

基于复合自适应律的直线电机自适应鲁棒控制

张国柱, 陈 杰, 李志平

(北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要: 自适应鲁棒控制(ARC)能克服参数不确定性与扰动对系统的影响, 具有良好的输出跟踪性能. 然而常规ARC的参数估计值难以逼近真值. 为实现高性能的控制与准确的参数估计, 本文提出了基于复合自适应律的自适应鲁棒控制(CAARC). 该方法同时采用了输出误差与参数估计误差的相关信息构造自适应律, 具有比常规ARC更好的参数估计效果. 本文在理论上证明了CAARC的闭环稳定性与参数估计误差的收敛性, 并通过分析表明CAARC具有比常规ARC更好的输出跟踪性能, 最后通过仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 自适应鲁棒控制; 直线电机; 在线参数估计; 复合自适应律

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

An adaptive robust control for linear motors based on composite adaptation

ZHANG Guo-zhu, CHEN Jie, LI Zhi-ping

(School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The adaptive robust control(ARC) not only reduces the influence of parametric uncertainties and disturbance to the system, but also provides a good performance in output tracking. However, the parameter estimates of traditional ARC do not give good approximations to the true values of the corresponding parameters. To achieve a high performance control and accurate parameter estimation, we propose a novel composite-adaptation-based adaptive robust control method(CAARC). This method combines the information of output tracking error with the parameter estimate error in constructing the adaptation law, which gives a better result in parameter estimation than that from the traditional ARC. The close-loop stability and the convergence of parameter estimates are also proved. It has been shown by analysis that CAARC has a better tracking performance than the traditional ARC. Finally, the effectiveness of the proposed method is demonstrated by simulation.

Key words: adaptive robust control; linear motor; online parameter estimation; composite adaptation

1 引言(Introduction)

为提高控制系统的鲁棒性与输出跟踪性能, YAO和TOMIZUKA提出了自适应鲁棒控制(ARC)^[1,2]. 对存在未知参数与不确定非线性的对象, ARC能保证系统的全局稳定性, 并使输出误差在无外扰的情况下渐近趋于零^[2]. LI和YAO把ARC应用于直线电机的控制当中, 取得了良好的控制效果^[3~5]. YUN和YAO对上述方法进行改进, 使得ARC能够运用到输入受约束的系统当中^[6]. 然而以上ARC的自适应律只能保证参数估计值有界, 难以实现参数估计值收敛于真值.

针对常规ARC参数估计值难以逼近真值的问题, 本文对其自适应律进行改进, 提出了基于复合自适应律的自适应鲁棒控制(CAARC). 该方法能使参数的估计值逼近真值, 从而能实现对系统运行状况与

故障的监测. 通过理论与仿真表明CAARC具有良好的输出跟踪性能.

2 直线电机模型与问题描述(Linear motor model and problem formulation)

一般的无铁芯直线电机, 由于电流环的调节时间很短^[4], 故可忽略其电流动态特性. 本文采用的电机模型如下^[4]:

$$M \cdot \ddot{y} = u - F, F = F_f + F_r - F_d. \quad (1)$$

该模型考虑了摩擦与推力纹波的影响, 其中 y 为负载位置, M 为惯量负载与铁芯的总质量, F_f 为摩擦力, F_r 为推力纹波, F_d 为外部扰动. 工程上一般认为摩擦力 F_f 与负载运动速度 $\dot{y}$ 之间满足

$$F_f(\dot{y}) = B\dot{y} + F_{fn}(\dot{y}), \quad (2)$$

其中: B 为粘性摩擦系数; $F_{fn}(\dot{y})$ 为摩擦力中的非线性

性项,可表示为^[7]

$$F_{\text{fn}}(\dot{y}) = [f_c + (f_s - f_c)e^{-|\dot{y}/\dot{y}_s|^\xi}] \text{sgn } \dot{y}, \quad (3)$$

其中: f_s 为最大静摩擦力, f_c 为库仑摩擦力, $\dot{y}_s$ 和 ξ 为用于描述Stribeck效应^[7]的参数. 定义 $\Delta = F_d - F_r$, 则由(1)(2)可得如下状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ M\dot{x}_2 = u - Bx_2 - F_{\text{fn}} + \Delta, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (4)$$

上式中: x_1 为电机输出位置, x_2 为速度. 该模型包含非线性项 F_{fn} 与不确定项 Δ , 且参数 M, B 未知.

本文研究的问题是: 设计一个控制器, 使得系统(4)的输出 y 对期望轨迹 y_d 的跟踪误差尽可能小, 并实现对 M, B, F_{fn} 等未知参数的在线估计.

3 模型变换与假设条件(Model transformation and assumption)

为设计ARC, 需先对被控对象作一些假设, 并对其模型进行变换. 由式(3)可知摩擦模型在 $x_2 = 0$ 处不连续, 而实际电机不能输出不连续推力, 故采用连续函数 $\bar{F}_{\text{fn}}$ 逼近式(3), 其中

$$\bar{F}_{\text{fn}} = A_f S_f(x_2), \quad (5)$$

其中: A_f 为未知参数, S_f 为已知的连续函数. 定义集总扰动 $d = \bar{F}_{\text{fn}} - F_{\text{fn}} + \Delta$, 则模型(4)的第2式可表示为

$$M\dot{x}_2 = u - Bx_2 - A_f S_f + d, \quad (6)$$

假设 d 的标称值为 d_n . 参数 M, B, A_f 和 d_n 均未知, 需要在线估计. 定义参数向量

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]^T = [M, B, A_f, d_n]^T,$$

则电机模型可化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \theta_1 \dot{x}_2 = u - \theta_2 x_2 - \theta_3 S_f + \theta_4 + \tilde{d}. \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\tilde{d} = d - d_n$. 实际电机参数 M, B, A_f 和 d_n 均有界, 且边界一般已知或可测, 故作如下假设:

假设 1

$$\begin{cases} \theta \in \Omega_\theta := \{\theta : \theta_{i \min} \leq \theta_i \leq \theta_{i \max}, i=1, \dots, 4\}, \\ \tilde{d} \in \Omega_d := \{\tilde{d} : |\tilde{d}| \leq \delta_d\}, \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \theta_{\min} &= [\theta_{1 \min}, \dots, \theta_{4 \min}]^T, \\ \theta_{\max} &= [\theta_{1 \max}, \dots, \theta_{4 \max}]^T, \end{aligned}$$

且 $\theta_{\min}, \theta_{\max}$ 与 δ_d 均为已知.

为便于设计ARC, 定义如下中间变量^[4,8]:

$$p = \dot{e} + k_1 e = x_2 - x_{2eq}, \quad x_{2eq} := \dot{y}_d - k_1 e, \quad (9)$$

其中: $e = y - y_d(t)$ 为输出跟踪误差, $y_d(t)$ 为 y 的期望跟踪轨迹, $k_1 > 0$ 为反馈增益. 由式(9)可知: $e(s)/p(s) = 1/(s + k_1) = G_p(s)$. 由于 $G_p(s)$ 为稳定传递函数, 因此如果 p 趋于零, 则 e 也趋于零. 根据式(7)和(9)可得

$$\begin{aligned} M\dot{p} &= u - \theta_1 \dot{x}_{2eq} - \theta_2 x_2 - \theta_3 S_f + \theta_4 + \tilde{d} = \\ &u + \varphi^T \theta + \tilde{d}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中:

$$\varphi^T = [-\dot{x}_{2eq}, -x_2, -S_f(x_2), 1],$$

$$\dot{x}_{2eq} = \ddot{y}_d - k_1 \dot{e} = \ddot{y}_d + k_1 \dot{y}_d - k_1 x_2.$$

4 基于复合自适应律的自适应鲁棒控制(Adaptive robust control based on composite adaptation)

常规ARC能保证系统输出误差指数收敛到原点附近, 并且能在无扰动情况下使输出误差渐近趋于零. 而对于未知参数的估计值, 一般只能保证其有界. 如果要使参数的估计值逼近真值, 则输入信号应当满足持续激励条件^[9]. 对于实际系统, 此条件往往不能满足, 因此常规ARC难以实现准确的参数估计. 本文提出的CAARC方法, 能在比持续激励更弱的条件下, 实现未知参数的准确估计, 从而具有更好的在线学习能力. 本节先对常规ARC的性能进行分析, 再具体阐述CAARC的设计方法, 然后详细分析CAARC输出跟踪与参数估计的性能.

4.1 常规ARC的性能分析(Performance analysis of the traditional ARC)

1) 常规ARC的控制律为:

$$u = u_a + u_s, \quad u_a = -\varphi^T \hat{\theta}, \quad (11)$$

其中: u_a 为自适应控制项; u_s 为鲁棒控制项, 其形式如下:

$$u_s = u_{s1} + u_{s2}, \quad u_{s1} = -k_2 p. \quad (12)$$

k_2 为选定的正数, u_{s2} 需要满足以下条件:

$$p(u_{s2} - \varphi^T \tilde{\theta} + \tilde{d}) \leq \varepsilon, \quad (13a)$$

$$p u_{s2} \leq 0, \quad (13b)$$

其中: $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$, ε 为设计参数, 一般取很小的正值. 满足式(13)的 u_{s2} 可由下式求得^[1,4]

$$u_{s2} = -\frac{1}{4\varepsilon} h^2 p. \quad (14)$$

上式中, h 为满足 $h \geq \|\theta_{\max} - \theta_{\min}\| \cdot \|\varphi\| + \delta_d$ 的任意连续函数.

2) 常规ARC的自适应律为:

$$\dot{\hat{\theta}} = \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau), \tau = \varphi p, \quad (15)$$

其中 Γ 为一正定对角矩阵; $\text{Proj}_{\hat{\theta}}$ 为向量的投影算子, 定义如下:

$$\text{Proj}_{\hat{\theta}}(\cdot) = [\text{Proj}_{\hat{\theta}_1}(\cdot), \dots, \text{Proj}_{\hat{\theta}_p}(\cdot)]^T, \quad (16)$$

其中:

$$\text{Proj}_{\hat{\theta}_i}(\cdot) = \begin{cases} 0, & \hat{\theta}_i = \theta_{i\max}, \text{ 且 } \cdot_i > 0, \\ 0, & \hat{\theta}_i = \theta_{i\min}, \text{ 且 } \cdot_i < 0, \\ \cdot_i, & \text{ 否则.} \end{cases} \quad (17)$$

定理1^[4] 若被控对象(7)满足假设1, 并采用控制律为(11~13), 自适应律为(15)组成的ARC, 则系统具有如下性质:

1) 系统所有状态均有界, 且正定函数 $V_s = (1/2)Mp^2$ 有上界, 其上界定义为

$$V_s \leq \exp(-\lambda t)V_s(0) + (\varepsilon/\lambda)[1 - \exp(-\lambda t)],$$

其中 $\lambda = 2k_2/\theta_{1\max}$.

2) 如果 $\tilde{d} = 0$, 则系统的输出跟踪误差最终收敛到零, 即: 当 $t \rightarrow \infty$, 有 $e \rightarrow 0$.

证 略, 请参考文献[4].

由定理1的证明可知, 常规的ARC虽然能保证误差 e 最终趋于零, 但不能保证参数估计误差 $\hat{\theta}$ 趋于零, 只能通过投影算子, 使 $\hat{\theta}$ 保持在 $\Omega_{\hat{\theta}}$ 以内.

4.2 CAARC的设计(Design of CAARC)

参数的在线估计值除用于设计自适应控制律以外, 还能用于系统工作状态的检测或故障诊断^[9], 因此如果能使参数的估计值较好地逼近真值, 则能扩大自适应鲁棒控制器的应用范围.

为了使参数的在线估计值 $\hat{\theta}$ 能逼近其真值 θ , 需要改进常规ARC的自适应律. CAARC采用了复合自适应律, 不仅利用了系统输出的误差信息, 还利用了参数估计的误差信息. 该方法能使参数估计误差在比持续激励更弱的条件下收敛到零, 从而使参数估计值能逼近真值.

假设 $\tilde{d} = 0$. 则式(10)可表示为:

$$M\dot{p} = u - \theta_1\dot{x}_{2eq} - \theta_2x_2 - \theta_3S_f + \theta_4. \quad (18)$$

定义回归向量 φ_0 为: $\varphi_0 = [\dot{x}_2, x_2, S_f, -1]^T$, 则由式(18)与(9)可得关于 θ 的线性关系式:

$$\varphi_0^T \theta = u. \quad (19)$$

CAARC的控制律与自适应律分别如下:

- 1) CAARC的控制律为: 式(11)~(13);
- 2) CAARC采用复合自适应律, 形式如下:

$$\dot{\hat{\theta}} = \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau - \gamma\Gamma(P\hat{\theta} - Q)), \tau = \varphi p, \quad (20)$$

其中: $P(t) = \int_0^t \varphi_0 \varphi_0^T dr$, $Q(t) = \int_0^t \varphi_0 u dr$, γ 为可选的正数.

注1 由式(19) (20)和 $P(t)$, $Q(t)$ 的定义可知

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}} &= \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\varphi p - \gamma\Gamma(\int_0^t \varphi_0 \varphi_0^T dr \hat{\theta} - \int_0^t \varphi_0 \varphi_0^T \theta dr)) = \\ &= \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\varphi p - \gamma\Gamma \int_0^t \varphi_0 \varphi_0^T dr \tilde{\theta}). \end{aligned} \quad (21)$$

可见该自适应律不仅包含系统输出误差信息 p , 还包含与参数估计误差有关的项 $\int_0^t \varphi_0 \varphi_0^T dr \tilde{\theta}$, 故将其称为复合自适应律.

4.3 CAARC的稳定性证明及性能分析(Stability proof and performance analysis of CAARC)

引理1 对于任意的 τ 与 τ' , 下式成立:

$$\tilde{\theta}^T(\Gamma^{-1}\text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau - \Gamma\tau') - \tau) \leq -\tilde{\theta}^T\tau'. \quad (22)$$

证 当取 τ_0 为任意值时, 投影自适应律

$$\dot{\hat{\theta}} = \text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau_0), \tau_0 = \varphi p.$$

可使参数的估计值具有如下性质^[10]:

$$P1: \quad \hat{\theta} \in \Omega_{\hat{\theta}} := \{\hat{\theta} : \theta_{\min} \leq \hat{\theta} \leq \theta_{\max}\},$$

$$P2: \quad (\hat{\theta} - \theta)^T(\Gamma^{-1}\text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau_0) - \tau_0) \leq 0, \forall \tau_0.$$

令 $\tau_0 = \tau - \tau'$, 由P2可得:

$$\tilde{\theta}^T(\Gamma^{-1}\text{Proj}_{\hat{\theta}}(\Gamma\tau - \Gamma\tau') - (\tau - \tau')) \leq 0.$$

从而有式(22)成立. **证毕.**

定理2 对于被控对象(7), 采用控制律为式(11)~(13), 自适应律为式(21)组成自适应鲁棒控制器, 则系统具有如下性质:

A) 系统所有状态均有界, 且正定函数 $V_s = (1/2)Mp^2$ 是有上界的, 其上界定义为

$$V_s(t) \leq \exp(-\lambda t)V_s(0) + (\varepsilon/\lambda)[1 - \exp(-\lambda t)], \quad (23)$$

其中 $\lambda = 2k_2/\theta_{1\max}$.

B) 如果 $\tilde{d} = 0$, 则:

1) 系统的输出跟踪误差渐近趋于零, 即: 当 $t \rightarrow \infty$, 有 $e \rightarrow 0$.

2) 如果存在 $t_0 > 0$ 使得 $P(t_0)$ 非奇异, 则参数估计误差也趋于零, 即: 当 $t \rightarrow \infty$, 有 $\tilde{\theta} \rightarrow 0$.

证 A)的证明: 根据式(10) (11)和(12)可得

$$\dot{V}_s = -k_2p^2 + p(u_{s2} - \varphi^T\tilde{\theta} + \tilde{d}). \quad (24)$$

注意到式(13a), 可得

$$\dot{V}_s \leq -k_2p^2 + \varepsilon = -2k_2V_s/M + \varepsilon \leq -\lambda V_s + \varepsilon, \quad (25)$$

由此可得式(23), 故结论A)成立.

下面证明B): 选取如下Lyapunov函数:

$$V_a = V_s + (1/2)\tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta}.$$

如果 $\tilde{d} = 0$, 由式(24)可知

$$\dot{V}_a = -k_2 p^2 + p(u_{s2} - \varphi^T \tilde{\theta}) + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}},$$

把式(20)代入上式可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_a = & -k_2 p^2 + p(u_{s2} - \varphi^T \tilde{\theta}) + \\ & \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \text{Proj}_{\tilde{\theta}}(\Gamma \tau - \gamma(\Gamma P \hat{\theta} - \Gamma Q)). \end{aligned}$$

根据式(13b), 以及 P, Q 和 τ 的定义可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_a \leq & -k_2 p^2 - \tilde{\theta}^T \tau + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \text{Proj}_{\tilde{\theta}}(\Gamma \tau - \\ & \gamma \Gamma (\int_0^t \varphi_0 \varphi_0^T dr) \hat{\theta} + \gamma \Gamma \int_0^t \varphi_0 \varphi_0^T \theta dr = \\ & -k_2 p^2 + \tilde{\theta}^T (\Gamma^{-1} \text{Proj}_{\tilde{\theta}}(\Gamma \tau - \gamma \Gamma P \tilde{\theta}) - \tau). \end{aligned}$$

根据引理1可得

$$\dot{V}_a \leq -k_2 p^2 - \gamma \tilde{\theta}^T P \tilde{\theta}. \quad (26)$$

由上式可知 $p \in L_2$. 易知, p 有界, 故 p 一致连续. 根据Barbalat引理可知当 $t \rightarrow \infty$, 有 $p \rightarrow 0$ 从而根据式(9)有 $e \rightarrow 0$. 因此, B)中1)成立. 下面证明2): 由 P 的定义可知 $P(t_0)$ 为半正定矩阵. 因此, 如果 $P(t_0)$ 非奇异, 则有 $\lambda_{\min}(P(t_0)) > 0$, 即 $P(t_0)$ 正定. 对于 $t > t_0$, 有

$$\begin{aligned} P(t) = & \int_0^{t_0} \varphi_0 \varphi_0^T dr + \int_{t_0}^t \varphi_0 \varphi_0^T dr = \\ & P(t_0) + \int_{t_0}^t \varphi_0 \varphi_0^T dr. \end{aligned}$$

由于 $P(t)$, $P(t_0)$ 与 $\int_{t_0}^t \varphi_0 \varphi_0^T dr$ 均为半正定矩阵, 因此 $\lambda_{\min}(P(t)) \geq \lambda_{\min}(P(t_0))$. 综上可知, 如果存在 $t_0 > 0$ 使得 $P(t_0)$ 非奇异, 则对于 $t > t_0$ 有矩阵 $P(t)$ 正定, 且 $\lambda_{\min}(P(t)) \geq \lambda_{\min}(P(t_0)) > 0$. 又因为 $\gamma > 0$, 从而有当 $t > T$ 时, 式(26)的右端负定, 故 $\dot{V}_a < 0$, 根据Lyapunov定理可得当 $t \rightarrow \infty$ 时, $p \rightarrow 0$ 且 $\tilde{\theta} \rightarrow 0$. 因此B)中的2)成立. 证毕.

注 2 如果系统的参考输入 y_d 能使得对应的回归向量 φ_0 满足持续激励条件, 即存在正数 α_1 , T 对于任意 $t > 0$ 满足: $\int_t^{t+T} \varphi_0 \varphi_0^T dr \geq \alpha_1 I^{[9]}$, 则由定理2中的B)可知, CAARC能保证当 $t \rightarrow \infty$, 有 $\tilde{\theta} \rightarrow 0$. 然而要注意的是, 定理2中的 $P(t_0)$ 非奇异比持续激励条件更弱.

注 3 由式(26)可知, 在扰动 $\tilde{d} = 0$ 的情况下, 如果增大 γ , 则参数估计误差将以更快的速度收敛到零. 然而, 在有扰动情况下, 过大的 γ 会导致参数估计值在自适应过程中有较大的波动. 因此应选取合适的 γ , 使系统具有足够的参数收敛速度, 同时保证自适应过程对扰动的鲁棒性.

注 4 由式(14)和(24)可得

$$\dot{V}_s = -(k_2 + \frac{1}{4\epsilon} h^2) p^2 + p(-\varphi^T \tilde{\theta} + \tilde{d}).$$

在上式中, $p(-\varphi^T \tilde{\theta} + \tilde{d})$ 代表模型不确定性(参数不确定性与扰动)对系统的影响. 在扰动 $\tilde{d} = 0$ 的情况下, 如果 $\tilde{\theta} = 0$, 则 p 指数收敛到零. 在瞬态响应过程中, 由于常规ARC对应的 $\tilde{\theta}$ 难以趋于零, 模型不确定性的影响较大, 因此影响了系统输出误差的收敛速度. 而CAARC能以较短的时间使 $\tilde{\theta}$ 趋于零, 参数不确定性对其瞬态性能影响较小, 因此在瞬态过程中具有比常规ARC更小的跟踪误差.

5 仿真结果与分析(Simulation results and analysis)

本文仿真采用式(1)作为直线电机模型, 各模型参数与文献[4]一致, 取值如下:

$$M = 0.1 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2}),$$

$$B = 0.27 \text{ V}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}),$$

$$F_{\text{fn}}(\dot{y}) = 0.09(1 + 0.1 \cdot \exp(-1000\dot{y})) \text{sgn } \dot{y} \text{ V},$$

$$F_d - F_r = -0.005 + 0.01 \text{rand}(1) \text{ V},$$

其中 $\text{rand}(1)$ 为集合 $[0, 1]$ 内的一个随机数.

已知参数向量 θ 的取值范围为 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, 其中:

$$\theta_{\min} = [0.02, 0.24, 0.08, -1]^T,$$

$$\theta_{\max} = [0.12, 0.35, 0.12, 1]^T.$$

选取 $S_f(x_2) = (2/\pi) \arctan(9000x_2)$, 易知 A_f 的期望值为0.09. 另外, 集总扰动为 $d = A_f S_f - F_{\text{fn}} + F_r - F_d$. 由于 $A_f S_f$, F_{fn} 和 $F_r - F_d$ 均关于原点对称, 因此 d 的标称值 d_n 为0. 综上可知, 等价模型(7)对应的参数向量 θ 为: $\theta = [0.1, 0.27, 0.09, 0]^T$, 可见 $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$. 根据上述直线电机模型参数, 可按照前文所述的方法设计自适应鲁棒控制器, 得到的控制器参数如下:

1) 常规ARC: 设计鲁棒控制项为: $u_s = -k_s p$. 控制器的增益系数选为: $k_1 = 400$, $k_s = 32$. 自适应律的参数选为: $\Gamma = \text{diag}\{40, 40, 40, 100\}$.

2) CAARC: 取 $\gamma=50$, 其他参数和常规ARC一致.

该仿真参考输入 y_d 为幅值为0.1 m, 频率为0.5 Hz的正弦信号, 采用ODE45的数值算法, 跟踪误差曲线如图1所示.

由图1可见, CAARC具有更小的跟踪误差, 从而可以提高直线电机位置控制的精度. 由于Stribeck摩擦模型具有不连续性, 因此导致系统的输出误差在速度换向时存在跳变. 由图1可见CAARC比常规ARC的误差值跳变明显减小.

常规ARC由于参数估计值难以逼近真值, 其自适应项 u_a 往往不能较好地抑制模型不确定性的影响. 而CAARC能使参数的在线估计值不断逼近真值, 从而能通过自适应控制项逐渐消除模型不确定性的影响, 因此具有比常规ARC更小的跟踪误差. 图2~5给出了两种方法参数在线估计的不同效果.

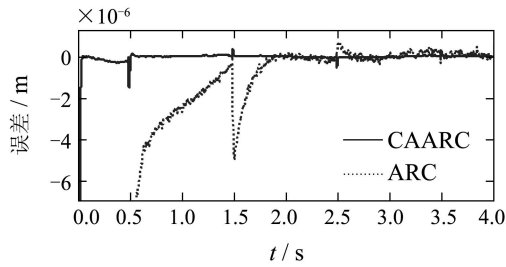
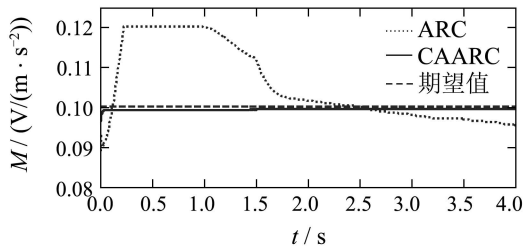
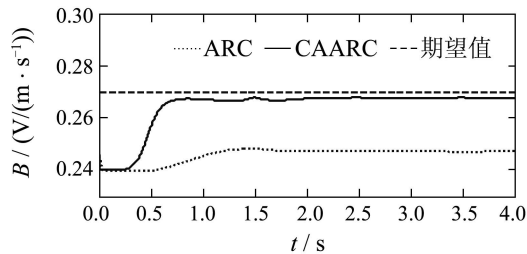
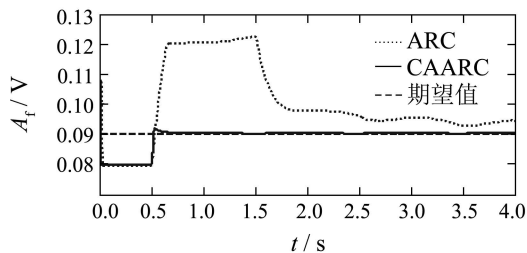
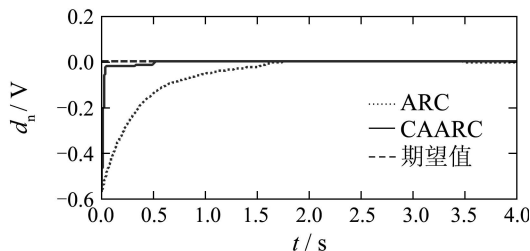


图1 系统跟踪误差曲线

Fig. 1 The curve of tracking error of the system

图2 参数 $\theta_1(M)$ 的在线估计值Fig. 2 Online estimation of parameter $\theta_1(M)$ 图3 参数 $\theta_2(B)$ 的在线估计值Fig. 3 Online estimation of parameter $\theta_2(B)$ 图4 参数 $\theta_3(A_f)$ 的在线估计值Fig. 4 Online estimation of parameter $\theta_3(A_f)$ 图5 参数 $\theta_4(d_n)$ 的在线估计值Fig. 5 Online estimation of parameter $\theta_4(d_n)$

由图2~5可以看出, 两种方法的参数估计值均能保持在集合 Ω_θ 以内. 常规ARC虽然能保证参数的在

线估计值有界, 但不能收敛到真值; 而CAARC能使参数估计值收敛到真值.

以上仿真结果表明, CAARC具有良好的参数在线估计效果, 而常规ARC的参数估计有较大的偏差. 此外, 从误差曲线可以看出CAARC比常规ARC更快地跟踪上参考输入, 因此具有比常规ARC更快的响应速度.

6 结论(Conclusion)

本文针对常规自适应鲁棒控制器参数估计值不能逼近真值的问题, 提出了基于复合自适应律的改进方法. 该方法同时利用了系统输出误差信息与参数估计误差信息对未知参数进行在线估计, 具有比常规ARC更好的参数估计能力, 从而能提高自适应鲁棒控制器的性能. 本文证明了该方法的系统闭环稳定性, 以及参数估计误差的收敛性. 理论推导和仿真结果表明, 基于复合自适应律的自适应鲁棒控制器具有比常规ARC更好的参数在线估计效果, 从而具有更好的控制性能.

参考文献(References):

- [1] YAO B, Al-MAJED M, TOMIZUKA M. High performance robust motion control of machine tools: an adaptive robust control approach and comparative experiments[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 1997, 2(2): 63 – 76.
- [2] YAO B, TOMIZUKA M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form[J]. *Automatica*, 1997, 33(5): 893 – 900.
- [3] YAO B, LI X. Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing[J]. *Mechatronics*, 2002, 12(4): 595 – 616.
- [4] LI X, YAO B. Adaptive robust precision motion control of linear motors with negligible electrical dynamics: theory and experiments[J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 2001, 6(4): 444 – 452.
- [5] LI X, YAO B. Output feedback adaptive robust precision motion control of linear motors[J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 1029 – 1039.
- [6] YUN H, YAO B. A globally stable saturated desired compensation adaptive robust control for linear motor systems with comparative experiments[J]. *Automatica*, 2007, 43(10): 1840 – 1848.
- [7] ARMSTRONG B, DUPONT P. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. *Automatica*, 1994, 30(7): 1083 – 1138.
- [8] WU J H, PU D L. Adaptive robust motion control of SISO nonlinear systems with implementation on linear motors[J]. *Mechatronics*, 2007, 17(4): 331 – 332.
- [9] SLOTINE J J, LI W P. *Applied Nonlinear Control*[M]. Englewood-Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1991.
- [10] YAO B, TOMIZUKA M. Smooth robust adaptive sliding mode control of robot manipulators with guaranteed transient performance[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1996, 118(4): 764 – 775.

作者简介:

张国柱 (1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为自适应鲁棒控制、伺服系统, E-mail: zhangguozhu@bit.edu.cn;

陈杰 (1965—), 男, 博士生导师, 研究方向为智能控制、约束系统控制, E-mail: chenjie@bit.edu.cn;

李志平 (1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为自适应控制.