

基于 LaSalle 不变集定理自适应控制永磁同步电动机的混沌运动^{*}

韦笃取^{1)†} 张 波¹⁾ 丘东元¹⁾ 罗晓曙²⁾

1) 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

2) 广西师范大学物理与电子工程学院, 桂林 541004)

(2008 年 11 月 11 日收到, 2008 年 12 月 29 日收到修改稿)

基于 LaSalle 不变集定理, 设计自适应混沌控制器对永磁同步电动机中的混沌进行控制. 由于该控制器能自动跟踪平衡点, 无需预先知道系统平衡点位置, 不需要改变受控系统原有的结构, 因此设计直接简便, 控制代价小, 易于工程实现. 仿真结果表明了该方法的有效性.

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

PACC: 0545

1. 引 言

永磁同步电动机(PMSM)具有高转矩、高速度、高启动转矩等显著优点, 因而在工业上得到越来越广泛的应用. 近年来, 由于永磁同步电动机的运行直接关系到工业自动化生产有效性, 其稳定性、可靠性研究受到人们广泛的关注. 已有研究表明, 电机传动系统在某些参数及工作条件下会呈现混沌行为^[1-3], 其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. 混沌的存在将严重影响电机运行的稳定性, 因而有必要对永磁同步电动机系统的混沌控制进行深入研究.

自 1990 年 Ott 等提出控制混沌的思想以来^[4], 混沌系统控制的研究引发人们极大的兴趣, 新的控制理论和方法不断涌现^[5-8], 但很多方法并不一定能够直接运用于实际工程中的混沌系统. PMSM 混沌控制的研究不仅工作不多, 而且已有的控制方法也不够完善. 文献[9]基于微分几何理论研究 PMSM 的混沌控制, 由于其控制方法复杂烦琐, 设计控制器有很大难度. Harb 提出用 Backstepping 方法控制 PMSM 中的混沌^[10], 但该方法有两个主要缺点: 第

一, Backstepping 方法设计过程会出现由于虚拟输入微分而引起的“微分项膨胀”的问题; 第二, 该方法没有考虑系统平衡点位置受参数不确定性的影响, 当系统参数因环境条件变化而改变时, 受控 PMSM 不能稳定到平衡点. 为了得到更加优良的控制策略, 本文基于 LaSalle 不变集定理, 设计自适应混沌控制器对 PMSM 中的混沌进行控制. 该控制器的优点在于其自适应律能自动跟踪系统平衡点, 无需预先知道平衡点位置, 也不需要改变受控系统原有的结构, 因此设计直接简便, 控制代价小, 易于工程实现. 仿真结果表明了该方法的有效性.

2. PMSM 数学模型

经过变换的均匀气隙永磁同步电动机数学模型为^[11]

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \alpha(i_q - \omega) - T_L, \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - i_d\omega + \gamma\omega + u_q, \\ \frac{di_d}{dt} &= -i_d + i_q\omega + u_d, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ω , i_q 和 i_d 为状态变量, 分别表示转子机械

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号: 2007AA05Z229), 国家自然科学基金(批准号: 10862001, 50877028, 60774069)和广东省自然科学基金重点项目(批准号: 8251064101000014)资助的课题.

[†] E-mail: duduwei@163.com

角速度和 q , d 轴定子电流 ; σ 和 γ 为系统参数 , 皆取正值 ; T_L 和 u_d , u_q 分别表示负载转矩和 d , q 轴定子电压 . 不失一般性 , 只考虑电机没有外力的情况 . 这种情况可以看作 PMSM 空载运行一段时间后突然断电 , 各项外部输入为零的情形^[4] , 即 $T_L = 0$ 和 $u_d = 0$, $u_q = 0$ 的情况 . 这时系统 (1) 变成

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

系统 (2) 有三个平衡点 : $S_1 = (0\ 0\ 0)$, $S_{2,3} = (\pm\sqrt{\gamma-1}, \pm\sqrt{\gamma-1}, \gamma-1)$. 在 PMSM 的实际模型中 , 参数 σ 和 γ 由于受环境如温度等影响而改变 , 因此其平衡点具有不确定性 . 文献 [1—3] 利用现代非线性理论例如分岔 , 混沌等方法对系统 (2) 的动力学行为进行了充分研究 . 研究结果表明电机在参数 σ 和 γ 取某些值时会呈现混沌行为 , 例如参数值取 $\sigma = 5.45$, $\gamma = 20$ 时 , 电机出现混沌 , 其典型混沌吸引子如图 1 所示 . 电机系统的混沌行为将会严重破坏电机系统的稳定运行 , 甚至会引起传动系统的崩溃 , 所以必须抑制电机中的混沌运动 .

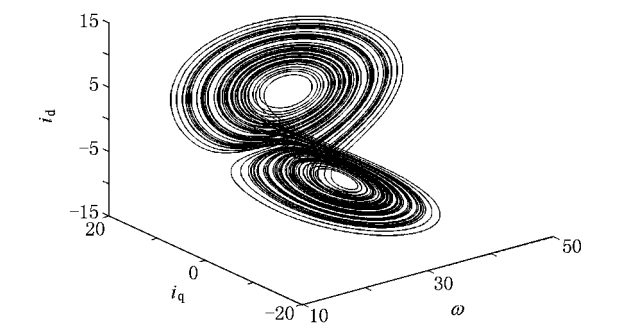


图 1 永磁同步电动机的混沌相图

3. 基于 LaSalle 不变集定理自适应控制 PMSM 中的混沌运动

3.1. 基本概念

考虑非线性系统

$$\dot{x} = f(x)\tag{3}$$

其中 $t \in [0, \infty]$ 状态变量 $x \in R^n$, $f:D \rightarrow R^n$ 是定义在 $f:D \in R^n$ 上的光滑向量场 , 满足 Lipschitz 条

件 , 不失一般性 , 我们假定非线性系统至少有一个平衡点 X^* , 且事先不知道平衡点的具体位置 . 对于非线性系统 (3) , 引入几个基本概念 .

定义 1 设 (3) 式的解是 $x(t)$, 若存在时间序列 $\{t_n\}$, $\lim_{n \rightarrow \infty} t_n = \infty$, 使得 $x(t_n) = p$, 则称 p 是 $x(t)$ 的一个正向极限点 .

定义 2 设 $M \subset R^n$, 若对于任意初始条件 $x(0) = x_0 \in M$ (3) 式的解 $x(t) = \Phi(t, x_0)$ 满足

$$x(t) \in M, \forall t \geq 0,$$

则称 M 是关于系统 (3) 的正向不变集 . 不变集可以包括系统的一个或多个平衡点 , 也可以是状态空间的一个子集合 .

引理 1 (LaSalle 不变集定理^[11]) 设 Ω 是一个有界闭集 , 从 Ω 内出发的系统 (3) 的解 $x(t) \subset \Omega$, 若 $\exists V(x):\Omega \rightarrow R$, 具有连续一阶偏导 , 使 $dV/dt \leq 0$, 又设

$$E = \{x | dV/dt = 0, x \in \Omega\},$$

$M \subset E$ 是最大不变集 , 则当 $t \rightarrow \infty$ 有 $x(t) \rightarrow M$. 特别地若 $M = \{0\}$, 则系统的平衡点稳定 . 具体证明见文献 [11] .

3.2. 基于 LaSalle 不变集定理设计自适应混沌控制器

要实现的控制目标就是把非线性系统控制到平衡点 X^* . 将控制项 u 直接加在系统 (3) 的右端 , 可以得到受控系统

$$\dot{x} = f(x) + u_i,\tag{4}$$

这里 i 是系统变量的个数 . 传统的控制方法是设计 u_i 使系统的状态接近平衡点 X^* , 这样的方法虽然简单 , 但是如果事先不知道平衡点的具体位置 , 将导致传统控制方法无能为力 . 为了克服这一缺陷 , 我们设计一个自适应律自动跟踪平衡点 , 即

$$\dot{y}_i = \lambda_i (x_i - y_i),\tag{5}$$

其中 $y_i \in R^n$, $\lambda_i \in R_+$.

至此 , 本文设计的自适应混沌控制器具有如下形式 :

$$\begin{aligned}u_i &= -k_i(x_i - y_i), \\ \dot{k}_i &= \alpha_i(x_i - y_i)^2.\end{aligned}\tag{6}$$

由此可以引出以下定理 .

定理 1 受控混沌系统 (4) 在自适应混沌控制器 (6) 作用下渐近稳定到不可知的平衡点 .

证明 取正值函数 $V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 +$

$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_i} (L - k_i)^2$,其中 L 是正实数.求 V 对时间的导数 ,有

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) f_i(x) - (L + \lambda_i) (x_i - y_i)^2. \tag{7}$$

由于非线性部分 $f(x)$ 满足 Lipschitz 条件 ,它在区域 D 上是有界的 ,那么必存在 $L < \infty$ 对于所有的 i 都有 $|f_i(x)| \leq l |x_i - y_i|$.可以通过选择 $L > l$ 使不等式

$$\dot{V} \leq W = - (L - l) \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \leq 0. \tag{8}$$

(8) 式保证对于 $t \rightarrow \infty$ (4) 式的任何解都趋近于集合 $E = \{(x, y, k) : x = y\}$.(6) 式的最大不变集 $M = \{(x, y, k) : x = y = x^*, k = k^*\}$ 仅包含系统 (4) 的平衡点 X^* .由 LaSalle 不变集定理可知 ,受控混沌系统 (4) 在自适应混沌控制器 (6) 作用下渐近稳定到平衡点 .证明完毕 .

注 设计本控制器需要系统 $f(x)$ 满足 Lipschitz 条件 ,其实这一条件很宽松 ,只要 $\partial f(x_i) / \partial x_j (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 有界则 $f(x)$ 就满足 Lipschitz 条件 .由于混沌系统吸引子具有有界性 ,混沌系统中的非线性部分 $f(x)$ 都可看成满足

Lipschitz 条件 ,至少是满足局部 Lipschitz 条件^[12] .因此永磁同步电动机的混沌运动可以用所设计的自适应控制器 (6) 来控制 .

3.3.PMSM 混沌运动的自适应控制及仿真

把控制器加在方程 (2) 的第二项上 ,受控的永磁同步电动机系统如下 :

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \alpha (i_q - \omega) , \\ \frac{di_q}{dt} &= -i_q - i_d \omega + \gamma \omega - k (i_q - y) , \\ \frac{di_d}{dt} &= -i_d + i_q \omega , \\ \dot{k} &= \alpha (i_q - y)^2 , \\ \dot{y} &= \lambda (i_q - y) . \end{aligned} \tag{9}$$

假设系统参数 σ 和 γ 的取值不确定 ,控制参数取 $\alpha = 0.4$, $\lambda = 0.3$.受控系统初始状态为 $(\omega, i_q, i_d, k, y) = (0.012, 0.014, 0.015, 0, 0)$.在施加控制前 ,永磁同步电动机处于混沌运动 .第 50 秒加入控制 u ,系统混沌运动很快得到控制 ,并稳定在平衡点 $X^* = (-4.3589, -4.3589, 19)$.控制结果如图 2 所示 .从仿真结果可以看出 ,在系统参数未知情况下 ,所设计的自适应控制仍然能控制系统到平衡点 ,

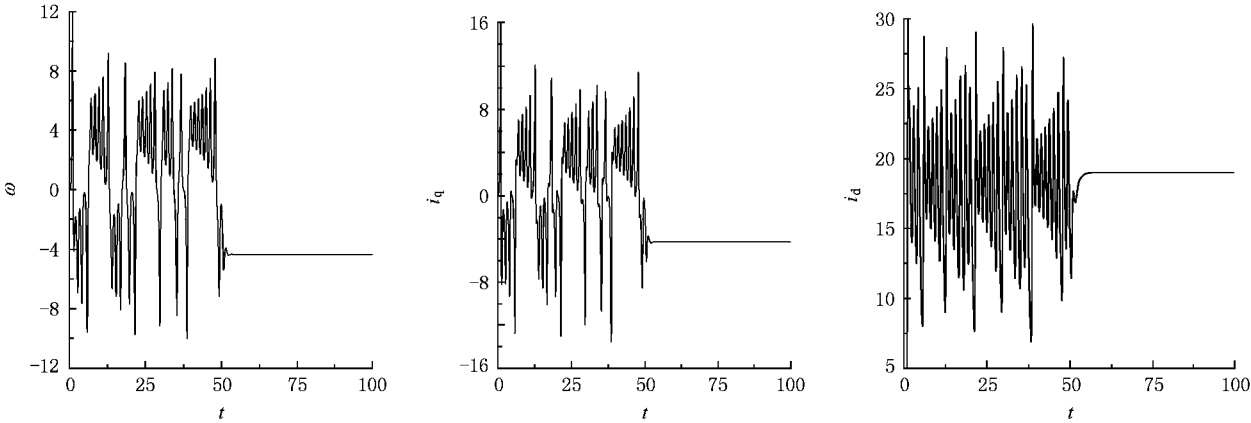


图 2 控制永磁同步电动机到平衡点

表明所设计的控制策略的有效性 .

4. 结 论

本文基于 LaSalle 不变定理 ,设计混沌控制器对 PMSM 中的混沌进行控制 .据文献检索表明 ,在已有文献的工作中 ,设计自适应控制器通常是为了跟踪

系统不确定性参数 .本文提出的控制器的优点在于其自适应律能直接自动跟踪系统平衡点 .该控制器由于无需事先知道平衡点位置 ,同时不需要使用除系统状态变量 i_q 以外的任何有关被控系统的信息 ,不需要改变受控系统原有的结构 ,所以设计直接简便 ,控制代价小 ,易于工程实现 .仿真结果表明了该方法的有效性 .

- [1] Zhang B , Li Z , Mao Z Y 2000 *J. South. China. Univ. Tech.* **28** 125 Chinese [罗晓曙、方锦清、王力虎 1999 物理学报 **48** 2196]
- [2] Li Z , Park J , Joo Y , Zhang B , Chen G 2002 *IEEE Trans. Circ. Syst. I.* **49** 383 [7] Wei D Q , Luo X S 2007 *Chin. Phys.* **16** 3244
- [3] Hemati N , Kwatny H 1993 *Bifurcation of equilibria and chaos in permanent-magnet machines. Proceeding of the 32nd Conference on Decision and Control* , San Antonio , Texas , December , 1993. p 475 [8] Wei D Q , Luo X S 2008 *Chin. Phys. B* **17** 92
- [4] Ott E , Grebogi C , Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 196 [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]
- [5] Luo X S , Wang B H 2001 *Chin. Phys.* **10** 17 [10] Harb A 2004 *Chaos, Solitons & Fractals* **19** 1217
- [6] Luo X S , Fang J Q , Wang L H 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 2196 (in Chinese) [11] LaSalle J P 1960 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **46** 363
- [12] Wei R , Wang X Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3298 (in Chinese) [魏荣、王行愚 2004 物理学报 **53** 3298]

Adaptive controlling chaos in permanent magnet synchronous motor based on the LaSalle theory^{*}

Wei Du-Qu^{1,2,†} Zhang Bo¹⁾ Qiu Dong-Yuan¹⁾ Luo Xiao-Shu²⁾

¹ *Power Electric College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*

² *College of Physics and Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China*

(Received 11 November 2008 ; revised manuscript received 29 December 2008)

Abstract

Recent investigation has shown that the permanent magnet synchronous motor (PMSM) goes chaos for certain parameter values or under certain working conditions , which threatens the secure and stable operation of the motor . Hence , it is significant to study the method of controlling or suppressing chaos in PMSM . Based on LaSalle invariant theory , an adaptive law of controlling chaos was presented in this paper , which enables avoiding the influence of undeterministic equilibrium of the system . Simulation results show that the designed control method is effective and its control property is better than that of others . Our research results may help to maintain the system 's secure operation .

Keywords : LaSalle invariant theory , adaptive law , chaos control , permanent magnet synchronous motor

PACC : 0545

^{*}Project supported by the Hi-tech Research and Development Program of China (863) (Grant No. 2007AA05Z229), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10862001 , 50877028 , 60774069) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province (Grant No. 8251064101000014).

[†] E-mail : duduwei@163.com