

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519103

基于扰动观测器的 EMB 夹紧力复合滑模控制^{*}

姜平 鹿庆刚 张炳力 徐超 宋祖常

(合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009)

摘要: 针对电子机械制动系统存在夹紧力响应缓慢、控制精度恶化的问题,提出基于扰动观测器的电子机械制动夹紧力复合滑模控制方法。首先,根据电子机械制动系统不同制动阶段的需求,设计分阶段闭环控制策略,通过分段式控制算法实现精准调控;其次,在传统指数趋近律的基础上引入对称型 Sigmoid 函数和滑模面幂次项构建复合趋近律,在提升趋近速度的同时削弱抖振。同时设计超螺旋扩张状态观测器,用于估计系统扰动并将其反馈补偿至控制器中;最后通过 Lyapunov 函数证明所述控制算法和扰动观测器的稳定性。仿真结果表明,在紧急制动工况下,所述算法与双幂次算法及超螺旋算法相比,响应速度提升 0.05 s 和 0.06 s,平均稳态误差减少 0.04% 和 0.05%,证明了所述算法下的电子机械制动夹紧力控制具有更优的响应速度和控制精度。

关键词: 电子机械制动;分阶段闭环控制;滑模控制;夹紧力;扩张状态观测器

中图分类号: U463.5;TN60 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.2510;510.8020

Composite sliding mode control of EMB clamping force based on disturbance observer

Jiang Ping Lu Qinggang Zhang Bingli Xu Chao Song Zuchang

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To address the issues of slow clamping force response and deteriorated control accuracy in Electronic Mechanical Braking systems, a composite sliding mode control strategy incorporating a disturbance observer is proposed. Firstly, a phase-based closed-loop control strategy is designed to meet the requirements of different braking stages, enabling precise regulation through a segmented control algorithm. Secondly, based on the traditional exponential reaching law, a composite reaching law is developed by introducing a symmetric Sigmoid function and a power term of the sliding surface. This design enhances the reaching speed while mitigating chattering. Moreover, a super-twisting extended state observer is constructed to estimate system disturbances and feed them back to the controller for real-time compensation. The stability of the proposed control algorithm and observer is rigorously proven using the Lyapunov method. Simulation results under emergency braking conditions demonstrate that compared with the double-power reaching law and super-twisting algorithm, the proposed method improves the response speed by 0.05 s and 0.06 s, respectively, and reduces the average steady-state error by 0.04% and 0.05%, confirming the superior performance of the proposed EMB clamping force control strategy in terms of both response speed and control precision.

Keywords: electronic mechanical brake; staged closed-loop control; sliding mode control; clamping force; extended state observer

0 引言

在汽车制动领域,电子机械制动(electronic mechanical braking, EMB)系统因其响应快、结构紧凑、无需液压介质

等优势,成为下一代线控制动系统的研究热点^[1]。然而,EMB系统在实际运行中面临参数不确定性、非线性摩擦、外部负载扰动等多重挑战,传统控制方法难以同时满足响应速度、控制精度与抗干扰能力的需求^[2]。为实现高性能

收稿日期:2025-06-14

^{*} 基金项目:安徽省省级科技创新攻坚计划项目(202423e12050001)、济宁市产业创新重大技术项目(2022JBP002)、安徽省科技创新攻坚计划项目(202423d12050007)资助

制动控制,亟需对 EMB 系统的控制策略进行深入研究^[3]。

在 EMB 的控制算法方面,针对输出夹紧力的精确控制是当前研究的热点之一^[4]。目前,广泛应用于 EMB 系统的控制方法主要包括 PID 控制^[5]、滑模控制^[6]、自抗扰控制^[7]、模型预测控制^[8]以及模糊控制^[9]等。文献[10]利用遗传算法对 PID 控制器参数进行优化,相对于固定增益的 PID 控制器控制性能优异,但应对所有目标制动压力时需要大量优化数据,通用性较差。文献[11]设计了 EMB 多阶段控制策略,并在力控环节引入基于自抗扰控制的压力环控制器,实验结果表明其具备良好的鲁棒性,但压力环控制策略参量较多且整定困难,在实际应用中对控制器硬件的算力具有一定的要求。滑模控制因其有限时间收敛特性及优异的抗扰性能,近年来成为 EMB 系统控制策略设计的重要研究方向^[12-13]。文献[14]将模糊逻辑与滑模控制相结合,有效抑制了滑模控制中的抖振问题,但未考虑滑模控制增益和模糊参数对性能的影响,导致系统在不同工况下的适应性不足;文献[15]设计了一种改进的超螺旋滑模控制算法,以解决滑模面距离平衡点较远位置收敛慢的问题,但未将摩擦特性、电机参数漂移等问题纳入到模型中,可能导致算法在实际车辆中性能下降。

针对 EMB 系统中存在着电机参数漂移、摩擦特性变化、负载扰动及制动盘间隙不均等多种不确定性因素,导致控制性能下降甚至产生跟踪误差的问题,可以通过设计状态观测器对系统扰动进行动态估计与补偿,提升整体控制性能和系统可靠性。文献[16]提出一种高增益扩张观测器,用于估计系统的负载扰动并前馈补偿。文献[17]提出一种嵌入式非线性扰动观测器,在线估计时变参数及外部干扰,但对扰动的观测精度较低。

本文针对 EMB 系统对响应速度和控制精度的要求及现有研究的不足,提出了一种基于扰动观测器的 EMB 夹紧力复合滑模控制方法。根据 EMB 不同制动阶段的需求,设计三阶段闭环控制策略,通过分段式控制算法实现精准调控;设计了一种复合滑模趋近律的夹紧力控制器,同时设计超螺旋扩张状态观测器(super-twisting extended state observer, STESO)对扰动进行观测和补偿;利用 Lyapunov 函数验证算法的稳定性;最后通过仿真实验,将本文算法与超螺旋算法和双幂次算法进行对比,验证本文算法的性能。

1 方案与建模

1.1 EMB 方案

一种经典的 EMB 执行机构的组成如图 1 所示,主要由永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)、行星轮系、滚珠丝杠以及制动模块构成。PMSM 产生动力经行星轮系减速增扭进而带动滚珠丝杠,推动制动组件实现夹紧。根据 EMB 的实际运行特性,将制动过程划分为 3 个阶段:间隙消除阶段、力跟随阶段和间隙生成阶段。依据目标夹紧力与实际夹紧力之间的关系进行阶段

识别与切换;当目标夹紧力大于零且实际夹紧力不超过设定阈值时,系统处于间隙消除阶段;当目标夹紧力与实际夹紧力均大于该设定阈值时,为力跟随阶段;而当目标夹紧力为零且实际夹紧力不高于阈值时,则进入间隙生成阶段。本文设定阈值为 100 N。

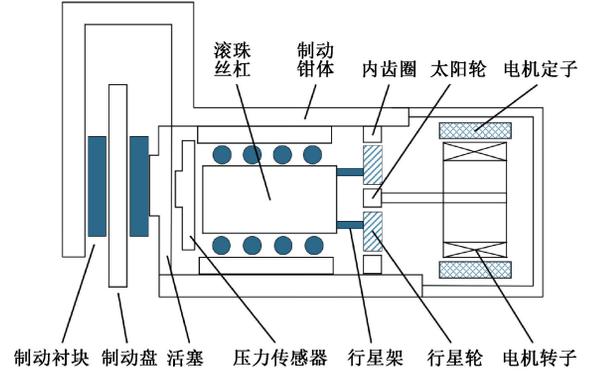


图 1 EMB 组成架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the EMB system architecture

1.2 EMB 数学建模

1) PMSM 数学模型

本文选取表贴式三相永磁同步电机作为驱动电机,其在同步旋转坐标系下的数学模型为^[18-19]:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l - T_f - B_v \omega \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 分别表示 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别表示 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别表示 d 、 q 轴电感; R 为定子电阻; ω_e 为电角速度; φ_f 为永磁体磁链; J 为转子转动惯量; ω 为机械角速度; T_e 为电机输出转矩; T_l 、 T_f 分别为负载转矩和摩擦转矩; B_v 为粘性摩擦系数。

2) 电机摩擦模型

本文采用 Stribeck 摩擦模型进行建模,反映 EMB 执行机构中的非线性摩擦特性,数学模型如下:

$$T_f = \begin{cases} T_e, & \omega = 0, |T_e| < T_s \\ T_s \cdot \text{sgn}(T_e), & \omega = 0, |T_e| \geq T_s \\ T_e + (T_s - T_c) \exp[-(\omega/\omega_s)^\delta] + B_v \omega, & \omega \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_s 表示最大静摩擦力矩; T_c 表示库伦摩擦力矩; ω_s 和 δ 为经验常数,一般取 1。

3) 传动机构模型

EMB 的传动机构主要由行星轮系和滚珠丝杠组成。行星轮系数学模型可表达为:

$$\theta_s = \frac{\theta}{i} \quad (4)$$

式中: θ_s 表示行星轮系输出端转角; θ 表示电机输出端转角; i 表示行星轮系减速比。

滚珠丝杠数学模型可表达为:

$$s = \frac{\theta_s \cdot L_0}{2\pi} \quad (5)$$

式中: s 表示滚珠丝杠螺母位移; L_0 表示滚珠丝杠导程。

4) 负载模型

本文采用如下公式来表示制动压力与制动衬片形变量之间的关系:

$$F_n = \begin{cases} F_{n3} \cdot x^3 + F_{n2} \cdot x^2 + F_{n1} \cdot x + F_{n0}, & x > \zeta \\ F_{n4} \cdot x, & x \leq \zeta \end{cases} \quad (6)$$

$$x = \begin{cases} 0, & s \leq s_0 \\ s - s_0, & s > s_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$T_l = \frac{F_n \cdot L_0}{2\pi i \eta_s \eta_p} \quad (8)$$

式中: F_n 为制动卡钳单侧夹紧力; F_{ni} ($i = 0, 1, 2, 3, 4$) 为夹紧力系数; x 为制动衬块形变量; ζ 为夹紧力表达式切换阈值; s_0 为初始制动间隙; η_s 为行星齿轮效率; η_p 为滚珠丝杠效率。

考虑系统内部参数扰动及外部不确定性扰动,将电机的动态方程改写为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{k_t}{J} - \Delta a\right)u - \left(\frac{B_v}{J} + \Delta b\right)\omega - \frac{T_l}{J} - \frac{T_f}{J} \quad (9)$$

整理得:

$$\frac{d\omega}{dt} = bu - g - d \quad (10)$$

$$g = \frac{B_v \omega}{J} + \frac{T_l}{J} \quad (11)$$

$$d = \Delta au + \Delta b\omega + \frac{T_f}{J} \quad (12)$$

式中: k_t 为转矩常数, $b = \frac{k_t}{J}$; u 为控制输入; Δa 、 Δb 为系统参数的不确定性; d 为系统总的不确定。

2 EMB 控制策略设计

2.1 总体控制策略设计

所设计的 EMB 系统总体控制策略如图 2 所示。在间隙消除阶段,采用“转速环-电流环”双闭环控制从而增强转速响应,实现制动间隙的迅速消除;而在力跟随阶段,采用“夹紧力环-转速环-电流环”三闭环调节机制,提升夹紧力的跟踪精度和系统稳定性;在间隙生成阶段,采用“位置环-转速环-电流环”三闭环控制,驱动电机反向运转,使制动衬块与制动盘之间的间隙准确恢复至设定值。

针对力跟随阶段因电机参数时变、摩擦非线性以及外部负载扰动等因素导致的力跟踪滞后、稳态误差大等问题,本文特别设计了改进滑模转速环控制器,同时设计 STESO,用于对系统存在的扰动进行估计和补偿,力跟随

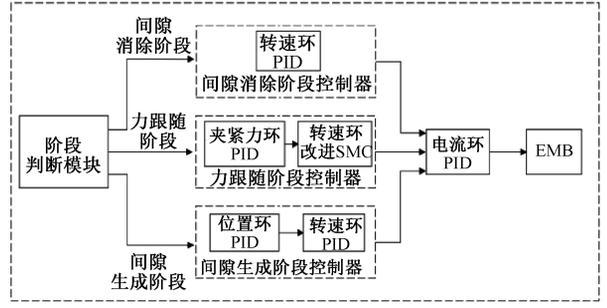


图 2 总体控制策略

Fig. 2 Overall control strategy

阶段改进控制器总体结构如图 3 所示。

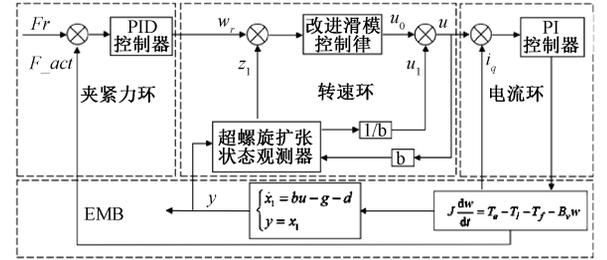


图 3 力跟随阶段改进控制器总体结构

Fig. 3 Overall structure of the improved controller in the force-following phase

2.2 超螺旋扩张状态观测器设计

为增强系统的抗干扰性能,设计 STESO,对 EMB 系统存在的扰动估计并补偿。

建立系统状态方程,令状态变量 $x_1 = \omega$, 输出 $y = \omega$, 由式(10)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = bu - g - d \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

将扰动项 d 扩张为新的状态变量 x_2 , 建立系统的扩张状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = bu - g - x_2 \\ \dot{x}_2 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (14)$$

以 x_1 和 x_2 为观测对象,定义估计误差,设计 STESO 为:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - x_1 \\ e_2 = z_2 - d \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = bu - g - z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = -b_1 |e_1|^{1/2} \text{sgn}(e_1) - b_2 \text{sgn}(e_1) - \beta_2 e_1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: z_1 、 z_2 为估计值; β_1 、 β_2 、 b_1 、 b_2 为待设计参数。

2.3 改进滑模控制律设计

通过设计滑模面和趋近律来实现夹紧力的稳定跟踪。定义跟踪误差如下:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_r - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\omega}_r - \dot{\omega} \end{cases} \quad (17)$$

式中: ω_r 为目标机械角速度, 由夹紧力环得出。

选取滑模面为:

$$s = c_1 x_1 + c_2 \int_0^t x_1 d\tau \quad (18)$$

式中: c_1, c_2 为正常数。对滑模面进行求导得:

$$\dot{s} = c_1 x_2 + c_2 x_1 \quad (19)$$

在滑模控制设计中, 传统指数趋近律虽广泛使用, 但因趋近速度有限及抖振现象明显, 难以满足 EMB 系统的高精度控制需求。为此, 本文提出一种复合滑模趋近律, 通过优化趋近律的切换增益和增加滑模面幂次项, 在保证快速收敛的同时, 提升系统的控制精度。复合滑模趋近律如下:

$$\dot{s} = -k_1 f(s) - k_2 |s|^{(1/2)} s^3 \quad (20)$$

$$f(s) = \frac{2}{1 + e^{-as}} - 1 \quad (21)$$

式中: k_1, k_2 均为正常数; $f(s)$ 为对称型 Sigmoid 边界函数; a 为正常数。本趋近律引入对称型 Sigmoid 边界函数 $f(s)$ 构成动态调节机制, 如图 4 所示, 相较于符号函数 sgn 和饱和函数 sat , Sigmoid 函数能够在原点处实现更好的平滑过渡。当系统状态远离滑模面 ($|s| > 1$) 时, $|f(s)| = 1$, 趋近律由 $-k_1 f(s)$ 和 $-k_2 s^3$ 共同起作用, 复合趋近律主要呈现线性特性, 从而有效提高趋近速度; 当系统状态逼近滑模面 ($|s| < 1$) 时, 复合趋近律的对称型 Sigmoid 函数和滑模面幂次项起作用, 既维持了一定的趋近速度, 又削弱了传统指数趋近律因固定增益引起的抖振问题。

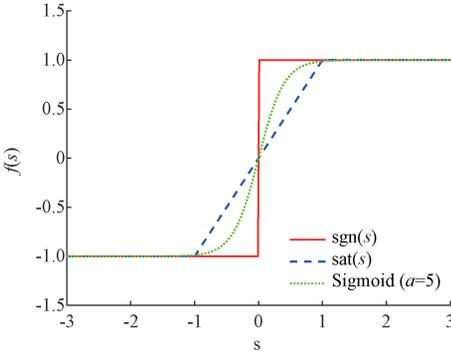


图 4 sgn, sat 和 Sigmoid 函数图像

Fig. 4 Graphs of the sgn, sat, and Sigmoid functions

结合式(15)和式(16)得控制器的表达式为:

$$u = i_q = \frac{1}{b} [\dot{\omega}_r + g + d + \frac{1}{c_1} (k_1 f(s) + k_2 |s|^{(1/2)} s^3 + c_2 x_1)] \quad (22)$$

基于前述所设计的改进扰动观测器, 将观测到的扰动补偿到式(22)中, 得控制器表达式为:

$$u = i_q = \frac{1}{b} [\dot{\omega}_r + g + z_2 + \frac{1}{c_1} (k_1 f(s) + k_2 |s|^{(1/2)} s^3 + c_2 x_1)] \quad (23)$$

2.4 稳定性分析

选取 Lyapunov 函数对复合滑模趋近律进行稳定性

分析:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (24)$$

$$\dot{V} = s\dot{s} = s[-k_1 f(s) - k_2 |s|^{(1/2)} s^3] = -k_1 s f(s) - k_2 |s|^{(1/2)} s^4 \quad (25)$$

当 $s > 0$ 时, $f(s) > 0$, $-k_1 s f(s)$ 和 $-k_2 |s|^{(1/2)} s^4$ 两项均小于 0, 得 $\dot{V} < 0$; 当 $s < 0$ 时, $f(s) < 0$, $-k_1 s f(s)$ 和 $-k_2 |s|^{(1/2)} s^4$ 两项均小于 0, 亦得 $\dot{V} < 0$ 。则可证明所设计的改进滑模趋近律稳定有效。

为证明设计的 STESO 的稳定性, 给出误差动态方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\beta_1 e_1 - e_2 \\ \dot{e}_2 = -b_1 |e_1|^{1/2} \text{sgn}(e_1) - b_2 \text{sgn}(e_1) \\ -\beta_2 e_1 - h(t) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $h(t) = \dot{d}$ 为扰动变化率, 假设扰动导数有上界, 即 $|h(t)| \leq H$ 。

定义观测器的 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} e_1^2 + \eta |e_2| \quad (27)$$

式中: η 为权重系数, 且 $\eta > 0$ 。

对 V 求导, 得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1 \dot{e}_1 + \eta \frac{d}{dt} |e_2| \\ &= e_1 (-\beta_1 e_1 - e_2) + \eta \text{sgn}(e_2) \dot{e}_2 \\ &= -\beta_1 e_1^2 - e_1 e_2 + \eta \text{sgn}(e_2) \cdot \\ &\quad [-b_1 |e_1|^{1/2} \text{sgn}(e_1) - b_2 \text{sgn}(e_1) - \beta_2 e_1 - h(t)] \end{aligned} \quad (28)$$

估计导数上界, 得:

$$\dot{V} \leq -\beta_1 e_1^2 - e_1 e_2 - \eta b_1 |e_1|^{1/2} - \eta b_2 - \eta \beta_2 |e_1| - \eta |h(t)| \quad (29)$$

去掉正项估计, 得:

$$\dot{V} \leq -\lambda_1 |e_1|^{1/2} - \lambda_2 |e_1| - \lambda_3 \quad (30)$$

其中:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \eta b_1 > 0 \\ \lambda_2 = \eta \beta_2 > 0 \\ \lambda_3 = \eta (b_2 - H) > 0 \end{cases} \quad (31)$$

根据有限时间稳定性判据, 若 $\dot{V} \leq -cV^\gamma$, 其中 $0 < \gamma < 1$, 则系统在有限时间 $T \leq \frac{V(0)^{1-\gamma}}{c(1-\gamma)}$ 内收敛。由式 $\dot{V} \leq -\lambda_1 |e_1|^{1/2} - \lambda_2 |e_1| - \lambda_3 \leq -cV^\gamma$ 可知, 存在 $\gamma \in (0, 1)$, 使该式成立。因此, 在满足设计参数条件 $b_2 > H$, 且 $\lambda_i > 0 (i = 1, 2, 3)$ 的情形下, 观测器误差系统满足有限时间稳定性判据, 所设计的 STESO 是稳定有效的。

3 仿真实验

3.1 仿真模型及参数

基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建 EMB 模型及控

制系统,对设计的控制策略进行实验和分析。

1) 双幂次趋近律

$$\dot{s} = -k_1 |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - k_2 |s|^\beta \operatorname{sgn}(s) \quad (32)$$

2) 超螺旋趋近律

$$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 |s|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(s) + v \\ \dot{v} = -k_2 \operatorname{sgn}(s) \end{cases} \quad (33)$$

将所提控制算法和双幂次趋近律滑模控制算法、超螺旋滑模控制算法进行对比分析。为更好地体现本文算法性能及对比分析,将本文算法、双幂次滑模控制算法、超螺旋滑模控制算法的系数统一,设置参数为: $k_1 = 100, k_2 = 80, \alpha = 1.15, \beta = 0.85$ 。设计的 STESO 参数为: $\beta_1 = 100, \beta_2 = 2\,500, b_1 = 33.5, b_2 = 550$ 。

实验所用的 EMB 的相关参数如表 1 所示。

表 1 EMB 系统主要参数

Table 1 Main parameters of EMB system

名称	符号	数值
阻尼系数	B_v	0.001 086 N · s/m
定子电阻	R	0.12 Ω
定子电感	L	0.000 5 H
转动惯量	J	0.000 1 kg · m ²
极对数	p	3
额定电压	U	12 V
永磁体磁链	ψ_f	0.015 Wb
行星齿轮减速比	i	16
行星齿轮效率	η_p	0.96
丝杠导程	L_0	4.5 mm
丝杆效率	η_s	0.95

3.2 抗干扰性能分析

为验证设计的 STESO 的扰动观测能力,给定系统一随机干扰信号,结果如图 5 所示。易见,STESO 对扰动的观测值与实际值重合度很高,二者在幅值和相位上均保持良好的一致性。因此设计的 STESO 具备很好的扰动辨识能力和快速跟踪特性,能够提高系统的抗扰能力。

3.3 紧急制动响应分析

设定 5 000 N 的阶跃信号,模拟汽车的紧急制动工况,仿真结果如图 6 所示。接受到制动信号后,系统以 1 000 r/min 的目标转速消除制动间隙,本文算法、双幂次算法和超螺旋算法均在 0.021 s 左右完成制动间隙消除。随后切换至力跟随阶段,3 种算法分别在 0.15、0.20、0.21 s 到达目标夹紧力值并保持稳定。在夹紧力值保持稳定时,本文算法基本无误差,双幂次和超螺旋的稳态误差分别为 0.04%、0.05%。综上,本文所提算法在紧急制动工况下具有最优的响应速度和稳态性能。图 7 为紧急制动工况下的滚珠丝杠位移,滚珠丝杠在 0.08 s 内平移 0.85 mm 后电机进入堵

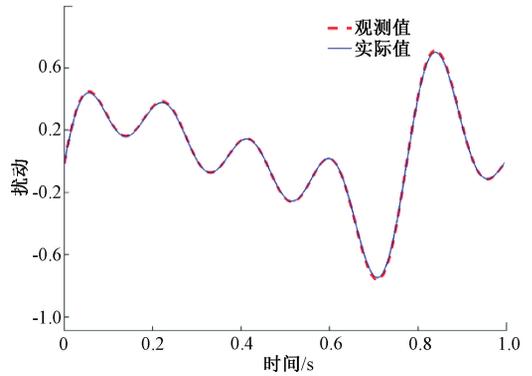


图 5 STESO 的扰动观测结果

Fig. 5 Disturbance observation results of the STESO

转状态,输出持续的夹紧力。

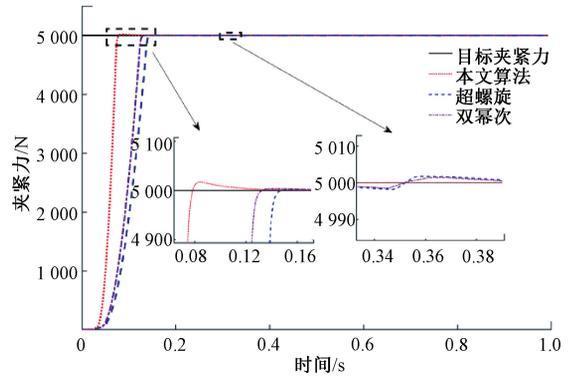


图 6 紧急制动工况夹紧力响应曲线

Fig. 6 Clamping force response curve under emergency braking condition

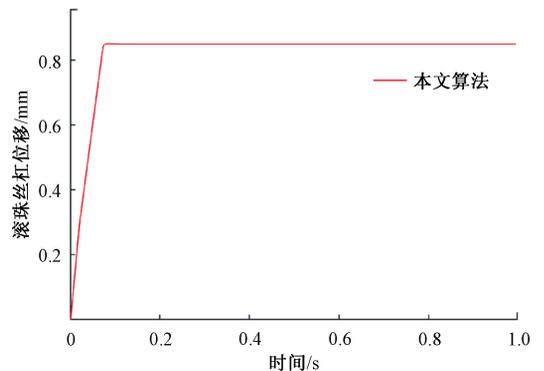


图 7 紧急制动工况滚珠丝杠位移

Fig. 7 Ball screw displacement under emergency braking condition

3.4 缓和制动响应分析

给系统施加三角波信号模拟缓和制动工况,结果如图 8 和 9 所示。在响应速度方面,本文算法在 0.047 s 时跟踪到目标夹紧力的数值并能实现稳定跟踪,而双幂次和超螺旋算法分别在 0.08 s 和 0.09 s 时才能实现稳定跟踪。由局部细节放大图可知,在三角波的波峰和波谷处,本文算法与目标夹紧力的贴合度很高,显著优于超螺旋和双幂次

算法。

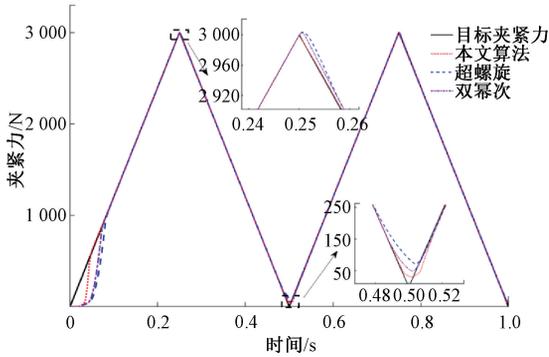


图 8 缓和制动工况夹紧力响应曲线

Fig. 8 Clamping force response curve under mild braking condition

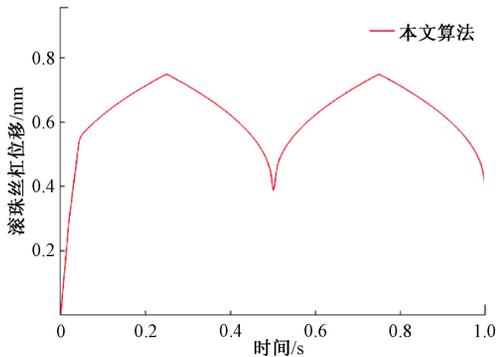


图 9 缓和制动工况滚珠丝杠位移

Fig. 9 Ball screw displacement under mild braking condition

3.5 正弦波制动工况响应分析

为验证系统的跟踪性能,给系统施加正弦波信号,各算法结果如图 10 和 11 所示。在响应时间方面,本文算法在 0.04 s 时跟踪到目标夹紧力的数值,双幂次和超螺旋算法响应时间较慢,分别在 0.07 s 和 0.08 s 实现稳定跟踪。在跟踪精度方面,本文算法和双幂次算法在跟踪到目标夹紧力后,都能够很好的与目标夹紧力贴合,而超螺旋算法存在一定的波动,稳态误差难以完全消除。因此可以得出结论,本文算法相对于其他两种算法,具有更快的响应速度和更高的跟踪精度。

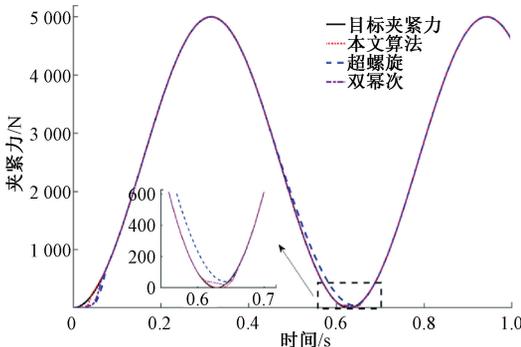


图 10 正弦波制动工况夹紧力响应曲线

Fig. 10 Clamping force response under sinusoidal braking condition

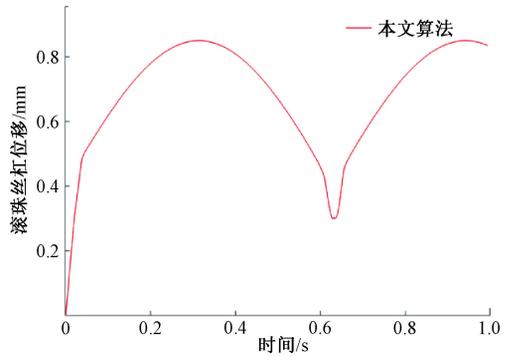


图 11 正弦波制动工况滚珠丝杠位移

Fig. 11 Ball screw displacement under triangular wave braking condition

3.6 循环制动响应分析

为验证本文所提的三阶段闭环控制策略,设置一组 [3 000 N 6 000 N 2 000 N 0] 数值的目标夹紧力,模拟汽车的循环制动过程。设定间隙消除阶段、力跟随阶段、间隙生成阶段的阶段标志分别为 1, 2, 3, 结果如图 12 所示。接收到制动信号后,系统进入间隙消除阶段,采用转速环-电流环双闭环控制,阶段标志为 1, 本文算法、双幂次算法和超螺旋算法均在 0.021 s 时完成间隙消除。随后进入力跟随阶段,目标夹紧力为 3 000 N, 采用夹紧力环-转速环-电流环三闭环控制,阶段标志为 2。本文算法、双幂次算法和超螺旋算法分别在 0.12、0.16 s 和 0.17 s 达到目标值,且超调量分别为 0.57%、0.13% 和 0.08%, 在夹紧力上升阶段,本文算法相对于其他两种算法响应更快速;在夹紧力达到稳定时,本文算法基本无稳态误差,双幂次和超螺旋算法的平均稳态误差分别为 0.06% 和 0.04%。控制目标在 1 s 和 1.5 s 时分别切换至 6 000 N 和 2 000 N, 由图 12 可知,本文算法的响应速度和控制精度都要优于另外两种算法。在第 2 s 时,目标夹紧力切换至 0, 进入间隙生成阶段,采用位置环-转速环-电流环三闭环控制,阶段标志为 3。本文算法、双幂次算法和超螺旋算法的实际夹紧力分别在 2.04、2.14、2.16 s 时降为 0, 恢复初始间隙至 0.3 mm。图 13 表示本文算法在循环制动工况下的滚珠丝杠位移,在前 3 个目标夹紧力下,滚珠丝杠的位移分别为 0.75、0.89 mm 和 0.69 mm, 且在目标夹紧力为 0 后,滚珠丝杠能够迅速恢复至原位。图 14 表示 EMB 系统在不同目标夹紧力下的控制策略切换过程,证明了所提三阶段闭环控制策略的可行性。

3.7 泛化能力验证

为验证所提控制算法的泛化能力,本文设计不同 Sigmoid 函数斜率 a 、不同初始制动间隙工况进行实验研究。设置不同的 Sigmoid 函数斜率参数 $a=0.5, 1, 5, 10$, 分析其对系统动态性能的影响。如图 15 所示,当 a 值增大时, Sigmoid 函数在滑模面 $s=0$ 处的斜率显著增加,但实验结果表明,不同 a 值下的夹紧力动态响应曲线具有高度一致性; $a=0.5$ 与 $a=10$ 工况下首次到达目标夹紧力的时间

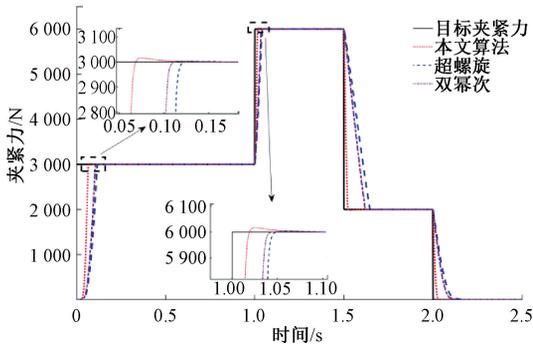


图 12 循环制动工况夹紧力响应曲线

Fig. 12 Clamping force response under cyclic braking condition

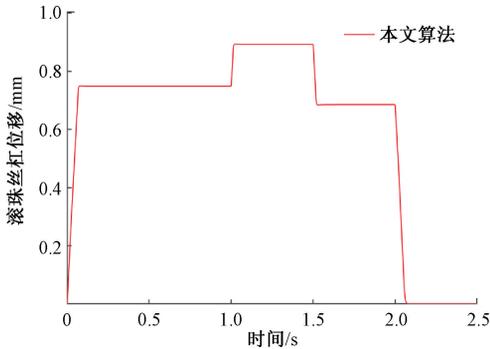


图 13 循环制动工况滚珠丝杠位移

Fig. 13 Ball screw displacement under cyclic braking condition

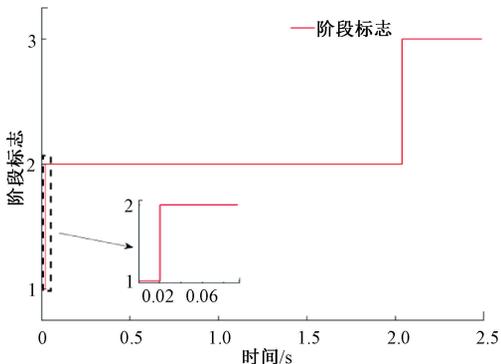


图 14 循环制动工况阶段切换标志

Fig. 14 Phase switching flags in cyclic braking condition

差仅为 0.01 s,且所有工况均未出现明显抖振现象。该结果验证了本文算法在面对 Sigmoid 函数斜率变化时依然能够维持稳定的动态响应性能。

进一步地,设置 0.1~0.4 mm 的梯度制动间隙工况,评估算法对不同初始制动间隙的适应性。图 16 的实验结果所示,系统在 0.009~0.035 s 内即可完全消除不同幅值的初始制动间隙,并在 0.067~0.092 s 内达到目标夹紧力。间隙增大 300% 时,稳定时间仅增加 37.3%,呈现良好的线性补偿特性,该实验结果验证了本文算法对机械参数摄动的适应能力。综合上述实验结果,本文算法在参数敏感性和工况适应性方面均展现出优异的泛化性能,满足

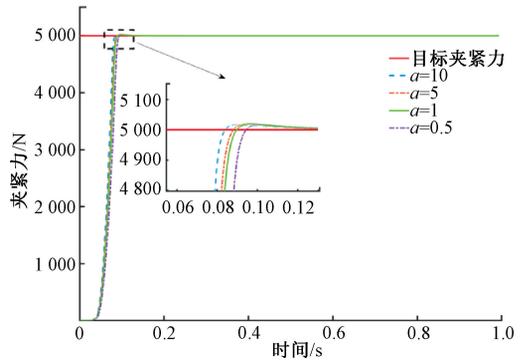


图 15 不同 Sigmoid 函数斜率夹紧力响应曲线

Fig. 15 Clamping force response curves under different Sigmoid slope parameters

EMB 系统高精度控制的需求。

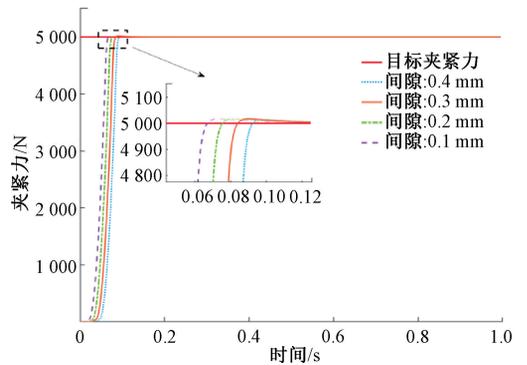


图 16 不同初始制动间隙夹紧力响应曲线

Fig. 16 Clamping force response curves under different initial brake gaps

4 结 论

本文提出一种基于扰动观测器的 EMB 夹紧力复合滑模控制方法来提高 EMB 系统的动态性能指标,设计了三阶段闭环控制策略,通过分段式控制算法实现制动过程的精准调控。在此基础上,构建了一种改进滑模趋近律,引入对称型 Sigmoid 函数与滑模面幂次项,在提升趋近速度的同时有效降低了抖振;同时设计了 STESO,能够对外部扰动和未建模动态进行实时估计,并将观测结果补偿至控制器中,从而显著增强系统的抗扰能力。

仿真测试表明,在紧急制动工况下,所述算法与双幂次算法及超螺旋算法相比,响应速度提升 0.05 s 和 0.06 s,平均稳态误差减少 0.04% 和 0.05%。在其他工况下,本文算法也表现出了更好的跟踪性能。本文同时设计了不同 Sigmoid 函数斜率 a 、不同初始制动间隙工况的泛化实验,证明了本文算法优异的泛化能力,能够在多种工况下实现对 EMB 系统的精确控制。

参考文献

[1] 赵立金,杨世春,曲婧瑶. 电子机械制动系统关键技术

- 研究进展[J]. 北京航空航天大学报, 2025, 51(4): 1037-1047.
- ZHAO L J, YANG SH CH, QU J Y. Research progress on key technologies of electromechanical braking systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1037-1047.
- [2] 陈齐平, 王博文, 李志玉, 等. 智能网联汽车线控制动技术发展现状综述[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 84-96.
- CHEN Q P, WANG B W, LI ZH Y, et al. A review of the current development of brake-by-wire technology for intelligent and connected vehicles[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 84-96.
- [3] 熊璐, 李聪聪, 卓桂荣, 等. 电子机械制动器构型及控制技术发展现状[J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2187-2199, 2250.
- XIONG L, LI C C, ZHUO G R, et al. Current status of configuration and control technology development for electromechanical brakes [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(12): 2187-2199, 2250.
- [4] 张奇祥, 王金湘, 张伊晗, 等. 智能电动汽车线控制动关键技术与研究进展[J]. 机械工程学报, 2024, 60(10): 339-365.
- ZHANG Q X, WANG J X, ZHANG Y H, et al. Key technologies and research progress of brake-by-wire systems for intelligent electric vehicles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(10): 339-365.
- [5] 张帅, 梁光成, 常宏, 等. 考虑制动间隙的电子机械制动系统三阶闭环PID控制策略[J]. 山东交通学院学报, 2021, 29(1): 7-14, 20.
- ZHANG SH, LIANG G CH, CHANG H, et al. A third-order closed-loop PID control strategy for an electromechanical braking system considering brake clearance [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2021, 29(1): 7-14, 20.
- [6] ZHAO Y Y, LIN H, LI B Q. Sliding-mode clamping force control of electromechanical brake system based on enhanced reaching law[J]. IEEE Access, 2021, 9: 19506-19515.
- [7] 宋亚东, 郝明基, 于保卫, 等. 电子机械制动器分阶段闭环控制策略研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2024, 38(5): 1-6.
- SONG Y D, HAO M J, YU B W, et al. Research on phase-based closed-loop control strategy for electromechanical brakes [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 38(5): 1-6.
- [8] XUE ZH J, LI CH F, WANG X Y, et al. Coordinated control of steer-by-wire and brake-by-wire for autonomous emergency braking on split- μ roads[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2020, 14(14): 2122-2132.
- [9] CHEN SH, ZHANG X L, WANG J ZH. Sliding mode control of vehicle equipped with brake-by-wire system considering braking comfort [J]. Shock and Vibration, 2020, 2020(1): 5602917.
- [10] 贾明菲. 汽车线控制动执行器控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- JIA M F. Research on control strategies for automotive brake-by-wire actuators [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [11] 牟希东. 面向动力学控制的电子机械制动系统控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- MU X D. Research on control strategies of electromechanical braking systems for dynamic control[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [12] 谭草, 宋亚东, 李波, 等. 基于超扭曲扩张状态观测器的电子机械制动器夹紧力改进滑模控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(11): 3544-3553.
- TAN C, SONG Y D, LI B, et al. Improved sliding mode control of electromechanical brake clamping force based on super-twisting extended state observer[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2025, 55(11): 3544-3553.
- [13] 赵逸云, 林辉, 李兵强. 有轨电车电子机械制动系统夹紧力控制优化方法[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(7): 141-151.
- ZHAO Y Y, LIN H, LI B Q. Optimization method for clamping force control in electro-mechanical braking systems of trams[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(7): 141-151.
- [14] 陈峥峰, 郭洪强. 电子机械制动系统等效模糊滑模控制研究[J]. 现代制造工程, 2019(4): 50-54, 104.
- CHEN ZH F, GUO H Q. Research on equivalent fuzzy sliding mode control of electromechanical braking system [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(4): 50-54, 104.
- [15] 张越, 郭中阳, 黄孝慈, 等. 基于改进超螺旋滑模控制的线控制动系统控制方法[J]. 汽车技术, 2024(9): 18-24.
- ZHANG Y, GUO ZH Y, HUANG X C, et al. Control method for brake-by-wire systems based on improved super-twisting sliding mode control [J]. Automobile Technology, 2024(9): 18-24.
- [16] PARK G, CHOI S B. Clamping force control based on dynamic model estimation for electromechanical

brakes[J]. Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018, 232(14): 2000-2013.

- [17] MA R, ZHANG H Y, YUAN M H, et al. Chattering suppression fast terminal sliding mode control for aircraft EMA braking system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7 (3): 1901-1914.

- [18] 黎心慰, 马家庆, 陈昌盛, 等. 基于新型趋近律和 EKF 的 PMSM 滑模控制器设计[J]. 电子测量技术, 2025, 48(11): 42-48.

LI X W, MA J Q, CHEN CH SH, et al. Design of sliding mode controller for PMSM based on novel reaching law and EKF [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(11): 42-48.

- [19] 赵凯辉, 谯梦洁, 吕玉映, 等. PMSM 无模型超螺旋快速积分终端滑模控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(5): 64-74.

ZHAO K H, QIAO M J, LYU Y Y, et al. Model-free

super-twisting fast integral terminal sliding mode control for PMSM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 64-74.

作者简介

姜平, 博士, 副教授, 主要研究方向为车辆现代设计理论与方法。

E-mail: hgdjiangping@126.com

鹿庆刚(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为智能底盘线控制动技术。

E-mail: a17685456871@163.com

张炳力, 博士, 教授, 主要研究方向为智能网联新能源汽车技术及产业发展。

E-mail: zhangbingli@hfut.edu.cn

徐超, 硕士研究生, 主要研究方向为智能底盘线控转向技术。

E-mail: Xu.Chao@mail.hfut.edu.cn

宋祖常, 硕士研究生, 主要研究方向为智能网联新能源汽车技术。

E-mail: 2639660734@qq.com