笔者通过双曲正切函数来代替符号函数, 即 $Q = \mu \tanh(\sigma)$, 来进一步改善系统的性能。

1.4 有限时间同步控制器设计

设驱动系统为系统(4), 响应系统为:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 s y_1 &= -y_2 y_3 - y_1 + v_d + u_1 \\ \tau_2 s y_2 &= -y_2 - y_1 y_3 - y_3 + v_q + u_2 \\ \tau_3 s y_3 &= a y_1 y_2 + b y_2 - c y - \hat{T}_L + u_3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

令 $e_i = y_i - x_i, i=1,2,3$, 则误差系统可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 s e_1 &= e_2 e_3 + e_2 x_3 + e_3 x_2 - e_1 + u_1 \\ \tau_2 s e_2 &= -e_2 - e_1 e_3 - e_1 x_3 - e_3 x_1 - e_3 + u_2 \\ \tau_3 s e_3 &= a(e_1 e_2 + e_1 x_2 + e_2 x_1) + b e_2 - c e_3 - e_T + u_3 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

针对式(10), 基于主动控制和有限时间稳定理论, 设计的控制器所述如下。

定理 2 对于不确定性式(10), 如果采用如下形式的控制器:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -e_2 e_3 - e_2 x_3 - e_3 x_2 - k_1 e_1^\alpha \\ u_2 &= e_3 x_1 + e_3 - k_2 e_2^\alpha \\ u_3 &= -a e_2 x_1 - b e_2 + e_T - k_3 x^\alpha \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 k_1, k_2 和 k_3 为终端吸引子权系数且均为正实数, 为简化计算取 $k_1 = k_2 = k_3 = k; \alpha = p/q, 0 < p < q$ 且 p, q 均为奇数, 则系统(10)的状态误差在有限时间趋近于零。

证明 对于系统(10)中的第 1 个方程, 把控制

器 u_1 代入可得:

$$\tau_1 s e_1 = -e_1 - k_1 e_1^\alpha. \quad (12)$$

取 Lyapunov 函数 $V_1 = 0.5 \tau_1 e_1^2$, 则其沿式(12)的轨迹的导数可表示为:

$$s V_1 = -e_1^2 - k_1 e_1^{\alpha+1} \leq -k_1 e_1^{\alpha+1} = -m_1 V_1^\xi. \quad (13)$$

其中 $m_1 = k_1 (0.5 \tau_1)^{-0.5(\alpha+1)}, \xi = 0.5(\alpha+1)$ 。由于 $0 < \alpha < 1$, 则 $0 < \xi < 1$, 又 $m > 0$, 故根据引理 1 可知, 系统误差 e_1 将在有限时间 $t_1 = e_1(0) / (k_1(1-\alpha))$ 时趋近于 $e_1 = 0$ 。

再将 $e_1 = 0$ 和 u_2, u_3 代入式(10)的余下 2 个方程可得:

$$\left. \begin{aligned} \tau_2 s e_2 &= -e_2 - k_2 e_2^\alpha \\ \tau_3 s e_3 &= -c e_3 - k_3 e_3^\alpha \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

取 Lyapunov 函数 $V_1 = 0.5(\tau_2 e_2^2 + \tau_3 e_3^2)$, 则其沿式(14)轨迹的导数可表示为:

$$s V_2 \leq k_2 e_2^{\alpha+1} - k_3 e_3^{\alpha+1} \leq -m_2 V_2^\xi \leq k_2 e_2^{\alpha+1} - k_3 e_3^{\alpha+1}. \quad (15)$$

其中 $m_1 = \min(k_2 (0.5 \tau_2)^{-0.5(\alpha+1)}, k_3 (0.5 \tau_3)^{-0.5(\alpha+1)})$, 由于 $0 < \alpha < 1$, 则 $0 < \xi < 1$, 又 $m > 0$, 根据引理 1 可知, 系统误差 e_2, e_3 将分别在有限时间 t_2 内趋近于零。

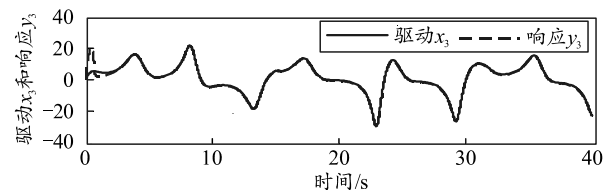
综上所述: 当 $t > t_2$ 时, 系统(10)在控制器(11)的作用下, 其状态误差将在有限时间内趋近于零, 定理得证。这也就说明了驱动系统(4)和响应系统(9)在有限时间内达到了同步。

2 仿真分析

笔者主要是分 2 方面来进行仿真验证: 1) 验证滑模观测器的设计效果; 2) 通过与文献[11,18](自适应同步、传统有限时间同步)方案进行比较, 来说明明文中方案的优越性。为了便于比较, 仿真中均采用 4 阶 Runge-Kutta 法, 采样时间 $T_s = 0.01$ s, 初始条件 $(x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3) = (1, 1, 1, 3, 3, 3), c = 1.8$, 其余参数与第 2 部分相同。

2.1 观测器性能验证

为了验证观测器的性能, 笔者给系统施加突变负载, 当 $t \leq 50$ s 时, $T_L = 0.525$; 当 $t > 50$ s 时, T_L 突变为 10。其仿真结果分别如图 3 所示。



(a) 速度同步响应

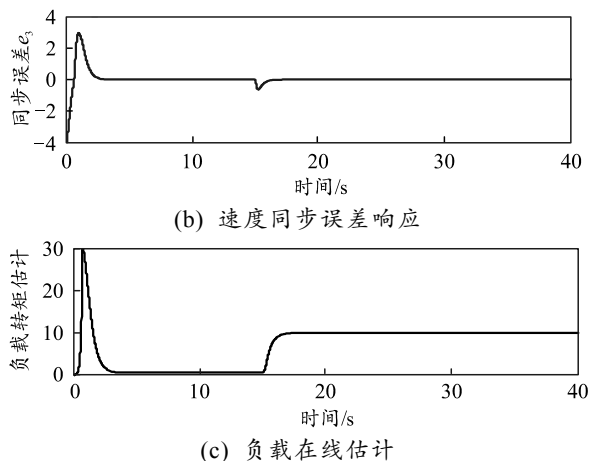


图 3 变负载时系统的响应

从图 3(a)和(b)可以看出：当系统在 15 s 由 0.525 突变为 10 时，响应系统在很短的时间内就很好地实现了系统的跟踪，具有很强的鲁棒性能。从图 3(c)可以看出：笔者设计的滑模观测器能够准确、快速地跟踪突变负载，并且稳态时无抖振，具有很好的响应能力和稳态性能。

2.2 控制器性能验证

文中的控制器参数为： $k_1=k_2=k_3=k=10$ ， $\alpha=7/9$ ；文献[18]中的参数为： $k=0.9$ ， $\alpha=7/9$ 。仿真结果如图 4 所示。

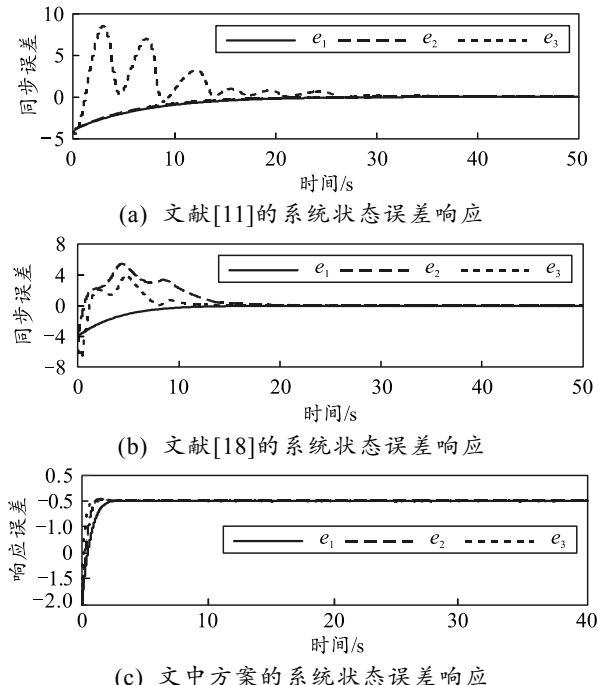


图 4 非均匀气隙 PMSM 混沌同步状态误差响应

图 4 表明：3 种控制方案都能实现响应系统和驱动系统的同步，但是与文献[11,18]相比，笔者所提方案具有更快的响应能力，能够很快实现系统的

同步。

为了进一步验证系统的鲁棒性能，假设系统的参数 c 有 30% 的摄动，可由 Matlab 中的 rand() 来实现。文献[11]与文中方案的响应曲线如图 5 所示。

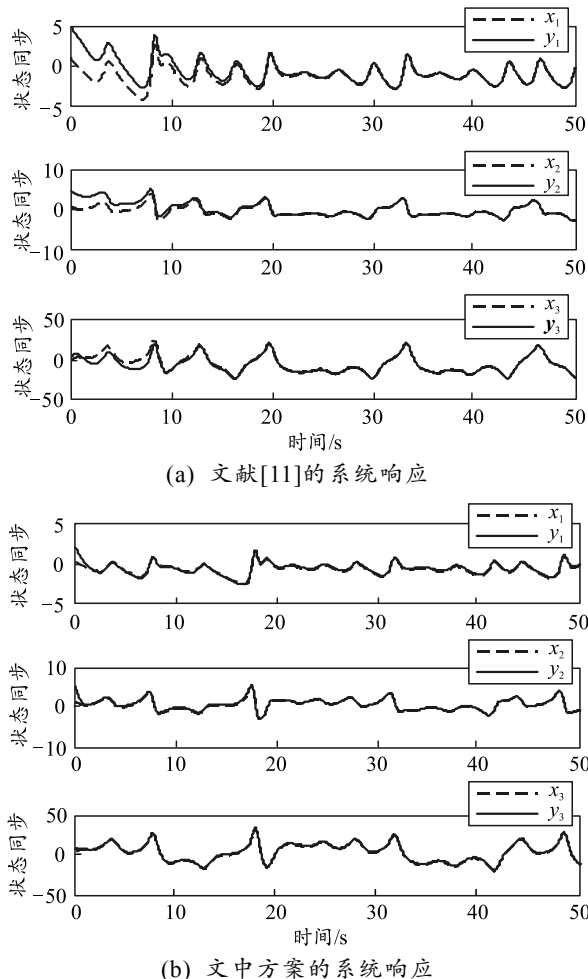


图 5 含参数不确定性时系统的响应

从图中可以看出：当系统参数 c 存在 30% 的摄动时，文献[11]的方案引入了自适应机制，能够很好地实现系统的补偿；文中的方案不仅能够快速实现系统的同步，而且具有很强的鲁棒性，与文献[11]方案相比，具有明显的优越性。

3 结论

笔者通过对 PMSM 混沌系统的分析，将主动控制与有限时间稳定控制理论相结合，提出一种主动有限时间同步控制策略。该策略通过调整终端吸引子比例系数，有效地缩短系统的跟踪时间，以提高系统的响应能力。通过仿真与传统控制器进行对比，验证了该方案不仅具有很强的鲁棒性能，而且具有快速响应能力，能够很好地满足系统性能的要求，具有一定的研究价值。

参考文献:

[1] 邹国堂, 王政, 程明. 混沌电机驱动及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-2.

[2] HEMATI N. Strange attractors in brushless DC motors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 1994, 41(1): 40-45.

[3] ZHONG L, JIN B P, YOUNG H J, et al. Bifurcations and chaos in a permanent-magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(3): 383-387.

[4] 张波, 李忠, 毛宗源, 等. Poincare 映射的数值算法及其在永磁同步电机混沌分析中的应用[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(5): 796-800.

[5] 张波, 李忠, 毛宗源, 等. 利用 Lyapunov 指数和容量维分析永磁同步电机仿真中的混沌现象[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(4): 589-592, 596.

[6] 张波, 李忠, 毛宗源. 永磁同步电动机的混沌特性及其反混沌控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 545-548.

[7] 朱海磊, 陈基和, 王赞基. 利用延时反馈进行异步电动机混沌反控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 156-159.

[8] ZHAO Y, ZHANG T Y, HAN X C, et al. Anticontrol of chaos for PMSM systems with unknown parameters via adaptive control method[C]. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan: IEEE, 2010: 3934-3938.

[9] 韦笃取, 罗晓曙. 非均匀气隙永磁同步电机混沌的状态反馈控制[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2006, 24(1): 13-17.

[10] 张宁, 马孝义, 陈帝伊, 等. 永磁同步电动机的混沌数

学模型及其线性反馈同步控制[J]. 微特电机, 2011, 39(2): 63-66, 79.

[11] 张兴华, 丁守刚. 非均匀气隙永磁同步电机的自适应混沌同步[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 661-664.

[12] 杨晓辉, 刘小平, 胡龙龙, 等. 永磁同步电机的鲁棒滑模变结构混沌同步控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(8): 93-95.

[13] 王磊, 李颖晖, 朱喜华, 等. 存在扰动的永磁同步电机混沌运动模糊自适应同步[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 33-37.

[14] 丁世宏, 李世华. 有限时间控制问题综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 161-169.

[15] WEI D Q, ZHANG B. Controlling chaos in permanent magnet synchronous motor based on finite-time stability theory[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(4): 1399-1403.

[16] 赵建利, 王京, 王慧. 洛伦兹-哈肯激光混沌系统有限时间稳定主动控制方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 79-87.

[17] MOHAMMAD P A. Finite-time chaos control and synchronization of fractional-order nonautonomous chaotic(hyperchaotic) systems using fractional nonsingular terminal sliding mode technique[J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 69: 247-261.

[18] WANG H, HAN Z Z, XIE Q Y, et al. Finite-time chaos synchronization of unified chaotic systems with uncertain parameters[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14: 2239-2247.

[19] HONG Y G, YANG G W, BUSHNELL L, et al. Global finite-time stabilization: from state feedback to output feedback[C]. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision & Control, 2000: 2908-2913.

[20] SANJAY P B, DENNIS S, BERNSTEIN. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000, 38(3): 751-766.

(上接第 28 页)

参考文献:

[1] 仝若贝. 基于供应链管理的物流企业流程优化研究[J]. 物流技术, 2012, 31(5): 119-121.

[2] 周庆忠, 刘晓东, 李郑. 后勤保障供应链绩效评估研究[J]. 经济研究导刊, 2015(10): 142-144.

[3] 江雨, 姜大立. 军事供应链风险研究综述与展望[J]. 军事运筹与系统工程, 2017, 31(4): 75-80.

[4] 陈艺文. 基于区块链的供应链管理系统设计及实现[J]. 现代计算机(专业版), 2019(3): 86-90.

[5] 杨莉. 基于供应链管理的军队物资采购需求管理策略[J]. 军队采购与物流, 2016(4): 36-40.

[6] 张雪胭, 于洪敏, 梁婧. 基于供应链管理的装备维修器材保障流程再造[J]. 装备学院学报, 2016, 27(4): 20-23.

[7] 郭峰, 赵宏强, 王雷, 等. 航空装备维修器材筹措供应标准体系[J]. 兵工自动化, 2019, 38(6): 1-8.

[8] 颜拥, 赵俊华, 文福栓, 等. 能源系统中的区块链: 概念、应用于展望[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 12-20.

[9] 赵晓文, 钟华, 连云峰. 区块链技术及其在军事后勤领的应用探讨[J]. 仓储管理与技术, 2019(2): 17-20.