

# 永磁同步电动机中基于冲洗滤波技术的混沌控制研究

李春来<sup>†</sup>

(湖南理工学院物理与电子信息系, 岳阳 414006)

(2008 年 7 月 14 日收到, 2009 年 4 月 20 日收到修改稿)

针对永磁同步电动机中存在的混沌运动, 给出了一种基于冲洗滤波(washout filter)技术的永磁同步电动机混沌控制方法. 该方法以永磁同步电动机的电流作反馈, 实现了混沌运动的控制. 该控制方法不影响原系统的参数, 只需要调整滤波器的控制参数, 算法简单、易于工程实现. 数值仿真结果表明了该方法的有效性和鲁棒性.

关键词: 冲洗滤波器, 永磁同步电动机, 混沌控制

PACC: 0545

## 1. 引言

研究表明<sup>[1]</sup>, 永磁同步电动机在某些参数或工作条件下会呈现出复杂的混沌行为, 主要表现为转矩和转速的间歇振荡、控制性能的不稳定、系统不规则的电流噪声等, 这在许多工程中是不允许的. 如何控制和消除这种混沌现象成为关注的热点. 新的混沌控制理论和方法不断涌现<sup>[2-6]</sup>, 但能直接应用于永磁同步电动机的混沌控制不仅较少, 而且控制性能也不够完善<sup>[7-9]</sup>. 文献 7 采用基于纳入轨道和强迫迁徙的控制方法, 在永磁同步电动机的速度微分方程中施加一个外加输入, 实现了永磁同步电动机的混沌控制. 但负载转矩不是任意可控的, 而速度微分方程中可以改变的外部变量只有负载转矩, 因此这种方法在工程实际中很难实现. 利用状态延迟反馈控制方法实现永磁同步电动机的混沌控制<sup>[8]</sup>, 但该方法中周期目标轨道与延迟时间的关系难于确定. 文献 9 首先基于微分几何理论将永磁同步电动机的状态微分方程精确线性化, 然后利用反馈技术对永磁同步电动机控制中的混沌现象进行控制, 但这种方法较为复杂, 难于工程实现. 非线性系统控制的可行性和稳定性是最基本的要求. 而像永磁同步电动机这样的实际现场控制系统, 不可避免地会存

在各种干扰. 因此, 寻找一种简单可行和鲁棒的控制方法, 并利用这种方法消除存在于工程实际中的不利混沌现象, 是一项有意义的研究课题.

本文在现有研究成果的基础上, 给出一种基于冲洗滤波(washout filter)技术的混沌控制方法, 即对永磁同步电动机混沌动力系统增加一个电流反馈控制器, 实现其混沌运动的控制. 该控制方法具有如下优点<sup>[10]</sup>: (1) 不动点保持功能, 即在事先不知道系统不动点的情况下, 控制器就可以自动把系统稳定到系统的平衡点. (2) 不动点自动跟踪功能, 即当系统的参数变化而导致系统的不动点发生迁移时, 控制器可以自动跟踪不动点的变化. (3) 易于设计鲁棒控制器. 另外, 该控制方法不影响原系统的参数, 而只需调整滤波器的外部参数就可以实现对系统的混沌控制, 因而具有很大的灵活性, 且物理上易于实现.

## 2. 基于冲洗滤波技术的混沌控制方法

冲洗滤波器是一种高通滤波器, 广泛应用于工程实际中<sup>[11]</sup>. 一维情况下冲洗滤波器的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s}{s+k}, \quad (1)$$

其中,  $k$  为时间常数. 当  $k > 0$  时, 滤波器工作在稳定状态; 当  $k < 0$  时, 滤波器工作在不稳定状态. 设  $x$  为冲洗滤波器的输入变量,  $y$  为输出变量, 并引入状

态变量  $w$  ,这样冲洗滤波器的状态方程和输出方程可表示为

$$\begin{aligned} \dot{w} &= x - kw, \\ y &= x - kw. \end{aligned} \tag{2}$$

考虑如下形式的受控非线性自治系统：

$$\dot{x} = Ax + f(x) + Bu, \tag{3}$$

其中,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$  为系统的状态变量;  $A$  为  $n \times n$  的不含状态变量的系统矩阵;  $B$  为待确定的常数矩阵;  $f(x) = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T, f_i(x)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 为连续函数,且关于  $x$  满足 Lipshitz 条件,即对  $\forall x, y \in R^n, \exists 0 < c < 1$ , 使  $\|f_i(y) - f_i(x)\| \leq c \|y - x\|$  成立;  $u$  为待设计的控制输入.取  $m$  ( $m \leq n$ ) 个状态变量为控制变量,且对所选的每一个变量设计一个冲洗滤波器,具体如下：

$$\begin{aligned} \dot{w} &= x - kw, \\ y &= x - kw, \\ u &= k_g g(y). \end{aligned} \tag{4}$$

其中,  $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T, x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T, y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T, k = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_m), u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T, k_g$  为反馈矩阵,  $g(\cdot) = (g_1(\cdot), g_2(\cdot), \dots, g_m(\cdot))^T$ , 且  $g_i(x) (i = 1, 2, \dots, m)$  为连续可微函数.通过选择合适的控制参数  $k, k_g$  和控制函数  $g(\cdot)$  可使原混沌系统控制到不稳定平衡点.

### 3. 基于冲洗滤波技术的永磁同步电动机的混沌控制

#### 3.1. 永磁同步电动机的混沌现象

经过仿射变换和时间尺度变换后的无量纲均匀气隙永磁同步电动机模型为<sup>[12]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} &= -\tilde{i}_d + \tilde{\omega} \tilde{i}_q + \tilde{u}_d, \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} &= -\tilde{i}_q - \tilde{\omega} \tilde{i}_d + \gamma \tilde{\omega} + \tilde{u}_q, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} &= \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) - \tilde{T}_L, \end{aligned} \tag{5}$$

式中  $\tilde{u}_d, \tilde{u}_q$  和  $\tilde{T}_L$  分别为变换  $d, q$  轴电压和负载扭矩;  $\gamma$  和  $\sigma$  为系统参数.本文研究系统无外部输入的情况,即  $\tilde{u}_d = 0, \tilde{u}_q = 0$  和  $\tilde{T}_L = 0$ .

当  $\sigma = 3, \gamma = 28$ , 初始状态  $(\tilde{i}_d(0), \tilde{i}_q(0), \tilde{\omega}(0)) = (0.001, 0.002, 0.001)$  时,系统呈现混沌状态.

系统混沌吸引子如图 1 和图 2 所示(图中  $x_1 = \tilde{i}_d, x_2 = \tilde{i}_q, x_3 = \tilde{\omega}$ ).这种现象可以解释为电动机在运行一段时间后突然断电,系统在某一特定参数下呈现的动态特性<sup>[13]</sup>.

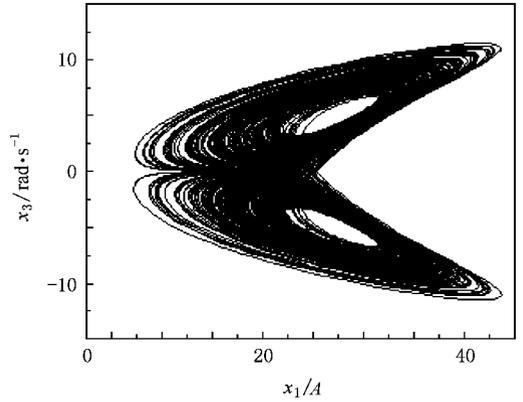


图 1 系统混沌相图( $x_1 - x_3$ )

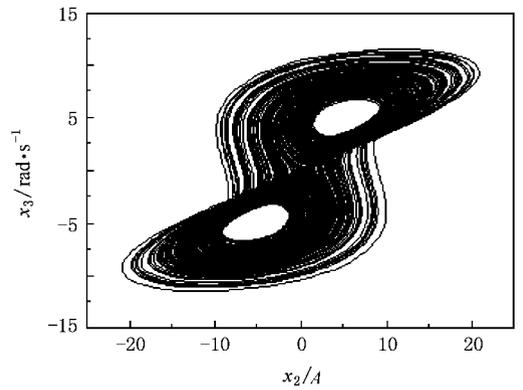


图 2 系统混沌相图( $x_2 - x_3$ )

#### 3.2. 基于冲洗滤波技术的永磁同步电动机的混沌控制分析

下面利用以上介绍的冲洗滤波器对均匀气隙永磁同步电动机进行控制.这里仍研究系统无外部输入的情况,即  $\tilde{u}_d = 0, \tilde{u}_q = 0$  和  $\tilde{T}_L = 0$ .取状态变量  $\tilde{i}_d$  作为冲洗滤波器的输入,且对状态方程(5)中的第一式进行反馈控制.控制过程如下：

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} &= -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q \tilde{\omega} + u, \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} &= -\tilde{i}_q - \tilde{i}_d \tilde{\omega} + \gamma \tilde{\omega}, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} &= \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}), \end{aligned}$$

$$\frac{dw}{dt} = -\tilde{i}_d - kw, \quad (6)$$

$$u = -\tilde{i}_d - kw,$$

(6) 式中  $k$  为控制变量, 控制过程中不改变系统参数, 所以控制过程具有很大的灵活性. 选择适当的  $k$  值, 可以使系统达到平衡点. 经计算, 系统(5)有  $P_1(27, -5.19615, -5.19615)$ ,  $P_2(27, 5.19615, 5.19615)$  两个平衡点. 控制的目标态就是系统的平衡点.

系统(6)在平衡点的 Jacobi 阵为

$$J = \begin{bmatrix} -2 & \omega_0 & i_{\varphi 0} & -k \\ -\omega_0 & -1 & r - i_{\omega 0} & 0 \\ 0 & \sigma & -\sigma & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -k \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $i_{\omega 0}$ ,  $i_{\varphi 0}$ ,  $\omega_0$  表示平衡点坐标.

易验证, 受控后的系统在平衡点  $P_1, P_2$  处的 Jacobi 阵具有相同的特征值, 即  $P_1, P_2$  处局部稳定性相同. 故现仅以  $P_1$  的稳定性进行讨论. 其特征方程为

$$\lambda^4 + (6+k)\lambda^3 + (35+5k)\lambda^2 + (161.9998+31k)\lambda + 161.9998k = 0. \quad (8)$$

由 Routh 判据, 可得系统平衡点  $P_1, P_2$  的稳定条件为  $k > 8.3904$ .

### 3.3. 数值仿真

取  $k = 10$ , 初态  $(\tilde{i}_d(0), \tilde{i}_q(0), \tilde{\omega}(0)) = (0.001, 0.002, 0.001)$ , 在  $t = 200$  s 时对系统施加控制, 控制结果分别如图 3—5 所示(图中  $x_1 = \tilde{i}_d$ ,  $x_2 = \tilde{i}_q$ ,  $x_3 = \tilde{\omega}$ ). 由此可知, 在施加控制后, 系统被迅速稳定到平衡点  $P_1(27, -5.19615, -5.19615)$ .

我们发现在控制过程中, 当  $k$  相同而初值不同时, 可以控制系统到不同的平衡点. 这是因为初值不同施加控制时系统的轨道位置不同, 即若起控时系统的轨道位于  $P_1$  的吸引域时, 则控制结果为平衡点  $P_1$ , 反之为平衡点  $P_2$ . 这也充分体现了混沌系统对初值的敏感性. 例如, 取  $k = 10$ , 初态  $(\tilde{i}_d(0), \tilde{i}_q(0), \tilde{\omega}(0)) = (0.001, -0.002, 0.001)$ , 在  $t = 200$  s 时对系统施加控制, 系统被迅速稳定到平衡点  $P_2(27, 5.19615, 5.19615)$ . 所得结果如图 6 所示, 其中实线表示对状态  $\tilde{i}_d$  的控制结果, 虚线是对状态  $\tilde{i}_q$  的控制结果.

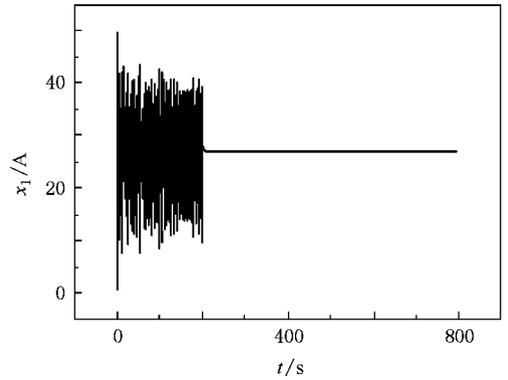


图 3  $\tilde{i}_d$  响应曲线

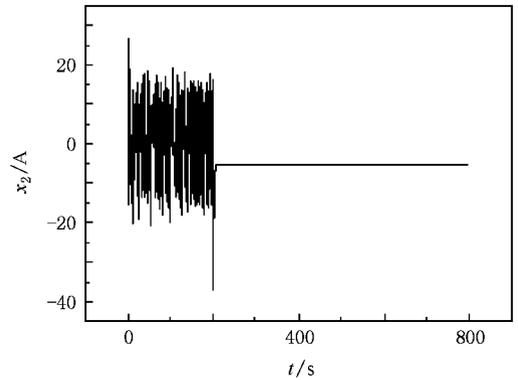


图 4  $\tilde{i}_q$  响应曲线

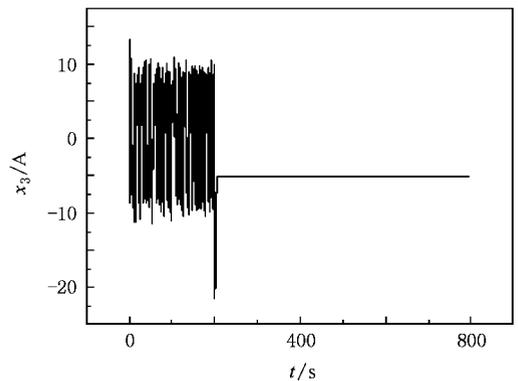


图 5  $\tilde{\omega}$  响应曲线

实际现场控制过程不可避免会存在各种干扰. 为了进一步研究本文给出的控制策略的效果, 我们假设控制器中存在模型误差干扰和测量噪声干扰. 首先考虑系统存在模型参数误差的情况. 取  $\gamma = 27.5$ , 其他参数的取值不变, 这时系统仍处于混沌状态, 但系统平衡点变为  $P_1(26.5, -5.14782,$

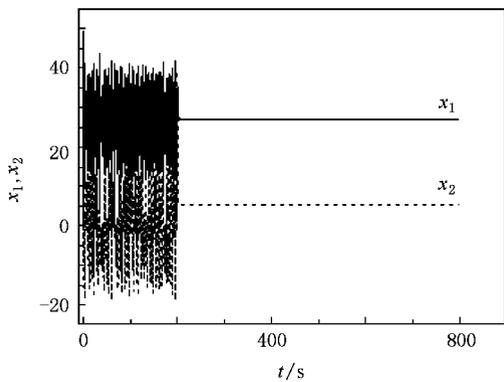


图6 取不同初值时的响应曲线

$-5.14782$ ),  $P_2(26.5, 5.14782, 5.14782)$ . 在第200 s 加入控制, 控制结果如图7所示. 图7(a)为  $\tilde{i}_d$  的响应曲线, 图7(b)为控制后的稳态误差(即  $\tilde{i}_d - \tilde{i}_d(0)$  图中用  $x_1 - x_1(0)$  表示). 由图7可见, 系统仍能很快稳定到新的平衡点. 这表明本文的控制策略可以自动跟踪不动点的变化.

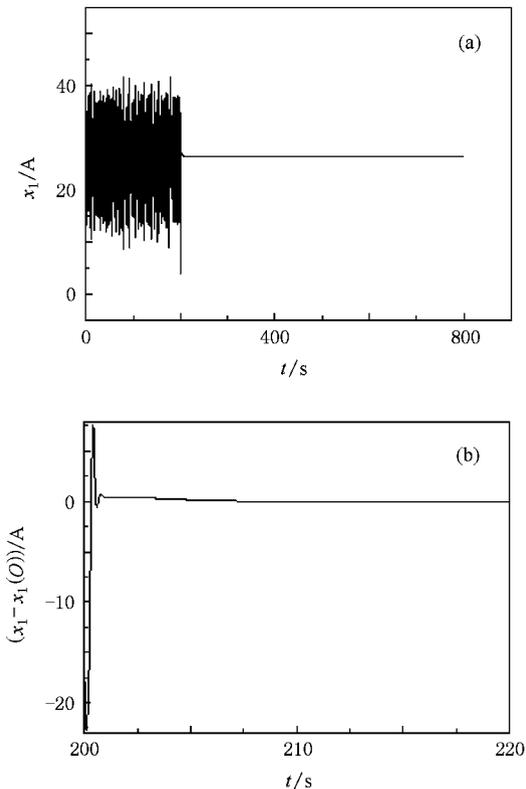


图7 系统存在模型误差干扰的控制结果 (a)  $\tilde{i}_d$  响应曲线, (b) 稳态误差

现在我们将随机干扰信号  $D\sin(\Omega t + \zeta)$  施加给受控系统第二式(其中  $D$  为控制强度, 取  $D = 0.4$ ,

$\Omega$  为正的常数, 取  $\Omega = 1$ ,  $\zeta$  为  $[0, 2\pi]$  之间均匀分布的随机变量). 受控系统模型和参数不变, 在第200 s 加入控制, 控制结果如图8所示. 图8(a)为  $\tilde{i}_d$  的响应曲线, 图8(b)为控制后的稳态误差, 其中虚线为存在噪声干扰的稳态误差, 实线为不存在噪声干扰的稳态误差. 由图8可见, 系统存在噪声干扰时, 控制策略仍能保持混沌系统控制到平衡点, 只是控制精度稍有降低, 调整时间稍有增加. 这表明本文给出的控制器对外部噪声干扰具有较强的鲁棒性.

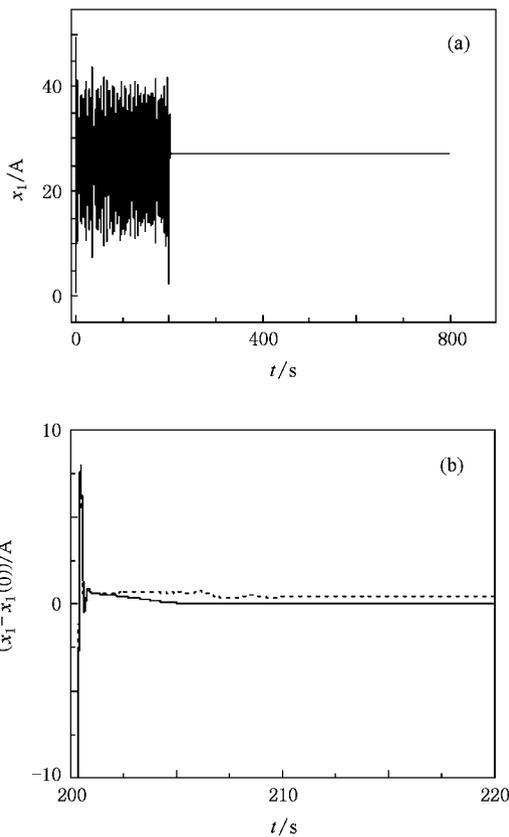


图8 系统存在噪声干扰的控制结果 (a)  $\tilde{i}_d$  响应曲线, (b) 稳态误差

### 4. 结 论

广泛应用的永磁同步电动机在一定参数条件下呈现出混沌状态, 影响了其稳定工作. 本文利用冲洗滤波技术对永磁同步电动机的混沌状态进行控制, 只需调节控制参数  $k$  便可将永磁同步电动机的混沌状态控制到期望的平衡点. 由于控制过程是通过调节外部参数实现的, 故具有较大的灵活性, 且物理上易于实现. 仿真结果表明了该方法的有效性和鲁棒性.

- [ 1 ] Chen J H , Chau K T , Chan C C 1999 *Int. J. Electr.* **86** 857
- [ 2 ] Braiman Y 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 545
- [ 3 ] Lima R , Pettini M 1992 *Phys. Rev. A* **41** 726
- [ 4 ] Liu Y , Barbosa L C , Rios L J R 1994 *Phys. Lett. A* **185** 35
- [ 5 ] Tian Y C , Gao F R 1998 *Physica D* **117** 1
- [ 6 ] Luo X S , Fang J Q , Kong L J , Weng J Q 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 14 ( in Chinese ) [ 罗晓曙、方锦清、孔令江、翁甲强 2000 物理学报 **49** 14 ]
- [ 7 ] 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 ]
- [ 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 ] Wang J M , Xu Z L 2005 *Inform. Contr.* **34** 270 ( in Chinese ) [ 汪剑鸣、许镇琳 2005 信息与控制 **34** 270 ]
- [ 11 ] Zhang H , Ma X K 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2415 ( in Chinese ) [ 张浩、马西奎 2003 物理学报 **52** 2415 ]
- [ 12 ] Zhang B , Li Z , Mao Z Y , Pong M H 2000 *J. South China Univ. Technol.* **28** 125
- [ 13 ] 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 ]

## Chaotic control of permanent magnet synchronous motor based on washout filter technique

Li Chun-Lai<sup>†</sup>

( Department of Physics and Electronics Information , Hunan Institute of Science and Technology , Yueyang 414006 , China )

( Received 14 July 2008 ; revised manuscript received 20 April 2009 )

### Abstract

A chaos control method is presented in the paper for the permanent magnet synchronous motor ( PMSM ) , which uses the current of the PMSM as its feedback based on washout filter technique. Only the parameter of the filter is needed and no parameter of the original system will be affected by using the controller. Simulation result presents the simplicity , effectiveness and robustness of the method.

**Keywords** : washout filter , permanent magnet synchronous motor , chaotic control

**PACC** : 0545