

电机伺服系统快速自适应抗扰控制

方靖荃, 邓文翔, 姚建勇, 陈久辉, 王鹏飞

(南京理工大学机械工程学院, 210094, 南京)

摘要: 为实现电机伺服系统在参数不确定性和未建模干扰共同作用下的高精度运动控制,提出一种基于有限时间参数估计的快速自适应抗扰控制(FADRC)方法。针对参数不确定性,通过引入一阶低通滤波运算和辅助中间变量,构造一种由跟踪误差、参数估计误差和系统状态估计误差复合驱动的新型参数自适应律,实现未知参数的在线快速更新;针对未建模干扰,设计扩张状态观测器(ESO)进行估计并由前馈项补偿;此外,借助反馈鲁棒项保证系统整体鲁棒性。基于 Lyapunov 稳定性理论的分析表明,所提出的控制方法可保证快速的参数估计性能和优异的跟踪控制效果。搭建了电动伺服实验平台进行测试,测试结果表明:相比基于传统自适应律的控制方法,所提出的新型控制方法的参数估计收敛速度提高约 80%,跟踪误差最大值减小约 13.8%。该方法可为实际机电系统的高精度伺服控制和快速参数辨识提供参考。

关键词: 电机伺服系统; 参数不确定性; 未建模干扰; 快速自适应; 扩张状态观测器

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202106006 **文章编号:** 0253-987X(2021)06-0044-09



OSID 码

A Fast Adaptive Disturbance Rejection Control for Motor Servo Systems

FANG Jingquan, DENG Wenxiang, YAO Jianyong, CHEN Jiuhui, WANG Pengfei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A fast adaptive disturbance rejection control method (FADRC) based on finite-time parameter estimation is proposed to realize high precision motion control of motor servo systems under the combined effect of parameter uncertainties and unmodeled disturbances. For parameter uncertainties, a novel parameter adaptation law driven by a combination of tracking error, parameter estimation error and system state estimation error is constructed by introducing first-order low-pass filtering operations and auxiliary intermediate variables to realize the fast online updating of unknown parameters. For unmodeled disturbances, an extended state observer (ESO) is designed to estimate them and compensate them with a feedforward term. In addition, the overall robustness of the system is ensured by the feedback robust term. Analysis based on Lyapunov stability theory shows that the proposed control method can guarantee fast parameter estimation performance and excellent tracking control effect. An electric servo experimental platform is built to test its effectiveness and superiority. Test results and a comparison with the traditional adaptation law-based control method show that the proposed novel control method improves the convergence speed of parameter estimation by about 80% and reduces the maximum tracking error by about 13.8%. This method can provide reference for high precision servo

收稿日期: 2020-11-10。 作者简介: 方靖荃(1994—),男,硕士生;姚建勇(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075262,51905271);江苏省自然科学基金资助项目(BK20190459)。

网络出版时间: 2021-03-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210307.1630.002.html>

control and fast parameter identification of practical electromechanical systems.

Keywords: motor servo system; parameter uncertainty; unmodeled disturbance; fast adaptive; extended state observer

电机伺服系统在工业和国防领域有着广泛应用,因此其高精度运动控制问题一直是相关领域的研究热点^[1-3]。然而,由于实际系统存在诸多模型不确定性,包括参数不确定性^[4]和未建模干扰^[5](如非线性摩擦等),严重制约系统控制性能的提升,给电机伺服系统的高精度运动控制带来巨大挑战^[6]。

为解决上述问题,研究者们提出了各种不同的控制策略。Whitaker 等人提出的自适应控制(AC)通过参数自适应律实现未知参数的在线更新,可以有效处理系统参数不确定性^[7-8]。Yao 等人提出的自适应鲁棒控制(ARC),能够同时处理系统参数不确定性与未建模干扰,在理论上保证了给定的瞬态跟踪性能和稳态跟踪精度,并且当仅存在参数不确定性时,还可以实现渐近跟踪^[9-10]。当系统未建模干扰较强时,ARC 只能通过高反馈增益保证良好的控制效果,然而过高的反馈增益可能激发系统高频动态进而引发系统失稳。Han 等人提出的自抗扰控制(ADRC)利用扩张状态观测器(ESO)对广义扰动进行估计,实现在不需要太多系统模型信息的条件下的干扰补偿^[11-13]。然而,ADRC 未精确考虑系统的参数不确定性,当系统模型不确定性主要来自不确定参数时,其控制性能往往弱于传统自适应控制。文献[14-15]融合自适应控制和基于干扰观测的补偿控制的特点,提出了一种基于模型的自抗扰自适应控制方法(ADRAC)。ADRAC 控制器在保留所融合的两种控制方法优势的同时,克服了它们各自的性能缺陷,但由于该控制策略中参数自适应律仅由跟踪误差和系统状态估计误差驱动,参数估计收敛速度较慢,进而导致了较差的系统瞬态跟踪性能。

基于以上考虑,本文针对实际电机伺服系统,提出了一种快速自适应抗扰控制(FADRC)方法。考虑到未知参数和其估值间的误差一般难以测量,通过引入一阶低通滤波运算和辅助中间变量提取参数估计误差,构造了一种由跟踪误差、参数估计误差及状态估计误差复合驱动的新型参数自适应律,并与扩张状态观测器有效融合,实现系统未知参数估计指数收敛的同时可主动补偿系统的未建模干扰。当系统存在时变干扰时,所提出的控制方法可保证一致最终有界的跟踪性能,当系统只存在常值干扰时,

还可获得优异的渐近跟踪性能。此外,得益于新型快速参数自适应律,系统的瞬态性能可以获得有效提升。针对电机伺服系统的测试实验验证了本文所提出控制方法的有效性以及相比于现有方法的优越性。

1 数学建模

本文研究的伺服电机系统体系结构如图 1 所示:位移控制器接收参考位置信号 $x_{1d}(t)$ 并将控制输入 u 传递至电机驱动器,外部编码器向位移控制器反馈电机位置信号构成位置闭环;运行于转矩模式下的驱动器驱动永磁同步电机带动惯性负载,驱动器内部的 PID 控制器完成电流闭环。控制器设计目标为:给定 $x_{1d}(t)$,设计一个有界且连续的 u 使得系统输出位移 x_1 跟踪 $x_{1d}(t)$ 的误差尽可能地小。考虑到电机的电磁时间常数相较机械时间常数小得多,并且电流环的响应速度远大于位置环的响应速度,故可忽略电流环动态,将其近似为比例环节处理。可建立惯性负载的动力学方程如下

$$m\ddot{y} = K_t u - B\dot{y} - f(y, \dot{y}, t) \tag{1}$$

式中: y 和 m 分别表示角位移和负载惯量; K_t 表示力矩常数; u 表示控制输入; B 表示黏性摩擦系数; f 表示其他未建模干扰,如非线性摩擦、外干扰等。

定义系统状态变量 $\mathbf{x}=[x_1, x_2]^T=[y, \dot{y}]^T$,系统未知参数向量 $\boldsymbol{\theta}=[\theta_1, \theta_2]^T=[K_t/m, B/m]^T$,未建模干扰 $d(x, t)=f(x, t)/m$ 。则由式(1)可推得系统状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \theta_1 u - \theta_2 x_2 - d(x, t) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

为了便于控制器设计,作如下假设。

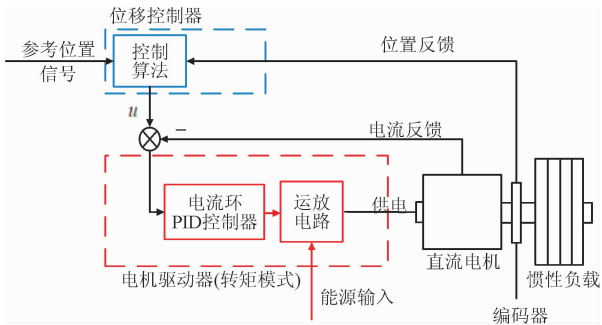


图 1 电机伺服系统体系结构图

Fig. 1 Architecture diagram of motor servo system

$$\dot{\mathbf{e}} = \omega_o \mathbf{A} \mathbf{e} + \mathbf{B}_2 h(t) / \omega_o^2 \quad (12)$$

由于矩阵 $\mathbf{A}$ 是 Hurwitz 矩阵,故一定存在正定矩阵 $\mathbf{J}$ 满足如下 Lyapunov 等式

$$\mathbf{A}^T \mathbf{J} + \mathbf{J} \mathbf{A} = -\mathbf{E} \quad (13)$$

式中 $\mathbf{E}$ 表示单位矩阵。

通过计算不难求出矩阵 $\mathbf{J}$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -1 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ -1 & -0.5 & 4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

经过分析可以发现,无论如何定义系统的扩张状态变量,所构造的 ESO 都是相同的,不同的只是状态估计误差动态的表达式。这一性质将有助于在不同情形下运用 Lyapunov 函数进行稳定性分析。此外,基于文献[17]的结论可以推断,所构造的线性 ESO 是稳定的,且理论上通过增大参数 ω_o ,可以保证系统的状态估计误差任意小。

2.3 控制器设计

由反步法思想,设计快速自适应抗扰控制器的步骤如下。

步骤 1 定义如下误差变量

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= x_1 - x_{1d} \\ z_2 &= x_2 - \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: z_1 为系统跟踪误差; α_1 为状态 x_2 的虚拟控制律; z_2 为两者之间的偏差。

对 z_1 求导,可得

$$\dot{z}_1 = z_2 + \alpha_1 - \dot{x}_{1d} \quad (16)$$

设计虚拟控制律如下

$$\alpha_1 = \dot{x}_{1d} - k_1 z_1 \quad (17)$$

式中增益系数 $k_1 > 0$ 。由式(15)~(17)可得

$$\dot{z}_1 = z_2 - k_1 z_1 \quad (18)$$

步骤 2 设计第二通道的自适应律。为了便于理论推导,在情形 1(即 $x_3 = d(x, t)$)的条件下,假设系统的未建模干扰为常值,即 $h(t) = 0$,将式(2)中的第 2 个公式变形为

$$\dot{x}_2 - \hat{x}_3 - \tilde{x}_3 = \theta^T \boldsymbol{\varphi} \quad (19)$$

考虑到参数估计误差无法直接测量,对上式中系统状态信息项 $\dot{x}_2$ 、 $\hat{x}_3$ 、 $\tilde{x}_3$ 和回归矩阵 $\boldsymbol{\varphi}$ 等项,引入如下—阶低通滤波运算

$$\left. \begin{aligned} k\dot{x}_{2f} + x_{2f} &= x_2, & x_{2f}(0) &= 0 \\ k\dot{\hat{x}}_{3f} + \hat{x}_{3f} &= \hat{x}_3, & \hat{x}_{3f}(0) &= 0 \\ k\dot{\tilde{x}}_{3f} + \tilde{x}_{3f} &= \tilde{x}_3, & \tilde{x}_{3f}(0) &= 0 \\ k\dot{\boldsymbol{\varphi}}_f + \boldsymbol{\varphi}_f &= \boldsymbol{\varphi}, & \boldsymbol{\varphi}_f(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, $k > 0$ 表示滤波运算系数。

另外,注意到

$$\dot{\tilde{x}}_3 = \dot{x}_3 - \dot{\hat{x}}_3 = h(t) - \omega_o^3 (\hat{x}_1 - x_1) \quad (21)$$

因此,当 $h(t) = 0$ 时, $\tilde{x}_3$ 可按上式积分得到。

进一步,可定义如下辅助中间变量 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{P}} &= -l\mathbf{P} + \boldsymbol{\varphi}_f \boldsymbol{\varphi}_f^T, & \mathbf{P}(0) &= \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{Q}} &= -l\mathbf{Q} + \boldsymbol{\varphi}_f (\dot{x}_{2f} - \hat{x}_{3f} - \tilde{x}_{3f}), & \mathbf{Q}(0) &= \mathbf{0} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中 l 为滤波系数,是一个正值常数。

对上式进行积分操作,可得 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Q}$ 表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P} &= \int_0^t e^{-l(t-\beta)} \boldsymbol{\varphi}_f(\beta) \boldsymbol{\varphi}_f^T(\beta) d\beta \\ \mathbf{Q} &= \int_0^t e^{-l(t-\beta)} \boldsymbol{\varphi}_f(\beta) (\dot{x}_{2f} - \hat{x}_{3f} - \tilde{x}_{3f}) d\beta \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

由上式可推得

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P} \boldsymbol{\theta} \quad (24)$$

进而可定义包含参数估计误差信息的矩阵 $\mathbf{H}$

$$\mathbf{H} = \mathbf{P} \hat{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{Q} = \mathbf{P} \tilde{\boldsymbol{\theta}} \quad (25)$$

定义 $\lambda_{\max}(\cdot)$ 和 $\lambda_{\min}(\cdot)$ 分别表示相应矩阵的最大最小特征值,则有如下引理。

引理 1 如果回归矩阵 $\boldsymbol{\varphi}$ 满足持续激励条件(PE),则矩阵 $\mathbf{P}$ 是正定的,使得其最小特征值 $\lambda_{\min}(\mathbf{P}(t))$ 可以满足^[18]

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{\min}(\mathbf{P}(t)) &> \sigma \\ t &> T > 0, \sigma > 0 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中 σ 为常数。

在此基础上,可定义参数自适应函数 τ 为

$$\tau = C_1 \boldsymbol{\varphi}^T z_2 - C_2 \frac{\mathbf{P}^T \mathbf{H}}{\|\mathbf{H}\|} + C_3 \frac{\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{J} \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\varphi}}{\omega_o} \quad (27)$$

式中 $C_1 > 0$ 、 $C_2 > 0$ 、 $C_3 > 0$ 表示自适应增益系数。

不同于传统控制方法的自适应律,式(27)提出的新型参数自适应律包含 3 项:第 1 项 $\boldsymbol{\varphi}^T z_2$ 基于系统跟踪误差信息,第 2 项 $\mathbf{P}^T \mathbf{H} / \|\mathbf{H}\|$ 基于参数估计误差信息,第 3 项 $\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{J} \mathbf{B}_1 \boldsymbol{\varphi} / \omega_o$ 基于系统状态估计误差信息。当取定系数 $C_2 = 0$ 时,式(27)退化为自抗扰自适应控制所采用的自适应律;进一步取定 $C_3 = 0$,则退化为传统自适应控制对应的经典自适应律。

通过运用新型参数自适应律,可以在继承传统自适应律优点的基础上,克服其参数估计收敛速度较慢,系统瞬态跟踪性能较差等缺点,进而帮助改善控制性能。

基于获得的参数估计值,设计实际的控制输入 u 为

$$\left. \begin{aligned} u &= (u_a + u_s) / \hat{\theta}_1 \\ u_a &= \dot{\alpha}_1 + \hat{\theta}_2 x_2 - \hat{x}_3 \\ u_s &= -k_2 z_2 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式中: $k_2 > 0$ 为增益系数; u_a 是基于在线参数估计和系统状态估计进行调整的模型补偿项; u_s 是线性鲁棒反馈项, 用来保证系统鲁棒性。

3 稳定性分析及证明

对于由式(2)描述的电机伺服系统, 所设计的快速自适应抗扰控制器(28)及参数自适应律(27)可保证如下有关系统稳定性的结论。

结论 1 当 $h(t) = 0$ 时, 闭环系统所有信号均有界, 且跟踪误差渐近收敛至 0。

结论 2 当 $h(t) \neq 0$ 时, 闭环系统所有信号均有界。

结论 3 当 ϕ 满足 PE 条件时, 系统参数估计误差 $\bar{\theta}$ 能够在有限时间内收敛于 0。

基于 Lyapunov 稳定性理论, 结合所提出的电机伺服系统快速自适应抗扰控制(FADRC)方法, 对以上稳定性结论逐条进行证明。

结论 1 证明 在情形 1 的条件下, 可定义 Lyapunov 函数如下

$$V_1 = 0.5z_1^2 + 0.5C_1z_2^2 + 0.5C_2\bar{\theta}^T\Gamma^{-1}\bar{\theta} + 0.5C_3\epsilon^T J\epsilon \quad (29)$$

将式(8)、式(15)~(17)及式(27)代入上式, 同时假设 $h(t) = 0$, 对上式求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & z_1(z_2 - k_1z_1) + C_1z_2(-k_2z_2 - \bar{\theta}^T\phi + \hat{x}_3) + \\ & C_2\bar{\theta}^T\Gamma^{-1}\dot{\bar{\theta}} + 0.5C_3\dot{\epsilon}^T J\epsilon + 0.5C_3\epsilon^T J\dot{\epsilon} \leq \\ & -k_1z_1^2 + z_1z_2 - C_1k_2z_2^2 + C_1z_2\epsilon_3\omega_o^2 - \\ & 0.5C_3\omega_o \|\epsilon\|^2 \end{aligned} \quad (30)$$

定义

$$Z = [z_1, z_2, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3]^T \quad (31)$$

$$\mathbf{A}_1 =$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} k_1 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & C_1k_2 & 0 & 0 & -0.5C_1\omega_o^2 \\ 0 & 0 & 0.5C_3(\omega_o - 1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5C_3(\omega_o - 1) & 0 \\ 0 & -0.5C_1\omega_o^2 & 0 & 0 & 0.5C_3(\omega_o - 1) \end{bmatrix} \quad (37)$$

可通过调整参数 $k_1, k_2, C_1, C_2, C_3, \omega_o$, 使得对称矩阵 $\mathbf{A}_2$ 为正定, 则可得

$$\dot{V}_2 \leq -Z^T \mathbf{A}_2 Z + C_3\eta \leq -\lambda_{\min}(\mathbf{A}_2)Z^T Z + C_3\eta \quad (38)$$

对式(38)积分可得

$$V_2(t) \leq V_2(0)e^{-\lambda_{\min}(\mathbf{A}_2)t} + \frac{C_3\eta}{\lambda_{\min}(\mathbf{A}_2)}(1 - e^{-\lambda_{\min}(\mathbf{A}_2)t}) \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} k_1 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & C_1k_2 & 0 & 0 & -0.5C_1\omega_o^2 \\ 0 & 0 & 0.5C_3\omega_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5C_3\omega_o & 0 \\ 0 & -0.5C_1\omega_o^2 & 0 & 0 & 0.5C_3\omega_o \end{bmatrix} \quad (32)$$

可通过调整参数 $k_1, k_2, C_1, C_2, C_3, \omega_o$ 使得对称矩阵 $\mathbf{A}_1$ 正定, 因此可得

$$\dot{V}_1 \leq -Z^T \mathbf{A}_1 Z \leq -\lambda_{\min}(\mathbf{A}_1)Z^T Z \equiv -W \quad (33)$$

式中: $\lambda_{\min}(\mathbf{A}_1)$ 表示矩阵 $\mathbf{A}_1$ 的最小特征值; W 是一个正函数。因此可得 $V_1 \in L_\infty, W \in L_2$, 误差信号 Z 和 $\bar{\theta}$ 都有界。由假设 1 可得, 系统状态 x_1, x_2 和扩张状态 x_3 本身以及它们的估计都是有界的。另外, 考虑到假设 2, 可推得系统的控制输入 u 是有界的。综上所述, 对于该闭环系统而言, 所有的信号都是有界的。基于对误差的分析, $\dot{W}$ 是有界, 因此 W 具有一致连续性。应用 Barbalat 定理^[19], 当时间趋近于无穷时, 系统跟踪误差趋近于 0, 结论 1 得证。

结论 2 证明 当未建模干扰项 $d(x, t)$ 为时变的函数时, 运用情形 2 来进行分析。此时假设 $h(t)$ 有界 (即 $|h(t)| \leq \zeta, \zeta > 0$), 可定义 Lyapunov 函数如下

$$V_2 = 0.5z_1^2 + 0.5C_1z_2^2 + 0.5C_3\epsilon^T J\epsilon \quad (34)$$

类似于上文的处理, 对上式求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & z_1(z_2 - k_1z_1) + C_1z_2(-k_2z_2 + \hat{x}_3) + \\ & 0.5C_3\dot{\epsilon}^T J\epsilon + 0.5C_3\epsilon^T J\dot{\epsilon} \leq \\ & -k_1z_1^2 + z_1z_2 - C_1k_2z_2^2 + C_1z_2\epsilon_3\omega_o^2 - \\ & 0.5C_3(\omega_o - 1) \|\epsilon\|^2 + C_3\eta \end{aligned} \quad (35)$$

式中, η 定义为

$$\eta = 0.5(\|\mathbf{J}\mathbf{B}_2\| |\zeta| / \omega_o^2)^2 \quad (36)$$

定义

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -0.5C_1\omega_o^2 \\ 0 & 0 \\ 0.5C_3(\omega_o - 1) & 0 \\ 0 & 0.5C_3(\omega_o - 1) \end{bmatrix} \quad (37)$$

由以上推导可知, 对于该闭环系统而言, 所有的信号都是有界的, 系统的跟踪误差 z_1 有界稳定, 结论 2 得证。

结论 3 证明 为了证明参数估计误差 $\bar{\theta}$ 能在有限时间内收敛于 0, 可定义 Lyapunov 函数如下

$$V_3 = 0.5\bar{\theta}^T\Gamma^{-1}\bar{\theta} \quad (40)$$

对式(40)求导可得

$$\dot{V}_3 = \bar{\theta}^T\Gamma^{-1}\dot{\bar{\theta}} =$$

$$\begin{aligned} &C_1 \bar{\theta}^T \varphi z_2 + C_2 \frac{\bar{\theta}^T \varepsilon^T J B_1 \varphi}{\omega_o} - C_3 \|P \bar{\theta}\| \leq \\ &\quad - [\sqrt{2}/(\lambda_{\max}(\Gamma^{-1/2})V_3^{1/2})][C_3 \sigma - \\ &(C_1 \|\varphi\| \|z_2\| + C_2 \|\varepsilon\| \|J B_1\| \|\varphi\|/\omega_o)] \end{aligned} \tag{41}$$

由于 $z_2 \rightarrow 0$ 且 φ 是有界的,所以存在某一时刻 $t_f > 0$,当 $t > t_f$ 时有

$$(C_1 \|\varphi\| \|z_2\| + C_2 \|\varepsilon\| \|J B_1\| \|\varphi\|/\omega_o) < 0.5 C_3 \sigma \tag{42}$$

由文献[20]可知,当 φ 满足 PE 条件时,参数估计误差 $\bar{\theta}$ 能够在有限时间内收敛于 0,结论 3 得证。

需要说明的是,即使 φ 不满足 PE 条件,由对结论 1 的证明过程可知,所设计的控制方法仍能保证 $\bar{\theta}$ 有界。

基于以上分析,所设计的 FADRC 控制器主要包含如下参数:控制输入增益 k_1 、 k_2 ,扩张状态观测器带宽 ω_o ,系统参数幅值 $\theta_{\min}$ 、 $\theta_{\max}$,参数初始估计值 $\hat{\theta}(0)$,自适应矩阵 Γ ,自适应律增益系数 C_1 、 C_2 、 C_3 ;滤波运算增益系数 l 、 k 。关于参数的取值有以下考虑。

- (1) k_1 、 k_2 、 ω_o 和 C_1 、 C_2 、 C_3 偏小会影响控制效果且可能导致矩阵 Λ_1 、 Λ_2 的不正定,偏大又会因为测量噪声和高频动态等因素导致系统不稳定、控制效果恶化。因此,通常从较小的初值开始谨慎地增加以提高跟踪性能,直至达到满意的效果。
- (2) $\theta_{\min}$ 、 $\theta_{\max}$ 、 $\hat{\theta}(0)$ 的取值需要符合系统实际物理限制,在合理估值的基础上进行设置。
- (3)自适应矩阵 Γ 、滤波运算增益系数 l 、 k 主要影响系统参数自适应过程的速度和效果。一般而言,较小的 k 和较大的 Γ 有助于使得参数估计值收敛得更快更平稳。在此基础上,通过反复试错法完成参数调试取值。

4 实验验证

4.1 电动伺服实验平台搭建

为了验证所设计的 FADRC 控制器的控制性能,搭建电动伺服实验平台以进行不同工况下的实验验证对比。该实验平台包含实验系统、测控系统两部分,实验系统主体由支座、伺服电机和负载惯量盘组成,电机主轴与负载之间通过联轴器连接,并配有角度编码器和扭矩传感器。测控系统由控制柜、显示屏和鼠标键盘组成,控制柜内包含一台搭载 Ardencc RTX7.0 实时操作系统的工控机,A/D 转换板卡和 D/A 转换板卡,光电编码器数据采集卡、电源以及电机驱动器等。下位机控制程序在实时操

作系统的基础上由离散化的 C++ 代码编写,并通过 LabWindows CVI 构建了相应的上位机可视化监控软件,系统的控制采样周期设定为 0.5 ms。

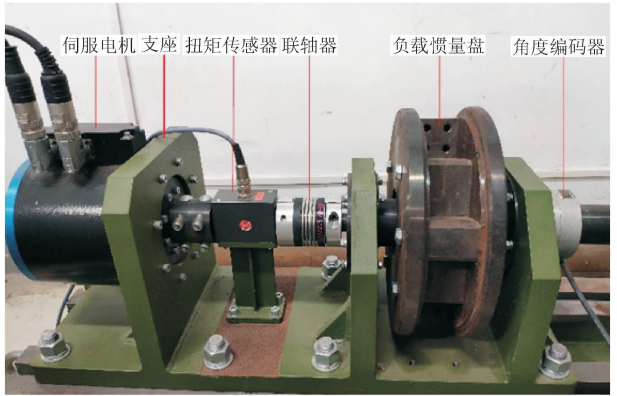


图 3 电动伺服实验平台
Fig. 3 Electric servo experiment platform

电动伺服实验平台各关键元件具体型号规格见表 1。

表 1 关键元件型号规格
Table 1 Types of key components

名称	型号规格
伺服电机	科尔摩根 D063M-13-1310
电机驱动器	科尔摩根 ServoStar 620
负载惯量盘	转动惯量 0.3 kg·m ²
角度编码器	海德汉 ERN180(精度±13")
联轴器	凸缘刚性联轴器 JB/ZQ4376-86 YL1
A/D 转换板卡	研华 PCI-1716
D/A 转换板卡	研华 PCI-1723
编码器采集卡	海德汉 IK-220

4.2 对比实验及分析

通过在如下 4 种控制器间进行比较,验证所设计的控制器的有效性和优越性。

本文所设计的快速自适应抗扰控制器 FADRC,依据前文所述调试方法反复尝试,选定如下参数取值: $k_1 = 165$, $k_2 = 60$; $\omega_o = 10$; $l = 1$, $k = 0.1$; $\Gamma = \text{diag}\{2, 0.05\}$; $C_1 = 1$, $C_2 = 0.5$, $C_3 = 1$; $\theta_{\min} = [100, 300]^T$, $\theta_{\max} = [0, 30]^T$; $\hat{\theta}(0) = [190, 2]^T$ 。

传统自抗扰自适应控制器 ADRAc,其参数自适应律不包含参数估计误差信息,故调整 $C_2 = 0$,其他参数与 FADRC 一致。

经典自适应控制器 ARC,其参数自适应律仅包含跟踪误差信息,且该算法不含扩张状态观测器。故取 $\omega_o = 0$, $C_2 = 0$, $C_3 = 0$,其他参数不变。

自抗扰鲁棒控制器 RCESO 与 FADRC 相比,该控制器不含参数自适应,故取控制输入 u 表达式内参数项为其名义值即可,其余不变。

为了充分验证控制器的控制性能,实验验证环节分为无干扰和有干扰两种工况。

(1)无干扰工况。参考位置信号为 $x_{1d}(t)=10\sin(0.5\pi t)$,此工况下不同控制器的跟踪误差对比如图 4 所示。

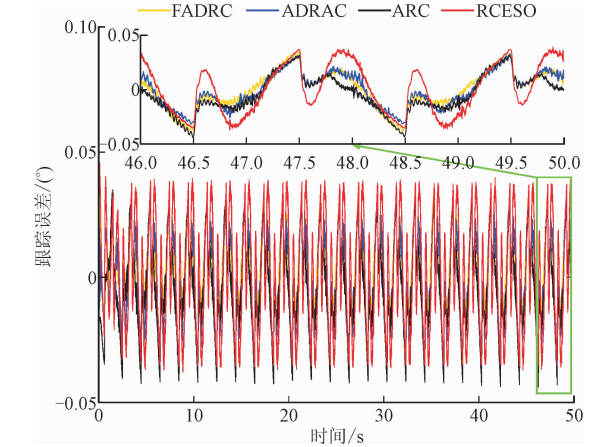


图 4 4 种控制器在无干扰工况下的跟踪误差对比
Fig. 4 Tracking errors under non-interference condition

为了量化实验数据,借鉴文献[15],在表 2 中选取跟踪误差的最大值 M_e 、平均值 μ 和标准差 σ 这 3 项指标以衡量不同控制器的控制性能。

表 2 无干扰工况下的性能指标			
Table 2 Performance indexes under non-interference condition			
控制器	$M_e/(^{\circ})$	$\mu/(^{\circ})$	$\sigma/(^{\circ})$
FADRC	0.033 2	0.013 9	0.007 6
ADRC	0.038 5	0.014 1	0.009 4
ARC	0.044 0	0.014 7	0.009 8
RCESO	0.039 5	0.019 9	0.010 7

对比表 2 数据可知,由于 ADRC 控制器有效融合参数自适应律和扩张状态观测器,相较于单纯的自抗扰控制器(RCESO)和自适应控制器(ARC),各项性能指标均有所提高;在此基础上,FADRC 同时考虑了跟踪误差、系统状态估计误差和参数估计误差,优化了系统参数估计收敛速度和瞬态性能,跟踪精度进一步提升,稳态误差峰值缩小至 0.0332° ,较 ADRC 减小约 13.8%。

图 5 为 2 种控制器在无干扰工况下的参数估计对比。由数据分析可知,ADRC 控制器参数估计

收敛耗时约 25 s,本文设计的 FADRC 控制器仅用时约 5 s,这是由于引入包含参数估计误差信息的切换项,因而使得参数估计快速收敛,相较于 ADRC 控制器参数估计速度提升约 80%,充分证明了系统快速性的特点。

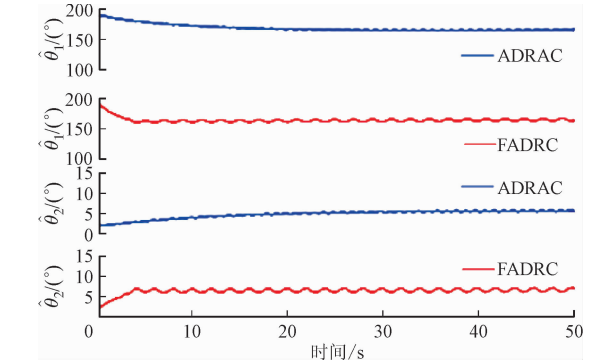


图 5 无干扰工况下的参数估计
Fig. 5 Parameter estimation under non-interference condition

(2)有干扰工况。该工况下参考位置信号不变,干扰是通过修改 D/A 板卡的控制输出函数 u_r 来模拟实现的。为了充分验证所设计控制方法的抗扰性能,将 u_r 修改为 $u_r=u-0.05x_1-0.05x_2$,式中 x_1 , x_2 分别为位置干扰项和速度干扰项。

各控制器在该工况下的跟踪误差对比如图 6 所示,量化数据列于表 3 中。

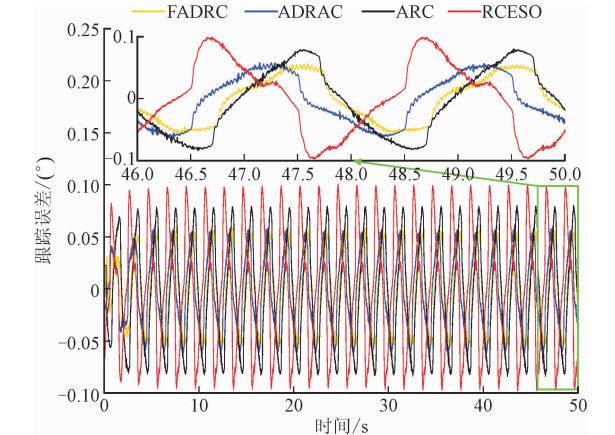


图 6 4 种控制器在有干扰工况下的跟踪误差对比
Fig. 6 Tracking errors under interference condition

表 3 有干扰工况下的性能指标			
Table 3 Performance indexes under interference condition			
控制器	$M_e/(^{\circ})$	$\mu/(^{\circ})$	$\sigma/(^{\circ})$
FADRC	0.056 4	0.032 8	0.017 1
ADRC	0.062 1	0.035 2	0.017 8
ARC	0.083 8	0.045 5	0.026 0
RCESO	0.099 3	0.048 4	0.031 9

分析数据可知,当存在位置-速度干扰时,FADRC控制器性能指标虽然较无干扰工况有退化,如图7所示。这是由于参数估计快速收敛,减轻了ESO的估计负担^[14],与其他控制器相比仍具有较好的控制精度,证明了FADRC自身具有良好的抗扰性能。

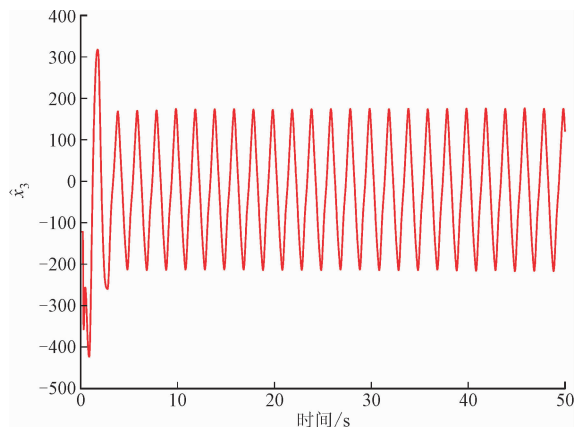


图7 有干扰工况下扩张状态观测

Fig. 7 Expanded state observation under interference conditions

综上所述,本文所设计的FADRC控制器,相较于其他传统控制器,在位置跟踪的稳态误差和在线参数估计的收敛速度等方面都有明显改善,具有更为理想的控制性能,充分验证了其有效性和相比于现有控制方法的优越性。

5 结 论

本文提出了一种电机伺服系统的快速自适应抗扰控制(FADRC)方法。所设计的控制器融合了自适应控制和基于干扰观测器的补偿控制,分别处理参数不确定性和未建模干扰,保留了两种控制方法的优势的同时,克服了它们的性能缺陷。所设计的参数自适应律中不仅包含跟踪误差项、系统状态估计误差项,还引入了与参数估计误差有关的切换项,显著提升了系统控制的稳态精度和在线参数估计的收敛速度,改善了系统控制性能。利用Lyapunov方法分析了闭环系统的稳定性,并通过实验结果对比验证了所提出的控制器的有效性和优越性。

参考文献:

[1] 赵峰, 罗雯, 高峰阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 34-41.
ZHAO Feng, LUO Wen, GAO Fengyang, et al. An

improved sliding mode control for PMSM considering sliding mode chattering and disturbance compensation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 34-41.

[2] 徐会风, 苏少平, 杜庆诚. 一种新型零矢量的二三导通无刷直流电机直接转矩控制系统研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(4): 85-92.

XU Huifeng, SU Shaoping, DU Qingcheng. A novel direct torque control system with new zero vector for two-three conduction brushless DC motors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(4): 85-92.

[3] 顾万里, 胡云峰, 张森, 等. 有刷直流电机自适应滑模控制器设计与实验 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 112-117.

GU Wanli, HU Yunfeng, ZHANG Sen, et al. Design and experiments on the adaptive sliding mode controller of brushed DC motor: assessment [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 112-117.

[4] 王敏林, 董雪明, 任雪梅, 等. 多电机驱动系统的保性能鲁棒 Funnel 控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 91-101.

WANG Minlin, DONG Xueming, REN Xuemei, et al. Optimal robust guaranteed cost funnel control for multi-motor driving system [J]. Control Theory and Application, 2020, 37(3): 91-101.

[5] YAO Jianyong, JIAO Zhongxia, YAO Bin. Robust control for static loading of electro-hydraulic load simulator with friction compensation [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(6): 954-962.

[6] 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 104-109.

WANG Hanxiao, LIU Ling, WU Huawei. A sensorless permanent magnet synchronous motor control strategy for improved sliding mode observers with stator parameters identification [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 104-109.

[7] 黄帅, 王昕, 王振雷. 一类非线性多变量系统的多模型自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 829-836.

HUANG Shuai, WANG Xin, WANG Zhenlei. Multiple model adaptive control for a class of nonlinear multivariable systems [J]. Control Theory and Application, 2020, 37(4): 829-836.

[8] DENG Wenxiang, YAO Jianyong, MA Dawei. Adaptive control of input delayed uncertain nonlinear systems with time-varying output constraints [J]. IEEE Access, 2017, 5: 15271-15282.

- [9] YAO Bin, TOMIZUKA M. Smooth robust adaptive sliding mode control of manipulators with guaranteed transient performance [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1996, 118(4): 1176-1180.
- [10] YAO Bin, TOMIZUKA M. Adaptive robust control of SISO nonlinear systems in a semi-strict feedback form [J]. *Automatica*, 1997, 33(5): 893-900.
- [11] GAO Zhiqiang, HUANG Yi, HAN Jingqing. An alternative paradigm for control system design [C] // 40th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 4578-4585.
- [12] GUO Baozhu, ZHAO Zhiliang. Active disturbance rejection control for nonlinear systems: an introduction [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016: 1-50.
- [13] 侯利民, 任一夫, 徐越, 等. 基于 NESO 的永磁同步电机滑模自抗扰控制 [J]. *控制工程*, 2019, 26(1): 50-54.
- HOU Limin, REN Yifu, XU Yue, et al. Sliding mode active disturbance rejection control of PMSM based on NESO [J]. *Control Engineering*, 2019, 26(1): 50-54.
- [14] YAO Jianyong, DENG Wenxiang. Active disturbance rejection adaptive control of uncertain nonlinear systems: theory and application [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 89(3): 1611-1624.
- [15] YAO Jianyong, DENG Wenxiang. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(10): 8023-8032.
- [16] GAO Zhiqiang. Scaling and parameterization based controller tuning [C] // 2003 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 4989-4996.
- [17] ZHENG Qing, GAO L Q, GAO Zhiqiang. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics [C] // 46th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 3501-3506.
- [18] NA Jing, MAHYUDDIN M N, HERRMANN G, et al. Robust adaptive finite-time parameter estimation and control for robotic systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, 25(16): 3045-3071.
- [19] 闵颖颖, 刘允刚. Barbalat 引理及其在系统稳定性分析中的应用 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2007, 37(1): 51-55, 114.
- MIN Yinyin, LIU Yungang. Barbalat lemma and its application in analysis of system stability [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2007, 37(1): 51-55, 114.
- [20] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Continuous finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(5): 678-682.

(编辑 刘杨)