

文章编号: 1000-5013(2009)03-0253-04

利用 Backstepping 方法的 PMSM 混沌运动的控制

李钟慎, 魏剑林, 王永初

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 在张波等提出的混沌模型的基础上, 采用 Backstepping 方法对永磁同步电动机的混沌运动进行控制. 该方法是建立在 Lyapunov 稳定性的基础上的, 选择适当的控制法则, 将稳定或不稳定的平衡点引导到稳定的平衡点上来. 数值仿真表明, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 控制量 u_d 和 u_q 是有界的且是收敛的, 说明该控制量是有效的.

关键词: 混沌控制; Backstepping 方法; 永磁同步电动机; Lyapunov 函数

中图分类号: TM 351; TP 273

文献标识码: A

对于电动机混沌现象的控制, 理论研究已经有大量的控制方法, 但其中很多方法并不能直接运用于工程实际中的混沌系统. 张波等^[1-3]在研究了永磁同步电动机(PMSM)模型后, 经过变换得到了一个适合分析永磁同步电动机混沌运动的模型. 文[4]利用 Lyapunov 指数和容量维对该模型进行分析, 进一步验证了永磁同步电动机中混沌运动的存在性. 李忠等^[5]采用纳入轨道和强迫迁徙方法, 控制了永磁同步电动机中的混沌现象. 任海鹏等^[6]利用延迟反馈, 控制永磁同步电机中的混沌现象. 李洁等^[7]利用部分解耦的控制方法, 使系统具有唯一稳定平衡点, 从而实现混沌的控制. 韦笃取等^[8]利用微分几何理论中的状态反馈精确线性化, 来控制 PMSM 中的混沌运动. 本文主要利用了 Backstepping 方法, 对永磁同步电机中的混沌运动进行控制^[9-11].

1 PMSM 的混沌模型

以定子 d, q 的轴电流 i_d, i_q 和转子角速度 ω 为状态变量, 提出的永磁同步电动机模型^[1-3]为

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= (u_d - R_1 i_d + \omega L_q i_q) / L_d, \\ \frac{di_q}{dt} &= (u_q - R_1 i_q - \omega L_d i_d - \omega \Psi_r) / L_q, \\ \frac{d\omega}{dt} &= (n_p \Psi_r i_q + n_p (L_d - L_q) i_d i_q - T_L - \beta \omega) / J. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中, R_1 为定子绕组电阻; L_d, L_q 分别为定子 d, q 的轴电感; Ψ_r 为转子磁极磁链; ω 为转子角速度; T_L, J 和 β 分别为负载转矩、转动惯量和粘滞阻尼系数; n_p 为极对数; u_d, u_q 分别为定子 d, q 的轴电压. 经过一系列变换后, 混沌模型方程为

$$\frac{di_d}{dt} = u_d - bi_d + \alpha i_q, \quad \frac{di_q}{dt} = u_q - i_q - \alpha i_d + \gamma \omega, \quad \frac{d\omega}{dt} = \alpha(i_q - \omega) + \beta i_d i_q - T_L. \quad (2)$$

式(2)中, $b = L_q/L_d$, $\gamma = \Psi_r/kL_q$, $\alpha = \beta\Psi_r/J$, $u_d = u_d/R_1 k$, $u_q = u_q/R_1 k$, $T_L = T_L/J$, $\beta = n_p(L_d - L_q)bk^2/J$. 由于 u_d 和 u_q 相应于电动机的输入电压, 是一个与时间相关的变量, 并且显式包含时间, 因而该变换式为一个非线性非自治方程.

对于 $u_d = u_q = T_L = 0$ 的情形, 可将其看成系统在稳定运行一段时间后突然断电的情况. 为了明确说

收稿日期: 2008-01-13

通信作者: 李钟慎(1971-), 男, 副教授, 主要从事时滞控制与混沌控制的研究. E-mail: lzszyw@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0710018)

明, 给出如下参数: $L_d = L_q = L = 14.25 \text{ mH}$, $R_1 = 0.9 \Omega$, $\Psi_f = 0.031 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$, $n_p = 1$, $J = 0.047 \text{ g} \cdot \text{m}^2$, $\beta = 0.0162 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$). 此时, 模型变换为

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -i_d + \omega i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - \omega i_d + \gamma \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} &= \sigma(i_q - \omega). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中, 初始条件为 $(i_d, i_q, \omega) = (0.01, 0.01, 0.01)$. 如果取 $\sigma = 5.46$, $\gamma = 20$, 则仿真结果如图 1 所示.

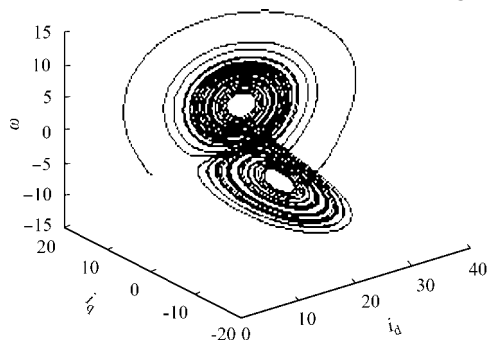


图 1 PMSM 系统的奇怪吸引子

Fig. 1 The chaotic attractor of PMSM system

2 PMSM 混沌控制

假设 $L_d = L_q = L$, 则 $b = 1$, $\varepsilon = 0$, $T_L = 0$, $u_q = 0$, $u_d \neq 0$. 此时, PMSM 混沌模型为

$$\frac{d\omega}{dt} = \sigma(i_q - \omega), \quad \frac{di_q}{dt} = -i_q - \omega i_d + \gamma \omega, \quad \frac{di_d}{dt} = -i_d + \omega i_q + u_d. \quad (4)$$

由式(4)可知, 该系统的不稳定平衡点为 $(0, 0, 0)$ 和 $(\pm \sqrt{\gamma-1}, \pm \sqrt{\gamma-1}, \gamma-1)$. 此时, 要先对点 $(0, 0, 0)$ 进行稳定. 为了控制 PMSM 混沌系统, 可以通过改变电动机的输入电压 u_d 来达到. 即利用 Backstepping 方法来求出该输入电压 u_d .

首先, 定义 $V_1(\omega) = \frac{1}{2}\omega^2$, 则有

$$\dot{V}_1(\omega) = \omega \cdot \dot{\omega} = \omega \cdot \sigma(i_q - \omega) = -\sigma\omega^2 + \sigma\omega i_q. \quad (5)$$

为了使 $\dot{V}_1(\omega) \leq 0$, 取 $\alpha\omega = p\omega$, 并定义一个误差变量 $\bar{i}_q = i_q - \alpha\omega$. 此时, 得到 (ω, \bar{i}_q) 的子系统为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega} &= \sigma\bar{i}_q - \sigma(1-p)\omega, \\ \dot{\bar{i}}_q &= \gamma\omega - \omega i_d - \bar{i}_q - p\omega - \varphi\bar{i}_q + \varphi(1-p)\omega. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

此时, 可以构建第 2 个 Lyapunov 函数为 $V_2(\omega, \bar{i}_q) = V_1(\omega) + \frac{1}{2}\bar{i}_q^2$, 其微分形式为

$$\dot{V}_2 = -\sigma(1-p)\omega^2 - (1+\varphi)\bar{i}_q^2 - \omega\bar{i}_q[\gamma - \sigma - \gamma + p - \varphi(1-p)].$$

为了使 $\dot{V}_2 \leq 0$, 选择 $z = \alpha(\omega, \bar{i}_q) = \sigma + \gamma - p + \varphi(1-p)$. 显然的, 只有当 $-\frac{1}{\sigma} < p < 1$ 时, $\dot{V}_2 \leq 0$.

下面定义 $z = z - \alpha(\omega, \bar{i}_q)$, 此时得到 $(\omega, \bar{i}_q, \bar{i}_d)$ 坐标的系统为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega} &= \sigma\bar{i}_q - \sigma(1-p)\omega, \\ \dot{\bar{i}}_q &= \gamma\omega - \omega i_d - \bar{i}_q - p\omega - \varphi\bar{i}_q + \varphi(1-p)\omega, \\ \dot{\bar{i}}_d &= \omega\bar{i}_q + p\omega^2 - \bar{i}_d - (\sigma + \gamma - p + \varphi(1-p)) + u_d. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

此时, 可以构造如下的 Lyapunov 函数

$$V_3(\omega, \bar{i}_q, \bar{i}_d) = V_2(\omega, \bar{i}_q) + \frac{1}{2}\bar{i}_d^2$$

其微分形式为

$$\dot{V}_3 = -\sigma(1-p)\omega^2 - (1+\varphi)\bar{i}_q^2 - \bar{i}_d^2 + \bar{i}_d[p\omega^2 - (\sigma + \gamma - p + \varphi(1-p)) + u_d].$$

为了使得 \dot{V}_3 小于零, 可以得到控制输入 u_d 为

$$u_d = -p\omega^2 + (\sigma + \gamma - p + \varphi(1-p)). \quad (8)$$

因此, 通过上面的证明可以知道, 式(4)所示系统在原点 $(0, 0, 0)$ 得到稳定, 且被稳定在点 $(0, 0, \alpha)$.

为了控制 PMSM 混沌系统到原点 $(0, 0, 0)$, 假设 $L_d = L_q = L$, 则 $b = 1$, $\varepsilon = 0$, $T_L = 0$, $u_q \neq 0$, $u_d = 0$. 此时, PMSM 混沌模型为

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha(i_q - \omega), \quad \frac{di_q}{dt} = -i_q - \omega i_d + \gamma\omega + u_q, \quad \frac{di_d}{dt} = -i_d + \omega i_q. \tag{9}$$

与上面一样, 需要设计一个稳定函数 $\alpha(\omega)$. 对于 Lyapunov 函数 $V_1(\omega) = \frac{1}{2}\omega^2$ 的微分 $\dot{V}_1 = \omega \cdot \dot{\omega} = \omega \cdot \alpha(i_q - \omega) = -\omega^2 + \omega\omega i_q$ 为负的, 此时 $i_q = \alpha(\omega)$, 选择 $\alpha(\omega) = 0$ 定义误差变量 $\bar{i}_q = i_q - \alpha(\omega)$. 此时, 得到 (ω, \bar{i}_q) 的子系统为

$$\dot{\omega} = \sigma \bar{i}_q - \alpha\omega, \quad \dot{\bar{i}}_q = \gamma\omega - \omega i_d - \bar{i}_q + u_q. \tag{10}$$

构建第 2 个 Lyapunov 函数为 $V_2(\omega, \bar{i}_q) = V_1(\omega) + \frac{1}{2}\bar{i}_q^2$, 其微分形式为

$$\dot{V}_2 = -\alpha\omega^2 - \bar{i}_q^2 - \bar{i}_q(\alpha\omega + \gamma\omega - \omega i_d + u_q). \tag{11}$$

为了使 $\dot{V}_2 \leq 0$, 可以得到控制量

$$u_q = \omega(i_d - (\sigma + \gamma)). \tag{12}$$

因此, 可以证明在 (ω, i_q) 坐标中, 式(10)所示的子系统的平衡点 $(0, 0)$ 是渐进稳定的. 通过 $\bar{i}_q = i_q - \alpha(\omega)$, $\alpha(\omega) = 0$, $\omega \rightarrow 0$, $i_q \rightarrow 0$, 以及式(9)的第 3 个等式, 可以得到式(9)所示的被控系统在控制输入 $u_q = \omega(i_d - (\sigma + \gamma))$ 时, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $(\omega, i_q, i_d) \rightarrow (0, 0, 0)$.

3 仿真实验

采用上述两种控制, 取仿真的采样时间步长为 0.01 s, 且假设 PMSM 混沌系统的参数 $\alpha = 5.46$, $\gamma = 20$, 初始值 $\omega(0) = 0.1$, $i_{d,0}(0) = 0.1$, $i_{q,0}(0) = 0.1$. 对于控制输入 u_d 取 $p = 0.1$, 在 $t = 20$ 时, 将控制加入混沌. 图 2(a) 为在式(8)表示的控制输入的作用下, PMSM 混沌系统的状态变量被稳定到 $(0, 0, \alpha_2)$; 而图 2(b) 为在式(12)表示的控制量的作用下, PMSM 混沌系统状态变量被稳定到 $(0, 0, 0)$. 图 3 表示控制量的变化情况. 从图 2, 3 可以看到, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 控制量 u_d, u_q 是有界且是收敛的.

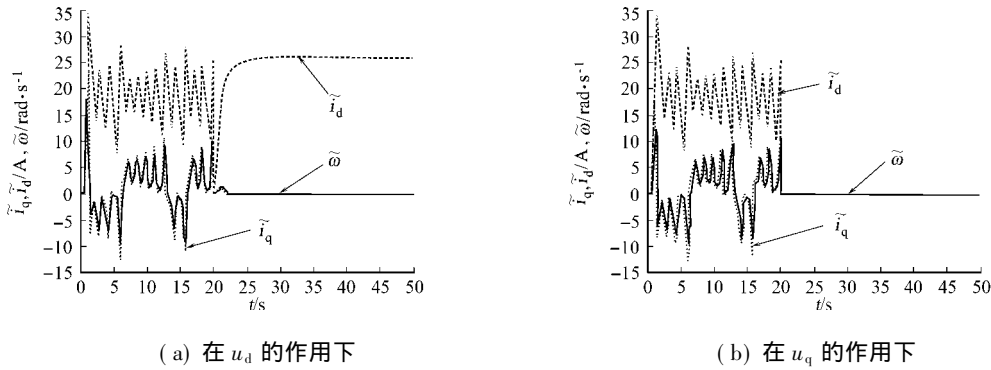


图 2 PMSM 系统的状态变量响应曲线

Fig.2 The curves of states responses of PMSM system

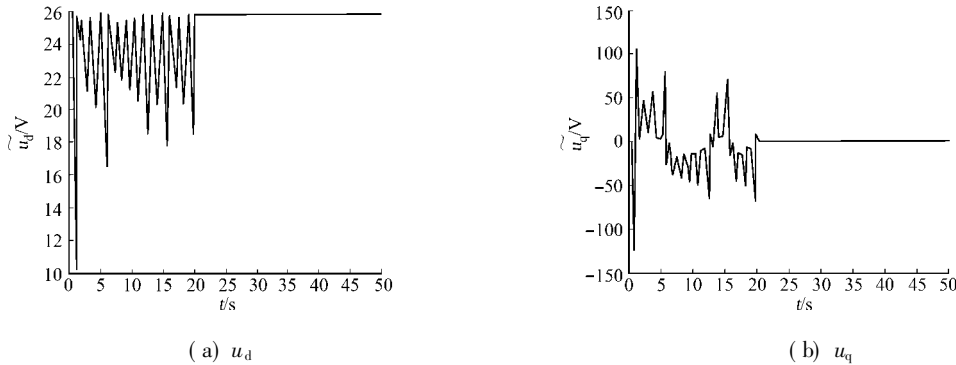


图 3 控制量的变化曲线

Fig.3 Curves of control value

4 结束语

本文首次将 Backstepping 方法运用到永磁同步电动机的混沌控制中来, 并且通过了上面的仿真. 可以看出, 该方法能够对不稳定的平衡点进行稳定或者引导, 从而达到对该混沌系统的控制; 同时, 也克服了如延迟反馈控制中的线性化不够精确、微分几何的线性化又过于复杂等缺点. 所以, 该方法将会在控制理论中获得广泛的应用.

参考文献:

- [1] LI Zhong, ZHANG Bo, TIAN Lian-fang, et al. Strange attractors in permanent-magnet synchronous motors[C] // IEEE Proceedings of 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Hong Kong: [s. n.], 1999: 150-155
- [2] ZHANG Bo, LI Zhong, MAO Zong-yuan. A type of fuzzy modeling of the chaotic system of permanent magnet synchronous motor[J]. ICEMS 2001: Proceedings of the Fifth International Conference, 2001(2): 880-883.
- [3] 张 波, 庞敏熙, 毛宗源, 等. 一类永磁同步电动机混沌模型与霍夫分叉[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 13-17.
- [4] 张 波, 李 忠, 毛宗源, 等. 永磁同步电动机的混沌和稳定性研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002, 28(12): 125-130.
- [5] 李 忠, 张 波, 毛宗源, 等. 永磁同步电动机系统的纳入轨道和强迫迁徙控制[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 53-56.
- [6] 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.
- [7] 李 洁, 任海鹏. 永磁同步电动机中混沌运动的部分解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(4): 637-640.
- [8] 韦笃取, 罗晓曙, 方锦清. 基于微分几何方法的永磁同步电动机的混沌运动的控制[J]. 物理学报, 2006, 55(1): 54-59.
- [9] 程代展, 洪奕光, 秦化淑. 多输入非线性后推(Backstepping)型(英文)[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 824-830.
- [10] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [11] 陈一秀, 王永初. 永磁直线电机的 H^∞ 鲁棒控制系统设计[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(3): 331-334.

Backstepping Based Chaotic Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor

LI Zhong-shen, WEI Jian-lin, WANG Yong-chu

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Backstepping based chaotic control for permanent-magnet synchronous motor (PMSM) is implemented on the basis of the chaotic model presented by Zhang Bo. Such a control method can make the new stable equilibrium points interlaced by stable or unstable equilibrium points using a suitable control law based on the Lyapunov stability theory. The results of numerical simulation has shown that when the parameter of time, t , tends to infinity, the control values of u_d and u_q are bounded and constringent, from which it can be concluded that such control values are effective.

Keywords: chaotic control; backstepping method; permanent-magnet synchronous motor; lyapunov function

(责任编辑: 鲁 斌 英文审校: 郑亚青)