

## 永磁同步电动机中混沌运动的部分解耦控制

李 洁, 任海鹏

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 永磁同步电动机在参数处于特定区域时存在混沌现象, 混沌的存在将使电机的性能变差, 因此要设法消除其混沌运动. 电机中混沌的现有控制方法的控制目标只能为周期点或平衡点, 不能满足实际需要. 为了解决这个问题, 设计了基于非线性反馈的永磁同步电动机中混沌运动的部分解耦控制. 该方法以直轴和交轴电压为控制变量, 通过电机状态的非线性反馈将直轴和交轴电流方程中的耦合项解耦, 同时使得直轴和交轴电流可以跟踪设定值. 这种控制方式的结果是使系统具有唯一稳定平衡点, 而这个平衡点的位置可以根据实际要求设置为任意点. 在任意时刻对处于混沌状态的永磁同步电动机进行部分解耦控制, 受控系统将稳定于设定平衡点, 从而实现混沌的控制. 文中分析了控制参数与系统响应快速性之间的关系, 为参数选择提供了指导. 仿真结果表明了理论分析的正确性和该控制方法的有效性.

**关键词:** 永磁同步电动机; 混沌; 部分解耦控制

**中图分类号:** TM219, TM17      **文献标识码:** A

## Partial decoupling control of chaos in permanent magnet synchronous motor

LI Jie, REN Hai-peng

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** Permanent magnet synchronous motor (PMSM) demonstrates chaotic phenomena when its parameters are in a certain range of values. Chaos degrades the performance of the motor drive systems; therefore it should be eliminated. The existing methods for chaos control in motor drive systems, whose control objective is limited to periodic orbits or equilibrium points, can not meet the practical requirement. To solve the problem, the partial decoupling control method based on nonlinear feedback is suggested to control the chaos in PMSM. The direct-axis and quadrature-axis stator voltages are used as the manipulated variables, by which the coupling terms in the direct-axis and quadrature-axis stator current equations are decoupled through the nonlinear feedback of the motor's states. As a direct result of the control force, the controlled system has a unique stable equilibrium point, which can be set to any value according to the practical requirement. At any time, once the partial decoupling control is used for the chaotic PMSM, the chaotic motion in PMSM will be stabilized at a predetermined equilibrium point. In this way, the chaos is eliminated in PMSM. The relationship between controlled system responses and control parameters is investigated, which gives guidance for parameter selection. The simulation results show that the theoretical analysis is correct and the method is effective.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); chaos; partial decoupling control

### 1 引言 (Introduction)

人们对混沌现象的研究已经有 40 年的历史, 对混沌现象的研究重点也从传统的分析和理解混沌向目前控制和利用混沌转变. 在电力电子学领域, 1989 年 Kuroe 和 Hayashi 在第 20 届 IEEE 电力电子专家会议上介绍了电动机运动中的混沌现象<sup>[1]</sup>, 指出当电机参数处于某些区域时, 电机将产生混沌运动, 表现为转矩忽大忽小, 转速忽高忽低, 这种情况在许多实际应用中是不允许的. 因此, 如何控制和消

除这种混沌现象成为人们关注的课题. 由于电动机是一个非线性、强耦合的对象, 考虑混沌运动的动态分析和实验研究都比较困难, 目前, 大多数研究处于理论分析和仿真研究阶段<sup>[2~5]</sup>. 在电机混沌现象的研究中, 张波等得到了一个适合分析永磁同步电动机混沌运动的模型<sup>[5]</sup>. 李忠等进一步分析了该模型的混沌和分岔现象<sup>[6]</sup>, 讨论了分岔条件.

对于混沌现象的控制, 理论研究中已经有大量方法<sup>[7]</sup>, 但其中很多方法并不一定能够直接运用于

工程实际中的混沌系统.例如 OGY<sup>[8]</sup>方法,其理论是严密和完备的,但通常很难在实际系统中找到一个可调参数来控制混沌运动,即使找到了一个可调参数也不一定能够达到控制目标.因此,对于一个工程实际中存在的不利的混沌现象寻找合理可行的方法进行控制是一项有意义的研究课题.李忠等人采用纳入轨道和强迫迁徙方法<sup>[9]</sup>控制了永磁同步电机中混沌现象,该方法要求在电机动态方程的速度微分方程中施加一个外加输入.然而,在速度微分方程中可以改变的外部变量只有负载转矩,而一般来讲,负载转矩不是任意可控的,因此这种方法在实际中很难实现.另外,就该控制方法而言,控制目标不允许是给定系统自身的任何一个轨道或状态;控制必须在收敛域中才能施加,控制速度较慢.针对该方法存在的不足,文献[10]提出采用延迟反馈控制永磁同步电动机中的混沌现象,该方法以电机的直轴电压或交轴电压为控制变量,解决了纳入轨道和强迫迁徙方法,在实际系统中难以实现的问题.但延迟反馈控制的延迟时间不易确定,而且控制目标必须为系统的不动点或周期轨道,而不动点或周期轨道不一定是实际工况所要求的控制目标.通常,当电机驱动系统因为某种原因进入混沌状态,人们希望消除混沌并使电机的转速稳定到一个符合工况的数值上,而上述方法不能满足这样的要求.为了解决这一问题,本文提出利用非线性反馈对永磁同步电动机中的混沌现象进行部分解耦控制,该方法仍然以直轴电压和交轴电压为控制变量,因而控制物理上可实现.非线性反馈规律使被控目标点成为受控系统的唯一平衡点,并使该平衡点渐进稳定,施加控制后,系统状态将渐进于该平衡点,从而实现控制的目的.该方法可以任意时刻施加控制,可以控制电机转速为任意恒定值.

## 2 永磁同步电动机中混沌运动的部分解耦控制 (Partial decoupling control of chaos in PMSM)

经过变换的永磁同步电动机模型<sup>[6]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -\tilde{i}_d + \tilde{\omega}\tilde{i}_q + \tilde{u}_d, \\ \frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -\tilde{i}_q - \tilde{\omega}\tilde{i}_d + \gamma\tilde{\omega} + \tilde{u}_q, \\ \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) - \tilde{T}_L. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q, \tilde{\omega}$  分别为经过变换的直轴电流、交轴电流和电机角速度;  $\tilde{u}_d, \tilde{u}_q$  和  $\tilde{T}_L$  分别为经过变换的  $d, q$  轴电压和负载转矩;  $\sigma$  和  $\gamma$  为系统参数.

取  $\tilde{u}_d = 0, \tilde{u}_q = 0, \tilde{T}_L = 0, \sigma = 5.46, \gamma = 20, (\tilde{i}_d(0), \tilde{i}_q(0), \tilde{\omega}(0)) = (20, 0.01, -5)$ , 系统呈现混沌状态.混沌吸引子如图1所示(其中  $\tilde{\omega}, \tilde{i}_d, \tilde{i}_q$  以标么值表示,无量纲,以下图形中也如此).

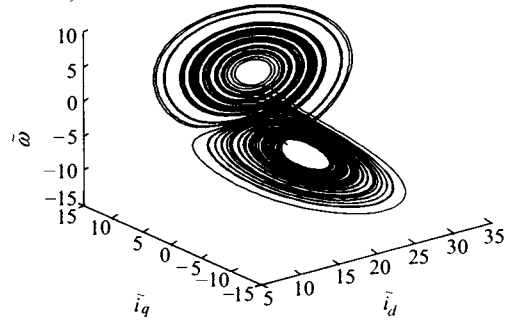


图1 永磁同步电动机中的混沌吸引子

Fig. 1 Strange attractor in PMSM

针对上述系统参数处于混沌区时呈现的混沌运动,本文采用部分解耦方法进行控制.

以  $\tilde{u}_d$  和  $\tilde{u}_q$  为控制变量,设计非线性反馈控制规律如下:

$$\begin{cases} \tilde{u}_d = \tilde{i}_d - \tilde{\omega}\tilde{i}_q - K_d(\tilde{i}_d - \tilde{i}_d^*) + \frac{d\tilde{i}_d^*}{dt}, \\ \tilde{u}_q = \tilde{i}_q + \tilde{\omega}\tilde{i}_d - \gamma\tilde{\omega} - K_q(\tilde{i}_q - \tilde{i}_q^*) + \frac{d\tilde{i}_q^*}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

将该控制规律施加于系统(1),则有

$$\frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -K_d(\tilde{i}_d - \tilde{i}_d^*) + \frac{d\tilde{i}_d^*}{dt}, \quad (3a)$$

$$\frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -K_q(\tilde{i}_q - \tilde{i}_q^*) + \frac{d\tilde{i}_q^*}{dt}, \quad (3b)$$

$$\frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) - T_L. \quad (3c)$$

由式(3)可见,式(2)的反馈控制规律实现了直轴和交轴电流的部分解耦控制.

定义  $e_d = \tilde{i}_d - \tilde{i}_d^*, e_q = \tilde{i}_q - \tilde{i}_q^*$ , 由式(3a), (3b)可得

$$\frac{de_d}{dt} = -K_d e_d, \quad (4a)$$

$$\frac{de_q}{dt} = -K_q e_q. \quad (4b)$$

可见,只要满足不等式

$$K_d > 0, \quad (5a)$$

$$K_q > 0, \quad (5b)$$

直轴电流和交轴电流将渐进稳定于各自的控制目标  $\tilde{i}_d^*$  和  $\tilde{i}_q^*$ . 上述部分解耦控制方法实现了直轴和交轴的电流解耦控制,相当于实现了 PMSM 的恒转矩控制.

设直轴和交轴电流的控制目标为恒值,则有

$$\frac{d\tilde{i}_d^*}{dt} = 0, \frac{d\tilde{i}_q^*}{dt} = 0, \text{再由式(3)可得}$$

$$\frac{d\tilde{i}_d}{dt} = -K_d(\tilde{i}_d - \tilde{i}_d^*), \quad (6a)$$

$$\frac{d\tilde{i}_q}{dt} = -K_q(\tilde{i}_q - \tilde{i}_q^*), \quad (6b)$$

$$\frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \sigma(\tilde{i}_q - \tilde{\omega}) - T_L. \quad (6c)$$

由式(6)可知,在施加控制后系统的平衡点为  $(\tilde{i}_d^*, \tilde{i}_q^*, \tilde{\omega}^*)$ , 而  $\tilde{\omega}^* = (\tilde{i}_q^* - T_L/\sigma)$ , 该平衡点为系统的唯一平衡点,而且易知该平衡点为全局稳定平衡点.在施加了控制之后系统的状态将稳定在该平衡点.

永磁同步电动机驱动系统中,控制目标一般是使转速  $\tilde{\omega}^*$  为恒定值,而  $\tilde{\omega}^*$  与  $\tilde{i}_q^*$  有关,因此,在设计目标时可以根据要求的转速值,求出对应的  $\tilde{i}_q^*$ , 而直轴电流的设定目标值  $\tilde{i}_d^*$  对于控制目标来说并不重要,可以根据实际系统任意设定.在计算过程中负载转矩可以进行估算,如果负载转矩估算不准确,稳态输出的转速值会有偏差,但混沌运动仍然可以被控制.

控制器中的参数  $K_d$  和  $K_q$  要求满足式(5)限制条件,同时这两个值控制着直轴电流和交轴电流趋向于目标值的速度,这两个值大,响应速度就快.

观察控制器(2)可见,控制变量是可以操作的外部变量直轴电压  $\tilde{u}_d$  和交轴电压  $\tilde{u}_q$ , 控制器中采用了状态反馈,其中状态  $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$  和  $\tilde{\omega}$  都可以通过测量和变换得到,因此该控制器是物理上可以实现的.

下面通过仿真研究上述控制方法的控制效果.

### 3 仿真研究 (Simulations)

系统参数取值为  $\sigma = 5.46, \gamma = 20, \tilde{T}_L = 0$ . 初始条件  $(\tilde{i}_d(0), \tilde{i}_q(0), \tilde{\omega}(0)) = (20, 0.01, -5)$ , 此时如果不控制,系统呈现的混沌吸引子如图 1 所示. 采用控制器(2) 进行控制,参数如下:  $K_d = K_q = 4.2$ ,  $\tilde{\omega}^* = 5$ , 则  $\tilde{i}_q^* = \tilde{\omega}^* + \frac{T_L}{\sigma} = 5$ , 取  $\tilde{i}_d^* = 3$ , 在  $t = 30\text{s}$  时,系统状态变化和施加控制后的输出误差变化曲线如图 2 所示.

由图 2 可见加入控制后系统很快达到稳定平衡点,转速输出达到设定值.图 2 对应的控制量的变化在图 3 中给出.

系统参数  $\sigma = 5.46, \gamma = 20, \tilde{u}_d = -0.2771, \tilde{T}_L = 1.2, \tilde{u}_q = 0$ , 初始状态为  $(\tilde{i}_d(0), \tilde{i}_q(0), \tilde{\omega}(0)) = (18, -8, -8)$ . 此时,系统仍处于混沌状态,其混沌吸引子如图 4 所示.

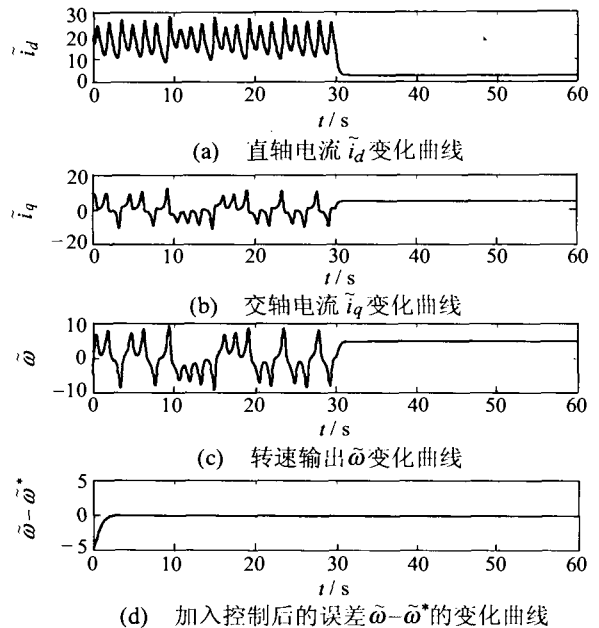


图 2 在  $t = 30\text{s}$  时施加控制,系统状态的变化及施加控制后的转速误差曲线  
 Fig. 2 System state curves and speed error curve after the control force is put into effect at  $t = 30\text{s}$

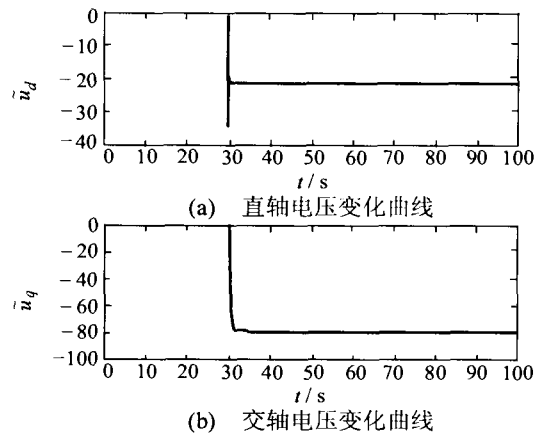


图 3 图 2 对应的控制变量变化图  
 Fig. 3 Curves of manipulated variables corresponding to Fig. 2

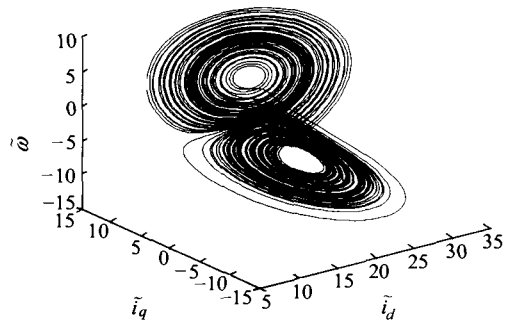


图 4 参数不同时永磁同步电动机中的混沌吸引子  
 Fig. 4 Attractor in PMSM with different parameters  
 在系统参数及初始条件取上述值时,控制器中

的参数  $K_d = K_q = 4.2$ , 控制目标  $\bar{\omega}^* = -3$ , 则  $\bar{i}_q^* = -2.787234$ , 取  $\bar{i}_d^* = -1$ , 仍然在第30s时施加控制, 控制的结果如图5所示. 由图5可见, 在不同参数、不同初始条件和不同控制目标时, 可以对混沌进行有效控制.

为了研究控制器参数对响应速度的影响, 在系统参数与图5中系统参数相同, 初始条件为  $(\bar{i}_d(0), \bar{i}_q(0), \bar{\omega}(0)) = (20, 10, 0)$ , 控制目标为  $(\bar{i}_d^*, \bar{i}_q^*, \bar{\omega}^*) = (20, 0.2128, 0)$ , 仍然在  $t = 30\text{s}$  时对系统进行控制, 控制参数分别为  $K_d = K_q = 14.2$ ,  $K_d = K_q = 4.2$  和  $K_d = K_q = 1.2$  三种情况下进行了仿真, 三种情况下误差的变化曲线如图6所示, 由图6可见控制参数  $K_d$  和  $K_q$  越大响应速度越快. 参数  $K_d$  和  $K_q$  的其他不同取值情况下的大量仿真结果也表明了这一点.

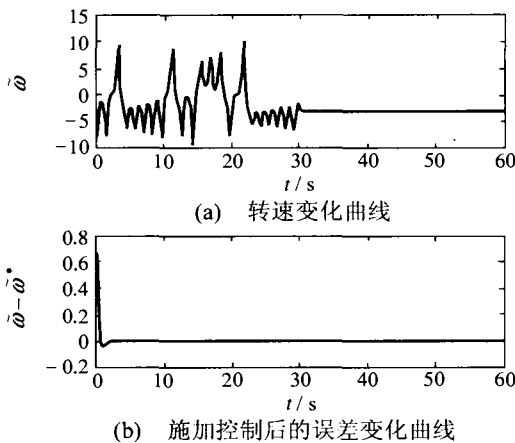


图5  $\bar{T}_L = 1.2, \bar{\omega}^* = -3$  时, 控制的输出和加入控制后的误差曲线

Fig. 5 Output and error curve after the controller is put into effect with  $\bar{T}_L = 1.2, \bar{\omega}^* = -3$

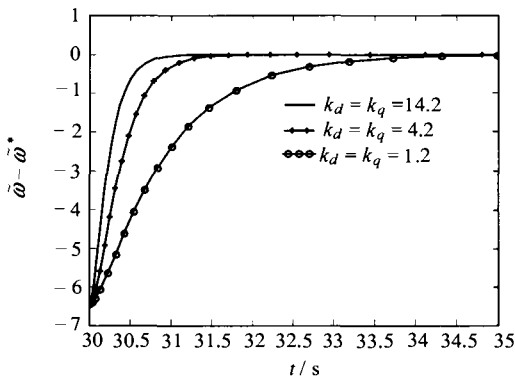


图6 控制参数取不同值时误差变化曲线

Fig. 6 Error curve with different control parameters

#### 4 结论(Conclusion)

永磁同步电动机是一个实际的物理系统, 对其在参数在特定区域表现出的混沌运动进行控制, 必

须考虑控制的可行性和控制的要求能否达到. 本文提出部分解耦控制方法控制永磁同步电动机中的混沌现象, 控制方法可行, 控制目标可以为任意值, 符合一般工程实际的要求.

#### 参考文献(References):

- [1] KUROE Y, HAYASHI S. Analysis of bifurcation in power electronic induction motor drive system [C]// *IEEE Power Electronics Specialists Conference Rec.* Milwaukee, WI, USA: [s. n.], 1989: 923-930.
- [2] HEMAIL N. Strange attractors in brushless DC motor [J]. *IEEE Trans on Circuits and System- I: Fundamental Theory and Application*, 1994, 41(1): 40-45.
- [3] SUTO Z, NAGY I, MASADA E. Avoiding chaotic processes in current control of AC drive [C]// *IEEE Power Electronics Specialists Conference Rec.* Fukuoka, Japan: [s. n.], 1998: 255-261.
- [4] 曹志彤, 郑中胜. 电机运动系统的混沌特性[J]. *中国电机工程学报*, 1998, 18(5): 318-322.  
(CAO Zhitong, ZHENG Zongsheng. The chaos of nonlinear moving system for the synchronous motor [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 1998, 18(5): 318-322.)
- [5] 张波, 李忠, 毛宗源, 等. 电机传动系统的混沌和混沌现象初探[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(7): 40-45.  
(ZHANG Bo, LI Zhong, MAO Zongyuan, et al. Primary study on an erratic behavior and chaotic phenomena of electric machine drive systems [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2001, 21(7): 40-45.)
- [6] LI Zhong, PARK Jin Bae, JOO Young Hoon, et al. Bifurcation and chaos in a permanent-magnet synchronous motor [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems - I*, 2002, 49(3): 383-387.
- [7] 任海鹏, 刘丁. 六辊 UC 轧机轧制过程中混沌的轨迹跟踪控制[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(6): 897-900.  
(REN Haipeng, LIU Ding. Tracking control of chaos in the rolling process of a 6-high UC mill [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(6): 897-900.)
- [8] OTT E, GREBOGI C, YORKE J A. Controlling chaos [J]. *Physics Review Letter*, 1990, 64(11): 1196-1199.
- [9] 李忠, 张波, 毛宗源. 永磁同步电动机系统的纳轨道和强迫迁徙控制[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(1): 53-56.  
(ZHANG Bo, LI Zhong, MAO Zongyuan. Entrainment and migration control of permanent-magnet synchronous motor system [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 53-56.)
- [10] 任海鹏, 刘丁, 李洁. 永磁同步电动机中混沌运动的延迟反馈控制[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(6): 175-178.  
(REN Haipeng, LIU Ding, LI Jie. Delay feedback control of chaos in permanent magnet synchronous motor [J]. *Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2003, 23(6): 175-178.)

#### 作者简介:

李洁 (1976—), 女, 西安理工大学博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动;

任海鹏 (1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为控制理论与应用、混沌工程, E-mail: renhaipeng@xaut.edu.cn.