

永磁同步电动机的自适应混沌控制*

李春来^{1)2)†} 禹思敏¹⁾

1) (广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

2) (湖南理工学院物理与电子学院, 岳阳 414006)

(2010年11月20日收到; 2011年8月12日收到修改稿)

首先基于 LaSalle 不变集定理设计一种自适应控制器, 实现了永磁同步电动机中的混沌控制. 然后在控制项中增加一个控制强度因子, 给出了一种改进的自适应控制器. 与以往的控制方案相比, 该控制方案具有最简形式, 控制器可以施加在状态方程的任何一项上. 仿真结果表明了该方法的有效性和对外界随机干扰的鲁棒性.

关键词: 自适应控制, LaSalle 不变集定理, 永磁同步电动机, 混沌控制

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Ac

1. 引言

混沌控制是非线性科学中的一个热门研究领域, 已渗透到自然科学和社会科学各领域之中. 1990年, 美国物理学家 Ott, Grebogi 和 Yorke^[1] 提出利用参数微扰法 (OGY 方法) 控制混沌. 随后混沌控制研究引起了人们的广泛关注与兴趣, 已经涌现出大量的混沌控制方法, 典型的控制方法有最优控制^[2]、自适应控制^[3]、滑膜变结构控制^[4]、滤波器控制^[5]、脉冲控制^[6]等. 但是, 很多方法并不一定能够直接应用于工程实际中的混沌系统.

永磁同步电动机是一种典型的多变量、强耦合非线性系统, 在某些参数及工作条件下会呈现混沌行为^[7], 主要表现为转矩和转速的间歇振荡、系统不规则的电磁噪声等. 这些不规则运动严重影响着系统的稳定运行, 如何对永磁同步电动机系统中的混沌行为进行控制已成为人们关注的课题. 目前对永磁同步电动机的混沌研究尚处于理论分析和仿真研究阶段^[5, 8-12]. 文献[8]基于状态延迟反馈控制的方法实现了永磁同步电动机中的混沌控制, 但是该方法很难确定延迟时间与目标轨道之间的内在联系. 文献[9]首先对处于混沌态的永磁同步电动机的状态微分方程进行了精确

线性化, 然后利用反馈技术将其控制到平衡点, 然而此方法较为复杂, 使得物理实现较为困难. 文献[5]给出了一种基于冲洗滤波技术的永磁同步电动机混沌控制方法, 但这种方法的控制代价较大. 文献[10]利用返步法对永磁同步电动机中的混沌进行了控制, 但是该设计过程较复杂, 且设计过程中会出现由于虚拟输入微分而引起“微分项膨胀”的问题. 文献[13]基于 LaSalle 不变集定理设计了一种自适应控制器, 实现了永磁同步电动机的混沌控制, 但该控制方案不具备最简形式, 其自适应项较为复杂.

永磁同步电动机是一种典型的实际现场控制系统, 不可避免地会存在外界干扰. 对于这样一个工程实际中存在的不良混沌现象, 寻找简单而在物理上可行和鲁棒的控制方法是一项有意义的研究课题. 本文首先基于 LaSalle 不变集定理设计了一种具有最简形式的自适应控制器, 实现了永磁同步电动机中的混沌控制. 然后通过增加一个控制强度因子, 给出了一种改进的自适应控制器. 与以往的控制方案相比, 该控制方案结构简单, 其控制项和自适应项均具有最简形式, 控制代价小, 易于工程实现. 另外, 该控制方案实施起来很灵活, 控制器可以施加在状态方程的任何一项上. 仿真结果表明了该方法的有效性和对外界随机干扰的鲁

* 国家自然科学基金 (批准号: 61172023, 60871025) 和广东省自然科学基金 (批准号: 8151009001000060, S2011010001018) 资助的课题.

† E-mail: lichunlai33@tom.com

棒性.

2. 永磁同步电动机数学模型

经过仿射和时间尺度变换后的均匀气隙永磁同步电动机数学模型为^[14]

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -i_d + \omega i_q + \tilde{u}_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - \omega i_d + \gamma \omega + \tilde{u}_q, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \sigma(i_q - \omega) - \tilde{T}_L, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 i_d, i_q 和 ω 分别为 d 轴定子电流、 q 轴定子电流和转子机械角速度; \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 为系统参数.

一般地, 我们考虑电动机系统没有外力的情形. 这时可以看作是永磁同步电动机空载运行一段时间后突然断电, 各外部输入项为零的情形, 即 $\tilde{u}_d = 0, \tilde{u}_q = 0$ 和 $\tilde{T}_L = 0$. 此时系统(1)可表示为

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -i_d + \omega i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - \omega i_d + \gamma \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \sigma(i_q - \omega). \end{aligned} \quad (2)$$

当 $\sigma = 3, \gamma = 28$, 系统(2)有三个平衡点, 分别为 $S_1(0, 0, 0), S_2(27, -5.19615, -5.19615), S_3(27, 5.19615, 5.19615)$. 此时永磁同步电动机表现为混沌行为, 其典型混沌吸引子如图 1 所示. 混沌的存在将严重破坏永磁同步电动机的稳定运行, 甚至会引起传动系统的崩溃, 所以必须抑制永磁同步电动机的混沌运动.

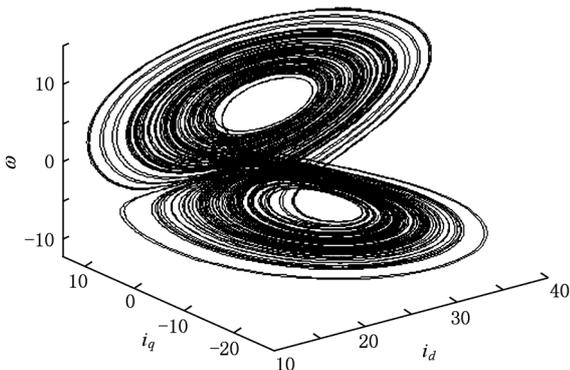


图 1 永磁同步电动机的混沌相图

3. 自适应控制器设计

3.1. 基于 LaSalle 不变集定理的自适应控制器设计

考虑如下非线性系统:

$$\dot{x} = f(x). \quad (3)$$

这里 $x \in R^n$ 为系统状态变量; 时间 $t \in [0, \infty]$; $f(x) \in R^n$ 为光滑向量场, 其满足 Lipschitz 条件, 即

$$\begin{aligned} \|f_i(x)\| &= \|f_i(x) - f_i(x_0)\| \\ &\leq k \|x_i - x_{i0}\| \leq k \|x - x_0\|_\infty, \end{aligned}$$

其中 $\|x - x_0\|_\infty$ 为 $x - x_0$ 的 ∞ 范数, 即

$$\begin{aligned} \|x - x_0\|_\infty &= \max_j \|x_j - x_{0j}\| \quad (j = 1, 2, \dots, n), \\ x_0 &= (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})^T \end{aligned}$$

为系统(3)的某个平衡点. 我们的目标是设计合适的控制方案, 将非线性系统(3)控制到平衡点 x_0 . 这时我们将控制器施加到系统(3)的第 i 项, 得到如下受控系统:

$$\dot{x} = f(x) + u_i. \quad (4)$$

下面给出具体的自适应控制方法,

$$u_i = \mu(x_i - x_{0i}), \quad (5)$$

$$\dot{\mu} = -\lambda(x_i - x_{0i})^2, \quad (6)$$

式中 $u_i \in R^1$ 为施加在状态方程的第 i 项上的控制器; x_{0i} 为平衡点 x_0 的第 i 个分量; μ 为控制强度, 满足自适应律(6)式; $\lambda \in R^+$.

定理 1 在自适应控制器(5)和(6)式的作用下, 受控混沌系统(4)渐近稳定到平衡点.

证明 选取正定函数

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{0i})^2 + \frac{1}{2\lambda} (\mu + K)^2,$$

式中 K 为一个正的实数, 满足 $K \geq nk$. 求函数 V 关于时间的导数

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^n (x_i - x_{0i}) \dot{x}_i + \frac{1}{\lambda} (\mu + K) \dot{\mu} \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i - x_{0i}) f_i(x) + \mu (x_i - x_{0i})^2 \\ &\quad - (\mu + K) (x_i - x_{0i})^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i - x_{0i}) f_i(x) - K (x_i - x_{0i})^2 \\ &\leq (nk - K) \|x - x_0\|_\infty^2 \leq 0. \end{aligned}$$

很明显, 当且仅当 $x_i = x_{0i} (i = 1, 2, \dots, n), \dot{V} = 0$, 即集合 $M = \{(x_i - x_{0i}, \mu) \in R^{n+1} | x_i = x_{0i}, \mu = \mu_0\}$ 是

包含于 $\dot{V} = 0$ 的最大不变集. 根据微分方程的 LaSalle 最大不变集定理, 受控混沌系统(4) 在自适应混沌控制器(5) 和(6) 式作用下渐近稳定到平衡点, 即 $x_i = x_{0i} (i = 1, 2, \dots, n)$. 证毕.

本设计过程中用到的 Lipachitz 条件很宽松, 只需满足 $\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_j} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 有界即可. 满足此要求的方程几乎包括所有已知的有限维混沌或超混沌系统. 另外, 本控制方案结构相当简单, 其控制项和自适应项均具有最简形式, 故本控制方案易于工程实现, 控制代价小. 我们可以将控制器施加在方程(3) 的任意一项上, 这样在永磁同步电动机的现场控制过程中可根据需要灵活使用本控制方案.

3.2. 改进自适应控制器设计

上述控制方案能有效将混沌系统控制到任意

平衡点, 但我们发现, 控制项 $\mu(x_i - x_{0i})$ 前面的系数为 1, 这样, 在系统达到稳定前控制强度仍较大. 在控制项前面增加一个控制强度因子 δ, δ 的取值为很小 ($0 < \delta < 1$) 的正常数, 这时控制项可表述为

$$u_i = \delta \mu(x_i - x_{0i}), \quad (7)$$

自适应项仍为(6) 式. 在实际控制中, 可以将自适应项中系数 λ 取得很小, 而通过求自适应控制系统的最大 Lyapunov 指数来确定控制强度因子 δ 的取值范围. 因此当 δ 取小于 1 的某个值时, 控制代价(控制能量) 自然减小.

4. 永磁同步电动机的自适应混沌控制及仿真分析

下面利用以上介绍的自适应方案对永磁同步电动机进行混沌控制. 首先, 我们采用自适应控制

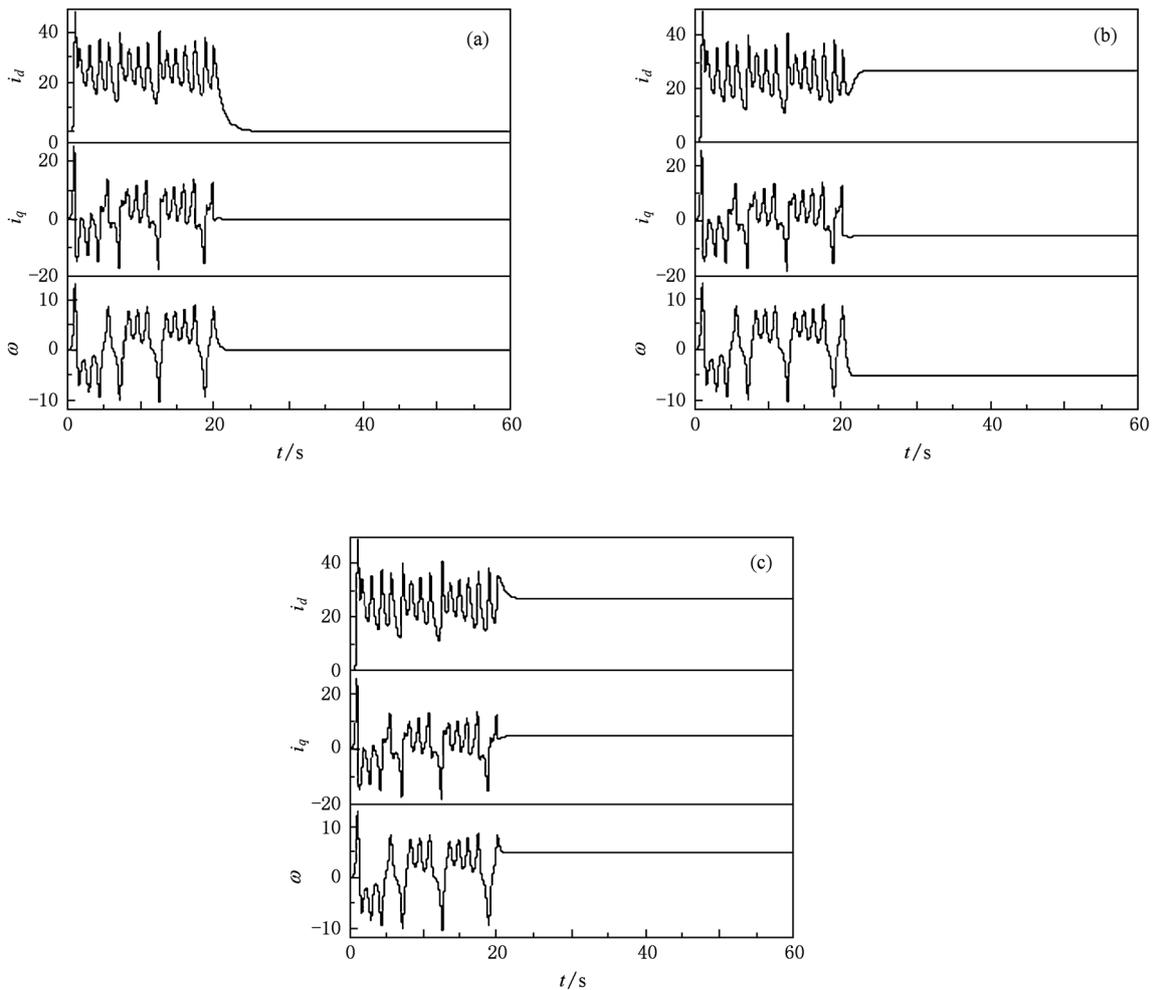


图2 控制永磁同步电动机到平衡点 (a) 控制到 $S_1(0, 0, 0)$, (b) 控制到 $S_2(27, -5.19615, -5.19615)$, (c) 控制到 $S_3(27, 5.19615, 5.19615)$

器(5)和(6)式. 根据上述讨论, 可以将控制器施加在系统(2)的任意一项上. 这里我们将控制器施加

在状态系统(2)中的第二式进行反馈控制. 此时, 控制系统为

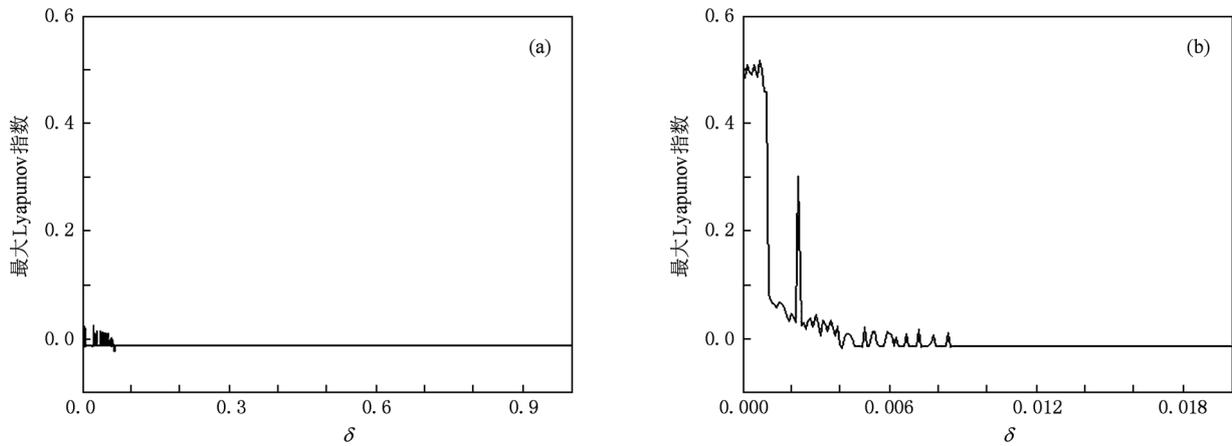


图3 系统(9)的最大 Lyapunov 指数 (a) $0 < \delta < 1$, (b) $0 < \delta < 0.02$

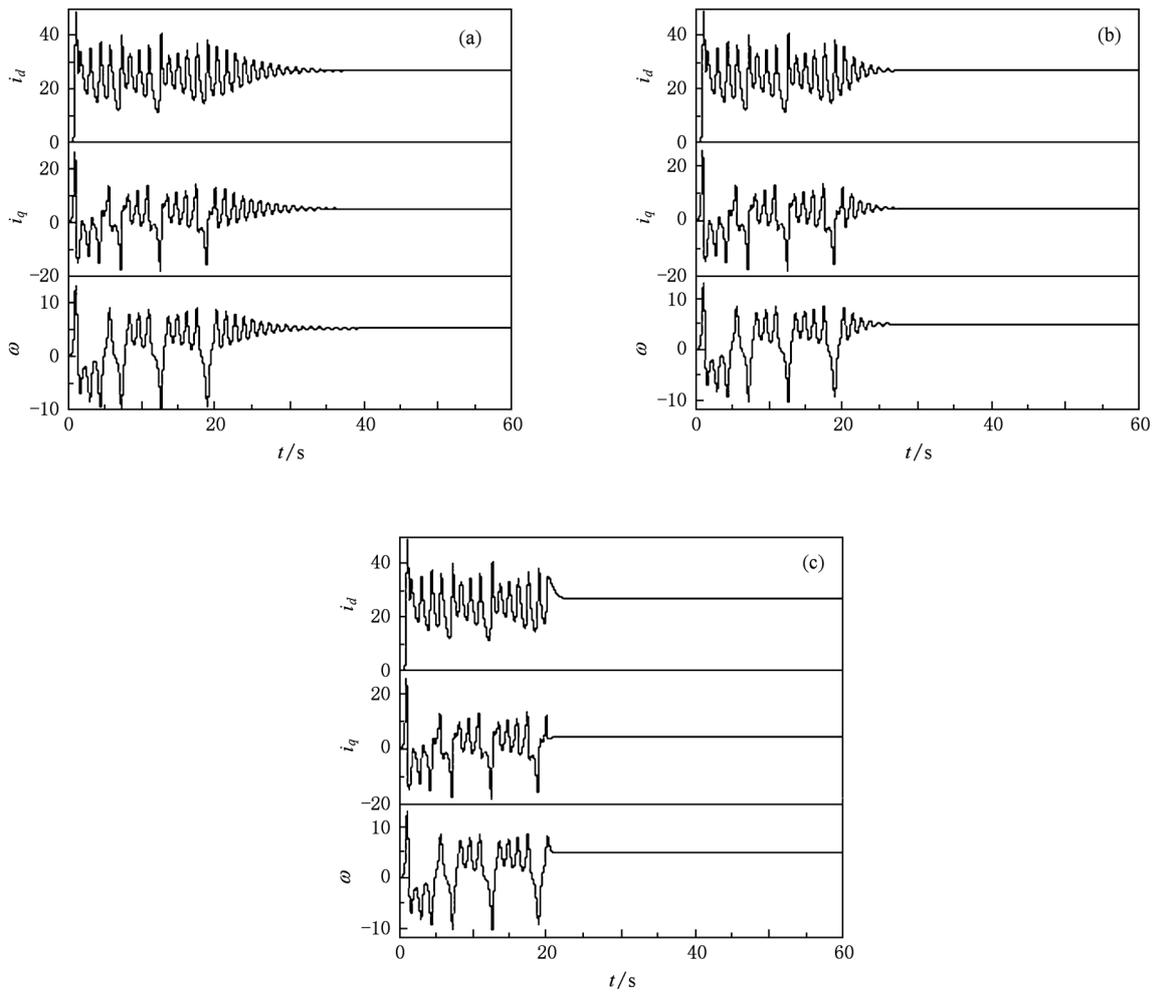


图4 当 δ 取不同值时控制永磁同步电动机到平衡点 S_3 (a) $\delta = 0.009$ 的控制结果, (b) $\delta = 0.07$ 的控制结果, (c) $\delta = 0.8$ 的控制结果

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -i_d + \omega i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - \omega i_d + \gamma\omega + \mu(i_q - i_{q0}), \\ \frac{d\omega}{dt} &= \sigma(i_q - \omega), \\ \frac{d\mu}{dt} &= -\lambda(i_q - i_{q0})^2. \end{aligned} \quad (8)$$

这里用 i_{d0}, i_{q0}, ω_0 表示系统的平衡点. 选取 $\sigma = 3, \gamma = 28, \lambda = 0.1$, 并选取 i_{q0} 的值分别为 $0, -5.19615, 5.19615$, 受控系统(8)的初始状态为 $(i_d, i_q, \omega, \mu) = (0.08, 0.06, 0.02, 0.5)$, 在时间 $t = 20$ s 时对系统施加控制, 控制结果分别如图 2 所示. 其中图 2(a) 是控制到平衡点 $S_1(0, 0, 0)$ 的仿真结果, 图 2(b) 是控制到平衡点 $S_2(27, -5.19615, -5.19615)$ 的仿真结果, 图 2(c) 是控制到平衡点 $S_3(27, 5.19615, 5.19615)$ 的仿真结果. 由图 2 可知, 在施加控制后, 系统被迅速稳定到平衡点.

现在我们采用自适应控制器(6)和(7)式对永磁同步电动机进行混沌控制. 为便于比较, 仍将控制项施加到系统(2)的第二式, 且取 $i_{q0} = 5.19615$, 即将混沌系统(2)控制到第三个平衡点. 此时, 控制

系统为

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -i_d + \omega i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - \omega i_d + \gamma\omega + \delta\mu(i_q - i_{q0}), \\ \frac{d\omega}{dt} &= \sigma(i_q - \omega), \\ \frac{d\mu}{dt} &= -\lambda(i_q - i_{q0})^2. \end{aligned} \quad (9)$$

为了确定 δ 的取值范围, 我们计算 $\sigma = 3, \gamma = 28, \lambda = 0.1$ 时系统(9)的最大 Lyapunov 指数. 如图 3 所示, 当 δ 在 $(0.0085, 0.025), (0.032, 0.038)$ 和 $(0.061, 1)$ 区间内时, 最大 Lyapunov 指数取负, 说明只要不到普通自适应控制方案 1/16 的控制强度, 就可以将系统控制到平衡点. 控制结果如图 4 所示, 其中图 4(a), (b), (c) 分别为 δ 取 $0.009, 0.07, 0.8$ 的仿真结果. 很明显, 当 δ 较小时, 控制能量较小, 此时过渡时间较长; 随着 δ 的增加, 过渡时间逐渐减小, 此时的控制代价较大. 因此, 我们可以根据实际需要来调整控制强度因子 δ 的大小.

永磁同步电动机是一种典型的现场控制系统, 不可避免地会存在外界随机干扰. 为了进一步检验

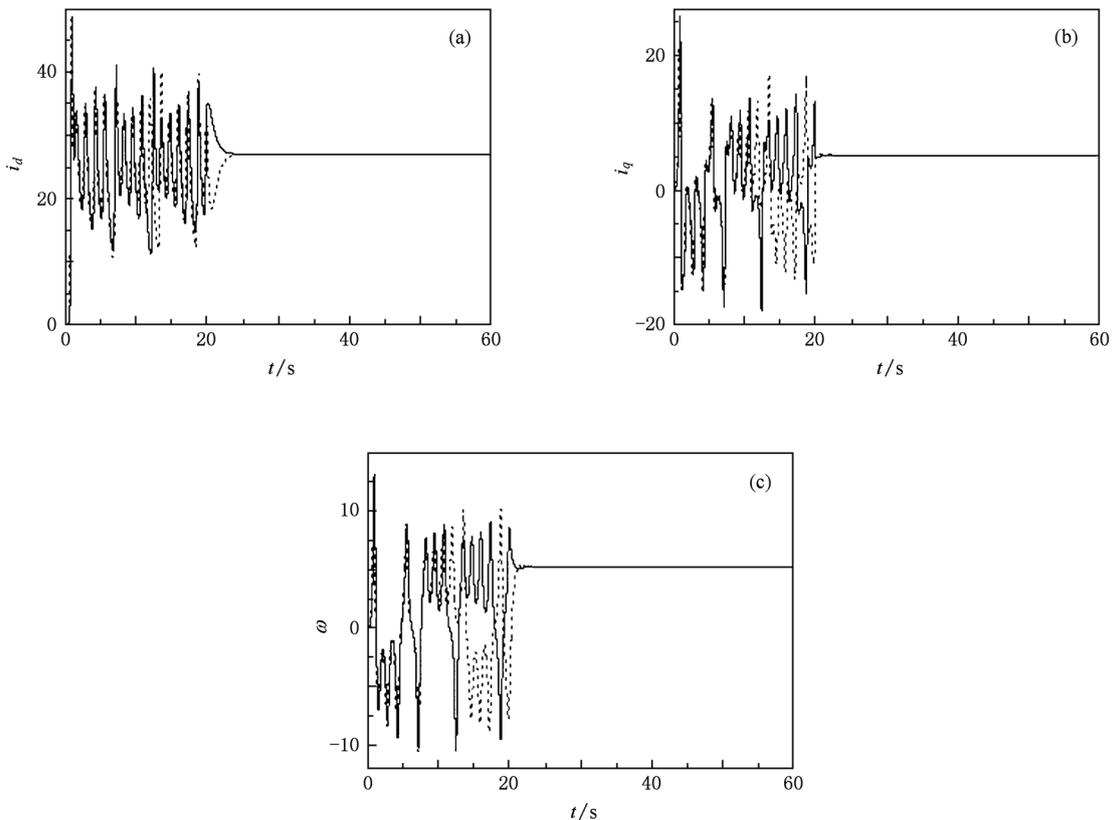


图 5 存在外界干扰时控制永磁同步电动机到平衡点 S_3 (a) 控制 i_d , (b) 控制 i_q , (c) 控制 ω

本文给出的控制方案的效果,我们将控制器施加在系统(2)的第一式(控制项为 $u_1 = \mu(i_d - i_{d0})$),自适应项为 $\dot{\mu} = -\lambda(i_d - i_{d0})^2$),将随机干扰信号 $0.3\cos(20t + \zeta), 0.1\sin(50t + \zeta), 0.2\sin(30t + \zeta)$ 分别施加给系统(2)的第一式、第二式和第三式(ζ 为 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布的随机变量), i_{d0} 取值为5.19615,受控系统参数 $\sigma = 3, \gamma = 28, \lambda = 0.1, \delta = 1$,在时间 $t = 20$ s时加入控制,将永磁同步电动机控制到平衡点 $S_3(27, 5.19615, 5.19615)$.图5所示为控制结果,其中虚线为存在随机干扰时的状态演化过程,实线为不存在随机干扰时的状态演化过程.由图5可知,系统存在外界随机干扰时,自适应控制方案仍能快速控制永磁同步电动机的混沌.由此表明本文设计的控制器对外部随机干扰具有较

强的鲁棒性.

5. 结 论

本文基于LaSalle不变集定理,设计了一种简单实用的自适应控制器,实现了永磁同步电动机中的混沌控制.并且通过在控制项中增加一个控制强度因子,给出了一种改进的自适应控制器.与以往的控制方案相比,该控制器结构具有最简形式,控制代价小,易于工程实现.另外,该控制器可以施加在状态方程的任何一项上,所以控制方案实施起来很灵活.仿真结果表明了该方案的有效性和鲁棒性.

- [1] Ott E, Grebogi C, Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [2] Zhu S P, Qian F C, Liu D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2250 (in Chinese) [朱少平、钱富才、刘 丁 2010 物理学报 **59** 2250]
- [3] Zhou Y, Zang Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7565 (in Chinese) [周 颖、臧 强 2009 物理学报 **58** 7565]
- [4] Yang G L, Li H G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7552 (in Chinese) [杨国良、李惠光 2009 物理学报 **58** 7552]
- [5] Li C L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8134 (in Chinese) [李春来 2009 物理学报 **58** 8134]
- [6] Zhang L P, Jiang H B, Bi Q S 2010 *Chin. Phys. B* **19** 01057
- [7] Chen J H, Chau K T, Chan C C 1999 *Int. J. Electr.* **86** 857
- [8] Ren H P, Liu D, Li J 2003 *Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.* **23** 175 (in Chinese) [任海鹏、刘 丁、李 洁 2003 中国电机工程学报 **23** 175]
- [9] Wei D Q, Luo X S, Fang J Q, Wang B H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 54 (in Chinese) [韦笃取、罗晓曙、方锦清、汪秉宏 2006 物理学报 **55** 54]
- [10] Harb A 2004 *Chaos Solitons Fract.* **19** 1217
- [11] Luo Y X 2006 *Proc. CSU-EPSSA* **18** 23 (in Chinese) [罗佑新 2006 电力系统及其自动化学报 **18** 23]
- [12] Li Z, Zhang B, Mao Z Y 2002 *Contr. Theor. Appl.* **19** 53 (in Chinese) [李 忠、张 波、毛宗源 2002 控制理论与应用 **19** 53]
- [13] Wei D Q, Zhang B, Qiu D Y, Luo X S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6026 (in Chinese) [韦笃取、张 波、丘东元、罗晓曙 2009 物理学报 **58** 6026]
- [14] Zhang B, Li Z, Mao Z Y 2000 *J. South China Univ. Techn.* **28** 125

Adaptive chaotic control of permanent magnet synchronous motor^{*}

Li Chun-Lai^{1)2)†} Yu Si-Min¹⁾

1) (*School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

2) (*College of Physics and Electronics, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China*)

(Received 20 November 2010; revised manuscript received 12 August 2011)

Abstract

Based on the LaSalle's invariant set theorem, an adaptive controller is constructed to acquire the chaotic control for the permanent magnet synchronous motor. And then a extended adaptive controller is developed by introducing a control strength factor. In comparison with the previous schemes, the present control method is simple, flexible, and is applicable in practice because of reduced control cost. Simulation results are presented to show the effectiveness and the robust of the proposed method.

Keywords: adaptive control, LaSalle's invariant set theorem, permanent magnet synchronous motor, chaotic control

PACS: 05. 45. Gg, 05. 45. Ac

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61172023, 60871025) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 8151009001000060, S2011010001018).

[†] E-mail: lichunlai33@tom.com