

文章编号: 1001-0920(2011)04-0553-05

## 基于扩张状态观测器的 SPMSM 调速系统的 滑模变结构反步控制

王礼鹏, 张化光, 刘秀翀, 侯利民

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

**摘要:** 基于面贴式永磁同步电机 (SPMSM) 的数学模型, 提出了反步控制与滑模变结构方法相结合的控制策略, 增强了控制器的快速响应性和对外界扰动的抑制能力, 滑模面中的积分作用可保证给定速度的无静差跟踪; 同时设计了扩张状态观测器 (ESO) 以实时估计控制系统的外界负载扰动, 及时调整控制量, 有效减小滑模变结构中的趋近率参数. 理论分析及仿真结果验证了该控制方法的有效性.

**关键词:** 永磁同步电机; 反步控制; 积分作用; 滑模变结构; 扩张状态观测器

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Backstepping controller based on sliding mode variable structure for speed control of SPMSM with extended state observer

WANG Li-peng, ZHANG Hua-guang, LIU Xiu-chong, HOU Li-min

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: WANG Li-peng, E-mail: wanglipeng302@yahoo.com.cn)

**Abstract:** Based on the mathematical model of the surface PMSM, a backstepping controller with sliding mode variable structure is proposed. Sliding mode variable structure based on exponential reaching law enhances the quick response and anti-disturbance ability of the control system. The integral action contained in the sliding surface can ensure the steady state error of tracking velocity zero. At the same time, extended state observer is used to evaluate the load torque of the system online, so the control process can be adjusted timely, which leads to the parameters of exponential reaching law being more smaller. Theoretical analysis and Matlab simulation results show the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** PMSM; backstepping; integral action; sliding mode variable structure; extended state observer

### 1 引言

永磁同步电机 (PMSM) 具有体积小、功率因数高、转动惯量低等优点, 已引起电机及其驱动领域学者的广泛关注. 由于永磁同步电机是一个非线性系统, 容易受到各种扰动的影响, 为了提高系统的动态性能, 非线性控制策略<sup>[1-2]</sup>已在永磁同步电动机系统中得到越来越多的研究和应用.

反步控制是一种最近发展起来的针对不确定非线性系统的控制策略, 已被引入电机控制领域<sup>[3-11]</sup>. 传统的反步控制可以实现 PMSM 系统的完全解耦, 而且所设计的控制器具有全局稳定性能; 但同时也存在一些问题, 如速度阶跃响应过程中存在速度静差, 没有考虑负载转矩变化对系统的影响, 以及加载过程中存

在较大的转速超调等. 文献 [6] 阐述了传统的反步控制在电机起动过程和稳态时都存在静差; [7] 在反步控制器设计中考虑了负载扰动, 设计了自适应反步控制器来抑制外部扰动, 但增加了系统的计算量和复杂性; [8-9] 将反步控制器分别与模糊控制和神经网络相结合, 能对负载变化进行有效补偿, 解决了不匹配干扰和参数变化的控制问题, 但系统设计较为复杂.

针对上述问题, 本文对 SPMSM 调速系统提出一种基于扩张状态观测器 (ESO) 的滑模变结构反步控制方法. 扩张状态观测器一般在自抗扰控制器中用来估计系统内外扰动量<sup>[12-13]</sup>. 本文采用扩张状态观测器来准确估计负载转矩, 因此可将外部扰动近似为一个已知量, 从而简化自适应反步控制器的设计, 减小滑

收稿日期: 2010-04-22; 修回日期: 2010-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977008); 高等学校博士学科点基金项目(20070145015).

作者简介: 王礼鹏(1984-), 男, 博士生, 从事交流传动系统智能控制方法的研究; 张化光(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 从事交流传动系统智能控制方法等研究.

模反步控制器中的趋近率参数;通过在滑模面中引入速度误差的积分作用,可以改善系统的起动过程的性能,实现给定速度的无静差跟踪. Matlab 仿真表明,本文设计的控制器能明显提高 SPMSM 控制系统的静态与动态性能,整个系统具有很强的鲁棒性.

## 2 面贴式永磁同步电机的数学模型

引入同步旋转坐标系,选择交直流电感相等,即  $L_d = L_q = L$ ,面贴式永磁同步电机的数学模型为<sup>[10]</sup>

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + w_e i_q + \frac{u_d}{L_d}, \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q}i_q - w_e i_d - w_e \frac{\phi_r}{L_q} + \frac{u_q}{L_q}, \\ \frac{dw_r}{dt} = -\frac{B}{J}w_r + \frac{1}{J}T_e - \frac{1}{J}T_L, \\ T_e = \frac{3p\phi_r}{2}i_q, \\ w_e = pw_r. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_d, i_q$  为定子电流  $d, q$  轴分量;  $u_d, u_q$  为定子电压  $d, q$  轴分量;  $R_s$  为定子电阻;  $L_d, L_q$  为定子  $d, q$  轴电感,  $p$  为磁极对数;  $\phi_r$  为转子永磁体磁通;  $w_e$  为电磁角速度;  $w_r$  为转子角速度;  $B, J$  为阻力摩擦系数和转动惯量.

## 3 基于扩张状态观测器的滑模反步控制系统的设计

为了实现 SPMSM 的精确控制和抗扰动性,基于上述数学模型,设计一种基于扩张状态观测器的滑模反步控制系统.

### 3.1 扩张状态观测器的设计

一个带未知扰动的非线性不确定系统可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}^{(n)} = f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) + bu, \\ y = x(t). \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t)$  为未知函数,  $w(t)$  为未知扰动,  $x(t)$  为系统状态变量,  $u$  为系统控制量,  $b$  为控制量增益.

定义  $a(t) = f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t)$ , 则式 (2) 表示的不确定系统的  $n+1$  阶 ESO 的一般形式为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - g_1(z_1 - x(t)), \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - g_n(z_1 - x(t)) + bu, \\ \dot{z}_{n+1} = -g_{n+1}(z_1 - x(t)). \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $z_1 \rightarrow x(t), \dots, z_n \rightarrow x^{(n-1)}(t), z_{n+1} \rightarrow a(t)$  是对未知函数  $f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t)$  和扰动  $w(t)$  的估计;  $g_i(\cdot)$  为非线性函数,一般取如下形式:

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sat}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta; \\ \text{sign}(\varepsilon), & |\varepsilon| \leq \delta. \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{sat}(\varepsilon) = \begin{cases} \varepsilon/\varsigma, & |\varepsilon| \leq \varsigma; \\ \text{sign}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \varsigma. \end{cases} \quad (5)$$

通常扩张状态观测器估计的是系统的内外总扰动.为了只观测外部所加负载扰动量,可将其中的已知模型部分分离出来,只对未知部分进行估计.由式 (1) 的第 3 式可知,永磁同步电动机的转矩方程为一阶系统.对 ESO 规定输出  $z_1$  跟随电机转速反馈信号  $w_r$ ,  $z_2$  观测电机的负载转矩扰动,则该一阶系统的二阶 ESO 模型为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \text{fal}(\varepsilon, \alpha_1, \delta_1) + f_0(z_1) + bu, \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 \text{fal}(\varepsilon, \alpha_2, \delta_2). \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\beta_1, \beta_2$  为观测器系数;  $\alpha_1, \alpha_2$  为非线性因子;  $\delta_1, \delta_2$  为滤波因子;  $\varepsilon = z_1 - w$ ;  $f_0(z_1) = -Bz_1/J$ ;  $b = 1/J$ ;  $u = T_e$ . 由式 (6) 便可得到待估计的负载转矩  $T_L$ .

### 3.2 滑模反步控制器设计

反步控制是从原系统方程选取状态构造新的子系统,然后构造 Lyapunov 函数,逐步设计,直至得到系统的实际控制使得整个系统稳定为止.针对永磁同步电动机系统,假定系统的控制目标是速度跟踪,定义速度跟踪误差为

$$e_w = w_r^* - w_r. \quad (7)$$

由式 (1) 的第 3 式并对上式求导,可得

$$\dot{e}_w = \dot{w}_r^* - \dot{w}_r = \dot{w}_r^* + \frac{1}{J} \left( Bw_r + \hat{T}_L - \frac{3p\phi_r}{2}i_q \right). \quad (8)$$

为使速度误差趋近于零,对由速度构成的子系统 (8),构造如下 Lyapunov 函数:

$$V_1 = S^2/2, \quad (9)$$

式中  $S = e_w + k \int_0^t e_w dt$  为选取的滑模面.为了满足  $\dot{V}_1 < 0$ ,采用基于指数渐近趋近率方法的滑模变结构方法,取  $\dot{S} = -\rho \text{sgn}(S) - rS$ , 则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = S\dot{S} &= S(-\rho \text{sgn}(S) - rS) = \\ &= -\rho S \text{sgn}(S) - rS^2 < 0. \end{aligned} \quad (10)$$

可得  $q$  轴的控制电流为

$$i_q^* = \frac{2J}{3p\phi_r} \dot{w}_r^* + \frac{2}{3p\phi_r} [Bw_r + \hat{T}_L + \rho J \text{sgn}(S) + rJS + Jke_w]. \quad (11)$$

由式 (11) 可知,如果不进行负载转矩的估计和补偿,则趋近率参数  $\rho$  和  $r$  需要增大才能在加载时实现速度准确跟踪的目的;而通过状态观测器进行负载转矩估计和补偿,可以在较小的趋近率参数的条件下达到速度全局渐近跟踪的目的.

为实现面贴式永磁同步电动机的完全解耦和速度跟踪, 本文采用磁场定向的控制方式, 令直轴参考电流满足  $i_d^* = 0$ , 且选择交轴参考电流如式(11)所示. 同时为了实现电流跟踪, 选择电流跟踪误差为

$$\begin{cases} e_d = i_d^* - i_d, \\ e_q = i_q^* - i_q. \end{cases} \quad (12)$$

由  $e_w, e_d, e_q$  组成新的子系统, 可得

$$\dot{e}_d = \dot{i}_d^* - \dot{i}_d = \frac{R}{L}i_d - pw_r i_q - \frac{u_d}{L}, \quad (13)$$

$$\dot{e}_q = \dot{i}_q^* - \dot{i}_q =$$

$$\frac{2J}{3p\phi_r} \ddot{w}_r^* + \frac{2B}{3p\phi_r} \dot{w}_r + \frac{2rJ}{3p\phi_r} \dot{S} +$$

$$\frac{2Jk}{3p\phi_r} \dot{e}_w - \dot{i}_q =$$

$$\frac{2J}{3p\phi_r} \ddot{w}_r^* + \frac{2B}{3p\phi_r} \dot{w}_r + \frac{2J(r+k)}{3p\phi_r} \dot{e}_w +$$

$$\frac{2Jrk}{3p\phi_r} e_w - \dot{i}_q =$$

$$\frac{2J}{3p\phi_r} \ddot{w}_r^* + \frac{2B}{3pJ\phi_r} \left( \frac{3p\phi_r}{2} i_q - Bw_r - \hat{T}_L \right) +$$

$$\frac{2J(r+k)}{3p\phi_r} \dot{e}_w + \frac{2Jrk}{3p\phi_r} e_w + \frac{R}{L} i_q +$$

$$pw_r i_d - \frac{u_q}{L} + \frac{p\phi_r}{L} w_r. \quad (14)$$

由于负载扰动是影响系统控制的主要因素, 文献[6]在新的子系统的Lyapunov函数设计中添加了负载扰动项, 虽然有效抑制了负载扰动, 但增加了控制器的复杂性. 本文采用扩张状态观测器对负载转矩进行了实时观测. 新的子系统的Lyapunov函数可简化为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_d^2 + \frac{1}{2} e_q^2 = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2} e_d^2 + \frac{1}{2} e_q^2. \quad (15)$$

对上式求导可得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_q \dot{e}_q + e_d \dot{e}_d = S\dot{S} + e_q \dot{e}_q + e_d \dot{e}_d. \quad (16)$$

式(16)中包含了系统的实际控制  $u_d$  和  $u_q$ . 为了满足  $\dot{V}_2 < 0$ , 选择

$$\begin{cases} \dot{e}_d = -K_d e_d, \\ \dot{e}_q = -K_q e_q, \end{cases} \quad (17)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= S\dot{S} + e_q \dot{e}_q + e_d \dot{e}_d = \\ &= -\rho S \text{sgn}(s) - rS^2 - K_d e_d^2 - K_q e_q^2 < 0. \end{aligned} \quad (18)$$

由式(13), (14), (17), 可求得  $u_d, u_q$  为

$$u_d = Ri_d - pLw_r i_q + K_d L e_d, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} u_q &= L \left[ \frac{2J}{3p\phi_r} \ddot{w}_r^* + \frac{2B}{3pJ\phi_r} \left( \frac{3p\phi_r}{2} i_q - Bw_r - \hat{T}_L \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{2J(r+k)}{3p\phi_r} \dot{e}_w + \frac{2Jrk}{3p\phi_r} e_w + \frac{R}{L} i_q + \right. \end{aligned}$$

$$\left. pw_r i_d + \frac{p\phi_r}{L} w_r + k_q e_q \right]. \quad (20)$$

由下列等式:

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = -\rho S \text{sgn}(S) - rS^2, \\ \dot{V}_2 = \dot{V}_1 - K_d e_d^2 - K_q e_q^2, \end{cases} \quad (21)$$

可得

$$\begin{cases} V_1(0) - V_1(\infty) \geq \int_0^\infty [\rho S \text{sgn}(S) + rS^2] dt, \\ V_2(0) - V_2(\infty) \geq \int_0^\infty [\rho S \text{sgn}(S) + rS^2] dt + \\ \int_0^\infty K_d e_d^2 dt + \int_0^\infty K_q e_q^2 dt. \end{cases} \quad (22)$$

由于  $V_1, V_2$  有界, 根据Barbalat推论<sup>[15]</sup>, 可得  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_w = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_d = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_q = 0$ , 从而证明了对于永磁同步电动机控制系统, 控制(11), (19), (20)能够使得系统速度跟踪误差趋于零, 并且达到电流跟踪的效果, 同时使得系统全局一致稳定.

## 4 仿真研究

为了验证基于扩张状态观测器的滑模反步控制方法的有效性, 对永磁同步电机矢量控制系统进行了仿真. 所采用的电机参数为: 额定转速2000 r/min, 额定转矩8 N·m, 定子电阻0.9585 Ω,  $d$ 轴和 $q$ 轴电感0.00525 mH, 极对数为4, 转动惯量0.0006329 Kg·m<sup>2</sup>, 摩擦系数0.0003035 N·m·s. 控制系统的总体框图如图1所示.

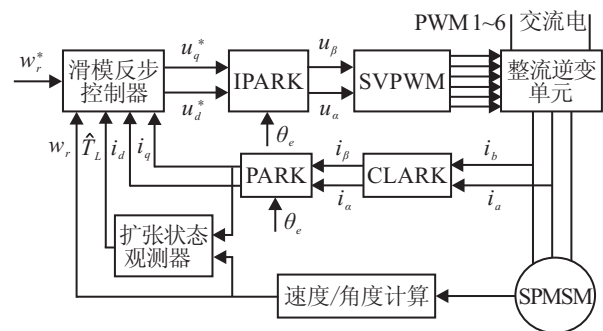


图1 基于ESO的永磁同步电机滑模反步控制系统

给定转子速度为斜坡给定, 上升时间为0.05 s, 稳态值为160 rad/s. 电机空载起动, 在0.08 s时加载5 N·m, 0.12 s时变为0 N·m; 0.16 s时加载-5 N·m, 0.2 s时变为0 N·m. 扩张状态观测器的参数为:  $\beta_1 = 5590, \beta_2 = 4858500, \alpha_1 = 0.75, \alpha_2 = 0.5, \delta_1 = 0.01, \delta_2 = 0.01, \varsigma = 0.01$ . 基于ESO的滑模反步控制器的参数为:  $k = 100, \rho = 200, r = 2800, K_d = 500, K_q = 10000$ .

1) 负载转矩已知时, 对传统的反步控制方法与滑模反步控制方法进行仿真比较. 在已知负载转矩的基础上, 给所加正向负载转矩叠加一个2.5 N·m的扰动, 所得仿真结果如图2所示. 由图2可以看出, 传统反步控制方法的速度跟踪的稳态误差为1.5 rad/s, 在

转矩扰动时稳态误差加大;而滑模反步控制方法的稳态误差为零,负载转矩扰动时能够得到很好的抑制,很快恢复到零。

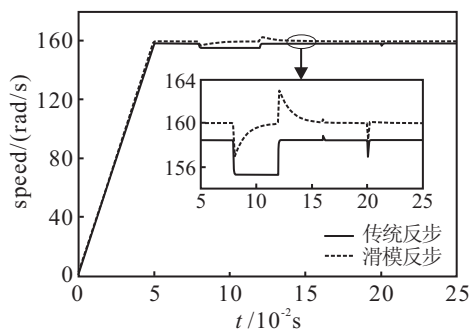


图2 传统反步控制和滑模反步控制下的速度响应

2) 负载转矩未知时,对滑模反步控制方法进行负载转矩未加补偿和基于ESO负载转矩估计补偿的比较研究,仿真结果如图3,图4所示。由图3可以看出,所设计的扩张状态观测器能够比较准确地观测负载转矩。图4表明了滑模反步控制能够有效抑制负载扰动,但在相同的滑模趋近率参数( $r = 2800$ )下,基于ESO的滑模反步控制效果比只采用滑模反步控制在负载转矩突变时引起的转速误差更小,调节时间更短;增加滑模趋近率参数后( $r = 5800$ ),虽然转速误差变小,但快速响应性仍不如基于ESO的滑模反步控制。

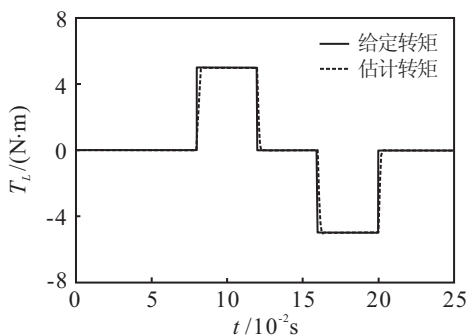


图3 基于ESO的永磁同步电机的负载转矩估计

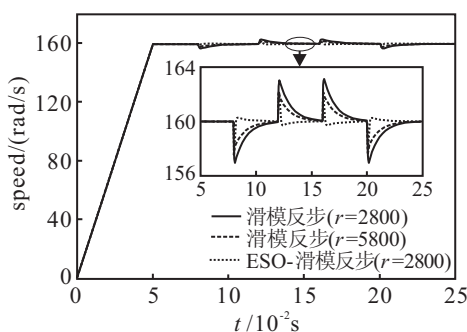


图4 滑模反步控制和基于ESO的滑模反步控制速度响应

3) 负载转矩未知时,对PI控制和基于ESO的滑模反步控制进行仿真对比。由图5可以看出,PI控制的超调量为 $1.8 \text{ rad/s}$ ,基于ESO的滑模反步控制接近 $0 \text{ rad/s}$ ;PI控制对于加载产生的速度误差最大为

$3.8 \text{ rad/s}$ ,后者最大为 $2.5 \text{ rad/s}$ ,并且对于扰动产生的转速变化的调节时间更短。

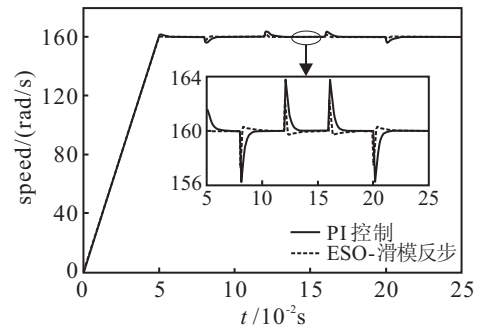


图5 PI控制和基于ESO的滑模反步控制下的速度响应

由以上分析可知,本文所设计的控制方法与传统反步控制和经典PI控制相比较,在电机控制过程中具有更快的响应速度和更高的稳态精度;当负载扰动或突变时,具有更小的转速变化和更快的恢复速度,从而表明该控制方法具有很好的鲁棒性。

## 5 结论

本文针对面贴式永磁同步电机的调速系统设计了一种基于扩张状态观测器的滑模反步控制方法。在反步控制中引入滑模变结构方法,明显提高了永磁同步电机系统的静态与动态性能,保证了系统的全局一致稳定性;通过扩张状态观测器实时观测系统的负载扰动,简化了自适应反步控制器设计中由于考虑负载而增加的复杂性和计算量,同时减小了滑模变结构的趋近率参数。仿真结果表明,所设计的控制器使得PMSM具有良好的转速跟踪性能和很强的抗负载转矩扰动的能力。

## 参考文献(References)

- [1] Sant A V, Rajagopal K R. PM synchronous motor speed control using hybrid fuzzy-PI with novel swithcing functions[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2009, 45(10): 4672-4675.
- [2] Ren Yu, Zhou Li-meng. PMSM control research based on partical swarm optimization bp neural network[C]. Int Conf on Cyberworlds. Hangzhou, 2008: 832-836.
- [3] 胡建辉, 邹继斌. 具有不确定参数永磁同步电动机的自适应反步控制[J]. 控制与决策, 2006, 21(11): 1265-1269. (Hu J H, Zou J B. Adaptive backstepping control of permanent magnet synchronous motors with paramter uncertainties[J]. Control and Decision, 2006, 21(11): 1265-1269.)
- [4] Seok-Kyoon Kim. Speed and current regulation for uncertain PMSM using adaptive state feedback and backstepping control[C]. IEEE Int Symposium on Industrial Electronics. Seoul, 2009: 1275-1280.

- [5] Lin Hai, Yan Weisheng, Wang Yintao, et al. Nonlinear sliding mode speed control of a PM synchronous motor drive using model reference adaptive backstepping approach[C]. Int Conf on Mechastronics and Automation. Changchun, 2009: 828-833.
- [6] Ouassaid M, Cherkaoui M, Maaroufi M. Improved nonlinear velocity tracking control for synchronous motor drive using backstepping design strategy[C]. Power Tech of 2005 IEEE Russia. Petersburg, 2005: 1-6.
- [7] Liu Dongliang, Yan Weican, He Yikang. Speed tracking control of PMSM with adaptive backstepping[C]. The 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 1986-1989.
- [8] 吴东苏, 顾宏斌. 轻型飞行模拟器运动平台自适应模糊反步控制[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(7): 1465-1468. (Wu D S, Gu H B. Adaptive fuzzy backstepping control of light flight simulator motion platform[J]. Chinese J of Scientific Instrument, 2008, 29(7): 1465-1468.)
- [9] Lin Chih-hong, Lin Chih-peng. Adaptive backstepping FNN control for a permanent magnet synchronous motor drive[C]. The 4th IEEE Conf on Industrial Electronics and Applications. Xi'an, 2009: 2712-2717.
- [10] 山炳强, 于海生. 基于负载观测器的永磁同步电机反步法控制[J]. 电机与控制应用, 2006(7): 33-36. (Shan B Q, Yu H S. Based on the load torque observer of permanent magnet synchronous motors backstepping control[J]. Electric Machines and Control Application, 2006(7): 33-36.)
- [11] 杨俊友, 刘启宇, 赵菲, 等. 滑模反推式永磁直线同步电动机的速度跟踪控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2009, 31(6): 602-605. (Yang J Y, Liu Q Y, Zhao F, et al. Speed tracking control for permanent magnet linear synchronous motor with sliding mode and backstepping[J]. J of Shenyang University of Technology, 2009, 31(6): 602-605.)
- [12] Fu Yongling, Liu Hesong, Pang Yao, et al. Active disturbance rejection control for the air-borne pmsm in direct drive ema application[C]. The 9th Int Conf on Electronic Measurement and Instruments. Beijing, 2009: 2-346 - 2-351.
- [13] Sun Kai, Zhao Yanlei, Shu Qifang. A position sensorless vector control system of permanent magnet synchronous motor based on active-disturbance rejection controller[C]. Int Conf on Mechatronics and Automation. Changchun, 2009: 3833-3837.
- [14] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88. (Han J Q. The extended state observer of a class of uncertain systems[J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85-88.)
- [15] Narendra K S, Annaswamy A M. Stable adaptive systems[M]. USA: Prentice Hall, 1989.

(上接第552页)

- [13] Niu B, Zhu Y L, He X X, et al. An improved particle swarm optimization based on bacterial chemotaxis[C]. Proc of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, 2006: 3193-3197.
- [14] 刘金洋, 郭茂祖, 邓超. 基于雁群启示的粒子群优化算法[J]. 计算机科学, 2006, 33(11): 166-168. (Liu J Y, Guo M Z, Deng C. GeesePSO: An efficient improvement of particle swarm optimization[J]. Computer Science, 2006, 33(11): 166-168.)
- [15] Ahmadjian V, Paracer S. Symbiosis: An introduction to biological associations[M]. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- [16] Douglas A E. Symbiotic interactions[M]. Oxford: Oxford University Press, 1994.
- [17] 刘汉生, 陈智兵, 胡朝晖, 等. 寄生虫及其宿主协同协同进化的研究进展[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 261-264. (Liu H S, Chen Z B, Hu Z H, et al. Status and prospects for researching coevolution of parasite and host[J]. Ecologic Science, 2003, 22(3): 261-264.)
- [18] 黄丽琴, 郭宪国. 寄生虫与宿主的协同进化关系[J]. 国际医学寄生虫病杂志, 2009, 36(1): 49-54. (Huang L Q, Guo X G. Coevolution between parasites and their hosts[J]. Int J of Medical Parasitic Diseases, 2009, 36(1): 49-54.)
- [19] 李文祥, 王桂堂. 寄生虫对宿主种群的调节[J]. 水生生物学报, 2002, 26(5): 550-554. (Li W X, Wang G T. Regulation of parasites on host populations: A brief[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(5): 550-554.)
- [20] Shi Y, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C]. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 1998, 1447: 591-600.
- [21] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm: Explosion, stability, and convergence in multidimensional complex space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [22] Carlisle A, Dozier G. An off-the-shelf PSO[C]. Proc of the Workshop on Particle Swarm Optimization. Indianapolis, 2001: 1-6.