

10-14-2020

Chaos Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finite Time LaSalle Invariant Set

Zhang Yun

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China;

Wang Cong

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China;

Hongli Zhang

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China;

Ma Ping

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Chaos Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finite Time LaSalle Invariant Set

Abstract

Abstract: In order to effectively restrain the chaotic behavior of permanent magnet synchronous motor, *an adaptive controller is designed based on finite time theory and LaSalle invariant set theorem. The chaotic dynamics characteristics of the permanent magnet synchronous motor system are analyzed, and the parameter fields of the system in different motion states are determined. It is proved theoretically that the controller can stabilize to the equilibrium point in finite time and can automatically track the equilibrium point of the system.* Simulation results show that the control scheme is concise, faster and more stable. The research results are of great significance to ensure the stable operation of PMSM.

Keywords

permanent magnet synchronous motor, bifurcation diagram, finite time theory, laSalle invariant set

Recommended Citation

Zhang Yun, Wang Cong, Zhang Hongli, Ma Ping. Chaos Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finite Time LaSalle Invariant Set[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 1956-1963.

基于有限时间 LaSalle 不变集的 PMSM 混沌控制

张云, 王聪, 张宏立, 马萍

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为有效地抑制永磁同步电动机系统的混沌行为, 基于有限时间理论和 LaSalle 不变集定理设计了一种自适应控制器。分析了永磁同步电动机系统的混沌动力学特性, 确定了系统处于不同运动状态的参数域; 在理论上证明该控制器能够在有限时间内稳定到平衡点且能自动跟踪系统平衡点; 仿真实验证明, 该控制方案形式简单, 快速性更好, 稳定性更高。研究结果对保证永磁同步电动机的稳定运行具有重要意义。

关键词: 永磁同步电动机; 分岔图; 有限时间理论; LaSalle 不变集

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 10-1956-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0509

Chaos Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Finite Time LaSalle Invariant Set

Zhang Yun, Wang Cong, Zhang Hongli, Ma Ping

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China)

Abstract: In order to effectively restrain the chaotic behavior of permanent magnet synchronous motor, an adaptive controller is designed based on finite time theory and LaSalle invariant set theorem. The chaotic dynamics characteristics of the permanent magnet synchronous motor system are analyzed, and the parameter fields of the system in different motion states are determined. It is proved theoretically that the controller can stabilize to the equilibrium point in finite time and can automatically track the equilibrium point of the system. Simulation results show that the control scheme is concise, faster and more stable. The research results are of great significance to ensure the stable operation of PMSM.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; bifurcation diagram; finite time theory; laSalle invariant set

引言

随着电机控制理论和永磁材料的不断发展, 以及现代工业进程中自动化的不断推进, 永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因其控制精度高、启动转矩大、稳定性强、功率因

数高而广泛应用于伺服系统、工业机器人、航空航天等多个领域^[1]。PMSM 系统是一种对初始条件、参数变量、工作环境等因素相当敏感的非线性动态系统, 易发生各类不稳定振荡现象。已有文献证明混沌行为作为其中一种复杂的动力学行为会引起电机转矩的随机变化、转速的间歇震荡、不规则的电流噪声等, 不利于系统动态性能的调控^[2]。因此, 研究 PMSM 系统的混沌动力学行为及混沌控制方法具有重要的现实意义。

为有效的抑制电机系统的混沌行为, 保证电



收稿日期: 2020-06-03 修回日期: 2020-07-21;
基金项目: 国家自然科学基金(51767022, 51967019),
新疆维吾尔自治区自然科学基金(2019D01C082);
作者简介: 张云(1996-), 男, 河南, 硕士生, 研究方向为永磁同步电动机的非线性动力学分析与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1956 •

机系统的稳定运行, 国内外专家已提出多种混沌控制方案。陈强等^[3]提出了基于扩张状态观测器的滑模控制器, 解决了系统中的不确定项、未知状态带来的干扰, 有效实现了对混沌的控制, 但该控制器的部分参数是依经验设定, 不便广泛使用。杨益飞等^[4]提出了利用最优输出反馈 H_∞ 技术实现永磁同步电动机的混沌控制, 利用 Hamilton 理论验证了设计的有效性, 但该方法缺陷是只能保证系统平衡点的控制。Li 等^[5]利用非线性反步法提出了一种改进的反步控制器, 既提高了速度的动态响应, 又实现了对速度的跟踪, 但对于转子磁链无法达到有效跟踪。He 等^[6]利用神经网络理论设计控制器, 该控制方法具有较强的自适应自学习能力, 能实现对永磁同步电动机混沌系统的控制, 但神经网络权值训练太复杂, 不易实现。柯伟煌等^[7]利用扰动观测器与无差拍电流预测控制方法设计控制器, 对于永磁同步电动机电流环有较好的控制效果, 也提高了鲁棒性, 但对速度环不能实现较好的跟踪控制。王要强等^[8]提出了滑模变结构控制器, 具有较强的鲁棒性, 且收敛速度快, 但该方法无法预先获得不确定性因素的边界, 并存在抖振现象。李春来等^[9]利用 LaSalle 不变集定理设计了一种改进的自调整控制器, 实现了 PMSM 中混沌控制以及对外部不确定干扰的鲁棒性, 但系统响应速度较慢。Zhao 等^[10]将有限时间稳定理论与模糊控制相结合, 设计的控制器提高了系统的响应速度和稳定性, 但没有考虑到工程应用中的跟踪问题。

针对上述存在问题, 为进一步提高 PMSM 系统的控制精度和减少控制响应时间, 本文提出了基于有限时间稳定理论和 LaSalle 不变集定理的 PMSM 系统的混沌振荡自适应控制方法。通过自适应技术解决了系统中存在参数未知的问题, 在保留自适应控制优点的基础上, 引入有限时间控制, 提高了系统的响应速度。本文的控制方法, 引入有限时间控制技术, 提高了系统响应速度; 不存在传统反步控制技术中的“计算爆炸”问题; 设计的控制器只有一个自适应律, 减少了在线计算的时间, 更

适用于实际工程。

1 理论基础

1.1 有限时间稳定理论

考虑非线性系统^[11]:

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0 \quad (1)$$

式中: $x \in R^n$ 为系统的状态变量; $f: D \rightarrow R^n$ 为定义域 D 到 n 维空间 R^n 中的一个非线性函数。

定义 1^[12]: 当式(1)是稳定的且为有限时间收敛时, 它的平衡点 $x=0$ 为连续有限时间稳定。有限时间收敛表示存在一个连续函数 $T(x): D_0 \setminus \{0\} \rightarrow (0, +\infty)$ 使得对 $\forall x_0 \in D_0 \subset D$ 。式(1)的解可记为 $x(t, x_0)$:

(1) 当 $t \in [0, T(x_0)]$ 时, 有 $x(t, x_0) \in D_0 \setminus \{0\}$ 和 $\lim_{t \rightarrow T(x_0)} x(t, x_0) = 0$;

(2) 当 $t > T(x_0)$ 时, 有 $x(t, x_0) = 0$;

当 $D=D_0=R^n$, 此时系统(1)满足全局有限时间稳定。

定理 1^[13]: 假设存在一个连续正定函数 $V(t)$ 满足微分不等式

$$\dot{V}(t) \leq -mV^\xi(t), \forall t > t_0, V(t_0) \geq 0 \quad (2)$$

式中: $m > 0, 0 < \xi < 1$ 是常数, 那么对于任何初始时间 t_0 , $V(t)$ 都满足不等式:

$$|f(x_1) - f(x_2)| < k|x_1 - x_2| \quad (3)$$

$$V(t) \equiv 0, \forall t > t_1 \quad (4)$$

其中:

$$t_1 = t_0 + \frac{V^{1-\xi}(t_0)}{m(1-\xi)} \quad (5)$$

证明^[14]: 考虑微分方程

$$\dot{x}(t) \leq -\varepsilon x^\xi(t), x(t_0) = V(t_0) \quad (6)$$

式(6)的唯一解如下

$$x^{1-\xi}(t) \leq x^{1-\xi}(t_0) - \varepsilon(1-\xi)(t-t_0), t_0 < t < t_1 \quad (7)$$

并且有 $V(t) \equiv 0, \forall t > t_1$ 。这里的 t_1 同样由式(7)表示。证明完毕。

定理 2^[15]: 假设 $0 < c < 1$, 那么对于正实数 a 和 b , $(a+b)^c \leq a^c + b^c$ 成立。

1.2 LaSalle 不变集理论

考虑非线性系统:

$$\dot{X} = f(X) \quad (8)$$

式中: $t \in [0, \infty]$, 状态变量 $X \in R^n$, $f: D \rightarrow R^n$ 是定义在 $f: D \in R^n$ 上的连续可微函数, 满足 Lipschitz 条件。设非线性系统至少存在一个平衡点 X^* , 但并不知道此平衡点的位置。对于式(8), 引入以下概念:

定义 1: Lipschitz 条件

若存在一个常数 k 使得对定义域 D 中任意两个不同的实数 x_1 和 x_2 均有以下不等式成立^[16]:

$$|f(x_1) - f(x_2)| < k|x_1 - x_2|$$

则称 $f(x)$ 在区域 D 满足 Lipschitz 条件。若 $f(x)$ 在区域 I 上满足 Lipschitz 条件, 则必定有 $f(x)$ 在区域 I 上满足一致连续。

定义 2:

设式(8)的解为 $x(t)$, 存在时间序列 $\{t_n\}$, $\lim(t_n) = \infty$, 使得 $x(t_n) = p$, 则称 p 是 $x(t)$ 的一个正向极限点。

定义 3:

设 $M \in R^n$, 系统对于任意初始条件 $x(0) = x_0 \in M$, 式(8)的解 $x(t) = \Phi(t, x_0)$ 满足: $x(t) \in M, \forall t \geq 0$

则 M 是式(8)的一个正向不变集, 它包括系统的一个或多个平衡点, 或是一个状态空间的子集^[16]。

定理 3 (LaSalle 不变集定理^[17]):

设 Ω 是一个有界闭集合, 从 Ω 集合内出发的系统(8)的解 $x(t) \subset \Omega$, 若 $\exists V(x): \Omega \rightarrow R$, 具有一阶连续偏导, 使 $V = \frac{1}{2}\omega^2$, 又设

$$E = \{x | dV/dt = 0, x \in \Omega\}$$

$M \subset E$ 是最大不变集, 则当 $t \rightarrow \infty$ 有 $x(t) \rightarrow M$, 特别的如果 $M = \{0\}$, 则系统的平衡点稳定。

2 混沌永磁同步电动机

以定子 d 轴电流 i_d 、定子 q 轴电流 i_q 、转子角速率 ω 为状态变量, 可得均匀气隙条件下的永磁

同步电动机无量纲数学模型:

$$\begin{cases} di_d/d\tilde{t} = -i_d + \omega i_q + \tilde{u}_d \\ di_q/d\tilde{t} = -i_q - \omega i_d + \gamma\omega + \tilde{u}_q \\ d\omega/d\tilde{t} = \sigma(i_q - \omega) - \tilde{T}_L \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\tilde{u}_d$, $\tilde{u}_q$ 和 $\tilde{T}_L$ 分别为 d 轴定子电压、 q 轴定子电压和负载扭矩; γ 和 σ 为系统未知参数。

考虑 PMSM 系统不施加外部激励情况, 看作 PMSM 空载运行一段时间后突然断电, 即 $\tilde{u}_d = 0$, $\tilde{u}_q = 0$ 和 $\tilde{T}_L = 0$, 此时系统的外部各项输入皆为零。

以系统(9)中的参数 γ 和 σ 作为变量, 令初始值 $(i_d, i_q, \omega) = (0.5, 1, 0.2)$, 得到系统状态变量 ω 随两参数变化的分岔图, 如图 1~2 所示, 表 1~2 给出了系统不同运动状态的参数域。

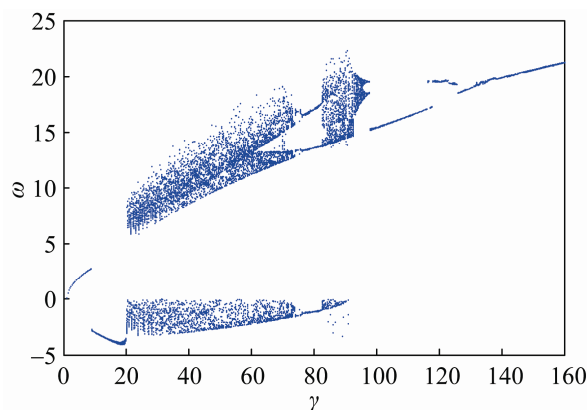


图1 状态变量 ω 随参数 γ 变化的分岔图

Fig. 1 Bifurcation diagram of state variable ω changing with parameter γ

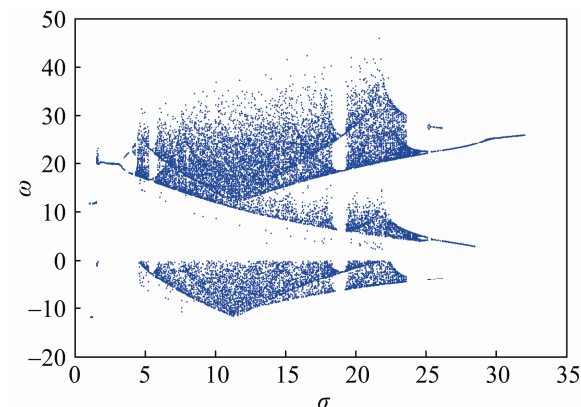


图2 状态变量 ω 随参数 σ 变化的分岔图

Fig. 2 Bifurcation diagram of state variable ω changing with parameter σ

表 1 永磁同步电动机系统随参数 γ 变化时的状态
Tab. 1 State of permanent magnet synchronous motor system with parameter γ

参数 γ	永磁同步电动机系统状态
(0.00, 20.12)	单倍周期
(20.12, 74.2)	混沌
(77.15, 82.8)	多倍周期
(126.93, 160)	单倍周期

表 2 永磁同步电动机系统随参数 σ 变化时的状态
Tab. 2 State of permanent magnet synchronous motor system with parameter σ

参数 σ	永磁同步电动机系统状态
(1.93, 3.13)	单倍周期
(3.14, 4.06)	二倍周期
(4.72, 18.39)	混沌
(18.92, 19.27)	多倍周期

从定性的角度来看,系统的分岔分析是随系统参数的变化而变化,由图 1 可以看出 PMSM 系统随参数 γ 的增大,周期与混沌状态循环出现,系统从分岔点处由周期状态跳变到混沌状态,致使系统表现出丰富的动力学行为。当参数 $\gamma \in (0,1)$ 时系统稳定于平衡点 $P_1(0,0,0)$,当 $\gamma \in (1,20.12)$ 时系统趋向于另外 2 个平衡点 $P_2(\gamma-1, \sqrt{\gamma-1}, \sqrt{\gamma-1})$ 和 $P_3(\gamma-1, -\sqrt{\gamma-1}, -\sqrt{\gamma-1})$,此范围系统处于单倍周期运动状态;当初始状态值不同时,系统稳定到的状态也不同, $\gamma \in (20.12, 74.2)$ 时,系统出现 Hopf 分岔,失去周期运动状态,进入非平衡状态,即系统进入混沌运动状态;当 $\gamma \in (77.15, 82.8)$ 时,系统由混沌运动状态转为多倍周期运动状态;而后随参数 γ 不断增大系统再次失去平衡,进入混沌运动状态;当 $\gamma \in (126.93, 160)$ 时,系统又通过分岔回归到分岔点,进入稳定运行状态,呈单倍周期运动状态。

保持参数 γ 不变,改变参数 σ 的值作系统的分岔图。由图 2 可看出随参数 σ 的不断增大系统也是周期运动状态与混沌运动状态交替出现。当 $\sigma \in (1.93, 3.31)$ 时,系统处于单倍周期运动状态,系统稳定到一个平衡点上;当 $\sigma \in (3.14, 4.06)$ 时,系统经过分岔点开始分岔,由单倍周期运动状态进

入二倍周期运动状态;当 $\sigma \in (4.72, 18.39)$ 时,系统失去平衡,处于混沌运动状态;当 $\sigma \in (18.92, 19.27)$ 时,系统又脱离混沌运动状态,转变为短暂的多倍周期运动状态,而后系统随参数 σ 的增大,倍周期运动状态区域宽度越来越大,系统的动力学行为也变化的更加复杂。

$$\begin{cases} di_d/dt = -i_d + \omega i_q \\ di_q/dt = -i_q - \omega i_d + \gamma \omega \\ d\omega/dt = \sigma(i_q - \omega) \end{cases} \quad (10)$$

由以上分析可知,当 $\sigma=3, \gamma=23$ 时,系统(10)有 3 个平衡点,分为 $S_1=(0,0,0)$, $S_2=(22, -4.690\ 4, -4.690\ 4)$, $S_3=(22, 4.690\ 4, 4.690\ 4)$ 此时 PMSM 处于混沌状态,混沌吸引子为图 3 所示,其会严重干扰永磁同步电动机系统的稳定运行。

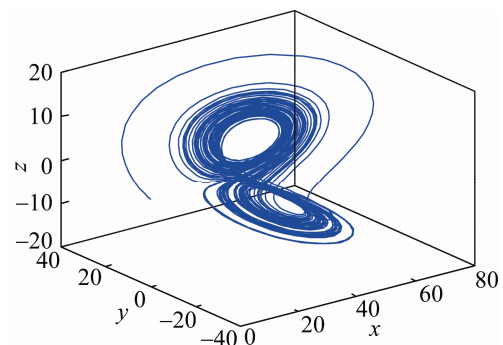


图 3 永磁同步电动机混沌吸引子相图

Fig. 3 Chaotic attractor phase diagram of permanent magnet synchronous motor

3 PMSM 的有限时间 LaSalle 不变集控制

利用有限时间稳定理论和 LaSalle 不变集定理设计控制器。受控的 PMSM 系统的状态方程为:

$$\begin{cases} di_d/dt = -i_d + \omega i_q \\ di_q/dt = -i_q - \omega i_d + \gamma \omega \\ d\omega/dt = \sigma(i_q - \omega) + u_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: u_1 为控制器。

定理 1: 设计控制器如下:

$$\begin{cases} u_1 = -\sigma i_q - \omega^E - k(\omega - y) \\ \dot{k} = -r(\omega - y)^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $E=ij$ ($j>i$ 是正的奇整数), 可使混沌永磁同步电动机系统能在有限时间内被控制到平衡点, 实现有限时间 LaSalle 不变集混沌控制。

证明: 把控制器(12)带入系统方程(11)方程第 3 项, 可得

$$\dot{\omega} = -\sigma\omega - \omega^E - k(\omega - y) \quad (13)$$

构造 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2}\omega^2$, 则对其沿着式(13)的轨迹对时间求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \omega\dot{\omega} = -\sigma\omega^2 - \omega^{E+1} - k(\omega^2 - y\omega) \leq -\omega^{E+1} = \\ &= -\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{E+1}{2}} \times \left(\frac{1}{2}\omega^2\right)^{\frac{E+1}{2}} = -\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{E+1}{2}} \times (V_1)^{\frac{E+1}{2}} \end{aligned}$$

由 $0 < E < 1$, 则有 $0 < (E+1)/2 < 1$, 根据引理 1 可知, 系统(11)在有限时间 $T_1 = V_1^{1-\xi} / [m_1(1-E)]$ 后达到 $\omega=0$ 处。

由上述可得, 当时间 $t > T_1$ 时, 系统(11)会在控制器作用下达到平衡点 $X=(0,0,0)$ 。

再令 $g(x) = -\sigma\omega - \omega^E$, 且存在 l 使得 $|g(x)| \leq l|\omega - y|$, 则式(13)变为:

$$\dot{\omega} = g(x) - k(\omega - y) \quad (14)$$

构造 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\omega_i - y_i)^2 + \frac{1}{2r} (k+L)^2$$

式中: L 为正实数, 且 L 远大于 l 。则对其沿着式(14)的轨迹对时间求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \sum_{i=1}^n (\omega_i - y_i) \cdot \dot{\omega}_i + \frac{1}{r} (k+L) \cdot \dot{k} = \\ &= \sum_{i=1}^n (\omega_i - y_i) \cdot (g(x) - k(\omega_i - y_i)) + \frac{1}{r} (k+L) \cdot \\ &= (-r(\omega_i - y_i)^2) = \\ &= \sum_{i=1}^n (\omega_i - y_i) \cdot g(x) - k \sum_{i=1}^n (\omega_i - y_i)^2 - k(\omega_i - y_i)^2 - \\ &= L(\omega_i - y_i)^2 \leq l(\omega - y)^2 - L(\omega - y)^2 \leq 0 \end{aligned}$$

显然, 当且仅当 $\omega_i = y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 即集合 $M = \{(\omega_i - y_i, k) \in R^{n+1} | \omega_i = y_i, k = k_0\}$ 是包含于 $\dot{V}_2=0$ 的最大不变集。根据定理 3 可知, 受控 PMSM 混沌系统(11)能被控制器(12)稳定到系统的平衡点处, 即 $\omega_i = y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

由以上分析可知, PMSM 混沌系统在控制器式(12)的作用下, 可实现有限时间的 LaSalle 不变集自适应混沌控制。

4 数值仿真

设步长 $h=0.002$, 使用四阶 Runge-Kutta 法求解微分方程, PMSM 的初值选取为 $(i_d, i_q, \omega) = (0.02, 0.06, 0.08)$, 控制参数 $K=0.4$, $E=0.5$ 。

由表 1 确定的系统随参数 γ 变化时所处的不同运动状态, 分别选取 $\gamma=13$ 时系统处于单倍周期运动状态, $\gamma=30$ 时系统处于混沌运动状态, $\gamma=79$ 时系统处于多倍周期运动状态, $\gamma=139$ 时系统又处于单倍周期运动状态, 分别施加控制器进行验证。图 4~7 给出了不同运动状态下控制器的控制效果图。

图 4~7 是受控 PMSM 混沌系统在参数 γ 不同时的 3 个状态变量的时间响应曲线, 可以看出, 虽然两种控制方法均能将 PMSM 混沌系统的 3 个状态变量由混沌振荡状态恢复到平衡运动状态, 但采用有限时间 LaSalle 不变集的控制效果更好, 响应速度更快; 由超调量也可以明显看出, 随着参数 γ 的不断增大, 采用 LaSalle 不变集控制的系统状态变量超调量大幅度增加, 而采用有限时间 LaSalle 不变集控制的系统状态变量超调量只有略微变化, 也表明该控制方法的鲁棒性较强, 更具有优势。

由表 2 确定的系统随参数 σ 变化时所处的不同运动状态, 分别选取 $\sigma=1.52$ 时系统处于单倍周期运动状态, $\sigma=3.80$ 时系统处于二倍周期运动状态, $\sigma=12.80$ 时系统处于混沌运动状态, $\sigma=19.10$ 时系统处于多倍周期运动状态, 分别施加控制器进行验证。图 8~11 给出了不同运动状态下, 控制器的控制效果图。

图 8~11 是受控 PMSM 混沌系统在参数 σ 不同时的 3 个状态变量的时间响应曲线, 可以看出, 随着参数 σ 的不断增大, 采用 LaSalle 不变集控制的 3 个系统状态变量, 波动明显, 超调量大幅增加。而采用有限时间 LaSalle 不变集控制的 3 个系统状

态变量, 控制效果更好, 响应速度更快, 只存在略微超调, 且由于设计的控制律为连续控制律, 因此

状态变量响应曲线非常平滑, 也表明该控制器的鲁棒性较强, 更适用于 PMSM 的混沌控制。

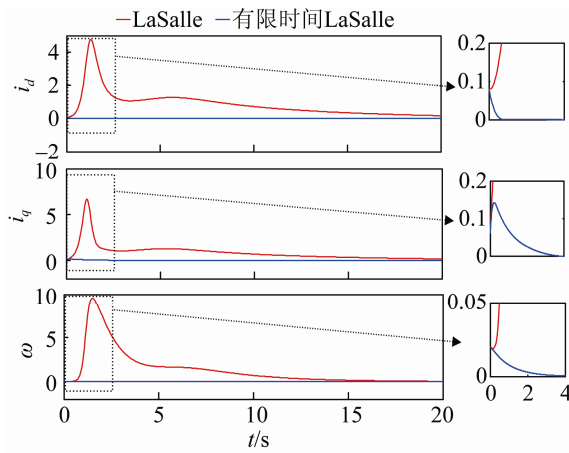


图 4 参数 $\gamma=13$ 时系统时间响应曲线

Fig. 4 System time response curve at parameter $\gamma=13$

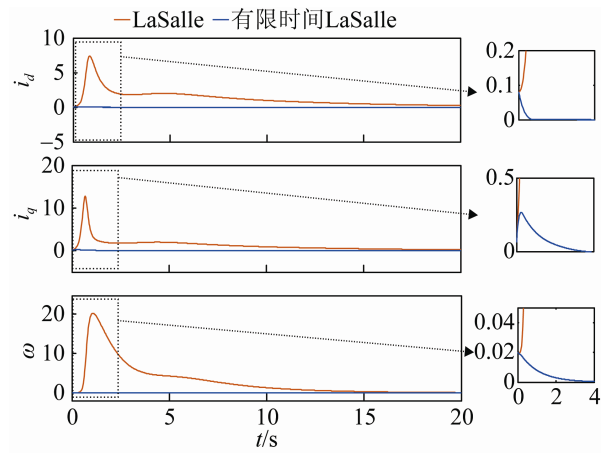


图 5 参数 $\gamma=30$ 时系统时间响应曲线

Fig. 5 System time response curve at parameter $\gamma=30$

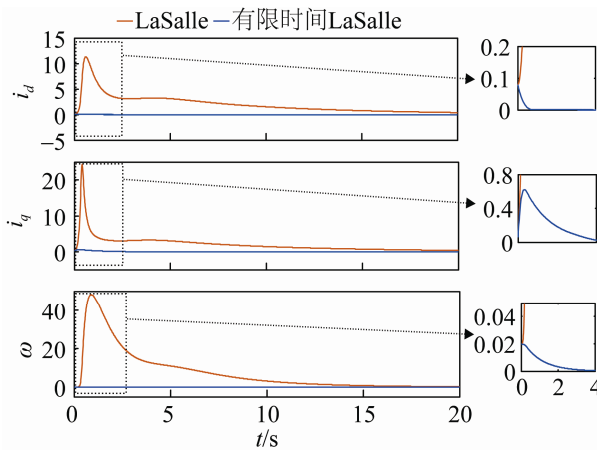


图 6 参数 $\gamma=79$ 时系统时间响应曲线

Fig. 6 System time response curve at parameter $\gamma=79$

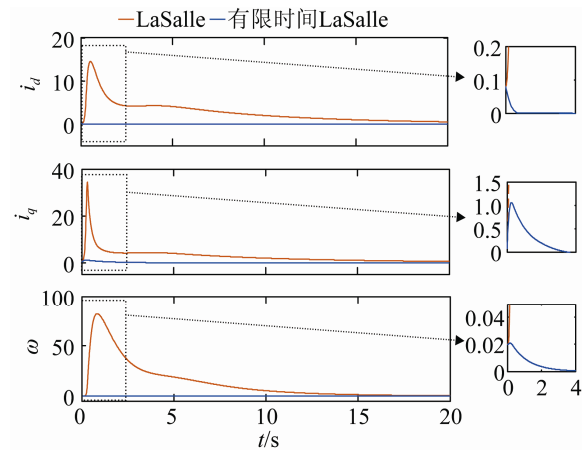


图 7 参数 $\gamma=139$ 时系统时间响应曲线

Fig. 7 System time response curve at parameter $\gamma=139$

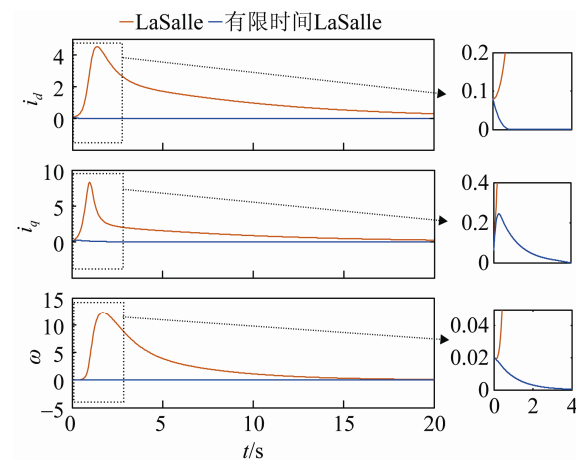


图 8 参数 $\sigma=1.52$ 时系统时间响应曲线

Fig. 8 System time response curve at parameter $\sigma=1.52$

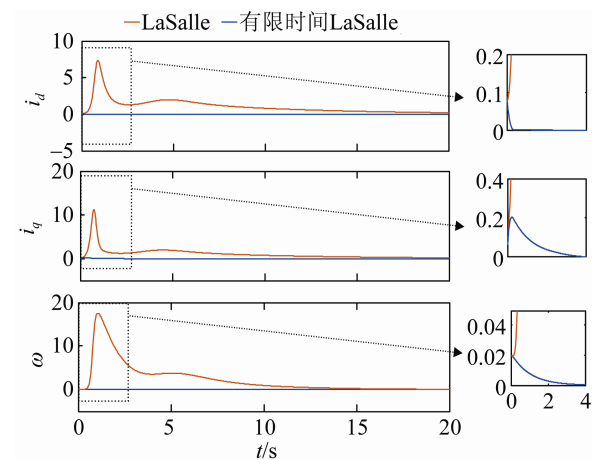
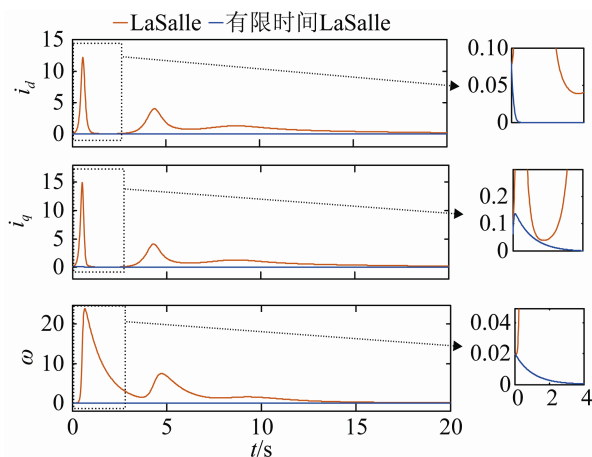
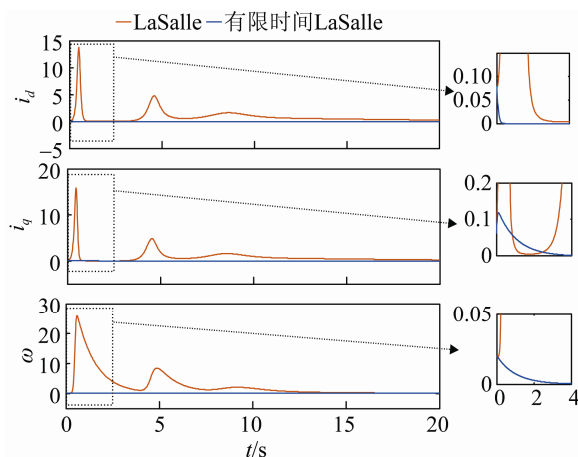


图 9 参数 $\sigma=3.80$ 时系统时间响应曲线

Fig. 9 System time response curve at parameter $\sigma=3.80$

图 10 参数 $\sigma=12.80$ 时系统时间响应曲线Fig. 10 System time response curve at parameter $\sigma=12.80$ 图 11 参数 $\sigma=19.10$ 时系统时间响应曲线Fig. 11 System time response curve at parameter $\sigma=19.10$

5 结论

针对 PMSM 系统的混沌控制问题, 设计了一种有限时间 LaSalle 不变集自适应控制方法。首先分析了 PMSM 系统的混沌特性, 利用分岔图找到了 PMSM 系统处于不同运动状态的两个参数范围; 其次针对系统不同运动状态, 分别施加有限时间 LaSalle 不变集控制器进行控制, 并与只采用 LaSalle 不变集控制的系统对比, 结果表明有限时间 LaSalle 不变集能更好的实现了对 PMSM 混沌系统的控制, 不仅保留 LaSalle 不变集自适应控制的优点, 又大幅缩短了系统的响应时间, 提高了系统的平滑性, 增强了系统的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 麦贤慧, 韦笃取, 罗晓曙. Newman-Watts 型小世界电机网络混沌行为的牵制控制[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 1(14): 96-102.
Mai Xianhui, Wei Duqu, Luo Xiaoshu. Containment control of chaotic behavior in a small-world motor network based on newt-watts[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 1(14): 96-102.
- [2] Li J, Ye X D. Recent Development of Chaos Theory in Topological Dynamics[J]. Acta Mathematica Sinica (S1439-8516), 2016, 32(1): 83-114.
- [3] 陈强, 南余荣, 邢科新. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机混沌系统自适应滑模控制[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 117-124.
Chen Qiang, Nan Yurong, Xing Kexin. Adaptive sliding

mode control for chaos system of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 117-124.

- [4] 杨益飞, 骆敏舟, 邢绍邦, 等. 永磁同步发电机混沌运动分析及最优输出反馈 H_{∞} 控制[J]. 物理学报, 2015, 64(4): 38-44.
Yang Yifei, Luo Minzhou, Xing Shaobang, et al. Chaotic motion analysis of permanent magnet synchronous generators and optimal output feedback H_{∞} control[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(4): 38-44.
- [5] Li Z, Zhang R, Du Y, et al. Research on Backstepping Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Based on Lyapunov Stability Theory, 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)[J]. Jeju: IEEE, 2018, 10: 1348-1351.
- [6] He W, David A O, Zhao Y, et al. Neural network control of a robotic manipulator with input deadzone and output constraint[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems (S2168-2216), 2016, 46(6): 759-770.
- [7] 柯伟煌, 钱胜南, 张艺, 等. 基于扰动观测器的永磁同步电动机无差拍电流预测控制仿真[J]. 电气技术, 2019, 20(8): 1-5.
Ke Weihuang, Qian Shengnan, Zhang Yi, et al. Simulation of PMSM's deadbeat current prediction based on disturbance observer[J]. Electrical Technology, 2019, 20(8): 1-5.
- [8] 王要强, 冯玉涛, 秦明, 等. 表贴式永磁同步电机全阶滑模观测与控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5688-5699.
Wang Yaoqiang, Feng Yutao, Qin Ming, et al. Observation and control of full-order sliding mode of

- PMSM[J]. Journal of Electrotechnics, 2018, 33(24): 5688-5699.
- [9] 李春来, 禹思敏. 永磁同步电动机的自适应混沌控制[J]. 物理学报, 2011, 60(12): 90-96.
Li Chunlai, Yu Simin. Adaptive chaos control of permanent magnet synchronous motors[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(12): 90-96.
- [10] Yu J, Zhao L, Yu H, et al. Fuzzy finite-time command filtered control of nonlinear systems with input saturation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics (S2168-2267), 2018, 48(8): 2378-2387.
- [11] Bhat S P D, Bernstein D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. SIAM J on Control and Optimization (S0363-0129), 2000, 38(3): 751-766.
- [12] 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.
Ding Shihong, Li Shihua. Summary of finite time control problem[J]. Control and Decision-making, 2011, 26(2): 161-169.
- [13] 汪慕峰, 韦笃取, 罗晓曙, 等. 基于有限时间稳定理论的无刷直流电动机混沌振荡控制[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 90-93.
Wang Mufeng, Wei Duqu, Luo Xiaoshu, et al. Chaotic oscillation control of brushless dc motor based on finite time stability theory[J]. Vibration and Impact, 2016, 35(13): 90-93.
- [14] Wang H, Han Z Z, Xie Q Y, et al. Finite-time chaos control via nonsingular terminal sliding mode control[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation (S1007-5704), 2009, 14(6): 2728-2733.
- [15] Wang H, Han Z Z, Xie Q Y, et al. Finite-time chaos control of unified chaotic systems with uncertain parameters[J]. Nonlinear Dynamics (S0924-090X), 2009, 55(4): 323-328.
- [16] 韦笃取. 基于 LaSalle 不变集定理自适应控制永磁同步电动机的混沌运动[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6026-6029.
Wei Duqu. Adaptive control of chaotic motion of permanent magnet synchronous motors based on LaSalle invariant set theorem[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6026-6029.
- [17] LaSalle J P. The extent of asymptotic stability[J]. Proc Natl Acad Sci USA (S0027-8424), 1960, 46(3): 363-365.