

文章编号: 1000-8152(2002)01-0053-04

永磁同步电动机系统的纳入轨道和强迫迁徙控制*

李 忠¹ 张 波² 毛宗源¹

(1. 华南理工大学自动控制工程系·广州, 510640; 2. 华南理工大学电力学院·广州, 510640)

摘要: 研究了永磁同步电动机的纳入轨道和强迫迁徙控制. 可以看到, 当系统轨道处于收敛域时, 利用纳入轨道和强迫迁徙控制可使系统轨道实现从稳态到混沌状态、从稳定不动点到稳定不动点或从混沌吸引子到稳定不动点的任意转移.

关键词: 永磁同步电动机; 混沌; 纳入轨道; 强迫迁徙

文献标识码: A

Entrainment and Migration Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor System

LI Zhong¹, ZHANG Bo² and MAO Zongyuan¹

(1. Department of Automatic Control Engineering, South China University of Technology · Guangzhou, 510640, P. R. China;

2. Electric Power College, South China University of Technology · Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: The entrainment and migration control of the PMSM is studied. It is shown that when the system orbits lie in the convergent basin, the entrainment and migration control can be achieved to make the system orbits from a stable state to chaos, from a stable fixed point to another one and from a strange attractor to a stable fixed point.

Key words: permanent-magnet synchronous motor (PMSM); chaos; entrainment; migration

1 引言 (Introduction)

在前面的研究中, 利用基于 Hopf 分支的参数调节法、Poincare 映射及特征指数等研究了 PMSM 产生混沌行为的机理^[1,2], 还利用 OGY 方法将 PMSM 的混沌运动控制到其不稳定的周期轨道上. 在本文中, 我们将利用纳入轨道和强迫迁徙法控制 PMSM 的混沌运动.

Jackson 在文[4]中描述的这个方法是假定在多吸引子系统的相空间中存在着一个收敛域, 在每一个收敛域中, 所有邻近的轨道局部地相互收敛. 这些吸引子中尽管有许多具有正的 Lyapunov 指数, 但是在它们的吸引域中有一个区域, 在其中的轨道一般会收敛, 这意味着 Lyapunov 指数仅仅是它们的动力学的一个平均测度. 基于此, Jackson 猜想每一个多吸引子系统在其吸引域中至少有一个收敛域.

这个控制方法的特点是将系统的一个吸引子先“纳入”再“迁徙”到另一个吸引子. 纳入意味着 $\lim_{t \rightarrow \infty} |x(t) - g(t)| = 0$, 这里 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的受控对象, 目标动力学 $g(t) \in G_k$ 具有任意的拓扑

形式, G_k 包含在某一收敛域 C_k 中, 即 $G_k \subset C_k$. 当系统进入纳入域 BE_k (a basin of entrainment) 之后这个控制才开始, $BE_k \supset G_k$. 除了初始状态的信息外 (即 $x_0 \in BE_k$), 不需要进一步的系统的反馈信息 (在下面的(2)式中, $\dot{g} = F(g)$ 不依赖于 x). 特别地, 这不是一个反馈控制, 这点对于在复杂系统中的实现非常重要. 控制的可靠性要求区域 BE_k 要是相空间中的凸集. 此外要引入迁徙目标, 它要求两个收敛域相交, 即 $G \cap C_i \neq \emptyset, G \cap C_j \neq \emptyset (i \neq j)$, 它将系统的动力学从一个吸引子转移到另一个吸引子, 或从一个收敛域到另一个收敛域.

2 纳入轨道控制原理 (Principle of entrainment control)

考虑一阶常微分方程:

$$\dot{x} = F(x), \quad x \in \mathbb{R}^n. \quad (1)$$

受控动力学形式为

$$\dot{x} = F(x) + [\dot{g} - F(g)]S(t), \quad g \in \mathbb{R}^n. \quad (2)$$

这里 $\{g(t)\}$ 是某些希望的目标动力学, $S(t)$ 是控制开关 ($S(t) = 0, t < 0, 0 \leq S(t) \leq 1, t \geq 0$). 可

* 基金项目: 国家自然科学基金(50177009), 广东省自然科学基金(011652)资助项目.

收稿日期: 2000-05-19; 收修改稿日期: 2000-10-13.

以看到控制 $u = [g - F(g)]S(t)$ 具有开环的特征, 控制项是直接加到原来的系统中。

要求在相空间中存在收敛域 C_k (convergent region), 使得在其中的邻近轨道相互收敛. 这些收敛域的存在使得系统可以利用本身的动力学特征使系统进入期望的目标动力学 $g(t) \in \mathbb{R}^n$ 的一个极限集. 如果有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |x(t) - g(t)| = 0$, 我们就说系统纳入了目标动力学 $g(t)$. 目标动力学可以选为具有任意的拓扑特征(如不动点、周期性、结点(knot)、或混沌), 但是它严格要求在某一目标区域 G_k 内, 它要与某个收敛域相交, 即 $g(t) \in G_k, G_k \cap C_k \neq \emptyset$. C_k 是由系统决定的。

为简单起见, 我们要求 $G \subset C, g(t) \in G_k \subset C_k$, 要使系统纳入目标轨道, 相邻的初始状态集为

$$BE_k = \{x(0) \mid \lim_{t \rightarrow \infty} |x(t) - g(t)| = 0\}.$$

这称为目标轨道的纳入域(the basin of entrainment), 因而有 $G_k \subset BE_k$.

系统由于其收敛特性而导致纳入, 这意味着, 一旦控制启动, 就不需要再了解系统的动态特征, 也不需要反馈信息来限制控制. 这一点非常重要, 因为具有混沌动力学的系统对小的误差非常敏感, 这使得我们在整个相空间利用传统的反馈方法来进行控制变得非常困难甚至不可能. 但是, 可以通过限制目标区域, 利用系统自身的收敛特性, 而不需要反馈信息。

要使系统的轨道纳入给定的目标轨道 $g(t)$, 这个目标轨道必须在收敛域 C 的一个特殊子集 \bar{C} 内, 它可由下式定义

$$\bar{C} = \{x \mid x \in \mathbb{R}^n; \left\| \frac{\partial F_i}{\partial x_j} - \delta_{ij} \lambda(x) \right\| = 0, \forall \operatorname{Re}(\lambda(x)) < 0\}. \quad (3)$$

$\lambda(x)$ 表示对应线性化矩阵的特征值. 由(3)式的行列式可得特征多项式方程

$$\sum_{k=0}^n a_k \lambda^{n-k} = 0 \quad (a_0 = 1). \quad (4)$$

使(4)式的所有的特征根具有负实部的充分必要条件为

$$a_{2k} > 0, \Delta_{2k+1} > 0 \quad (k = 0, 1, \dots),$$

或 $a_{2k+1} > 0, \Delta_{2k} > 0 \quad (k = 0, 1, \dots)$. (5)

这里 $\Delta_i(a_1, \dots, a_i)$ 是所谓的 i 阶 Hurwitz 行列式。

需要注意的是, 自治系统的任意一个特解不能作为控制的目标 g_k , 否则有 $g_{k+1} - F(g_k) \equiv 0$, 因而不存在控制. 特别地, 如果系统有不动点或极限环, 它们也不能用作纳入目标 $g(t)$. 要获得控制目标,

仅需要在其吸引域(basin of attraction)中选取一个目标, 当系统进入这个域中之后就终止控制。

3 永磁同步电动机混沌动力系统的纳入轨道控制 (Entrainment control of chaotic system of permanent-magnet synchronous motor)

考虑永磁同步电动机的混沌模型^[1]

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_d}{dt} = -\bar{i}_d + \bar{\omega}\bar{i}_q + \bar{u}_d, \\ \frac{d\bar{i}_q}{dt} = -\bar{i}_q - \bar{\omega}\bar{i}_d + \gamma\bar{\omega} + \bar{u}_q, \\ \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \sigma(\bar{i}_q - \bar{\omega}) - \bar{T}_L. \end{cases} \quad (6)$$

\bar{u}_d, \bar{u}_q 和 \bar{T}_L 分别为 d, q 轴电压和外部输入转矩, γ 和 σ 为参数. 这里设 $\bar{u}_d = \bar{u}_q = \bar{T}_L = 0$. 其线性化矩阵的特征多项式为(记 $(x, y, z) = (\bar{i}_d, \bar{i}_q, \bar{\omega})$):

$$\lambda^3 + (\sigma + 2)\lambda^2 + (2\sigma + 1 + z^2 - \sigma\gamma + \sigma x)\lambda + \sigma(yz + z^2 + x + 1 - \gamma) = 0. \quad (7)$$

这里

$$\begin{cases} a_1 = \sigma + 2, \\ a_2 = \sigma(2 - \gamma + x) + 1 + z^2, \\ a_3 = \sigma(yz + z^2 + x + 1 - \gamma). \end{cases} \quad (8)$$

(6)式的收敛域要求满足 $\operatorname{Re}\lambda(x, y, z) < 0$, 要使其成立的充分必要条件由(5)式决定(即 $a_1 > 0, a_1 a_2 - a_3 > 0$ 和 $a_3 > 0$), 这隐含着 $a_2 > 0$. 收缩条件 $a_1 > 0$ 是不依赖于 (x, y, z) 的, 对于通常的值 $\sigma > 0$ 这个不等式都成立. 条件 $a_1 a_2 - a_3 > 0$ 和 $a_3 > 0$ 可以写为:

$$\sigma(\sigma + 1)x^* - 2(\sigma + 1)z^2 - \sigma yz + (\sigma + 1)(\sigma + 2) > 0, \quad (9)$$

$$\sigma(yz + z^2 + x^*) > 0. \quad (10)$$

这里 $x^* = 1 - \gamma + x$, 表示沿 x 轴方向到包含(6)式两不动点的平面(x 坐标为常数)的 x 距离. 显然不动点在收敛域内。

收敛域的边界可见图 1 所示. 收敛域位于边界的上方, 它满足(9)式和(10)式, 这个边界通过 x^* 而依赖于 γ . 一个简单的结论是永磁同步电机系统可以纳入到另一个动力学状态。

对目标动力学 (g_x, g_y, g_z) 的控制方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = -x + yz + [g_x + g_x - g_y g_z]S(t), \\ \dot{y} = -y - xz + \gamma z + [g_y + g_y + g_x g_z + \gamma g_z]S(t), \\ \dot{z} = \sigma(y - z) + [g_z - \sigma(g_y - g_z)]S(t). \end{cases} \quad (11)$$

这里当 $t < 0$ 时, $S(t) = 0$; $t > 0$ 时, $S(t) = 1$.

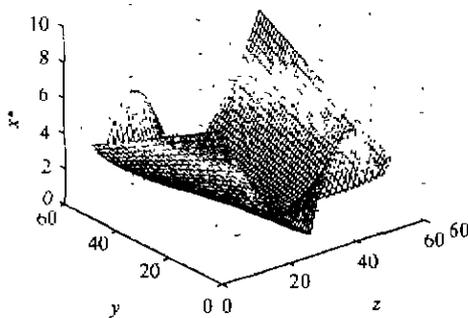


图1 PMSM在坐标系统 $(x^* = 1 - \gamma + x, y, z)$ 下收敛域的边界 (在其上方满足收敛条件(10)式和(11)式)

Fig. 1 The boundary of the convergent region for the PMSM in the coordinates $(x^* = 1 - \gamma + x, y, z)$ (Above this surface the convergent conditions (10) and (11) are satisfied)

下面,对于永磁同步电动机,我们希望将稳定的轨道纳入到混沌吸引子中,如将当 $\gamma = 13$ ($\sigma = 5.46$) 时的稳定的轨道纳入到 $\gamma_g = 20$ 时的混沌系统中去,使系统轨道趋向于混沌吸引子.这时, $(g_x, g_y, g_z) = (x, y, z)$ 要满足 $\gamma_g = 20$ 时的方程(6),容易求得(11)式中的第一和第三个式子中 $S(t)$ 的系数为零,(11)式可写为:

$$\begin{cases} \dot{x} = -x + yz, \\ \dot{y} = -y - xz + \gamma z + (\gamma_g - \gamma)S(t), \\ \dot{z} = \sigma(y - z). \end{cases} \quad (12)$$

从图2可以看到,稳定的系统被纳入到混沌的目标轨道.图2~图4的坐标单位以标么值表示.

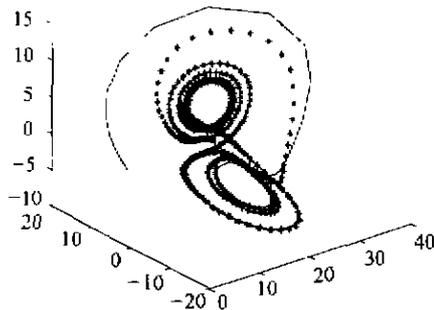


图2 $\gamma=13$ 的稳定PMSM系统纳入到 $\gamma_g=20$ 的混沌的PMSM目标轨道

Fig. 2 The entrainment of the stable PMSM system with $\gamma=13$ to the GG (given goal) of the chaotic PMSM dynamics $\gamma_g=20$

4 强迫迁徙控制(Migration control)

强迫迁徙控制的目的是为了将系统的动力学从一个收敛域 C_i 转入另一个收敛域 $C_j, i \neq j$. 这是很

有意义的,如在复杂系统的许多吸引子中,有些具有不同类型的动力学(如周期性、间歇性或混沌等等),它们中的某一个可能对系统的某一特定行为非常有用.混沌可能导致系统崩溃,因而周期行为可能相对“健康”(healthy);相反,规则(非混沌)行为可能“不健康”(unhealthy),因为它对环境的改变没有敏感依赖性.

纳入法的一个重要的应用是可以将系统从一个吸引子 A_1 转移到另一个吸引子 A_2 . 如果系统在 A_1 的吸引域 BA_1 中,我们可以先用一个简单的纳入目标来实现转移,如固定点 $g_0 \in C_i \subset BA_1$,在一定的时间内,系统和纳入目标有 $\|x(t) - g_0\| < \epsilon$. 这时要引入迁徙目标(migration goal, MG),它要从 g_0 进入 A_2 的吸引域 BA_2 . 如果系统跟随这个MG,它将进入 BA_2 ,这时控制将结束($S = 0$),系统将自动趋向于 A_2 . 这样就实现了期望的转移 $A_1 \rightarrow A_2$.

如果MG在大多数时间里处于系统的收敛域里,并且 dg/dt 如不太大,那么系统将跟踪MG. 对于永磁同步电动机模型,研究两种情形的 $A_1 \rightarrow A_2$: i) A_1 和 A_2 为稳定的不动点; ii) A_1 为一奇异吸引子, A_2 为一稳定不动点.

当 $\gamma < 14.1$ 时,系统有两个不动点 A^* . 如图3所示,系统当 $\gamma = 20$ 时处于 A^+ 的吸引域

$$\begin{cases} x = r - 1, \\ y = z = \sqrt{r - 1} \cdot (2 \cdot e^{-\frac{1}{5}} - 1). \end{cases}$$

当控制启动后,系统将被吸引到MG,从图3中可以看到系统很快被吸引到这条目标轨道上.

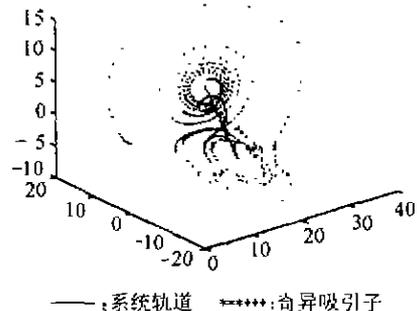


图3 PMSM混沌系统从吸引域 BA^+ 到 BA^- 的强迫迁徙
Fig. 3 The migration of the transient chaotic PMSM system ($\gamma=20$) from the basin of attraction BA^+ to BA^-

如图4所示,系统由混沌吸引子 ($\gamma = 20$) 转移到稳定的不动点 A^- . 当系统在吸引子附近时可以启动控制,目标动力系统可选为收敛域中的任意一固定点,如,

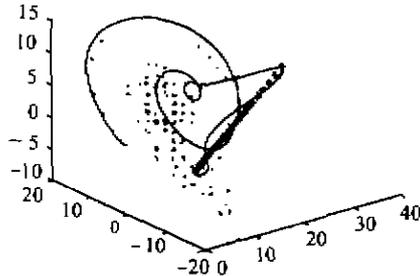
$$x = (r - 1) + 50, \quad y = z = \sqrt{r - 1},$$

记为 g_0 . 这是个两步控制过程,一旦系统被纳入目

标,控制则转为强迫迁徙 MG:

$$\begin{cases} g_x = (r-1) + 50 \cdot e^{\frac{t-t_m}{5}}, \\ g_y = g_z = \sqrt{r-1} \cdot (2 \cdot e^{\frac{t-t_m}{5}} - 1). \end{cases}$$

这里 t_m 是强迫迁徙启动的时刻. 系统将沿着 MG 运行直到系统充分接近 A^- , 控制则终止.



—: 系统轨道 *****: 奇异吸引子

图4 PMSM混沌动力系统从混沌吸引子到稳定不动点 A^- 的迁徙

Fig. 4 Illustrates the transfer of PMSM dynamics ($\gamma=20$) from a strange attractor to the stable fixed point A^-

5 结论 (Conclusion)

本文利用纳人轨道和强迫迁徙法对永磁同步电动机动力系统进行了控制,当系统轨道处于吸引域中时,可以将系统轨道控制到具有任意拓扑结构的目标轨道上.本文研究了三种情况的控制,即从稳态到混沌、从一个稳定不动点到另一个稳定不动点以及从一个混沌吸引子到一个稳定不动点,具有良好的控制效果.这种控制方法在工程上是一种开环控制,设计和使用时都十分简单,但是无法保证控制过程的

稳定性,而且目标轨道不允许是给定系统自身的任何一个轨道或状态.

参考文献 (References)

- [1] Li Z, Zhang B and Mao Z Y. Strange attractors in permanent-magnet synchronous motors [A]. IEEE 1999 Int. Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEEDS'99) [C], Hong Kong, 1999, 150 - 155
- [2] Li Z, Zhang B and Mao Z Y. Numerical algorithm of Poincare map and its application in analyzing the chaotic phenomena of the permanent-magnet synchronous motor [J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(5): 796 - 800
- [3] Jackson E A. On the control of complex dynamic systems [J]. Physica D, 1999, 50(2): 341 - 366
- [4] Jackson E A. The entrainment and migration controls of multiple-tractor systems [J]. Physics Letter A, 1990, 151(9): 407 - 420

本文作者简介

李忠 1968年生,1989年于四川大学数学系获理学学士学位,1996年于暨南大学数学系获理学硕士学位,2000年于华南理工大学自动控制工程系获工学博士学位.主要研究方向为模糊数学,智能控制及非线性系统中的混沌现象分析及控制. Email: zhongli@mail.scut.edu.cn

张波 1962年生,博士,教授,博士生导师.1982年毕业于浙江大学电机专业,1994年在南京航空航天大学电力电子技术专业获博士学位.已发表论文70余篇.目前研究方向:交流传动和电力电子技术.

毛宗源 1936年生,教授,博士生导师.1961年毕业于大连理工大学工业自动化专业.已发表论文百多篇.目前研究方向:现代控制理论及应用,电力电子技术.