

基于参数共振微扰法的直流电机混沌运动控制

占萌萌,周宇飞*,陈军宁

(安徽大学 电子信息工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:针对直流电机在某些参数和控制方式下会出现混沌与分岔运动,导致电机系统的损耗增加和运行的无规现象,通过建立精确状态方程模型和离散迭代非线性映射,对永磁同步电机(PMSM)的混沌现象进行了分析,并且采用参数共振微扰法对其进行了控制;选择了一个对直流电机系统影响较大、且易于改变的参数转速,再加入一个微小的正弦扰动信号,实现了系统的混沌控制。理论分析和数值仿真结果表明:建立精确状态方程模型和离散迭代非线性映射这两种方法下分析的电机系统在混沌状态下的分叉情况基本一致,且通过对电机中参数转速以特定的频率进行扰动,可以将系统稳定在某一周期轨道上;同时适当的参数扰动能减弱甚至消除系统中的混沌运动。

关键词:参数共振微扰法;直流电机;混沌控制;离散映射

中图分类号: TM331; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1299-04

Chaotic motion control in DC motor based on resonant parametric perturbation

ZHAN Meng-meng, ZHOU Yu-fei, CHEN Jun-ning

(School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of chaos and bifurcation movement under certain parameters and control for DC motor, which will lead to the loss of the motor system and run random, through establishing the exact equation of state models and discretizing iterative nonlinear mapping, Permanent magnet synchronous motor(PMSM) chaotic phenomena was analyzed, and it was controlled by the method of resonant parametric perturbation. Firstly, a parameter of speed was selected, which is greater impacting on the DC motor system, and easy to change. Then, a small sinusoidal perturbation signal was joined to achieve chaos control system. The theoretical analysis and numerical simulation results indicate that the bifurcation of motor system in the chaotic state is basically the same in two methods of establishing the accurate equation of state model and discrete iterative nonlinear mapping, and by the parameters disturbance of the motor speed in a specific frequency, the system can be stabilized in a periodic orbit. That is the chaotic motion of the system can be weakened or even eliminated in appropriate parameter perturbation.

Key words: resonant parametric perturbation; DC motor; chaos control; discrete map

0 引 言

20 世纪 90 年代,在电机驱动系统中发现存在混沌现象,之后关于电机驱动中混沌现象的研究便随之兴起。长期以来,电机驱动系统混沌工作状态导致的微小波动常被误认为是噪声,而较大幅度的波动则被误认为是电机系统的一种不稳定运行。当电机驱动中

存在这种长期不可预测的无规则、非线性现象时,将会导致电机系统的损耗增加和运行的无规则,因此混沌常常被认为是有害的运行状态。此时,有效地抑制并稳定混沌行为将具有重要的意义。

目前已有多种控制方法被提出来抑制并稳定混沌行为,如 OGY 方法、延时反馈方法、比例反馈方法、非反馈方法、非线性控制方法、自适应控制方法、神经元

收稿日期: 2012-04-27

作者简介: 占萌萌(1986-),女,安徽安庆人,主要从事非线性电路与系统方面的研究。E-mail: 117508377@qq.com

通信联系人: 周宇飞,男,教授,博士生导师。E-mail: zhouyf@ahu.edu.cn

网络控制方法和模糊控制方法等^[1]。这些控制方法都能有效地控制电机中的非线性现象,但也都有不足之处,例如延时反馈方法就很难确定控制的周期目标轨道与延迟时间的关系,而且不容易控制到预知的轨道。

参数共振微扰法是一种非反馈的混沌控制方法^[2],它是通过给参数以特定频率的扰动来抑制混沌运动的,将系统的混沌运动状态转变到规则运动态。参数扰动通常能使系统离开原来的周期轨道,相反,适当频率的参数扰动也可能使系统稳定在某一周期轨道上。

因此,适当的参数扰动也应能用于减弱甚至消除系统中的混沌运动。为了研究更优的控制方法,本研究利用参数共振微扰法来控制电机驱动中出现的混沌现象。

1 电压模式控制电机系统

1.1 电机系统工作原理

直流电机的驱动已广泛应用到电机拖动当中。最早的直流电机驱动系统的结构是由一串与电机串联或者并联的电阻组成。电机的电压等于电池的电压减去流经电阻的电压降,能够通过控制电流接触器切掉一部分电阻来增加。伴随着能量功率的电子控制技术的

快速发展,直流斩波电路已经被广泛应用到电机拖动当中。其具有体积小、重量轻、效率高等优点,并且有很高的可控性,尤其在为达到要求速度方面,可以提供平稳的加速度。一个降压直流斩波器的基本电路如图 1 所示,该斩波器用于直流电机驱动的速度控制。

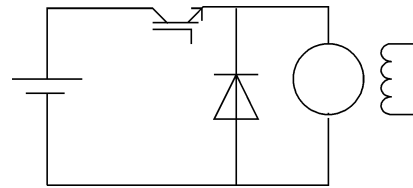


图 1 降压直流斩波控制电路

直流电机的主要特点就是其技术的成熟和简单。由于气隙磁通 Φ 和电枢电流 I_a 可以被独立地控制,使得电机的速度 ω_m 和转矩 T 可以被很容易地控制,从而使得电机的控制技术变得简单^[3]。

1.2 精确状态方程模型

电压模式控制的直流斩波器驱动的永磁直流电机驱动系统如图 2(a) 所示,其工作在连续导通模式^[4]。相应的等效电路模型如图 2(b) 所示,其中,电机的转速 ω 是由恒定频率的脉冲调制(PWM)信号控制的。

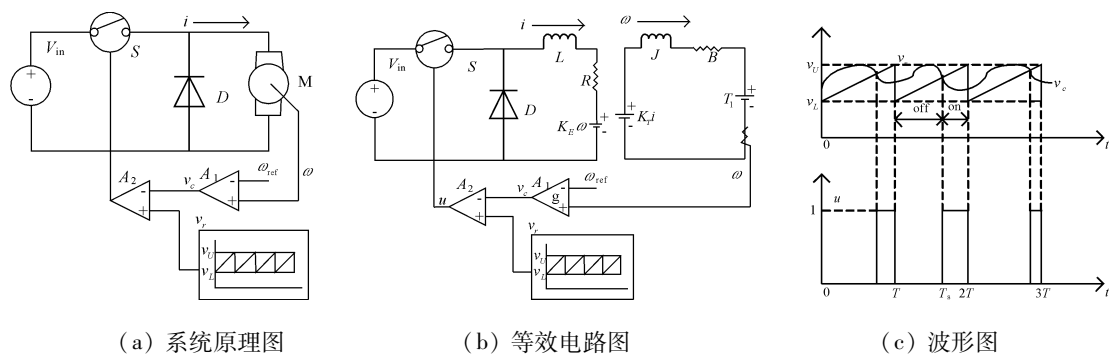


图 2 电压模式控制的直流驱动系统原理图、等效电路图及波形图

考虑到放大器 A_1 的放大倍数为 g , 控制信号 v_c 可以表示为:

$$v_c(t) = g[\omega(t) - \omega_{ref}] \quad (1)$$

式中: $\omega(t)$, ω_{ref} —实时转速和参考转速。

锯齿波电压 v_r 为:

$$v_r(t) = v_L + (v_U - v_L)(t \bmod T) \quad (2)$$

式中: v_L , v_U —锯齿波信号的低值电压和高值电压; T —锯齿波信号的周期,即开关周期; v_c , v_r —比较器 A_2 的输入。

其输出就是用来控制开关的脉冲调制信号 u , 即(波形图如图 2(c) 所示):

当 $u=0$ 时, $v_c \geq v_r$, 开关 S 断开, 则二极管 D 承受

正向电压而导通;

当 $u=1$ 时, $v_c < v_r$, 开关 S 导通, 则二极管 D 承受反向电压而截止。

则根据开关 S 的两个不同状态, 有两种主电路拓扑, 因此系统的状态方程也分为两个阶段:

(1) 阶段 1 ($v_c \geq v_r$, $u=0$), 则:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B/J & K_T/J \\ -K_E/L & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -T_1/J \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2) 阶段 2 ($v_c < v_r$, $u=1$), 则:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B/J & K_T/J \\ -K_E/L & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -T_1/J \\ V_{in}/L \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $i(t)$ —电枢电流, R —电阻, L —电感, V_{in} —直流

供电电压, K_E —反电势系数, K_T —转矩系数, B —粘滞系数, J —转动惯量, T_1 —负载转矩。

由此,开关的两个不同状态对应的状态方程可统一表达为:

$$\dot{x} = A_{\text{on,off}} \cdot x + B_{\text{on,off}} \quad (5)$$

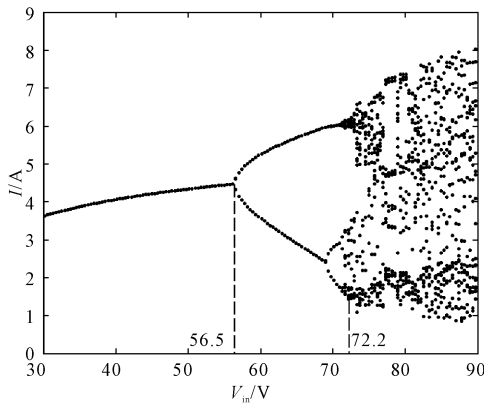
式中: x —状态变量, $x = [\omega(t), i(t)]^T$; $A_{\text{on,off}}$, $B_{\text{on,off}}$ —系数矩阵。

且:

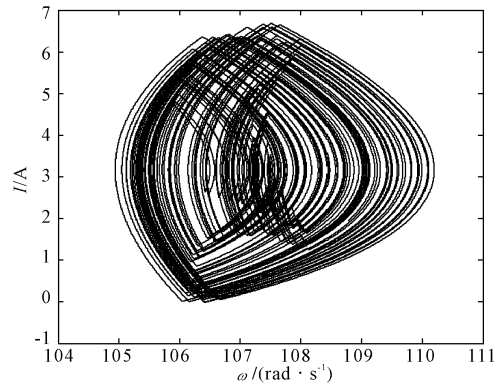
$$A_{\text{on}} = A_{\text{off}} = \begin{bmatrix} -B/J & K_T/J \\ -K_E/L & -R/L \end{bmatrix}, B_{\text{on}} = \begin{bmatrix} -T_1/(JV_{\text{in}}) \\ u/L \end{bmatrix} \Big|_{u=1}, B_{\text{off}} = \begin{bmatrix} -T_1/(JV_{\text{in}}) \\ u/L \end{bmatrix} \Big|_{u=0}。$$

利用 Matlab 的 Simulink 软件可建立式(5)的精确

仿真模型。本研究取电路参数为: $B = 0.000275 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s})$, $J = 0.000557 \text{ N} \cdot \text{m}/(\text{rad}/\text{s}^2)$, $K_T = 0.1324 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, $K_E = 0.1356 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$, $R = 2.9 \Omega$, $L = 53.7 \text{ mH}$, $T_1 = 0.39 \text{ N} \cdot \text{m}$, $v_1 = 0 \text{ V}$, $v_u = 2.2 \text{ V}$, $T = 10 \text{ ms}$, $\omega_{\text{ref}} = 105 \text{ rad}/\text{s}$, $g = 0.7 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$, $V_{\text{in}} = 20 \sim 90 \text{ V}$ 。本研究在每个开关导通时刻获得系统的电路状态,即以频闪映射来构造 Poincare 截面,通过对精确 Simulink 模型进行仿真,可以得到系统以电源电压 V_{in} 为参数的分岔图如图 3(a)所示,其中存在明显的倍周期分岔过程,系统状态在 $V_{\text{in}} \approx 56.5 \text{ V}$ 处发生分岔,并最终在 $V_{\text{in}} \approx 72.2 \text{ V}$ 后进入混沌, $V_{\text{in}} \approx 75 \text{ V}$ 时系统工作状态如图 3(b)所示。



(a) 以 V_{in} 为参数的分岔图



(b) 混沌工作状态

图 3 系统状态及其分岔

2 参数共振微扰法控制方法

通常研究者在工程实际中选一个对系统影响较大,并且易于改变的参数作为激励参数,基于机电系统本研究选择参考转速为激励参数,即对其加入一个微小的正弦扰动信号,来控制电路中的混沌现象。则参考转速为:

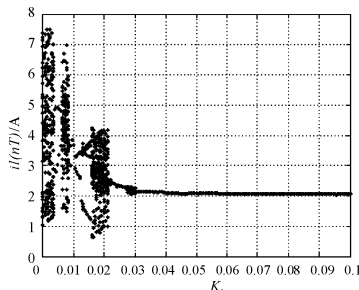
$$\omega_{\text{ref}} \rightarrow \omega_{\text{ref}} [1 + k_1 \sin(2\pi f_o t + \theta)] \quad (6)$$

式中: k_1 —微扰信号的强度, θ —微扰信号初相。

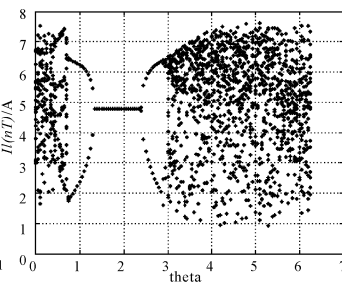
微扰信号频率等于开关频率 ($f_o = f = 1/T$), 以

构成共振响应。

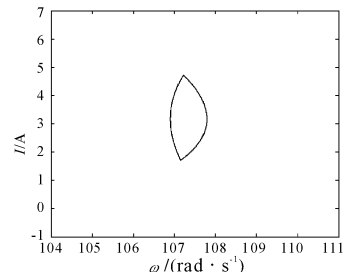
此时,微扰信号有两个可调的参数 k_1 和 θ ,为缩减参数范围,本研究先考虑 $\theta = 0$,对应不同 k_1 时的情况。对于如图 3(b)所示的混沌工作状态,控制结果如图 4(a)所示,可见当 $k_1 \geq 0.03$ 时,系统受控稳定。为了进一步确定最优相位 θ 的选择,本研究取较小的扰动强度做进一步分析实验,当取 $k_1 = 0.035$,对应不同 $\theta \in [0, 2\pi]$ 时的电路运行状态如图 4(b)所示,可见 θ 约为 2 时,系统最为稳定,系统所需的扰动强度也必然最小,其控制结果一周周期轨道如图 4(c)所示。



(a) θ 一定, k_1 对电路的影响



(b) k_1 一定, θ 对电路的影响



(c) 受控的周期1

图 4 外加扰动对电路工作状态的影响

3 离散迭代非线性映射模型

基于状态方程的模型的建立虽然不需要对电路系统进行简化和近似,所建立的方程是电路系统的精确模型,但是在这种模型下,难以分析系统的动力学行为,如周期轨道的稳定性等,且计算量巨大。本研究考虑建立其离散迭代映射模型^[5-12],并通过特征值的计算来进行电路的稳定性分析。

本研究采用频闪映射的方法,将电路状态变量离散化,即每个 nT 时刻进行采样,记:

$$x_n = x(nT) = [\omega(nT), i(nT)]^T, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

电机的运行波形如图 2(c) 所示,在一个开关周期中(如 $T \sim 2T$),电机将经历 2.2 节中的两种开关状态:

(1) $t \in [nT, nT + T_s]$, 开关 S 处于“截止(off)状态”,对应状态方程式(3),该状态结束时电机状态变量 x_m 为:

$$x_m = f_{\text{off}}(x_n, \bar{d}_n) = N_{\text{off}}(\bar{d}_n)x_n + M_{\text{off}}(\bar{d}_n)V_{\text{in}} \quad (8)$$

(2) $t \in [nT + T_s, (n+1)T]$, 开关 S 处于“导通(on)状态”,对应状态方程式(4),该相位结束时电机状态变量 x_{n+1} 为:

$$x_{n+1} = f(x_m, \bar{d}_n) = N_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)x_m + M_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)V_{\text{in}} \quad (9)$$

综合式(8,9)可离散迭代映射:

$$x_{n+1} = f(x_n, \bar{d}_n) = N_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)N_{\text{off}}(\bar{d}_n)x_n + [N_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)M_{\text{off}}(\bar{d}_n) + M_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)]V_{\text{in}} \quad (10)$$

其中:

$$\bar{d}_n = 1 - d_n$$

式中: d_n — 占空比。

此外,还需要推导出占空比函数,本研究从式(1,2)出发,找出开关切换瞬间和状态变量之间的关系。可定义开关函数 u 为:

$$u(\bar{d}_n) = v_c(\bar{d}_n T_s) - v_r(\bar{d}_n T) \quad (11)$$

因此,当 $u(\bar{d}_n) < 0$ 时开关开通,否则开关截止。

即 $u(\bar{d}_n) = 0$ 定义了开关切换瞬间 T_s 。

这样就可以利用得到的离散迭代映射式(10)来研究系统的稳定性,例如通过计算平衡点附近的特征值,可以分析电路参数变化时系统规则-周期状态的失稳过程。首先定义函数的雅克比矩阵为 J_a , 计算如下:

$$J_a(x_n, \bar{d}_n) = \frac{\partial x_{n+1}}{\partial x_n} = \frac{\partial f}{\partial x_n} - \frac{\partial f}{\partial \bar{d}_n} \left(\frac{\partial s}{\partial \bar{d}_n} \right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x_n} \quad (12)$$

其中:

$$\frac{\partial f}{\partial x_n} = N_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)N_{\text{off}}(\bar{d}_n)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{d}_n} = [-A_{\text{on}}TN_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)N_{\text{off}}(\bar{d}_n) + N_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)A_{\text{off}}TN_{\text{off}}(\bar{d}_n)]x_n + [-A_{\text{on}}TN_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)M_{\text{off}}(\bar{d}_n) + N_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)N_{\text{off}}(\bar{d}_n)B_{\text{off}}T - N_{\text{on}}(1 - \bar{d}_n)B_{\text{on}}T]V_{\text{in}}$$

$$\frac{\partial s}{\partial \bar{d}_n} = [A \quad 0]N_{\text{off}}(\bar{d}_n)(A_{\text{off}}x_n + B_{\text{off}}V_{\text{in}})T - (v_U - v_L)$$

$$\frac{\partial s}{\partial x_n} = [A \quad 0]N_{\text{off}}(\bar{d}_n)$$

然后,通过下式的计算,可以得到平衡点上的特征值 λ :

$$\det[\lambda I - J_a(x_n, \bar{d}_n)]_{x_n=x_Q, \bar{d}_n=\bar{d}_Q} = 0 \quad (13)$$

式中: $x_Q, \bar{d}_Q$ — 对应平衡点的数值。

通过计算,可得对应直流供电电压 V_{in} 的特征根轨迹如图 5 所示。

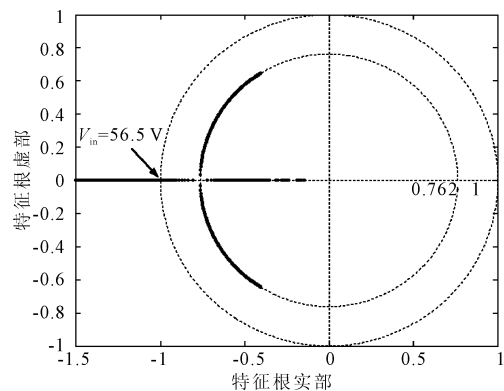


图 5 直流供电电压 V_{in} 的特征根轨迹

当 V_{in} 很小时,产生模为 0.762 的两个共轭特征根,随着 V_{in} 的增大,两个共轭复数特征根将沿着半径为 0.762 的圆向横轴靠拢,最终在横轴相遇,转变为实数特征根。然后在实轴上一左一右分离,当 $V_{\text{in}} = 56.5 \text{ V}$ 时,左边的特征根越出单位圆,右边的特征根向圆心靠拢,表明电路的一周期状态失稳,进入稳定的周期二,理论分析与图 3 中的分岔结构是完全一致的。

4 结束语

本研究通过建立精确状态方程模型和离散迭代非线性映射这两种方法,对永磁同步电机的混沌现象进

(下转第 1328 页)

正常工作,有效解决了母线取能存在的技术难点,并通过仿真实验验证了以分压电容与 PT 并联作为辅助电源对 EVT 的精度与运行可靠性未造成影响。

参考文献 (References):

- [1] 李岩松,郭志忠,杨以涵,等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(22):21-26.
- [2] 李芙英,纪 昆,臧金奎. 基于 DSP 的光电式电流互感器的实用化设计[J]. 电网技术,2002,26(6):46-48.
- [3] 段雄英,邹积岩,张可畏. 电压/电流组合型电子式互感器的研究[J]. 电工技术杂志,2002,21(5):9-12.
- [4] DONALDSON E F, GIBSON J R, JONES G R, et al. Hybrid optical current transformer with optical and power-line energization[J]. **IEEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution**,2002,147(5):304-309.
- [5] 钱 政. 有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J]. 高压电器,2004,40(2):135-138.
- [6] 张 曦,张庆伟,张源斌. 混合式 OCT 高压侧电路的供电方式[J]. 高电压技术,2002,28(12):14-15.
- [7] 周新启,刘会金,郑 莎. 混合式光电电流互感器高压侧的电源方案研究[J]. 继电器,2005,33(18):71-74.

- [8] 刘 丰,高迎霞,毕卫红. 电子式电流互感器高压侧供能方案的研究[J]. 高电压技术,2007,33(7):72-75.
- [9] 唐旭晖,完保娟,张景超,等. 光电电流互感器高压端供能电源的设计[J]. 高压电器,2009,45(5):123-125.
- [10] 张兴旺,陈小玲,郑 孜. 有源光电式电流互感器高压侧供电方案的研究[J]. 南昌工程学院学报,2008,27(3):42-44.
- [11] 段雄英,廖敏夫,邹积岩. 基于电容分压器的电子式电压互感器的研究[J]. 高电压技术,2003,29(1):50-52.
- [12] 时德钢,刘 晔,胡光辉,等. 一种基于电容分压的电子式电压互感器[J]. 电力电容器,2002,10(4):1-3.
- [13] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 3 版. 北京:中国电力出版社,1994.
- [14] 胡 彬,周有庆,彭红海. 电子式电流互感器高压侧电源的研究与实现[J]. 电气应用,2006,25(5):99-102.
- [15] 任晓东,陈树勇,姜 涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术,2008,32(18):67-71.
- [16] 汤蕴缪,史 乃. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [17] 李 鹏,张俊民,李 航. 变电站 PT 二次计量系统过电压保护的研究[J]. 检测技术,2007,26(5):97-101.

[编辑:李 辉]

(上接第 1302 页)

行了分析,并且对其采用参数共振微扰法进行控制。笔者通过对电机中参数 ω_{ref} 以特定的频率进行扰动,把系统的混沌运动状态转变到规则运动状态,在反复试验中得到适当的微扰动信号参数,使系统稳定在某一周期轨道上,最后得到结论,即:适当的参数扰动能减弱甚至消除系统中的混沌运动。

参考文献 (References):

- [1] 邹国棠,王 政,程 明. 混沌电机驱动及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 周宇飞,陈军宁,谢知刚,等. 参数共振微扰法在 Boost 变换器混沌控制中的实现及其优化[J]. 物理学报,2004,53(11):3676-3683.
- [3] 吴红星. 电机驱动与控制专用集成电路及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [4] 韦笃取,罗晓曙,方锦清,等. 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.
- [5] 汪莉丽,周宇飞,陈军宁,等. DC-DC 开关变换器的动力学

模型及其分析方法研究[J]. 电测与仪表,2006,43(5):51-55.

- [6] 殷培强,俞 力,南余荣,等. 基于分段李雅普诺夫函数的永磁同步电机混沌系统非脆弱模糊控制[J]. 中国机电工程学报,2006,26(24):143-147.
- [7] 罗佑新. 永磁同步电机混沌运动的电流变化率反馈控制[J]. 电机系统及其自动化学报,2006,18(6):22-25.
- [8] CHAU K T, WANG Z. Design of permanent magnets to chaoticize doubly salient PM motors for electric compaction[J]. **Journal of Applied Physics**,2006,99(8):1-3.
- [9] CHEN J H, CHAU K T, CHAN C C. Chaos in voltage-mode controlled DC drive systems[J]. **International Journal of Electronics**,1999,88(7):857-874.
- [10] [美] KHALIL H K. 非线性系统[M]. 3 版. 朱义胜,董辉,李作洲,等. 译. 北京:电子工业出版社,2005.
- [11] 郝柏林. 从抛物线谈起一混沌动力学引论[M]. 上海:上海科技教育出版社,1993.

[编辑:张 翔]