

运动控制中的鲁棒自适应死区补偿

王中华, 张 勇

(济南大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘要: 在高精度PD控制器中, 死区可能会产生极限环, 而且, 死区参数往往未知. 本文针对有非对称死区的直流伺服系统, 设计了一种鲁棒自适应预补偿控制器, 这种控制器不仅对死区的不确定性具有鲁棒性, 而且对惯性及粘性摩擦等参数的不确定性, 及外部扰动都有较强的鲁棒性. 采用Lyapunov理论证明了这种控制器能够保证跟踪误差一致最终有界. 并且调整调节控制器的参数可以改变跟踪误差. 仿真结果表明了这种方法的有效性.

关键词: 死区补偿; 鲁棒控制; 自适应控制; 运动控制; 直流伺服系统

中图分类号: TP273+.2 **文献标识码:** A

Robust adaptive dead-zone compensation in motion control

WANG Zhong-hua, ZHANG Yong

(School of Control Science and Engineering, University of Jinan, Jinan Shandong 250022, China)

Abstract: In a high-precision PD controller for motion control, the dead-zone may result in a limit cycle. The exact values of the dead-zone in actuator are always unknown. A robust adaptive controller with a pre-compensator is designed for the DC servo system with unsymmetrical dead-zone. This controller provides a high robustness to the dead-zone, disturbances and uncertainties in parameters such as inertial and viscous friction. By Lyapunov theory, we prove that the tracking error is ultimately uniformly bounded. The tracking error can be altered by adjusting the parameters of the controller. Simulation results are given to demonstrate its efficacy.

Key words: dead-zone compensation; robust control; adaptive control; motion control; DC servo system

1 引言(Introduction)

高精度运动控制在现代机械系统中有着广泛的应用, 例如: 航天主轴加工机床、半导体制造单元、外科手术机器人等. 组成其控制系统的物理部件则包含有饱和、磁滞、死区、摩擦等硬非线性, 这些硬非线性在实际的执行器(例如: 液压伺服阀、伺服电机等)中是普遍存在的. 在死区非线性不太严重并且控制指标要求不严格的情况下, 可以忽略. 但是, 在需要高精度运动控制的情况下, 忽略死区效应将会产生较大的稳态误差和较差的系统暂态响应. 如果执行器中包含死区, 采用PD控制会产生极限环. 因此, 死区非线性补偿对于控制器设计工程师来说是一个重要课题.

死区补偿最直观的方法是利用其逆来进行抵消, 但是死区参数往往未知且可能发生变化, 这种方法很难在实际中应用. 对于高精度运动控制, 一些学者提出了变结构控制^[1]、神经网络控制^[2]和模糊自适

应控制^[3~5]等多种死区补偿策略, 取得了较好效果. 自适应控制是一种解决含有未知参数系统控制问题的较好方法, Tao等人^[6]首先提出了自适应死区逆的死区补偿方法. 最近, 文献^[7]通过深入分析死区模型性质, 设计了一种鲁棒自适应控制器, 对死区的处理方式与一般鲁棒自适应控制中处理扰动的方法类似.

本文针对直流伺服系统, 设计了一种新的鲁棒自适应死区补偿控制器, 考虑了死区一般的非对称情况, 采用自适应死区预补偿, 不需要构造死区逆. 这种控制器不仅对死区具有较好的鲁棒特性, 而且对于系统参数不确定性及外部扰动具有良好的鲁棒性能.

2 直流伺服系统建模(DC servo system modeling)

本部分考虑如图 1 所示含有死区非线性的直流伺服系统, 首先分析死区特性并设计死区预补偿器,

然后建立直流伺服系统的数学模型。

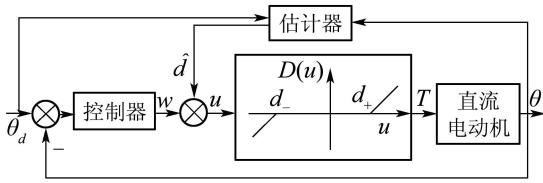


图1 含有死区的直流伺服系统模型结构简图

Fig. 1 The simplified scheme of DC servo system with deadzone

2.1 死区非线性(Dead zone nonlinearity)

由图1得

$$T = D_d(u) = \begin{cases} u - d_+, & u > d_+, \\ 0, & d_- < u \leq d_+, \\ u - d_-, & d_- \geq u, \end{cases} \quad (1)$$

其中参数向量 $d = [d_+ \ d_-]^T$ 表示死区宽度。在实际运动控制系统中, d 往往未知,使得死区补偿非常困难。大多数补偿策略只考虑死区对称情况,也就是 $d_+ = d_-$ 。非对称死区宽度情况可以写为:

$$T = D_d(u) = u - \text{sat}_d(u), \quad (2)$$

其中非对称饱和函数 $\text{sat}_d(\cdot)$ 定义为:

$$\text{sat}_d(u) = \begin{cases} d_+, & u > d_+, \\ u, & d_- < u \leq d_+, \\ d_- & u \leq d_-. \end{cases}$$

为了消除死区的影响,这里设计一死区预补偿器,其合成控制律使得 $w \approx T$ 。由于死区宽度未知,直观考虑采用学习或自适应方法。定义 $d = [d_+ \ d_-]^T$ 的估计值为 $\hat{d} = [\hat{d}_+ \ \hat{d}_-]^T$,因此考虑预补偿器, u 与 w 的关系可以表示为

$$u = w + \mu \cdot \hat{d}_+ + (1 - \mu) \cdot \hat{d}_-, \quad (3)$$

其中:当 $w \geq 0$ 时, $\mu = 1$;当 $w < 0$ 时, $\mu = 0$ 。

考虑系统死区及自适应补偿器, w 与 T 的函数关系可以表示为

$$T = D_d(u) = w + \mu \cdot \hat{d}_+ + (1 - \mu) \cdot \hat{d}_- - \text{sat}_d(w + \mu \cdot \hat{d}_+ + (1 - \mu) \cdot \hat{d}_-). \quad (4)$$

定义死区宽度估计误差为

$$\tilde{d} = d - \hat{d}, \quad (5)$$

通过简单推导,重写式(4)为

$$T = w - \tilde{d}^T \bar{\mu} + \tilde{d}^T \delta, \quad (6)$$

其中: $\bar{\mu}^T = [\mu \ 1 - \mu]$, δ 为模型非匹配项, $\delta = [\mu u_{-1}(\hat{d}_+) \ \mu u_{-1}(\hat{d}_-)]^T \Lambda_d(w)$,这里 $u_{-1}(\cdot)$ 为单位阶

跃函数, $\Lambda_d(w)$ 定义为

$$\Lambda_d(w) = \begin{cases} 0, & w > d_+, \\ 1 - w/d_+, & 0 < w \leq d_+, \\ 1 - w/d_-, & d_- < w \leq 0, \\ 0, & w \leq d_-, \end{cases}$$

δ 满足 $\|\delta\| \leq 1$ ^[4]。

从方程(6)可以看出,死区宽度估计向量 $\hat{d}$ 越接近实际的死区宽度参数向量 d , $w \rightarrow T$,说明死区效应得到较好的补偿。

2.2 伺服系统建模(DC servo system modeling)

直流伺服系统的模型为

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + T_d = T, \quad (7)$$

这里: $\theta(t)$ 为电动机角位移, J 为转动惯量, B 为粘性摩擦系数, T_d 为非线性摩擦、负载及外部扰动的合成, T 为直流电动机的输出扭矩。考虑死区, u 与 T 的关系为

$$T = D_d(u) = u - \text{sat}_d(u). \quad (8)$$

设计运动控制器使得电动机角位移输出 $\theta(t)$ 跟踪期望输出 $\theta_d(t)$ 。定义跟踪误差 $e = \theta_d - \theta$, $\dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$ 及误差尺度函数为

$$s(t) = \dot{e} + \lambda e, \lambda > 0, \quad (9)$$

方程 $s(t) = 0$ 在 $\mathbb{R}^2$ 空间定义了一时变超平面,在此平面上,跟踪误差按指数规律衰减为零。因此,保持 $s(t) = 0$ 这一条件能够获得良好的跟踪性能。同理,如果 $\|s\| \leq \Phi$,那么,实际跟踪误差满足^[8]

$$\begin{cases} |e| \leq \lambda^{-1}\Phi, \\ |\dot{e}| \leq 2\Phi, \end{cases} \quad (10)$$

通过定义一个连续函数 s_Δ 可以将误差尺度 s 与误差尺度界 Φ 结合在一起:

$$s_\Delta(t) = s(t) - \Phi \text{sat}(s(t)/\Phi), \quad (11)$$

其中饱和函数 $\text{sat}(z)$ 定义为:

$$\text{sat}(z) = \begin{cases} 1, & z \geq 1, \\ z, & -1 < z < 1, \\ -1 & z \leq -1, \end{cases}$$

s_Δ 具有以下性质:如果 $|s| < \Phi$,有 $\dot{s}_\Delta = s_\Delta = 0$;如果 $|s| > \Phi$,有 $\dot{s}_\Delta = \dot{s}$, $|s_\Delta| = |s| - \Phi$ 。对方程(9)进行求导,并由式(6)(7)得:

$$J\dot{s} = -w + J\ddot{\theta}_d + \tilde{d}^T \bar{\mu} - \tilde{d}^T \delta + B\dot{\theta} + T_d + J\lambda \dot{e}. \quad (12)$$

3 控制器设计与分析(Controller design and analysis)

在实际中, 转动惯量 J 和粘性摩擦系数 B 往往未知, 并且随着负载、温度、润滑条件的变化而变化. 本文利用自适应律对其进行在线估计. 定义估计误差:

$$\begin{cases} \tilde{J} = J - \hat{J}, \\ \tilde{B} = B - \hat{B}, \end{cases} \quad (13)$$

这里 $\hat{J}$ 和 $\hat{B}$ 分别表示 J 和 B 的估计值.

在进行控制器设计之前, 首先做以下符合实际情况的假设:

假设 1 未知死区宽度有界且为定值常数, 即: $\|d\| \leq d_M, \dot{d} = 0$.

假设 2 扰动合成项 T_d 满足条件 $|T_d| \leq T_M(\mathbf{x})$, $T_M(\mathbf{x})$ 为已知函数, 向量 $\mathbf{x}$ 包含所有与 T_d 有关的信号.

假设 3 参数 J 和 B 为定值常数且范围已知, 也就是 $\dot{J} = 0, \dot{B} = 0, J_{\min} \leq J \leq J_{\max}, B_{\min} \leq B \leq B_{\max}$, 其中 $J_{\min}, J_{\max}, B_{\min}$ 和 $B_{\max}$ 分别为已知常数.

本文的控制目标就是上述假设条件下, 设计控制律 $w(t)$ 使得跟踪误差尺度 s 最终在预先给定的范围之内. 根据式(12), 设计控制律为:

$$w = k_d s + \hat{J}(\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e}) + \hat{B}\dot{\theta} + k^* \text{sat}(s/\Phi), \quad (14)$$

其中: $k_d > 0, k^* > |T_M|$ 为设计参数. 设计参数自适应律为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{J}} = k_J(\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e})s_\Delta - k_J\sigma_J\hat{J}, \\ \dot{\hat{B}} = k_B\dot{\theta}s_\Delta - k_B\sigma_B\hat{B}, \\ \dot{\hat{d}} = \Gamma\bar{\mu}s_\Delta - \kappa\Gamma\hat{d}, \end{cases} \quad (15)$$

其中: $k_J, \sigma_J, k_B, \sigma_B, \kappa, \Gamma = \Gamma^T > 0$ 为设计参数.

注 1 在控制律(14)中, $k_d s$ 实际上是PD控制器, 其PD参数分别为 $k_d \lambda$ 和 k_d , 死区效应在一定程度上得到了前馈补偿.

注 2 在自适应律(15)中, 为防止适应参数超出一定范围, 采用了泄漏修正, 增加了自适应控制的鲁棒性.

定理 1 对于含有未知死区(1)的直流伺服系统(7), 设计控制器(14)及自适应律(15), 使得系统输出跟踪给定信号 θ_d , 其跟踪误差尺度 s 最终一致有界, 且当 $t \rightarrow \infty$ 时, 满足 $|s| \leq \Phi + \sqrt{\frac{2\eta}{J_{\min}\alpha}}$ (参数 α 和 η 在定理的证明中给出), 且其大小可以自由调节.

证 定义Lyapunov函数为:

$$V(t) = \frac{1}{2}(Js_\Delta^2 + k_J^{-1}\tilde{J}^2 + k_B^{-1}\tilde{B}^2 + \tilde{d}^T \Gamma^{-1} \tilde{d}), \quad (16)$$

注意到当误差尺度函数 s 在边界层的外部($|s| > \Phi$)时, 有 $\dot{s}_\Delta = \dot{s}, s_\Delta \text{sat}(s/\Phi) = |s_\Delta|$, 对(16)进行求导, 并代入式(12) (14)及(15)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= Js_\Delta \dot{s} + k_J^{-1}\tilde{J}\dot{\tilde{J}} + k_B^{-1}\tilde{B}\dot{\tilde{B}} + \tilde{d}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{d}} = \\ &= (-k_d s - \hat{J}(\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e}) - \hat{B}\dot{\theta} - k^* \text{sat}(s/\Phi) + \\ &J(\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e}) + B\dot{\theta} + \tilde{d}^T(\bar{\mu} - \delta) + T_d)s_\Delta - \\ &\tilde{J}((\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{e})s_\Delta - \sigma_J \hat{J}) - \tilde{B}(\dot{\theta}s_\Delta - \sigma_B \hat{B}) - \\ &\tilde{d}^T(\bar{\mu}s_\Delta - \kappa \hat{d}) \leq \\ &-k_d s_\Delta^2 + |\tilde{d}^T s_\Delta| + \sigma_J \tilde{J}\hat{J} + \sigma_B \tilde{B}\hat{B} + \kappa \tilde{d}^T \hat{d} \leq \\ &-k_d s_\Delta^2 + |\tilde{d}^T s_\Delta| + \sigma_J \tilde{J}\hat{J} - \sigma_J \tilde{J}^2 + \sigma_B \tilde{B}\hat{B} - \\ &\sigma_B \tilde{B}^2 + \kappa \tilde{d}^T \hat{d} - \kappa \tilde{d}^T \tilde{d}. \end{aligned} \quad (17)$$

利用不等式 $ab \leq \frac{1}{2}(a^2 + b^2)$, 有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -(k_d - \frac{1}{2})s_\Delta^2 - \frac{1}{2}((\kappa - 1)\tilde{d}^T \tilde{d} + \sigma_J \tilde{J}^2 + \\ &\sigma_B \tilde{B}^2) + \frac{1}{2}(\sigma_J J^2 + \sigma_B B^2 + \kappa d^T d), \end{aligned} \quad (18)$$

因此, 有:

$$\dot{V} \leq -\alpha V + \eta. \quad (19)$$

这里, α 和 η 为正的常数, 由下式给定:

$$\begin{aligned} \alpha &\triangleq \min \left\{ \frac{2k_d - 1}{J_{\min}}, k_J \sigma_J, k_B \sigma_B, \frac{\kappa - 1}{\lambda_{\min}(\Gamma^{-1})} \right\}, \\ \eta &\triangleq \frac{1}{2}(\sigma_J J^2 + \sigma_B B^2 + \kappa d^T d). \end{aligned} \quad (20)$$

由(19)可以得出:

$$0 \leq V(t) \leq \frac{\eta}{\alpha} + \left(V(0) - \frac{\eta}{\alpha}\right) e^{-\alpha t}. \quad (21)$$

因此, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\frac{1}{2}Js_\Delta^2 \leq V(\infty) \leq \eta/\alpha$. 根据 s_Δ 的性质, 当 $|s| > \Phi$ 时, $|s_\Delta| = |s| - \Phi$. 因此, 误差尺度 s 最终满足:

$$|s| \leq \Phi + \sqrt{\frac{2\eta}{J_{\min}\alpha}}, \quad (22)$$

通过调节 k_d, k_J, k_B 及 $\lambda_{\min}(\Gamma^{-1})$ 的值, 就可以调节跟踪误差的大小. 证毕.

注 3 控制律(14)的最后一项, 是为抵消外部扰动而设的鲁棒项.

注 4 当误差尺度函数 s 在边界层的内部($|s| < \Phi$)时, 并不能满足 $\dot{V} = \sigma_J \tilde{J}\hat{J} + \sigma_B \tilde{B}\hat{B} + \kappa \tilde{d}^T \hat{d}$, 所以误差尺度函数不会一直保证 $|s| < \Phi$.

注 5 一般说来, 知道的模型或扰动界越不精确, 选取的边界层厚度 Φ 越大. 为达到高精度输出跟踪, 边界层厚度 Φ 一般选择很小. 但是, 过小的 Φ 值可能会引起系统颤振. 因此, 在实际实施中, 的取值要在跟踪误差和系统的高频动态之间进行折中.

注6 在文献[7]中,未知死区宽度是作为非结构不确定性进行处理,假设其界已知,主要由控制器的滑模控制部分起补偿作用,这往往需要较大的控制输出.本文将未知死区宽度作为参数不确定性进行处理,假设其界未知,主要由自适应控制部分起作用,系统模型由量测的系统性能进行在线调节.本方法的优点在于需要较少的系统信息,相对较小的控制作用输入.

4 仿真结果(Simulation results)

本部分以某实验室一直流伺服系统为例,采用本文提出的控制器设计方法进行仿真研究.其伺服系统参数分别为: $J = 7.876 \times 10^{-3} \text{ V/rad} \cdot \text{s}^{-2}$, $B = 8.666 \times 10^{-3} \text{ V/rad} \cdot \text{s}^{-1}$, $d_+ = 0.08 \text{ V}$ 和 $d_- = -0.2 \text{ V}$, 伺服系统的饱和输入电压为 $\pm 1 \text{ V}$ (这里的单位进行了当量化).为观察系统参数的适应过程和控制器的鲁棒性,其期望输出轨迹取成分较为丰富的信号: $\theta_d = 1 + \sin t + 0.5 \sin(5t)$. 其控制器参数分别取 $k_d = 0.1$, $\lambda = 20$, $k_J = k_B = 0.001$, $\sigma_J = \sigma_B = 1$, $\Gamma = \text{diag}\{10, 10\}$, $\kappa = 50$, $k^* = 0.5$. 本文选取 Φ 值采用了试凑法,这里选取 $\Phi = 0.002$. 初始参数全部取为零值,也就是 $\hat{J}(0) = \hat{B}(0) = \hat{d}_+(0) = \hat{d}_-(0) = 0$. 为公平起见,PD控制采用相同的参数,即: $k_P = 2$, $k_D = 0.1$.

图2为采用鲁棒自适应死区补偿策略时的期望输出信号和实际输出信号,图3给出了采用本文控制方法的跟踪误差.从图3可以看出,在起始阶段,由于控制器初值与系统初值的不一致,跟踪误差较大;随着时间推移,自适应律的调节作用得到发挥,使得跟踪误差越来越小,最后得到令人满意的跟踪性能.图4给出了采用PD控制的跟踪误差.从图4可以看出,采用PD控制,由于死区的影响产生了极限环,具有较大的稳态误差.从图3和图4可以看出,本文提出的控制策略性能明显优于PD控制.

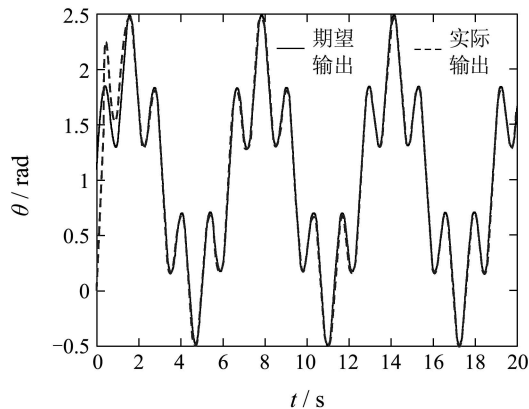


图2 采用本文控制方法的期望输出和实际输出

Fig. 2 Desired output and actual output with the proposed controller

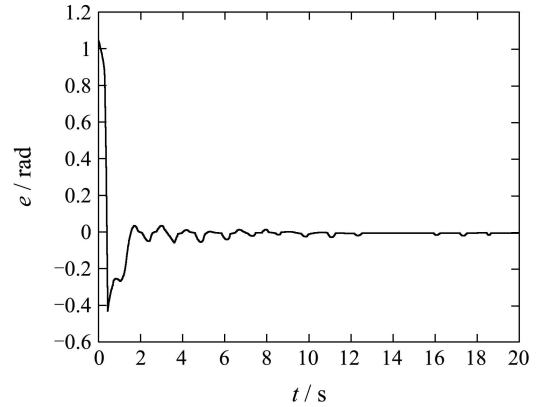


图3 采用本文控制方法的跟踪误差

Fig. 3 Tracking error with the proposed controller

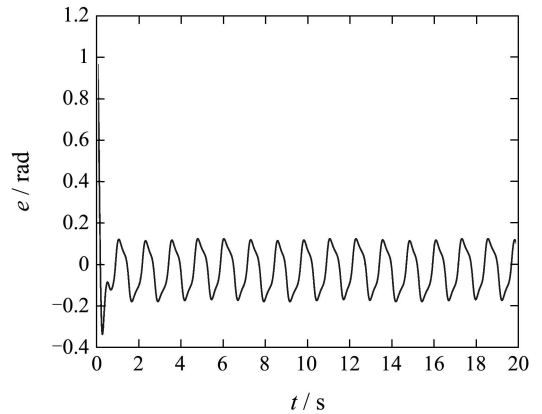


图4 采用PD控制的跟踪误差

Fig. 4 Tracking error with the PD controller

图5给出了本文控制方法的相应控制输入.在4 s时刻,对伺服系统增加 -0.4 V 的阶跃扰动, 0.4 V 的阶跃扰动相对 1 V 的饱和输入电压已经很大,图6给出了相应状况下的输出跟踪误差.从图6中可以看出,本文提出的控制策略对外部扰动显示了较强的鲁棒性能.

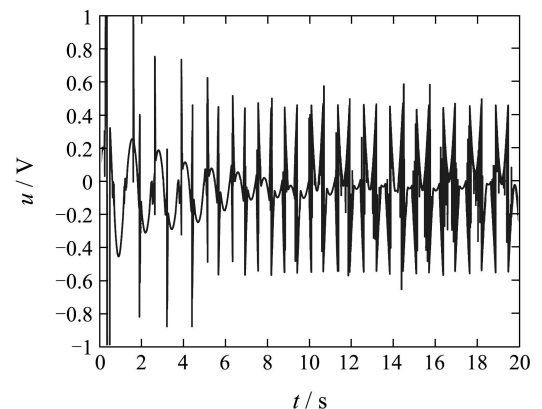


图5 采用本文控制方法的控制输入信号

Fig. 5 Control input signal with the proposed controller

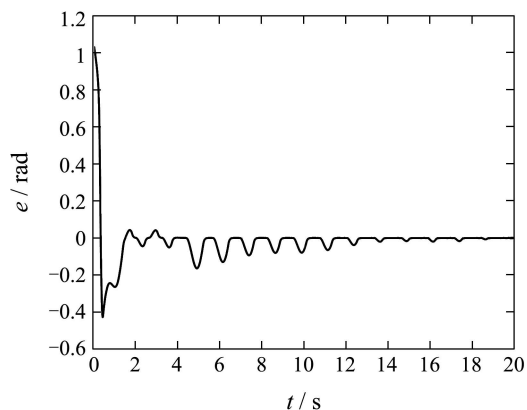


图6 在4 s时, 有0.4 V扰动时的跟踪误差

Fig. 6 Tracking error with adding 0.4 V disturbance at 4 s

5 结论 (Conclusion)

在运动控制中, 死区的存在限制了系统的跟踪性能. 本文针对直流伺服系统的未知死区, 提出的鲁棒自适应死区补偿策略, 不仅对死区具有鲁棒性, 而且对转动惯性、粘性摩擦等参数不确定性及外部扰动具有较强的鲁棒性, 并采用标准的非线性稳定性理论给与了证明. 理论分析和仿真结果都表明了这种控制策略的有效性.

参考文献(References):

- [1] UTKIN V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40(1): 23 – 36.
- [2] ŠELMIĆ R R, LEWIS F L. Deadzone compensation in motion control systems using neural networks[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(4): 602 – 613.
- [3] JAVIER C, LEWIS F L. Deadzone compensation in discrete time using adaptive fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 7(6): 697 – 707.
- [4] LEWIS F L, WOO K T, WANG L Z, et al. Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy logic control[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 1999, 7(6): 731 – 742.
- [5] JANG J O. A deadzone compensator of a DC motor system using fuzzy logic control[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Review*, 2001, 31(1): 42 – 48.
- [6] TAO G, PETER V. KOKOTOVIĆ. Adaptive control of plants with unknown deadzones[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(1): 59 – 68.
- [7] WANG X S, SU C Y, HENRY H. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown dead-zone[J]. *Automatica*, 2004, 40(3): 407 – 413.
- [8] SANNER R M, SLOTINE J J E. Gaussian networks for direct adaptive control[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, 3(6): 837 – 863.

作者简介:

王中华 (1967—), 男, 工学博士, 副教授, 目前研究方向为运动控制、自适应控制、非线性控制理论及应用等, E-mail: cse_wzh@ujn.edu.cn;

张 勇 (1965—), 男, 教授, 院长, 目前研究方向为机器人控制、智能控制理论及应用等, E-mail: cse_zhangy@ujn.edu.cn.