

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.4.309

中图分类号: TM351

文献标志码: A

PMSM 中滑模控制时的混沌机理分析

谭舒丹, 马家庆

(贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 在一定参数条件下永磁同步电机会出现非线性混沌行为, 主要表现为转矩、转速振荡等, 导致系统性能不稳定。为此, 在实际电机平台上进行滑模控制 SMC(slide model control)实验, 通过合理的方法处理数据后, 绘制相应的系统相图并与无滑模控制作对比, 从另一角度验证了混沌现象。在永磁同步电机混沌运动分析模型的基础上, 利用稳定性理论和平衡点性质在理论上研究永磁同步电机的混沌动态行为。实验结果与数值仿真一致, 验证了混沌现象的存在性及此理论分析的正确性, 同时, 表明滑模控制对混沌现象具有较优的抑制作用。

关键词: 永磁同步电机; 滑模控制; 混沌系统; 相图

Analysis of Chaos Mechanism of Sliding Mode Control in PMSM

TAN Shudan, MA Jiaqing

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Under certain parameters, a permanent magnet synchronous motor (PMSM) will exhibit nonlinear chaotic behavior, which is mainly manifested in torque and speed oscillation, resulting in unstable system performance. Under this background, a sliding mode control (SMC) experiment was carried out on an actual motor platform. After a reasonable process of data, the corresponding system phase diagram was drawn, and it was compared with that without SMC, thereby verifying the chaotic phenomenon from another point of view. Based on the analysis model of chaotic motion of PMSM, the chaotic dynamic behavior of PMSM was studied theoretically by using the stability theory and equilibrium point properties. It was found that the experimental results were consistent with the numerical simulation, which verifies the existence of chaos and the correctness of theoretical analysis and shows that SMC has a better inhibitory effect on the chaotic phenomenon.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor (PMSM); slide model control (SMC); chaotic system; phase diagram

收稿日期: 2021-12-21; 修回日期: 2022-03-11; 录用日期:

2022-04-06; 网络首发日期: 2022-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51867006, 61861007); 贵州省科技厅-贵大联合基金资助项目(黔科合 LH 字[2017]7229号); 黔科合平台人才资助项目([2017]5788); 贵州省科技厅资助项目(黔科合支撑[2021]一般 442)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51867006 and 61861007; Guizhou Provincial Science and Technology Department-Guizhou University Joint Fund under the grant LH[2017]7229; Special Project of Academic New Seedling Cultivation and Innovation Exploration of Guizhou University under the grant [2017]5788; guizhou provincial science and technology Department under the grant GPST[2021]-G422

永磁同步电机 PMSM(permanent magnet synchronous motor)因其质量轻、体积小、高运行效率、高转矩惯量比和高功率密度^[1-2]等优良性能被广泛应用于航空、航天、数控机床及电动汽车等诸多生活和生产领域。PMSM是1个非线性、多变量、强耦合系统^[3], 有着复杂的动力学行为。在一定参数范围和工作条件下, 电机具有非线性混沌行为, 主要表现为电机在运行过程中转矩、转速的间歇振荡, 控制性能不稳定及不规则的电磁噪声等^[4], 因而对 PMSM 的混沌特性开展相关研究具有重要意义。

目前,已有许多学者对电机的混沌特性进行了研究, Hemati N 等^[5]和 Zhong Li 等^[6]建立了第 1 个 PMSM 混沌模型,分析了模型产生分岔、混沌的条件,但结果与实际差异较大;张波等^[7-8]和李忠等^[9]利用现代非线性系统分析方法,如 Poincare 映射、Lyapunov 指数和容量维、状态空间重构等证明了在一定参数范围内 PMSM 会出现混沌现象;文献[10]提出 1 种基于轨迹保稳降维 PMSM 混沌运动机制的分析方法,采用平面坐标投影法深入分析了 PMSM 的混沌运动;文献[11]利用分数微积分的数值计算方法,绘制了系统的有阶分岔图,表明 PMSM 的运行状态随着系统秩序的改变而发生平衡、周期和混沌的变化;文献[12]通过 1 个简单的显式准则,研究了 PMSM 系统的 Hopf 分岔,并分析了其混沌系统的基本动态特性。

随着现代控制理论和电机控制技术的快速发展,各种非线性混沌控制方法被不断探索,如滑模控制 SMC(slide model control)^[13-14]、模糊神经网络控制^[15]和反馈线性化控制^[16]等。其中,滑模控制是 1 种重要的鲁棒控制策略^[17],在抑制电机混沌运动方面有较大优势。文献[18]基于滑模控制开发了 1 种新颖的跟踪控制算法用于抑制混沌行为,并将其应用于 Van der Pol 混沌振荡器;文献[19-20]在考虑 PMSM 系统中不确定因素和外部扰动的前提下,设计了自适应滑模控制器,仿真结果证明了其可以消除系统中存在的混沌并克服滑模控制中的抖振;文献[21]引入了 1 个分数 SMC 来控制 PMSM 的 d 轴和 q 轴的电流,分析了分数阶数对混沌吸引子的影响。上述文献对 PMSM 混沌行为的分析基本上均停留在理论数学模型和仿真实验的基础上,甚少涉及到实际电机中混沌特性的验证研究。混沌并非无序,而是包含着严格的内在规律,因此探究实际 PMSM 中的非线性动力学行为及系统的混沌特性具有实际价值。

综上所述,本文引入 SMC,研究实际 PMSM 系统的混沌形态。首先,构建 PMSM 系统的混沌模型,计算模型的特征方程及相应特征值,根据特征值分析系统的混沌特性和参数条件;然后,搭建

仿真模型,从物理层面进行实验验证;最后,在实验平台上证明系统的混沌现象,并与无 SMC 系统进行了比较。合理处理数据后,绘制系统的时域图和状态变量相图进行分析,旨在验证理论分析的正确性,并从微观角度在实际电机中验证混沌现象的存在。

1 永磁同步电机的混沌数学模型

在 dq 轴坐标系下, PMSM 的简化数学模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{-R_s i_d + \omega L_q i_q + u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-R_s i_q + \omega L_d i_d - \omega \psi_r + u_q}{L_q} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{T_e - T_L - \beta \omega}{J} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d 、 i_q 为定子电流的 d 、 q 轴分量; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴的定子电感分量; R_s 为定子电阻; ω 为转子电角速度; u_d 、 u_q 为定子电压的 d 、 q 轴分量; ψ_r 为永磁磁链; J 为转动惯量; T_e 为电磁转矩, $T_e = 1.5n_p[\psi_r i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]$, 其中 n_p 为电机极对数; T_L 为负载转矩; β 为黏滞摩擦系数。

本文控制结构采用一般的转速外环电流内环形式,并在均匀气隙条件下进行讨论,即 $L_d = L_q$ 。假设电机无外部激励或运行过程中突然断电,即 $u_d = u_q = T_L = 0$ 。令 $[i_d, i_q, \omega] = [x_1, x_2, x_3]$, 并对式(1)进行线性仿射变换和时间尺度变换,得到类 Lorenz 系统混沌模型,即

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + x_2 x_3 \\ \dot{x}_2 = -x_2 - x_1 x_3 + \gamma x_3 \\ \dot{x}_3 = \sigma(x_2 - x_3) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\gamma = \frac{\psi_r}{kL_q}$; $\sigma = \frac{\beta\tau}{J}$; $k = \frac{\beta}{n_p \tau \psi_r}$; $\tau = \frac{L_q}{R_s}$ 。

2 永磁同步电机模型特性分析

本文根据稳定性理论对系统模型进行分析,由

式(2)可求出系统平衡点分别为

$$\begin{cases} X_1 = (0, 0, 0) \\ X_2 = (\gamma - 1, \sqrt{\gamma - 1}, \sqrt{\gamma - 1}) \\ X_3 = (\gamma - 1, -\sqrt{\gamma - 1}, -\sqrt{\gamma - 1}) \end{cases} \quad (3)$$

系统 Jacobi 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} -1 & x_3 & x_2 \\ -x_3 & -1 & \gamma - x_1 \\ 0 & \sigma & -\sigma \end{bmatrix}$$

根据 Jacobi 矩阵求解系统特征多项式(不考虑 X_1)为

$$\det(\lambda) = \lambda^3 + (2 + \sigma)\lambda^2 + (\sigma + \gamma)\lambda + 2\sigma(\gamma - 1) = 0 \quad (4)$$

根据以上理论分析可知:

(1)当 $0 < \gamma < 1$ 时, 式(4)有唯一实数解, 此时,

$$\lambda_1 = -1; \lambda_2 = \lambda_3 = -\frac{1 + \sigma}{2} \pm \frac{\sqrt{(1 + \sigma)^2 + 4\sigma(\gamma - 1)}}{2},$$

3 个特征值的实部均小于 0, 因此系统具有唯一稳定平衡点 $O(0,0,0)$;

(2)当 $\gamma=1$ 时, $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = -1, \lambda_3 = -1 - \sigma$, 式(4)出现特征值 0, 说明此时系统存在 1 个分岔点, $O(0,0,0)$ 平衡点的稳定性开始发生改变, 系统处于临界稳定状态, 临界稳定值 $\gamma_b = \frac{\sigma(\sigma + 4)}{\sigma - 2}$ 。

(3)当 $\gamma > 1$ 时, 系统有 3 个实数解, 如式(3), X_1 的特征值与情况(1)相同, X_2 和 X_3 的特征值为 $\lambda_1 = -(\sigma + 2), \lambda_2 = \lambda_3 = \pm \sqrt{\frac{2\sigma^2 + 2\sigma}{\sigma - 2}}i$ 。结合情况(1)可知, 随着 γ 的增大, 特征值沿实轴从负到正穿越虚轴, 系统发生分岔, 并出现 2 个新的平衡点, 当 γ 超过临界值 γ_b 时, 系统便会进入混沌状态。

本文中 $\sigma=5$, 计算得 $\gamma_b=15$, 分别取 $\gamma=10.0$ 、 14.6 、 20.0 时构建系统相图, 如图 1 所示。在计算机软件 MATLAB 中对不同值进行分析。由图 1 可见, 与上述理论分析结果相同。当 $\gamma > \gamma_b$ 时, 取 $\gamma_b=20.0$ 系统出现混沌状态, 轨线在 2 个平衡点间无规则旋转, 并一直处于某个范围内, 图中体现为 1 个类似蝴蝶的形状, 如图 2 所示。

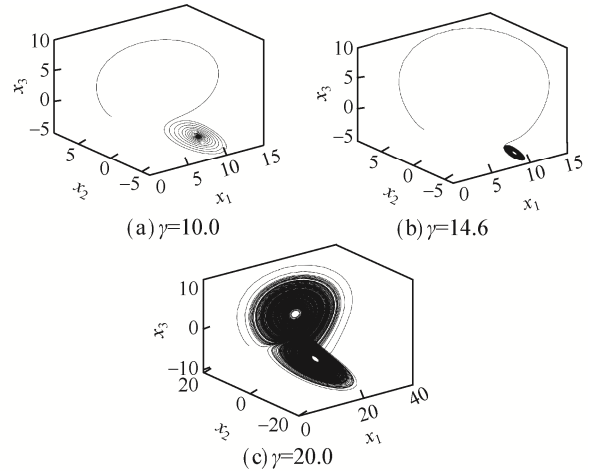
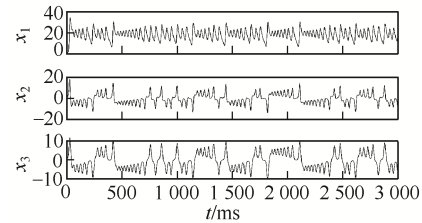
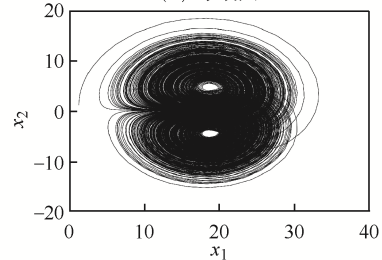


图 1 状态变量的三维相图

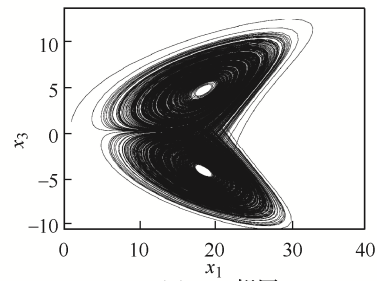
Fig. 1 Three-dimensional phase diagram of state variables



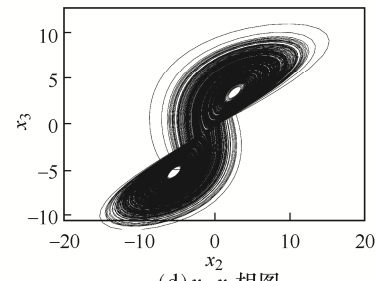
(a) 时域图



(b) x_1 - x_2 相图



(c) x_1 - x_3 相图



(d) x_2 - x_3 相图

图 2 $\gamma=20.0$ 时状态变量的时域图和二维相图

Fig. 2 Time-domain diagram and two-dimensional phase diagram of state variables at $\gamma=20.0$

3 滑模控制

滑模控制是一种有效的非线性控制方法。对于一般非线性控制系统，有

$$x = f(x, u, t), t \in \mathbb{R} \quad (5)$$

式中： x 为状态变量， $x \in \mathbb{R}_n$ ； u 为控制变量， $u \in \mathbb{R}_m$ 。

切换函数为 $S(x)$ ， $S \in \mathbb{R}_m$ ，则控制律 $u_i(x)$ 可表示为

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x), & S_i(x) > 0 \\ u_i^-(x), & S_i(x) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$u_i(x)$ 使切换面 $S_i(x)=0$ 以外的系统轨迹在有限时间内趋近，到达并停留在滑模面上，此时仅需保证设计的滑模面是渐进稳定的，那么滑模运动就是渐进稳定的，系统就能够达到预设的控制性能指标。本文所用的滑模趋近律为

$$\dot{S} = -k_1 |x_1|^{a_1} S^{\frac{m}{n}} - k_2 |x_1|^{a_2} S^{\frac{m}{n}} \quad (7)$$

式中： $k_1 > 0$ ； $k_2 > 0$ ； $0 < m < n$ (m, n 均为奇数)； $a_1 > 1$ ； $0 < a_2 < 1$ ； x_1 为系统状态变量。

此时 PMSM 系统的控制框图，如图 3 所示。

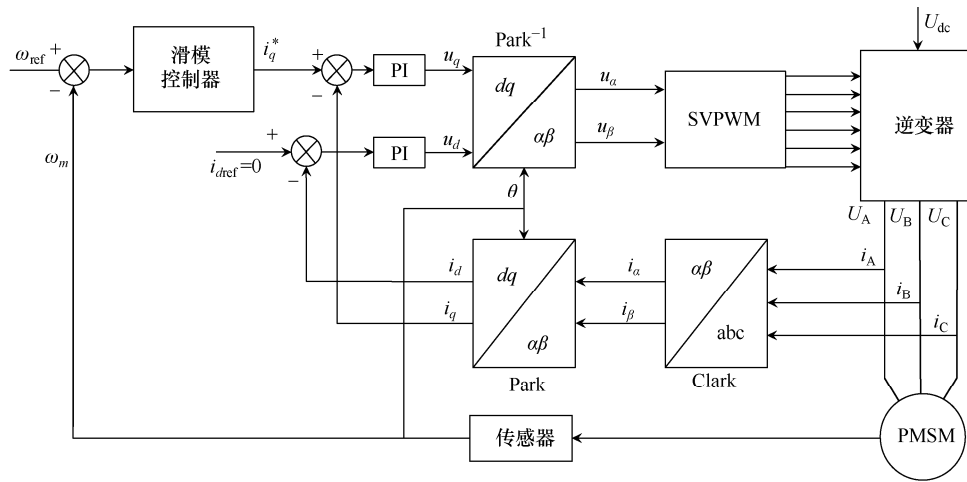


图 3 PMSM 的滑模控制框图

Fig. 3 Block diagram of SMC of PMSM

4 永磁同步电机混沌机理分析

4.1 数值仿真验证

在仿真验证之前，对 PI 和 SMC 的特性进行对比，如图 4 所示，显示了模型在 4 种不同参数的调节下，2 种控制方法的转速从启动到稳速的过程。4 种参数调节下，PI 的调节时间分别为 0.75、0.50、0.30 和 0.20 s，超调越小，时间越长；SMC 的调节时间分别为 0.10、0.25、0.30 和 0.60 s，超调越小，时间越短。SMC 可以更好地同时优化调节时间和超调量，使系统具有更好的控制性能。因此，选用 SMC 分析和验证电机的混沌现象，并观察其控制效果。

仿真中均采用 $i_d=0$ 的控制策略驱动电机，系统未应用和应用滑模控制时的仿真时域图及二维

相图分别如图 5 和图 6 所示。为了直观比较和观察，对应图形的横、纵坐标均设置相同差值，令转速为 1 200 r/min，令 $[i_d, i_q, \omega] = [x_1, x_2, x_3]$ 。

由图 5 和图 6 的相图可知，状态变量 x_1 、 x_2 、 x_3 的轨线与理论结果一致，均在某个范围内运动，表明了混沌现象的存在并验证了理论分析的正确性。由图 5(a)和图 6(a)可知：应用 SMC 的 ω 在给定值上下的波动相对较小，约为 0.038；而未应用

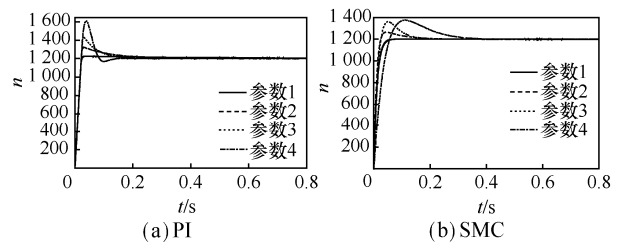


图 4 4 种参数调节下的转速

Fig. 4 Speed under four kinds of parameter regulation

SMC 时达到了 0.064。整体上, 在 SMC 下的轨线范围 $[\Delta x, \Delta y]$ 要比无 SMC 小, 仿真结果见表 1。系统在 SMC 下的速度稳定性较好, 且对电机混沌现象也有一定的抑制作用。

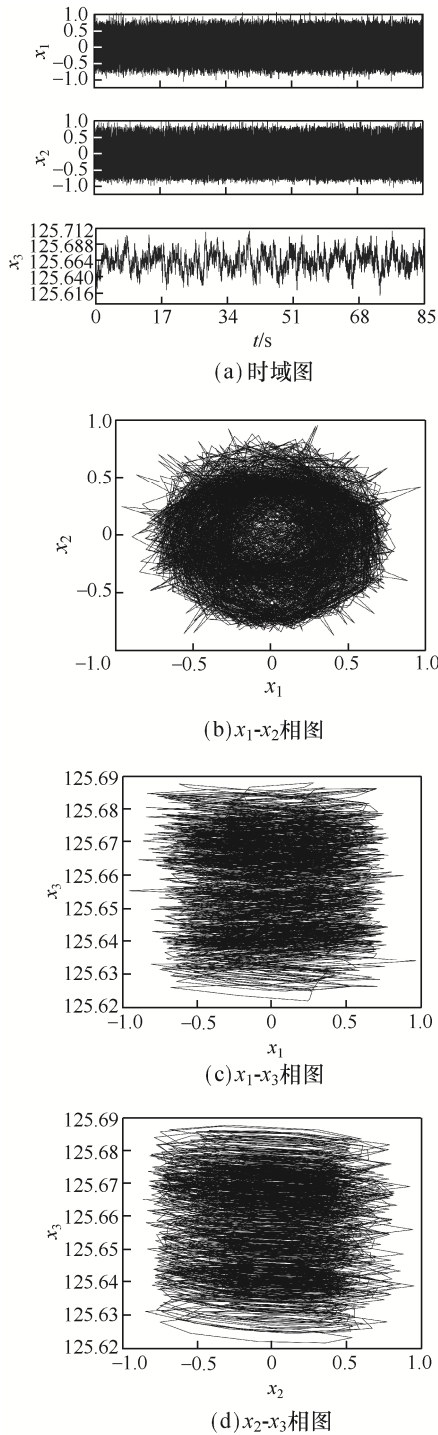


图 5 未应用 SMC 控制器时的仿真时域图及二维相图
Fig. 5 Time-domain diagram and two-dimensional phase diagram without SMC controller

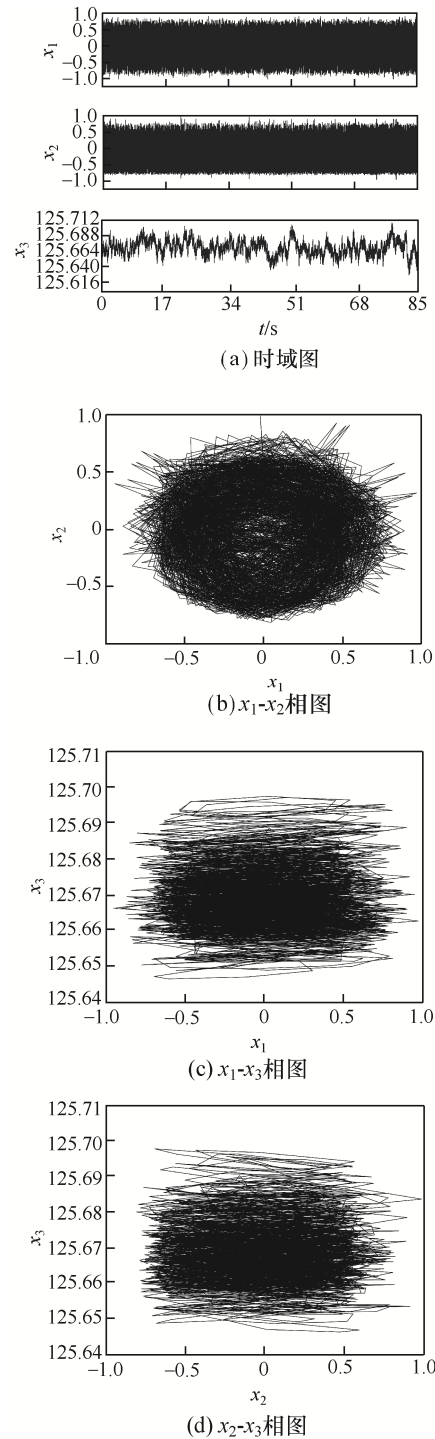


图 6 应用 SMC 控制器时的仿真时域图及二维相图
Fig. 6 Time-domain diagram and two-dimensional phase diagram with SMC controller

4.2 实验平台验证

搭建如图 7 所示的 PMSM 实验平台, 选用控制芯片型号为 TMS320F28335, 电机型号为 ACSM80, 实验参数见表 2。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation results

坐标差值	相图	未应用 SMC	应用 SMC
Δx	x_1-x_2	1.802 8	1.797 0
	x_1-x_3	1.709 4	1.703 2
	x_2-x_3	1.750 5	1.653 2
Δy	x_1-x_2	1.772 3	1.671 1
	x_1-x_3	0.084 0	0.065 0
	x_2-x_3	0.081 0	0.064 7

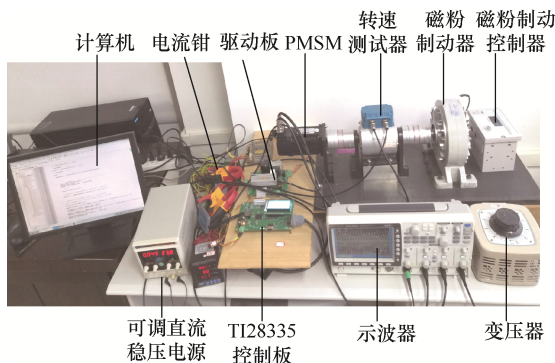


图 7 PMSM 实验平台

Fig. 7 Experimental platform of PMSM

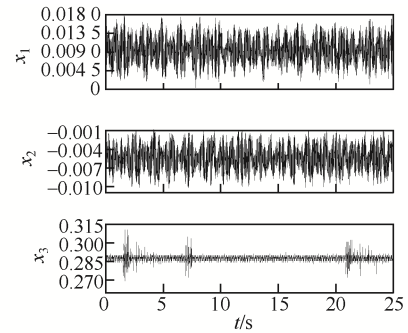
表 2 PMSM 实验参数

Tab. 2 Experimental parameters of PMSM

参数	数值
额定电压/V	220
额定功率/kW	0.75
额定转矩/(N·m)	2.4
最大转矩/(N·m)	7.2
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
额定电流/A	4.2
相电阻/ Ω	0.901
相电感/mH	6.552
极对数	4

在实际电机中测量得到的数据为三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 和转速 n ，而非 i_d 、 i_q 和 ω 。因此，以上测量数据经过 Clark 和 Park 变换得到交、直流轴电流 i_d 、 i_q ，通过 $\omega=(\pi/30)n$ 得到角速度 ω 。为便于对比，与仿真一致，转速设置为 1 200 r/min，图中 $[i_d, i_q, \omega]=[x_1, x_2, x_3]$ ，并且对应的时域图和相图横、纵坐标均设置相同差值，分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可以看出，系统相图的变量轨线



(a) 时域图

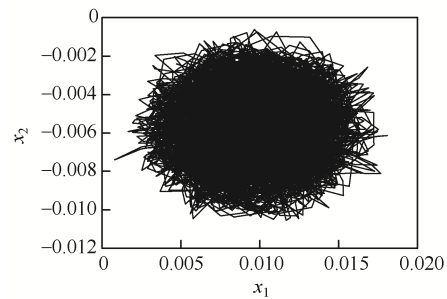
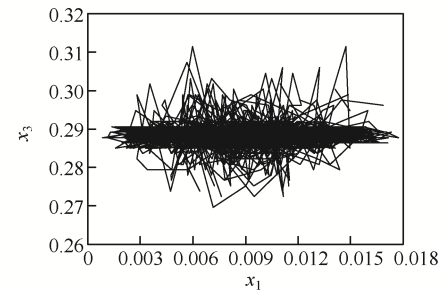
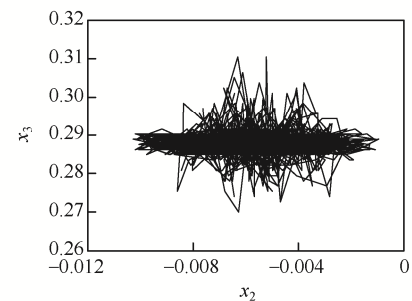
(b) x_1-x_2 相图(c) x_1-x_3 相图(d) x_2-x_3 相图

图 8 未应用 SMC 控制器的时域图和相图

Fig. 8 Time-domain diagram and phase diagram without SMC controller

在实际电机中证明了混沌现象的存在。从表 3 可以看出，应用 SMC 的轨线范围整体均比未应用 SMC 小。因此，对于 PMSM 混沌现象的抑制，SMC 表现更加优越。

对比表 1 和表 3 的数据能够明显看出，实验结果不如仿真结果理想，这是由于仿真中 PMSM 的

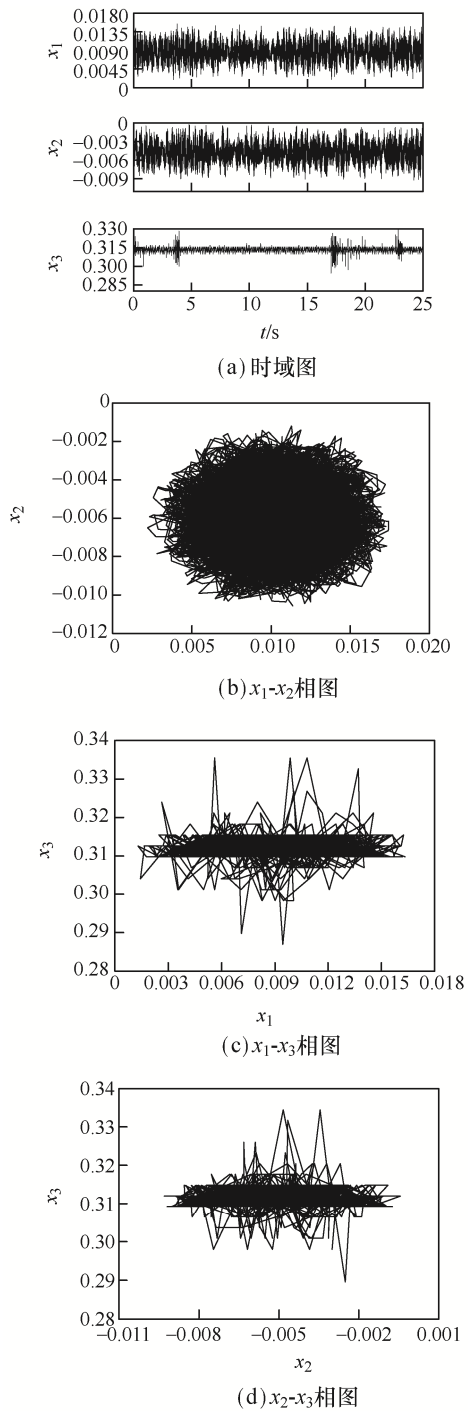


图 9 应用 SMC 控制器的时域图和相图

Fig. 9 Time-domain diagram and phase diagram with SMC controller

模型和相关参数是理想化的, 参数也不可动态修改, 与实际工程应用有较大差距; 且忽略了实际运行中的各种客观因素, 如电阻受温度影响, 电感受电机磁饱和效应影响, 轴间阻尼、摩擦等。虽然 2 种实验结果存在一定差异, 但最终趋势相同。

表 3 实验结果

Tab. 3 Experimental results

坐标差值	相图	未应用 SMC	应用 SMC
Δx	x_1-x_2	0.018 4	0.015 2
	x_1-x_3	0.017 2	0.014 1
	x_2-x_3	0.011 6	0.008 1
Δy	x_1-x_2	0.010 6	0.008 7
	x_1-x_3	0.008 3	0.007 4
	x_2-x_3	0.008 3	0.007 4

当电机转速稳定在 1 200 r/min 时, 突加 4 N·m 的负载转矩, 用示波器观察其对电流的影响, 如图 10 所示, 可见: 转速稳定时, SMC 下的电机电流波动小, 在突加负载转矩后, 其电流出现的波动也更小(示波器纵坐标数据以电压形式输出)。

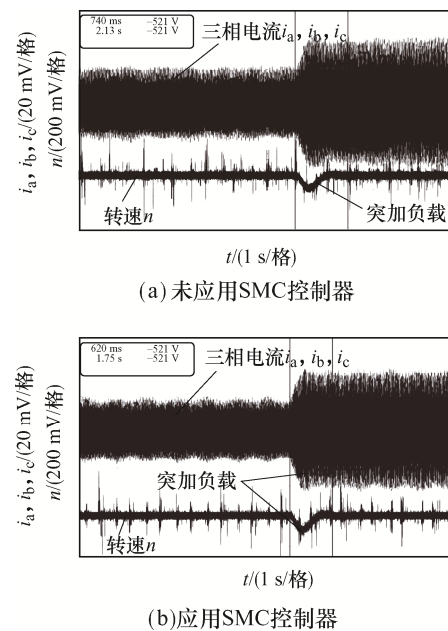


图 10 突加负载转矩的三相电流及转速

Fig. 10 Three-phase current and speed under sudden load torque

为了更清晰地观察 PMSM 的混沌现象, 从实验结果中未突加负载转矩时的波形部分截取了应用、未应用 SMC 的电机三相电流混沌现象局部放大图, 如图 11 所示(示波器纵坐标数据以电压形式输出)。SMC 下的电流波形略平稳, 波动也小于无 SMC 的。同时, 可以观察到, 在每相电流中都存在着类似的混沌现象, 即小周期波动。图 10 和 11 表明 SMC 具有抑制 PMSM 混沌现象的作用。

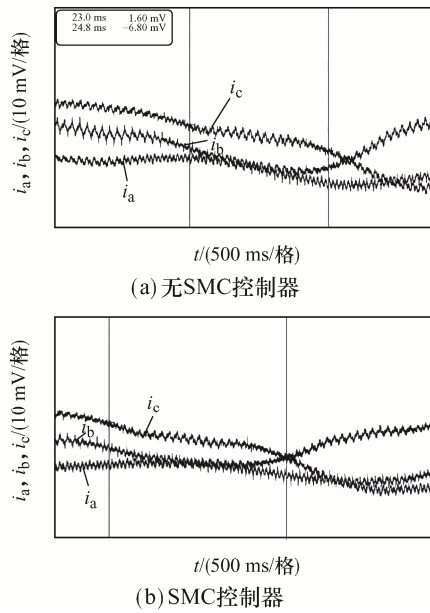


图 11 混沌现象局部放大

Fig. 11 Local enlargement of chaotic phenomenon

5 结语

对于 PMSM 这种非常典型的非线性混沌系统, 目前大多数研究者都是仅采用数值仿真和数学模型的方法来分析系统混沌现象的存在性, 鲜有使用实验平台的相关研究。本文在实际电机中进行实验验证, 并从示波器截取的图形中观察到了混沌现象。实验结果验证了 PMSM 中混沌现象的存在性及理论分析的正确性, 证明了滑模控制对混沌现象有更好的抑制作用。此分析方法不仅从理论模型出发, 还从另一个角度真切深入地了解了实际电机中的混沌现象。

参考文献:

- [1] 寇宝泉, 赵晓坤, 张浩泉, 等. 永磁同步电机电磁结构及磁场调节技术的综述分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7126-7141.
Kou Baoquan, Zhao Xiaokun, Zhang Haoquan, et al. Review and analysis of electromagnetic structure and magnetic field regulation technology of the permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7126-7141 (in Chinese).
- [2] 王震, 周明磊, 王琛琛. 方波工况下 PMSM 单电流调节

器控制策略的研究[J]. 电源学报, 2021, 19(4): 69-77.

Wang Zhen, Zhou Minglei, Wang Chenchen. Research on control strategy for PMSM with single-current regulator under the condition of square wave [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(4): 69-77 (in Chinese).

- [3] 张军. 永磁同步电机伺服系统振动抑制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
Zhang Jun. Research on vibration suppression of permanent magnet synchronous motor servo system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019 (in Chinese).
- [4] Li Zicheng, Ruan Mengxiong, Wang Houneng, et al. Chaos control of Boost converter based on super-twisting sliding mode control [C]// 2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Nanchang, China, 2019: 188-193.
- [5] Hemati N, Kwatny H. Bifurcation of equilibria and chaos in permanent-magnet machines [C]// Proceedings of 32nd IEEE Conference on Decision and Control. San Antonio, TX, USA, 1993, 1: 475-479.
- [6] Zhong Li, 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.
- [7] 张波, 李忠, 毛宗源, 等. 电机传动系统的不规则运动和混沌现象初探[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 41-46.
Zhang Bo, Li Zhong, Mao Zongyuan, et al. A primary study on an erratic behavior and chaotic phenomena of electric drive system [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 41-46 (in Chinese).
- [8] 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.
Zhang Bo, Li Zhong, Mao Zongyuan, et al. Analyzing chaotic phenomenon in permanent magnet synchronous motors with Lyapunov exponent and capacity dimension [J]. Electric Machines & Control Application, 2001, 18(4): 589-592, 596 (in Chinese).
- [9] 李忠, 张波, 单方, 等. 基于状态空间重构法的永磁同步电机的混沌分析[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2000, 21(3): 64-67.
Li Zhong, Zhang Bo, Shan Fang, et al. Analysis of

- chaotic phenomenon in permanent-magnet synchronous motors based on reconstruction of phase-space [J]. Journal of Jinan University(Natural Science & Medicine Edition), 2000, 21(3): 64-67 (in Chinese).
- [10] 孙黎霞, 鲁胜, 温正庚, 等. 永磁同步电机混沌运动机理分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(3): 97-104.
- Sun Lixia, Lu Sheng, Wen Zhengeng, et al. Analysis of chaotic motion mechanism of permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(3): 97-104 (in Chinese).
- [11] 杨晓辉, 刘小平, 柳和生, 等. 基于滑模变结构永磁同步电机混沌跟踪控制[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2331-2333, 2355.
- Yang Xiaohui, Liu Xiaoping, Liu Hesheng, et al. Chaos tracking control of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode variable structure [J]. Power Technology, 2014, 38 (12): 2331-2333, 2355 (in Chinese).
- [12] Liang X, Xiang Y, Ai F, et al. Nonlinear dynamic analysis of fractional-order permanent magnet synchronous motor [C]// CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2020). Online, 2020: 715-720.
- [13] 肖蕙蕙, 陈敏, 陈艳, 等. Buck 变换器多幂次趋近律滑模控制研究[J]. 电源学报, 2019, 17(6): 34-40.
- Xiao Huihui, Chen Min, Chen Yan, et al. Research on sliding mode control with multipower approaching law for Buck converter [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(6): 34-40 (in Chinese).
- [14] Xu Wei, Junejo A K, Liu Yi, et al. An efficient antidisturbance sliding-mode speed control method for PMSM drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6879-6891.
- [15] Zhao Le, Luo Shaohua, Hu Xuechun, et al. Accelerated adaptive backstepping control of the chaotic PMSM via the type-2 sequential fuzzy neural network [C]// 2020 International Symposium on Autonomous Systems (ISAS). Guangzhou, China, 2020: 35-40.
- [16] Aghili F. Optimal feedback linearization control of interior PM synchronous motors subject to time-varying operation conditions minimizing power loss [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5414-5421.
- [17] Wang Yaoqiang, Feng Yutao, Zhang Xiaoguang, et al. A new reaching law for antidisturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4117-4126.
- [18] Piccinni G, Torelli F, Avitabile G. Chaos suppression in forced chaotic systems by innovative sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(8): 1424-1428.
- [19] 林飞飞, 曾喆昭. 不确定分数阶 PMSM 混沌系统自适应滑模控制[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 66-72.
- Lin Feifei, Zeng Zhezha. Adaptive sliding mode control of uncertain fractional order permanent magnet synchronous motor chaotic system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 66-72 (in Chinese).
- [20] 周硕, 王大志, 谷中平. 永磁同步电动机混沌系统自适应滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(8): 78-80, 84.
- Zhou Shuo, Wang Dazhi, Gu Zhongping. Adaptive sliding mode control for the chaotic permanent magnet synchronous motor system [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(8): 78-80, 84 (in Chinese).
- [21] Lu Senkui, Wang Xingcheng, Li Yanan. Fractional order modeling and asymptotic stabilizing for permanent magnet synchronous motor system [C]// 2018 Chinese Automation Congress (CAC). Xi'an, China, 2018: 3612-3617.



谭舒丹

作者简介:

谭舒丹(1998—), 女, 硕士研究生。
研究方向: 交流电机控制。E-mail:
1715612535@qq.com。

马家庆(1981—), 男, 通信作者,
博士, 副教授。研究方向: 交流电机控制、
电力电子器件能量传递效率。Email:
357287962@qq.com。