

永磁同步电机的自适应反步滑模变结构的混沌控制

范本正¹, 李钟慎²

(1. 华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021; 2. 华侨大学科研处, 福建 泉州 362021)

摘要: 永磁同步电机的动力学特性表明在一定的条件下 PMSM 会呈现混沌特性行为. 为了控制不良的混沌振动, 设计了一个基于自适应反步法的滑模变结构非线性控制器. Matlab 数字仿真表明, 基于自适应反步法的滑模变结构控制器具有健全的控制性能, 它能够消除混沌现象, 并能把系统的跟踪误差和参数变化迅速地以指数规律收敛到零, 使得系统具有较强的抗干扰性.

关键词: 永磁同步电机; 反步法; 滑模变结构; 自适应控制

中图分类号: TP368

文献标识码: A

Chaotic control of PMSM system with adaptive backstepping sliding mode law

FAN Ben - zheng¹, LI Zhong - shen²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China;
2. Scientific Research Centre, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract: The dynamics of a permanent magnet synchronous machine (PMSM) shows that under certain conditions, the PMSM is experiencing chaotic behavior. To control these undesirable chaotic oscillations, a nonlinear controller based on the adaptive backstepping sliding mode law was designed. The result of simulation demonstrated that the sliding mode controller based on the adaptive backstepping had healthy control performance and could eliminate the undesirable chaotic oscillations. The tracking error and parameters deviation can be eliminated exponentially, which made this system extremely robust to disturbance.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; backstepping; sliding mode; adaptive control

1 引言

随着混沌学研究的深入, 人们发现电机传动系统中的不规则运动与混沌现象具有相似之处, 表现在对参数和初始条件的敏感依赖性、运动轨迹的不可预测性, 不存在固定的周期轨道等方面. 这种相似性激发了人们对电机传动系统中混沌现象的研究和认识的热情. 文献 [1] - [3] 研究了永磁同步电机中的混沌现象, 给出了适合分析混沌运动的永磁同步电机模型.

诸如分形和混沌非线性理论已经广泛用在研究非线性系统的稳定性上^[4], 且已经被许多学者用于研究永磁同步电机了. Hemati 等^[5]运用混沌理论研究了无刷直流电机的动力学特性. Hemati 等^[6]和 Park 等^[7]用分形理论研究了 PMSM 的动力学特性. 这些研究显示上述电机都经历了无序、混乱的振荡, 这些不良的混沌振荡需要消除. 至今已有很多学者介绍了不同类型的控制器. 文献 [8] - [9] 运用反步递归的非线性理论设计了非线性控制器消除混沌现象. Yau H T^[10]运用滑模变结构控制不确定系统的混沌现象.

滑模变结构控制 (SMC) 提供了另一种有效解决不确定混沌系统的方法. 但是, 它的前提条件是假设控制方法能够被用在处理无限快速转换的问题上. 实际上这是不可能的, 由于转换存在有限的时间延迟, 造成了该方法运用在实际系统中的局限性. 这种非理想的转换将会导致一种无法预测的现象——抖动,

收稿日期: 2008 - 06 - 13

作者简介: 范本正 (1979 -), 男, 硕士研究生. 通讯联系人: 李钟慎, 副教授.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (E0710018)

会恶化系统的性能, 也会造成机械装置的摩擦. 为了克服抖动现象, 引进了扩展系统的概念, 它已经成功地运用到控制混沌和实际的被控对象^[11]上. 反步法是最流行的非线性控制设计的方法, 能产生一个全局渐近稳定控制律来镇定混沌系统^[12].

2 PM SM 系统的反步法设计

2.1 PM SM 系统带有外部干扰 的标准化形式

以张波等人提出的永磁同步电机混沌现象动力学模型^[1-2]为基础, 来控制该类电机中的混沌现象. 经过一系列的变换后得到带有外部干扰 d 的 PM SM 混沌系统:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{i}}_d = (\tilde{i}_d - \tilde{i}_d^*) \\ \dot{\tilde{i}}_q = -\tilde{i}_d - \tilde{i}_q + \tilde{i}_q^* + u + d \\ \dot{\tilde{i}} = -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为控制输入; d 是外界干扰, 且 $|d| < 1$. 式 (1) 表明了 \tilde{i}_d 是为系统的内在动力学特性, 只要 \tilde{i}_q 和 \tilde{i} 稳定到特定点时 \tilde{i}_d 也会稳定. 假设控制输入 $u = u_1 + u_2$, 并且 $u_1 = \tilde{i}_d^* - \tilde{i}_d$, 可以得到一个减弱的系统, 为了推出积分类型的反步滑模变结构控制律, 系统 (1) 转变成下面的形式:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{i}}_d = (\tilde{i}_d - \tilde{i}_d^*) \\ \dot{\tilde{i}}_q = \tilde{i}_d \\ \dot{\tilde{i}} = -\tilde{i}_d + \tilde{i}_q - \tilde{i}_d^* + u_2 + d \end{cases} \quad (2)$$

定义:
$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_c \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{i}_d \end{bmatrix}^T = T^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{i} \\ \tilde{i}_q \\ \tilde{i}_d \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

式中:
$$T = \begin{bmatrix} \hat{\alpha} & 0 & 0 \\ \hat{\alpha} & 1 & 0 \\ \hat{\alpha} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

此时, 动力方程组 (2) 转换为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_c \\ \dot{\tilde{i}}_{qc} \\ \dot{\tilde{i}}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\alpha} & 0 \\ 0 & \hat{\alpha} & 1 \\ 0 & (\hat{\alpha} + 1) - \hat{\alpha}(1 + \hat{\alpha}) & -(\hat{\alpha} + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_c \\ \tilde{i}_{qc} \\ \tilde{i}_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (u_2 + d) \quad (5)$$

式中: $\hat{\alpha} = \alpha + \tilde{\alpha}$, $\hat{\alpha}$ 是虚拟数值, $\tilde{\alpha}$ 不确定参数.

控制的任务是强迫系统跟踪 n 维空间期望向量 $X_d(t)$, 在 $[t_0, \infty)$ 是连续的. 定义跟踪误差: $e(t) = X_d(t) - X(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)]$. 在本论文中控制的目标是能够把系统控制到任何给定的点或跟踪任何目标轨道, 设计了一个完整的基于反步法的滑模变结构控制律. 跟踪误差满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} X_d(t) - X(t) = 0$, 其中 $\|\cdot\|$ 是欧几里德范式.

把式 (5) 转化为误差的方程组:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 + \tilde{\alpha} \\ \dot{e}_2 = e_3 + \tilde{\alpha}(x_{2dc} - e_2) \\ \dot{e}_3 = [(\hat{\alpha} + 1) - \hat{\alpha}(1 + \hat{\alpha})] e_2 - (\hat{\alpha} + 1) e_3 + \tilde{\alpha} - \dot{u}_2 - \dot{d} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\tilde{\alpha} = (e_2 - x_{2dc}) / \hat{\alpha}$, $\tilde{\alpha} = [(\hat{\alpha} + 1) - \hat{\alpha}(1 + \hat{\alpha})] x_{2dc} + (\hat{\alpha} + 1) x_{3dc} + \dot{x}_{3dc}$, $|\tilde{\alpha}| \ll 1$, $X_{dc} = [x_{1dc} \ x_{2dc} \ x_{3dc}]^T$ 是转换后期望向量, 还可以是, $X_{dc} = T^{-1} X_d$.

2.2 自适应反步滑模变结构控制器设计

反步法设计运用到式 (6), 设计过程分为三步.

1) 从式 (6) 中把系统状态变量 e_2 作为一个独立的输入量, 并设

$$e_{2c} = \phi_1(e_{1c}) = -k_1 e_{1c} \quad (k_1 > 0) \tag{7}$$

式中: $\phi(e_{1c})$ 定义为子系统 (6) 第一式的期望虚拟稳定法则. 选择一个 Lyapunov 函数 $V_1 = e_{1c}^2/2$, 此时它的微分式子是:

$$\dot{V}_1 = e_{1c} \dot{e}_{1c} = e_{1c} [\phi_1(e_{1c}) + \tilde{\mu}] = -k_1 e_{1c}^2 + \tilde{\mu} e_{1c} \tag{8}$$

如果 $x_{2dc} = \dot{x}_{1dc} = 0$, 则式 (8) 转变为 $\dot{V}_1 = -k_1 (1 + \tilde{\mu}/\mu) e_{1c}^2 < 0$, 表明了在没有自适应律的作用下 e_{1c} 能够渐近收敛, 甚至存在不确定量 $\tilde{\mu}$ 时. 但是, 对于跟踪问题, 由于式 (8) 存在不确定项 $\tilde{\mu} e_{1c}$ 而不能渐近稳定. 为了克服这个问题, 下面介绍一个自适应律. 设

$$\dot{\mu} = \mu e_{1c} \tag{9}$$

式中: μ 是自适应增益, 它与参数估计的收敛性有关. 此时, 选择 Lyapunov 函数为:

$$V_1 = e_{1c}^2/2 + \tilde{\mu}^2/2\mu \tag{10}$$

此时它的微分式子是:

$$\dot{V}_1 = e_{1c} \dot{e}_{1c} + \tilde{\mu} \dot{\tilde{\mu}}/\mu = e_{1c} (\phi_1(e_{1c}) + \tilde{\mu}) + \tilde{\mu} (-\mu e_{1c})/\mu = -k_1 e_{1c}^2 \tag{11}$$

从式 (10) 和式 (11) 得出 $V_1(t) < V_1(0)$, 因此 e_{1c} 和 $\tilde{\mu}$ 都是有界的. \dot{V}_1 是一致连续性, 可以通过下式得到验证:

$$\ddot{V}_1 = -2k_1 e_{1c} \dot{e}_{1c} = -2k_1 e_{1c} [\phi_1(e_{1c}) + \tilde{\mu}] = 2k_1^2 e_{1c}^2 - 2k_1 e_{1c} \tilde{\mu}$$

因此, 根据 Barbalat 定理^[13] V_1 是有界的, \dot{V}_1 是一致连续性, 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $\dot{V}_1 \rightarrow 0$ 也就是 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_{1c}(t) = 0$, 对于跟踪任务可以推出 $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mu}(t) = 0$

2) 实际上, e_{2c} 可能与 $\phi_1(e_{1c})$ 不相等. 因此, 定义新的误差变量 $z_4 = e_{2c} - \phi_1(e_{1c})$. 则动力学子系统 (6) 第一式可表示为:

$$\dot{e}_{1c} = \phi_1(e_{1c}) + z_4 + \tilde{\mu} \tag{12}$$

如果 z_4 在式 (12) 中等于 0 时, 则 $\dot{V}_1 < 0$ 另外, 考虑 z_4 的动力特性:

$$\dot{z}_4 = \dot{e}_{2c} - \dot{\phi}_1(e_{1c}) = e_{3c} + \tilde{\mu}(x_{2dc} - e_{2c}) + k_1 \dot{e}_{1c} = e_{3c} + k_1 [\phi_1(e_{1c} + z_4)], \quad k_1 = \tilde{\mu} \tag{13}$$

用同样的方法, 把 e_{3c} 当作一个独立的输入量 $\phi_2(e_{2c}, z_4c)$,

$$e_{3c} = \phi_2(e_{2c}, z_4c) = -e_{2c} - (k_1 + k_2) z_4 - k_1 \phi_1(e_{1c}) \quad (k_2 \in R, R > 0) \tag{14}$$

选择子系统 (e_{1c}, z_4) 的 Lyapunov 函数为:

$$V_2 = V_1 + z_4^2/2 \tag{15}$$

根据式 (14) 的假设,

$$\dot{V}_2 = e_{1c} \dot{e}_{1c} + \tilde{\mu} \dot{\tilde{\mu}}/\mu + z_4 \dot{z}_4 = -k_1 e_{1c}^2 - k_2 z_4^2 < 0 \tag{16}$$

有 Barbalat^[13] 定理可知, 子系统 (e_{1c}, z_4) 是渐进稳定的.

3) 有上面 2 步可知, 误差系统能够被引导到渐近稳定的. 根据 Lyapunov 稳定必要条件, 选择滑模面切换函数:

$$s = e_{3c} - \phi_2(e_{2c}, z_4c) = e_{3c} + e_{1c} + (k_1 + k_2) z_4 + k_1 \phi_1(e_{1c}) = e_{3c} + (k_1 + k_2) e_{2c} + (1 + k_1 k_2) e_{1c} \tag{17}$$

在没有不确定项和干扰项 d 时, 通过 \dot{s} 可以得到相应的等价控制器 \dot{u}_{2eq} :

$$\dot{u}_{2eq} = \left[\frac{\dot{s}}{s} + \left(\frac{\dot{s}}{s} - \lambda \right) / \lambda \right] e_{2c} - (\lambda + 1) e_{3c} + (1 + k_1 k_2) e_{2c} + (k_1 + k_2) e_{3c} + \lambda \tag{18}$$

式中: $\lambda = \left[\frac{\dot{s}}{s} - \left(\frac{\dot{s}}{s} - \lambda \right) / \lambda \right] x_{2dc} + (\lambda + 1) x_{3dc} + \dot{x}_{3dc}$

即使存在不确定性和外部的干扰, 在滑模面上为了增强系统状态的鲁棒性, 选择如下转换控制器:

$$\dot{u} = \dot{u}_{2eq} + w \operatorname{sgn}(s) \tag{19}$$

选择 Lyapunov 函数 $V_s = s^2/2$ 当 $w > \left| \frac{b(e_c, t)}{s} + \left| \frac{d(t)}{s} \right| \right|$, 保证滑模面切换函数达到条件.

$$\dot{V}_s = \dot{s}s = s \left[-w \operatorname{sgn}(s) - b(e_c, t) - \dot{d}(t) \right] - |s| \left[w - |b(e_c, t)| - |\dot{d}(t)| \right] \leq 0 \quad (20)$$

式 (20)证明存在滑模面, 系统是全局渐近稳定.

由式 (18)和式 (19), 能够得出 FMSM 混沌系统的积分控制器

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 = \tilde{i}_d + \int_0^t [u_{2eq} + w \operatorname{sgn}(s)] dt \\ &= \tilde{i}_d + \int_0^t \left[(\hat{\omega} - \omega) + (\hat{\omega} - 1) e_{2c} - (\hat{\omega} + 1) e_{3c} + (1 + k_1 k_2) e_{2c} + (k_1 + k_2) e_{3c} + \hat{\omega} + w \operatorname{sgn}(s) \right] dt \end{aligned}$$

3 数字仿真

3.1 镇定问题

把系统镇定到特殊的点, 如果 $X_d = 0$ (平衡点 $(0, 0, 0)$), $\omega = 5.46$, $\mu = 20$ 系统的初始值 $(5, 5, 5)$, 外部干扰 $d(t) = 0.5 \sin(0.5t)$, $\mu = 2$. 控制器的控制增益: $k_1 = \hat{\omega}(0) = 5$, $k_2 = 8$, $w = 2$ 通过 SMC 控制的仿真结果如图 1, 其中 $\mu = 0$, 在 $t = 10$ s 时加上控制器的输入. 图 1 显示了即使是存在外部干扰时, FMSM 混沌状态能够被稳定到 $(0, 0, 0)$ 上.

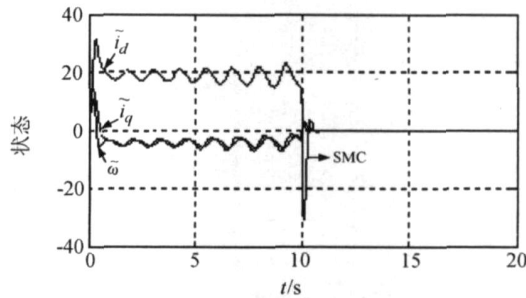


图 1 $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q, \tilde{\omega}$ 状态图 (在 $t = 10$ s 加上控制器的输入)

Fig 1 States $(\tilde{i}_d, \tilde{i}_q, \tilde{\omega})$ responses for regulation problem (the control input is active at $t = 10$ s)

3.2 跟踪问题

如果存在不确定参数 μ 时, 在考虑系统的跟踪问题时, 系统的渐近稳定性不能得到保证. 因此, 在跟踪问题上自适应律必须起到作用. $\omega = 5.46$, $\mu = 20$, 假设期望跟踪的向量 $X_d = TX_{dc} = T \begin{bmatrix} \omega(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix}^T$, $\omega(t) = a \sin(\mu t)$, $a = 0.4$, $\mu = 2$, $k_1 = \hat{\omega}(0) = 5$, $k_2 = 8$, $w = 5$, $\mu = 0.715$, 在 $t = 10$ s 加上 SMC, 在 $t = 20$ s 时加上自适应律, 图 2 所示是控制后的 FMSM 系统的状态变量 \tilde{i}_d, \tilde{i}_q 跟踪轨迹. 图 3 所示控制器的变化图, 显示其很强的鲁棒性. 图 4 在 SMC 的作用下滑模面的动力学特性被镇定到零点. 图 5 所示, 对未知参数的辨识的有效性. 图 6 通过控制状态变量 \tilde{i}_d, \tilde{i}_q , 使内在状态变量 \tilde{i}_d , 是有界的.

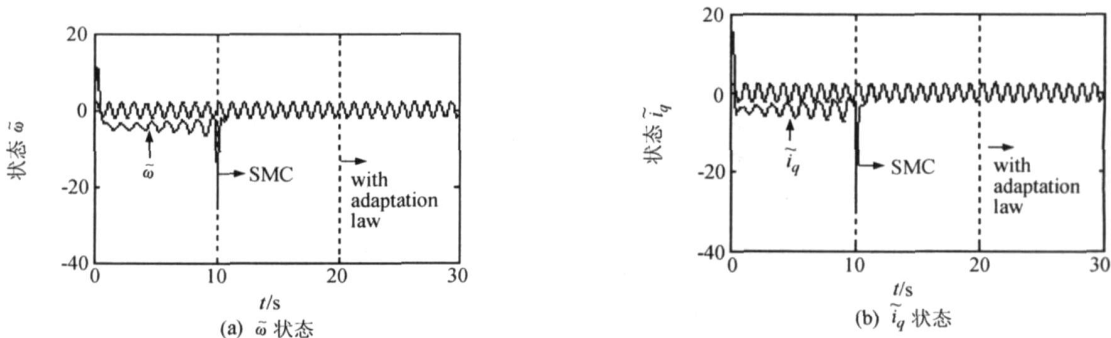


图 2 跟踪轨迹图, ($t = 10$ s 时加入控制器)

Fig 2 Tracking response (the control input is active at $t = 10$ s)

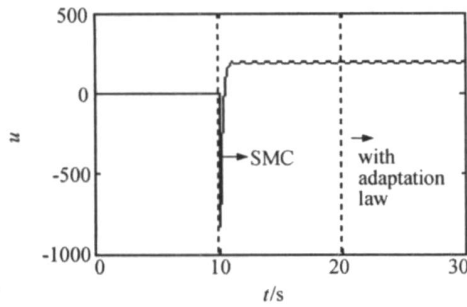
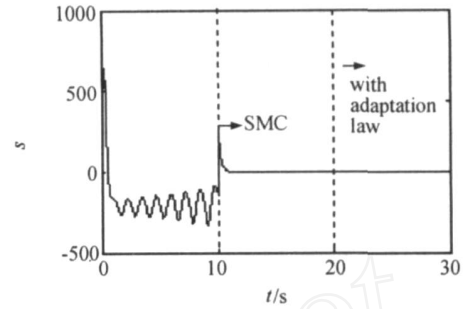
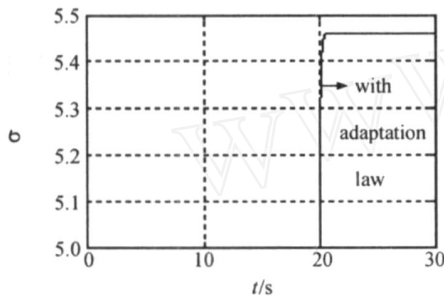
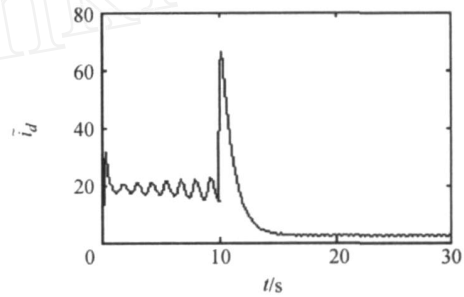
图 3 控制器 u 的输入变化图Fig. 3 The changing of control input u 图 4 滑模面 s 的变化图Fig. 4 The changing of sliding surface s 图 5 参数 σ 估计自适应律

Fig. 5 Estimation behavior of the adaptive law

图 6 内在状态变量 \bar{i}_d Fig. 6 Time response of the internal state \bar{i}_d

5 结语

对 MSM 混沌系统提出了一个具有强鲁棒性的非线性控制器。根据 Lyapunov 稳定性定理, 设计了一个带有自适应律的控制器。利用反步法通过逐步修正算法设计镇定控制器实现系统的全局调节和跟踪。滑模变结构对不确定参数或外部干扰具有强的鲁棒性。自适应律估计参数使系统能够引导全局跟踪。

参考文献:

- [1] Zhang B, Li Z, Mao Z Y. A type of fuzzy modeling of the chaotic system of permanent magnet synchronous motor[J]. Electrical Machines and Systems, 2001, 2: 880 - 883.
- [2] 张波, 李忠. 永磁同步电动机的混沌模型及其模糊建模[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(6): 841 - 844.
- [3] 张波, 李忠. 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.
- [4] Harb A M, Nayfeh A H, Chin C, *et al*. On the effects of machine saturation on subsynchronous oscillations in power systems[J]. Electric Mach Power Syst, 2000, 28(11): 1 019 - 1 035.
- [5] Hemati N, Leu M C. A complete model characterization of brushless DC motors[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1992, 28(1): 172 - 180.
- [6] Hemati N, Kwatny H. Bifurcations of equilibria and chaos in permanent - magnet machine[C]//Proceeding of the 32nd Conference on Decision and Control San Antonio: [s n], 1993: 475 - 479.
- [7] Li Z, Park J, Joo Y, *et al*. Bifurcations and chaos in a permanent - magnet synchronous motor[J]. IEEE Trans Circ Syst, 2002, 49(3): 383 - 387.
- [8] Harb A, Zaher A, Zohdy M. Nonlinear recursive chaos control[C]//Proceedings of the American Control Conference (ACC). Anchorage: [s n], 2002: 2 251 - 2 254.
- [9] Harb A, Ahmad W. Control of chaotic oscillators using a nonlinear recursive backstepping controller[C]// IASTED Conference on Applied Simulations and Modeling Crete: [s n], 2002: 451 - 453.
- [10] Yau H T, Chen C K, Chen C L. Sliding mode control of chaotic system with uncertainties[J]. Int J Bifurcat Chaos, 2000, 10: 1 139 - 1 147.
- [11] Jang M J, Chen C L, Tsao Y M. Sliding mode control for active magnetic bearing system with flexible rotor[J]. J Frankl Inst Eng Appl Math, 2005, 342: 401 - 419.
- [12] Bowong S, Moukam Kakmeni F M. Chaos control of uncertain chaotic systems via backstepping approach[J]. ASME J Vibrat Acoust, 2006, 128: 21 - 27.
- [13] Slotine J E, Li W. Applied nonlinear control[M]. New Jersey: Prentice - Hall, 1991: 103 - 137.

(责任编辑: 沈芸)