

基于无源性理论自适应镇定具有 v/f 输入的永磁同步电动机的混沌运动*

韦笃取[†] 张波

(华南理工大学电力学院, 广州 510641)

(2011 年 4 月 13 日收到; 2011 年 5 月 26 日收到修改稿)

首先利用无源性理论, 构造自适应反馈控制器使具有 v/f 控制输入的混沌永磁同步电动机 (PMSM) 等效为闭环无源系统, 然后证明该无源系统可以实现在平衡点的稳定, 从而达到镇定 PMSM 混沌运动的目的. 数值仿真结果表明, 该控制策略不仅行之有效, 对参数的不确定性具有较强的鲁棒性. 研究结果对保证具有 v/f 控制输入的 PMSM 的稳定运行有较好的参考价值.

关键词: 无源控制, 自适应率, 混沌镇定, 永磁同步电动机

PACS: 05.45.-a, 05.40.-a

1 引言

随着电力电子技术和控制技术的发展, 永磁同步电动机 (PMSM) 已在现代高性能伺服系统中得到了极为广泛的应用, PMSM 将越来越多地替代传统电机, 应用前景非常乐观, 因而对 PMSM 的研究是非常有意义的^[1]. 最近的研究表明, PMSM 传动系统在某些参数及工作条件下会呈现混沌行为^[2-5], 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. 由于这种混沌现象对 PMSM 的稳定运行非常有害, 因此有必要予以抑制. 近 10 年来, 各种不同的控制方法已被用于电机混沌系统的控制. 然而, 目前 PMSM 混沌控制的研究模型都没有考虑电动机的控制输入, 即只考虑电机系统在稳定运行一段时间后突然断电的情形. 现实中, 电动机的控制电压对电机的动力学行为有很大影响, 因此研究具有控制电压的 PMSM 混沌运动的镇定具有实际意义并有助于理论结果的工程应用.

无源控制方法是一种基于无源性理论的非线性系统的控制方法^[6,7]. 对于混沌系统而言, 可以依

据无源性理论构造反馈控制器, 使得闭环系统成为无源系统而保持稳定, 从而达到控制混沌目的. 近年来, 无源性理论在混沌系统镇定的应用研究受到人们的普遍关注. 例如, Qi^[8], Zhang 和 Qi^[9] 根据无源性理论, 首先分析了将几类混沌系统等效为无源系统的基本条件, 然后在此基础上, 设计状态反馈控制器实现最小相位混沌系统在任意平衡点上的渐近稳定, 他们的研究表明, 利用等效无源控制策略对系统中的混沌行为实行切换控制, 可以消除系统中的混沌运动, 降低系统自激振动的危害, 实现系统的快速稳定. Wang 和 Liu^[10] 利用无源系统固有的稳定特性, 构造自适应控制器, 对具有 4 涡漩混沌系统进行控制, 数值仿真结果表明了他们所采用方法的有效性. 周雒维等人提出一类无源反馈控制方法, 实现了电压模式 Buck 变换器的混沌控制, 他们首先采用数据采样方式建立了被控系统的迭代映射方程, 然后利用数值计算确定出无源反馈控制强度的调节范围, 并对比分析了系统施加控制前后的 Jacobian 矩阵特征值轨迹, 最后用仿真和实验结果证实他们所采用的控制方式可以有效实现系统混沌行为的抑制, 拓宽输入电压的稳定范围, 减

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 50937001)、国家自然科学基金项目 (批准号: 10947011, 10862001) 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: weiduqu@mailbox.gxnu.edu.cn

小电压和电流纹波^[11]. 另一方面, 自适应控制方法在含有不确定性参数系统控制中的应用研究受到人们的广泛关注. 人们通常用自适应方法来消除不确定性参数对控制器的影响^[12-16]. 当混沌系统存在不确定参数时, 可将自适应控制方法与无源控制方法相结合, 以消除系统不确定性的影响, 我们把这种控制方法称为无源自适应控制方法. 本文利用无源自适应控制方法对具有 v/f 控制输入的 PMSM 混沌运动进行镇定. 数值仿真结果表明, 该控制策略不仅行之有效, 参数的不确定性具有较强的鲁棒性. 研究结果对保证具有 v/f 控制的 PMSM 的稳定运行有较好的参考价值.

2 无源非线性系统基本概念和无源控制方法

无源性表示耗能网络的一种特性, 无源网络中的能量流向一般满足^[6,7]: 输入的能量 = 最后的能量 - 初始的能量 + 耗散的能量. 也就是说, 网络不会自己产生能量. 无源网络只是消耗能量而不产生能量, 这对于网络稳定性及动态品质研究很重要. 由无源网络可以得到无源系统的概念. 无源系统是一类考虑系统与外界有能量交换的动态系统, 而在无源网络中成立的能量流向等式对于无源系统也同样成立. 系统无源可以保持系统的内部稳定. 对于存在振荡的不稳定系统来说, 为了使得系统内部稳定, 我们可以依据无源理论来构造反馈控制器, 使得相应的闭环系统无源而保持内部稳定^[6,7].

下面我们先引出无源非线性系统概念, 然后介绍无源控制方法.

考虑仿射非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X) + g(X)u, \\ y &= h(X), \end{aligned} \quad (1)$$

其中状态变量 $X \in R^n$, 外部输入量 $u \in R^m$, 测量输出 $y \in R^m$, f, g 均为光滑的向量场, h 为光滑映射.

定义 1^[6,7] 如果存在一个实常数 w , 使得对于 $\forall t \geq 0$, 不等式

$$\int_0^t u^T(\tau)y(\tau)d\tau \geq w \quad (2)$$

成立, 或者存在 $\rho > 0$ 和一个实常数 w , 使得不等式

$$\int_0^t u^T(\tau)y(\tau)d\tau + w \geq \int_0^t \rho y^T(\tau)y(\tau)d\tau \quad (3)$$

成立, 那么系统 (1) 称为无源非线性系统. 从以上的定义可以看出, 无源非线性系统的物理意义非常明显, 即系统只能通过外部输入能源来增加能量^[17,18]. 从反方面考虑, 可以利用无源系统的这种物理特性, 通过施加外部控制来逐步减少非线性振荡系统的能量, 从而降低系统输出幅度, 实现系统的稳定.

令 $z = \vartheta(x)$, 那么 (1) 式可以转换成下面的一般形式:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= f_0(z) + p(z, y)y, \\ \dot{y} &= b(z, y) + a(z, y)u, \end{aligned} \quad (4)$$

这里 $a(z, y)$ 对任何的 (z, y) 都是非奇异的. 根据无源非线性系统概念, 可以引出下面的引理:

引理 1^[6,7] 如果系统 (1) 是最小相位系统, (4) 式将等效为无源系统并且在下面的状态反馈作用下渐近稳定于系统平衡点:

$$u = \lambda(x) + \gamma(x)v, \quad (5)$$

这里 v 是外部输入. 具体证明见参考文献 [6,7].

引理 1 表明对于一个不稳定的非线性系统, 我们可以构造 (5) 控制器, 使系统等效为无源系统, 从而实现系统在平衡点的稳定.

3 具有 v/f 控制输入 PMSM 混沌运动的无源自适应镇定

具有 v/f 控制输入的 PMSM 模型是如下系统

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -i_d + i_q\omega + u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -i_q - i_d\omega + \alpha\omega + u_q \\ \frac{d\omega}{dt} = \beta(i_q - \omega) \\ u_d = k_d\omega \\ u_q = k_q\omega \end{cases} \quad (6)$$

式中, ω, i_q 和 i_d 为状态变量, 分别表示转子机械角速度和 q, d 轴定子电流; α 和 β 为系统参数, 皆取正值. 实际 PMSM 系统中的系统参数具有不确定性, 即这些参数的大小会随温度、噪声等工作环境、条件的变化而改变. $u_q = k_q\omega$ 和 $u_d = k_d\omega$ 是 v/f 控制输入, 其中 $k_d > 0, k_q > 0$ 是控制信号的增益. 文献 [17] 结合非线性系统稳定理论和数值分析方法对系统 (6) 的动力学行为进行了充分的研究. 结果表明, 系统参数 α 和 β 具有丰富的非线性动力学

行为, 当系统参数取某些值时会呈现混沌行为, 例如图 1(a) 和 (b) 分别是参数值取 $\alpha = 20, \beta = 5$ 时电机的时间序列和混沌吸引子. 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, 所以如何镇定电机中的混沌运动是一项有意义的工作.

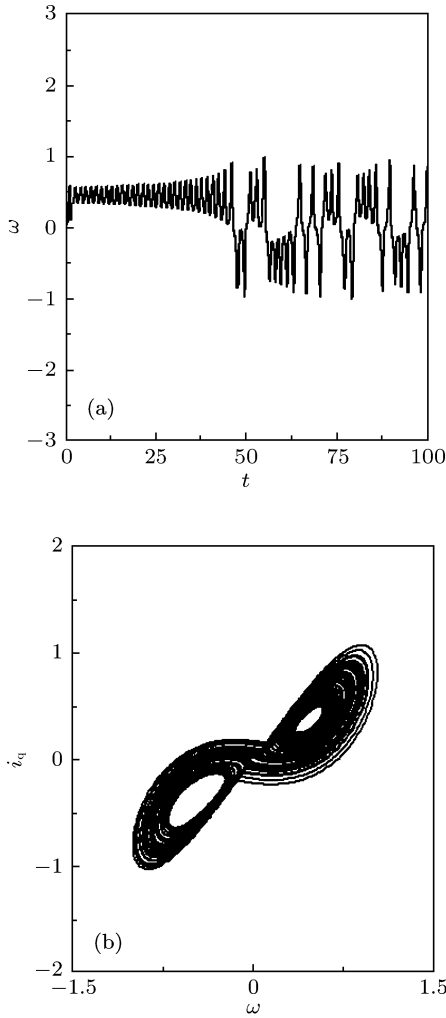


图 1 具有 v/f 控制输入的 PMSM 的时间序列和混沌吸引子 (参数值取 $\alpha = 20$ 和 $\beta = 5$)

为了镇定具有 v/f 控制输入的 PMSM 的混沌运动, 我们选择电机转速 ω 为控制目标, 系统加入控制器后表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -i_d + i_q\omega + k_d\omega, \\ \frac{di_q}{dt} = -i_q - i_d\omega + \alpha\omega + k_q\omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = \beta(i_q - \omega) + u, \\ y = \omega, \end{cases} \quad (7)$$

这里 u 是控制器, 而 y 是系统输出. 根据上面的概念, 引出我们的主要结果.

定理 1 受控系统 (7) 是最小相位系统.

证明 假设 $z_1 = i_d, z_2 = i_q$ 并考虑到 $y = \omega$, 受控系统 (7) 可以重写成 (4) 的形式:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -z_1 + z_2y + k_d y, \\ \dot{z}_2 = -z_2 - z_1y + \alpha y + k_q y, \\ \dot{y} = \beta(z_2 - y) + u, \end{cases}$$

那么 (4) 式中所给符号表述如下:

$$\begin{aligned} z &= (z_1, z_2) \\ f_0(z) &= [-z_1, -z_2]^T, \\ p(z, y) &= [z_2 + k_d, -z_1 + \alpha + k_q]^T, \\ b(z, y) &= \beta(z_2 - y), \\ a(z, y) &= 1. \end{aligned} \quad (8)$$

选择一个贮存函数:

$$V = W(z) + \frac{1}{2}y^2 + \frac{1}{2k_1}(\hat{\alpha} - \alpha)^2 + \frac{1}{2k_2}(\hat{\beta} - \beta)^2, \quad (9)$$

其中 $W(z) = \frac{1}{2}z_1^2 + z_2^2$; $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 分别是不确定参数 α 和 β 的估计值. 它们可能是常数或随时间变化的方程, k_1, k_2 是任意正常数. (4) 式的零动态系统表达如下:

$$\dot{z} = f_0(z). \quad (10)$$

考虑 (10) 式我们有

$$\frac{dW(z)}{dt} = \frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) = [z_1, z_2] [-z_1, -z_2]^T \leq 0. \quad (11)$$

由于 $W(z)$ 是 $f_0(z)$ 的 Lyapunov 函数, 所以受控系统的零动态系统是 Lyapunov 意义下的稳定, 即受控系统 (7) 是最小相位系统 [18,19]. 证毕.

定理 2 对于受控系统 (7), 如果设计的闭环自适应控制器具有如下形式

$$\begin{aligned} u &= -z_1k_d - z_2k_q - (\hat{\alpha} + \hat{\beta})z_2 + v, \\ \dot{\hat{\alpha}} &= k_1z_2y, \\ \dot{\hat{\beta}} &= k_2z_2y, \end{aligned} \quad (12)$$

那么受控系统等价一个无源系统且渐近稳定在一个给定的平衡点. 此外, 控制器能够避免不确定性参数的影响.

在 (12) 式中, v 是一外部输入信号, $\dot{\hat{\alpha}}$ 和 $\dot{\hat{\beta}}$ 是不确定参数 $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 的自适应率. 任意正标量 k_1, k_2 可以调整自适应率的性能.

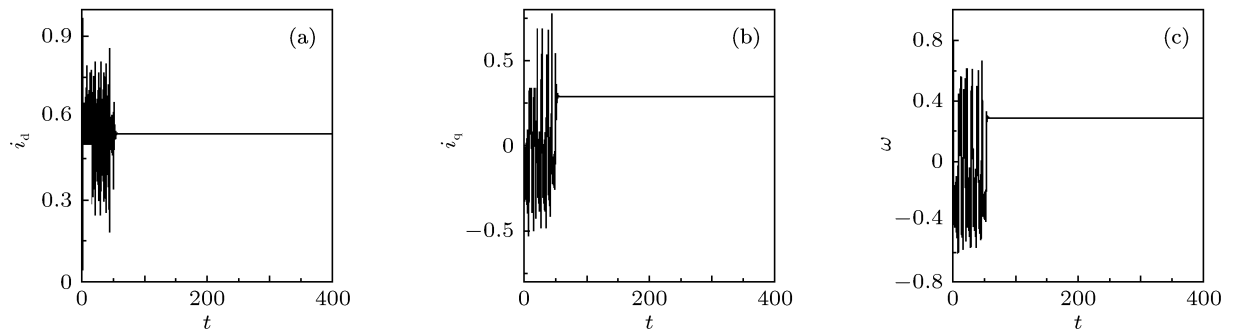


图2 具有v/f控制输入的PMSM在无源自适应镇定器作用下的动态响应曲线 (a) 状态变量 i_d 响应曲线; (b) 状态变量 i_q 响应曲线; (c) 状态变量 ω 响应曲线

证明 对(9)式沿着(7)式轨迹积分,可以得到

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{\partial W(z)}{\partial z} \dot{z} + y\dot{y} + \frac{1}{k_1}(\hat{\alpha} - \alpha)\dot{\hat{\alpha}} + \frac{1}{k_2}(\hat{\beta} - \beta)\dot{\hat{\beta}} \\ &= \frac{\partial W(z)}{\partial z} (f_0(z) + p(z, y)y) \\ &\quad + \frac{1}{k_1}(\hat{\alpha} - \alpha)\dot{\hat{\alpha}} + \frac{1}{k_2}(\hat{\beta} - \beta)\dot{\hat{\beta}} \\ &= \frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) + \frac{\partial W(z)}{\partial z} p(z, y)y \\ &\quad + [b(z, y) + a(z, y)u]y \\ &\quad + \frac{1}{k_1}(\hat{\alpha} - \alpha)\dot{\hat{\alpha}} + \frac{1}{k_2}(\hat{\beta} - \beta)\dot{\hat{\beta}}. \end{aligned} \quad (13)$$

根据定理1,受控系统(7)是最小相位系统,即 $\frac{\partial W(z)}{\partial z} f_0(z) \leq 0$,所以(13)式变成以下不等式:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &\leq \frac{\partial W(z)}{\partial z} p(z, y)y + [b(z, y) + a(z, y)u]y \\ &\quad + \frac{1}{k_1}(\hat{\alpha} - \alpha)\dot{\hat{\alpha}} + \frac{1}{k_2}(\hat{\beta} - \beta)\dot{\hat{\beta}} \\ &\leq k_d z_2 y + \alpha z_2 y + k_q z_2 y - \beta y^2 + \beta z_2 y \\ &\quad + u y + \frac{1}{k_1}(\hat{\alpha} - \alpha)\dot{\hat{\alpha}} + \frac{1}{k_2}(\hat{\beta} - \beta)\dot{\hat{\beta}}. \end{aligned} \quad (14)$$

把(12)代入不等式(14),我们得到:

$$\frac{dV}{dt} \leq v y - \beta y^2. \quad (15)$$

假设系统的初始状态为 V_0 ,并对不等式(15)两边进行关于时间 t 的积分,可以得到:

$$V - V_0 \leq \int_0^T v(\tau)y(\tau)d\tau - \int_0^T \beta y^2(\tau)d\tau. \quad (16)$$

因为 $V \geq 0$,令 $w = V_0$,我们有

$$\begin{aligned} \int_0^T v(\tau)y(\tau)d\tau + w &\geq \int_0^T \beta y^2(\tau)d\tau + V \\ &\geq \int_0^T \beta y^2(\tau)d\tau, \end{aligned} \quad (17)$$

这个不等式满足定义1,根据引理1,受控系统(7)是无源的,并且在控制器(12)的作用下渐近稳定

在一个给定的平衡点.另一方面,由于有自适应率估算不确定参数,所以控制器能够避免不确定性参数 α 和 β 的影响.证毕.

下面我们通过数值模拟验证控制器的有效性.v/f控制输入信号的增益取 $k_q = 0.3$ 和 $k_d = 0.1$. α 和 β 参数取值与第三节一致,但假设在施加控制前并不知道参数的取值.第50s加入控制 u ,图2和图3分别为控制系数取 $k_1 = 0.5, k_2 = 1.5$ 时的控制结果和参数估算曲线,由图可知系统混沌振荡很快得到镇定到平衡点,并且能正确估算不确定参数.

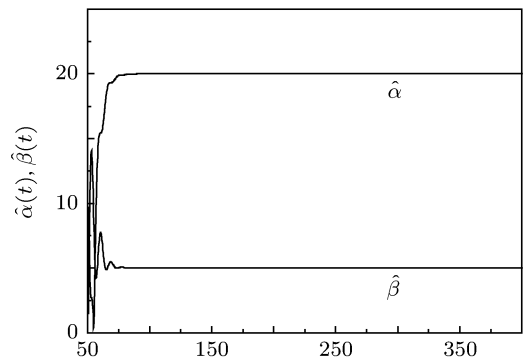


图3 参数估算曲线

4 结论

当前,PMSM混沌控制的研究模型都没有考虑电动机的控制输入.现实中,电动机的输入电压对电机的动力学行为有很大影响,因此研究具有控制输入电压的PMSM混沌运动的镇定具有实际意义并有助于理论结果的工程应用.本文将无源控制方法与自适应控制方法相结合对具有v/f控制输入的PMSM的混沌振荡进行镇定,是非线性控制方法应用于实际工程系统的有益的尝试.该控制方法

直接简便,并具有明确的物理意义,易于工程实现. 由于控制器中引入参数自适应律,因此所设计的控

制器具有避免系统不确定性参数影响的优点. 最后的数值仿真表明了该控制策略的正确性和有效性.

-
- [1] Zhang B, Li Z, Mao Z Y 2001 *Proceedings of the CSEE* **21** 40 (in Chinese) [张波, 李忠, 毛宗源 2001 中国电机工程学报 **21** 40]
- [2] Wei D Q, Zhang B, Qiu D Y, Luo X S 2010 *IEEE. Trans. Circ. Syst.-II* **57** 456
- [3] Wei D Q, Zhang B, Qiu D Y, Luo X S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6026 (in Chinese) [韦笃取, 张波, 丘东元, 罗晓曙 2009 物理学报 **58** 6026]
- [4] Zhang B, Li Z, Mao Z Y 2001 *Control Theor. Appl.* (in Chinese) (in Chinese) [张波, 李忠, 毛宗源 2001 控制理论与应用 **18** 589]
- [5] Wei D Q, Zhang B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1399
- [6] Willems J C 1972 *Arch. Rational Mech. Anal.* **45** 321
- [7] Byrnes C I, Isidori A, Willems J C 1991 *IEEE Trans. on Auto. Contr.* **36** 1228
- [8] Qi D L 2006 *Chin. Phys.* **15** 1715
- [9] Yang J, Qi D L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 020508
- [10] Wang F Q, Liu C X 2007 *Chin. Phys.* **16** 946
- [11] Lu W G, Zhou L W, Luo Q M, Du X 2007 *Trans. of China Electr. Soc.* **22** 98 (in Chinese) [卢伟国, 周维维, 罗全明, 杜雄 2007 电工技术学报 **22** 98]
- [12] Wei D Q, Luo X S, Wang B H, Fang J Q 2007 *Phys. Lett. A* **363** 71
- [13] Wei D Q, Luo X S, 2007 *Chin. Phys.* **16** 3244
- [14] Si G Q, Cao H, Zhang Y B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 010509
- [15] Wei W, Li D H, Wang J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 040507
- [16] Ma J, Su W T, Gao J Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1554 (in Chinese) [马军, 苏文涛, 高加振 2010 物理学报 **59** 1554]
- [17] Hemati N, Kwatny H 1993 *Proc. 32nd Conf. Decision and Control.* San Antonio, Texas, December, 1993 p475
- [18] Lin W 1995 *Syst. Contr. Lett.* **25** 41
- [19] Wen Y 1999 *IEEE. Trans. Circ. Syst. I* **46** 876

Robust suppressing chaos in permanent magnet synchronous motor with v/f control based on passivity theory*

Wei Du-Qu[†] Zhang Bo

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(Received 13 April 2011; revised manuscript received 26 May 2011)

Abstract

A passivity-based adaptive control law is presented, which transforms the permanent magnet synchronous motor (PMSM) with v/f controller into an equivalent passive system. It is proved that the equivalent system can be asymptotically stabilized at different equilibrium points without any influence of undeterministic parameters. Simulation results show the proposed control law is very effective and robust against the uncertainty in system parameters.

Keywords: passive control, adaptive control law, chaos, permanent magnet synchronous motor

PACS: 05.45.-a, 05.40.-a

* Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50937001), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10947011, 10862001), and the Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 8251064101000014).

[†] E-mail: weiduqu@mailbox.gxnu.edu.cn