

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

谭 草¹, 宋亚东¹, 李 波¹, 司书哲², 郝明基¹, 丁嘉伟¹

(1. 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 舜泰汽车有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要: 针对电子机械制动器因系统内部变量耦合、参数摄动、外部时变干扰等不确定性因素造成的夹紧力响应缓慢、控制精度恶化等问题, 提出了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方法。首先, 设计了一种改进的趋近律, 在传统指数趋近律的基础上引入可变函数增益项及滑模面幂次项, 增大趋近速率的同时削弱抖振, 并且基于改进的趋近律和滑模面设计了改进的夹紧力控制器; 其次, 设计了基于超扭曲算法的扩张状态观测器, 用于估计系统扰动, 同时把扰动估计值前馈至控制器中给予补偿; 再次, 通过李雅普诺夫定理验证了系统的稳定性; 最后, 在台架试验中, 将本文提出的算法与双幂次趋近律、快速幂次趋近律、指数趋近律等算法进行对比。结果表明: 本文算法下电子机械制动器的夹紧力控制具有更高的响应速度、控制精度与抗干扰能力。

关键词: 车辆工程; 线控制系统; 滑模控制; 电子机械制动; 夹紧力

中图分类号: U463.5; U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)11-3544-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240264

Improved sliding mode control of clamping force in electronic mechanical brake based on super-twisting extended state observer

TAN Cao¹, SONG Ya-dong¹, LI Bo¹, SI Shu-zhe², HAO Ming-ji¹, DING Jia-wei¹

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Shuntai Automobile Co., Ltd., Zibo 255000, China)

Abstract: Aiming at the problems of slow clamping force response and deteriorating control accuracy caused by uncertainty factors such as internal system variable coupling, parameter perturbation, and external time-varying interference in electronic mechanical brake, an improved sliding mode control method for clamping force of electronic mechanical brake based on super-twisting extended state observer

收稿日期: 2024-03-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52375105); 山东省优秀青年人才基金项目(ZR2022YQ51); 山东省自然科学基金项目(ZR2023ME178; ZR2023ME177); 山东省高等学校“青创科技计划”团队项目(2022KJ232); 山东省科技中小企业创新能力提升项目(2023TSGC0404).

作者简介: 谭草(1991-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 新能源汽车线控系统分析、设计与控制.

E-mail: njusttancao@yeah.net

通信作者: 李波(1986-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 智能新能源汽车底盘系统集成与线控技术.

E-mail: njustlibo@126.com

is proposed in this paper. Firstly, an improved reaching law is designed, which introduces a variable function gain term and a sliding mode surface power term on the basis of the traditional exponential reaching law. This increases the convergence speed while weakening chattering phenomenon. Based on the improved reaching law and sliding mode surface, an improved clamping force controller is designed. Secondly, design an extended state observer based on the super-twisting algorithm to estimate system disturbances, while feedforward the estimated disturbance values to the controller for compensation. Thirdly, the stability of the system is proven through the Lyapunov theorem. Finally, compare the algorithm proposed in this paper with algorithms such as double power reaching law, fast power reaching law and exponential reaching law in the test bench experiments. The results show that the clamping force control of the electronic mechanical brake under the algorithm proposed in this paper has higher response speed, control accuracy, and anti-interference ability.

Key words: vehicle engineering; brake-by-wire system; sliding mode control; electronic mechanical brake; clamping force

0 引 言

高级别自动驾驶对线控制动系统的响应速度、控制精度、抗干扰能力等提出了更高的要求^[1]。分布式的电子机械制动(Electronic mechanical brake, EMB)系统被认为是主流发展趋势之一^[2],而高品质的EMB构型设计与夹紧力控制算法研究是其发展的核心^[3]。

当前,EMB执行机构的主要构型包括旋转电机结合减速机构及运动转换机构、直线电机结合机械式力放大机构等^[4]。由于旋转电机技术相对成熟,主流EMB执行机构及本文均采用旋转电机结合行星轮系与滚珠丝杠的构型。对EMB输出的夹紧力进行精确控制是当前EMB控制算法领域的研究热点之一^[5]。当前广泛应用的EMB控制算法包括PID控制^[6]、模糊控制^[7]、滑模控制^[8]、模型预测控制^[9]、鲁棒控制^[10]等。文献[11]采用了经典的三闭环PID控制算法,其控制器结构简单、便于设计,但3个控制环杂糅耦合导致参数调整困难;文献[12]在经典PID控制的基础上引入了自适应算法,实现了比例系数的自动调节,减少了参数整定工作量,实验结果表明该算法响应性能较好。滑模控制(Sliding mode control, SMC)通过设计滑模面和趋近律,可使控制变量快速收敛^[13],不仅响应速度快、调整参数少,而且对系统不确定性及干扰具有较好的鲁棒性^[14]。文献[15]为解决电子楔形制动系统因参数时变等非线性因素导致的系统鲁棒性恶化问题,设计了基于滑模算法的夹紧力控制器,并进行了试验验证;文献[16]设计了基于改进滑模趋近律的夹紧

力控制方法,有效提高了EMB夹紧力的响应性能,但鲁棒性稍有欠缺;文献[17]设计了自适应滑模控制器,可在识别摩擦模型参数的同时将其补偿到控制器中,使系统跟踪鲁棒性有所提升。

在复杂工况下,EMB系统内部变量耦合、参数摄动、外部时变干扰等会导致控制性能恶化,因此控制方法的抗干扰能力是其能否实际应用的关键。文献[18]将电机编码器与电流传感器组合起来以估计夹紧力,同时利用遗传算法优化系统噪声,使滤波效果得到一定的提升。实验结果表明,优化后的卡尔曼滤波器能够更好地抵抗干扰,更有效地实现夹紧力的准确控制,使系统可靠性有所提升。文献[19]设计了基于H_∞算法的鲁棒控制器,提高了系统的抗扰性及鲁棒性,但其控制较为保守,难以兼顾良好的动、静态性能。文献[20]设计了基于扰动观测器的快速终端滑模制动力矩控制方法,可观测和补偿系统扰动,同时削弱了系统抖振现象。文献[21]设计了强耦合条件下无压力传感器的EMB夹紧力控制算法,并设计了基于sigmoid函数的改进型扩张状态观测器(Extended state observer, ESO),对系统扰动进行估计与补偿,使系统的鲁棒性有所提高。

在提高EMB夹紧力控制鲁棒性的同时,需使其兼具动态响应快、稳态精度高等性能,这是当前EMB夹紧力控制研究亟待解决的问题之一。为此,本文首先设计一种改进的滑模趋近律,并基于改进的滑模趋近律设计EMB夹紧力控制器;其次,设计了一种基于超扭曲算法的扩张状态观测器,对系统扰动进行观测,同时对扰动估计值给予补偿;再次,通过李雅普诺夫判据验证算法的稳

定性;最后,通过试验验证本文所提算法的性能。

1 系统方案与建模

经典的 EMB 执行机构组成架构如图 1 所示。该方案将驱动电机、行星齿轮减速器及滚珠丝杠机构串联,驱动电机的动力经过减速器放大后驱动丝杠,丝杠螺母再带动制动卡钳夹紧制动盘,从而完成制动过程。

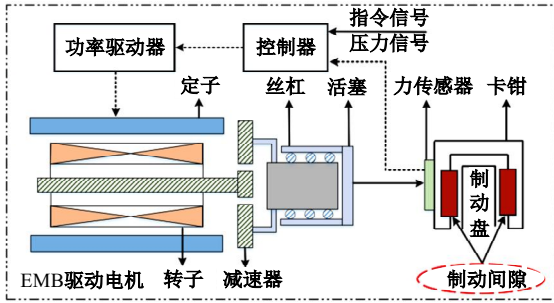


图 1 EMB 组成架构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the composition architecture of EMB

本文选用功率密度较高的三相永磁同步电机 (Permanent magnet synchronous motor, PMSM) 作为驱动电机,其在 $d-q$ 轴下的数学模型为^[22]:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_d - R i_d + \omega_e L i_q \\ L \frac{di_q}{dt} = u_q - R i_q - \omega_e L i_d - \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

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

$$T_e = k_T i_q \quad (3)$$

式中: L 、 R 分别为定子电感和定子电阻; u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; T_e 为电机输出转矩; k_T 为转矩常数; J 为转子转动惯量; B_v 为黏性摩擦因数; ψ_f 为磁链; ω_e 为电角速度; ω 为电机机械角速度; T_L 、 T_f 分别为电机的负载及摩擦力矩。

利用 Stribeck 模型拟合驱动电机运行时产生的摩擦行为^[23],其中摩擦力矩的计算公式为:

$$T_f = \begin{cases} T_e, \omega = 0 \& |T_e| < T_s \\ T_s \times \text{sgn}(T_e), \omega = 0 \& |T_e| \geq T_s \\ T_e + (T_s - T_e) \exp\left[-(\omega/\omega_s)^\delta\right] + B_v \omega, \omega \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_s 为最大静摩擦力矩; T_e 为库伦摩擦力矩; ω_s 、 δ 为经验常数,其中 δ 的取值范围一般为 0.5~1。

EMB 传动机构的数学模型为^[24]:

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

$$\theta_s = \frac{\theta}{i} \quad (6)$$

式中: s 为滚珠丝杠的螺母位移; L_0 为丝杠的导程; θ_s 为行星齿轮输出端的转角; θ 为电机输出转角; i 为齿轮传动比。

为便于后续控制器的设计,本文通过台架试验对 EMB 夹紧力与驱动电机转角之间的近似关系进行拟合,结果如图 2 所示。二者近似满足线性关系,表达式为:

$$F = \begin{cases} k(|\theta - \theta_0|), & |\theta| > |\theta_0| \\ 0, & |\theta| \leq |\theta_0| \end{cases} \quad (7)$$

$$T_L = \frac{F \times L_0}{2\pi i \eta_g \eta_p} \quad (8)$$

式中: θ_0 为间隙消除完成时刻的电机转角; k 为拟合系数; F 为实际夹紧力; η_g 为滚珠丝杠的效率; η_p 为行星齿轮的效率。

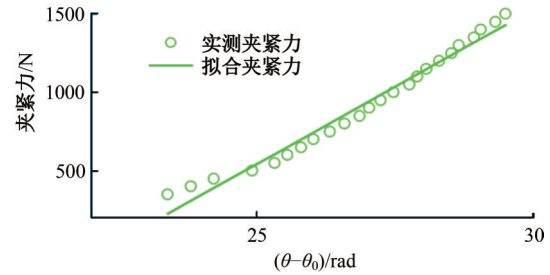


图 2 EMB 电机转角与夹紧力的近似拟合关系

Fig. 2 The approximate fitting relationship between the motor angle and clamping force of EMB

根据负载模型式(7),选取系统状态变量为

$[x_1, x_2]^T = [y, \dot{y}]^T$, 可得 EMB 系统方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = bu - \xi \omega - f_1 - f_2 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} f_1 = \frac{T_L}{J} \\ f_2 = \frac{T_f}{J} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $y = x_1$ 为夹紧力; x_2 为夹紧力的一阶微分; $\xi = B_v k / J$; $b = k k_T / J$; ω 为电机机械角速度; f_i ($i = 1, 2$)分别为负载项及系统摩擦项; u 为控制输入。

考虑系统因温升引起的参数摄动及制动时产生的冲击振动等,若系统总的不确定性有界,则系统方程可改写为:

$$\dot{x}_2 = (b + \kappa_1)u + (-\xi + \kappa_2)\omega - f_1 - f_2 + \eta = bu - g + d \quad (11)$$

$$d = \kappa_1 u + \kappa_2 \omega - f_2 + \eta \quad (12)$$

$$g = \xi \omega + f_1 \quad (13)$$

$$\begin{cases} |d| \leq \vartheta \\ |\dot{d}| \leq \chi \end{cases} \quad (14)$$

式中: κ_1, κ_2 为 EMB 参数不确定性; η 为制动时产生的冲击及时变干扰; d 为 EMB 总的不确定性; ϑ, χ 为常数, 分别表示 d 及其微分的上界。

2 改进控制器设计

2.1 控制器总体结构

EMB 是一个高度集成的多变量耦合系统, 针对其输出的制动夹紧力因内部参数摄动或外部不确定扰动造成的响应缓慢、精度恶化等问题, 本文提出了基于超扭曲扩张状态观测器的改进滑模夹紧力控制器。该控制器充分利用滑模控制响应快速、对参数摄动不敏感的特性, 提高夹紧力的响应速度、控制精度及抗干扰性能; 同时, 设计了超扭曲扩张状态观测器, 对扰动进行观测并对系统给予补偿, 进一步提高 EMB 系统的抗干扰能力。改进控制器的总体结构框图如图 3 所示。

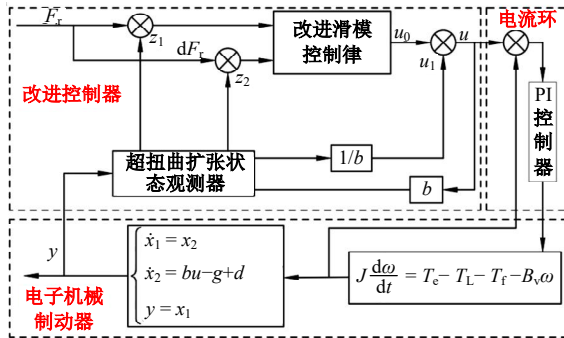


图 3 改进控制器总体结构

Fig. 3 Overall structure of the improved controller

2.2 超扭曲扩张状态观测器设计

将系统内部未建模动态误差及外部不确定性扰动视为总扰动, 根据 EMB 系统方程, 可得 EMB 的扩张状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu - g \\ \dot{x}_3 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: x_3 为观测系统总的不确定性新扩展出的状态。

定义观测器的估计误差及辅助滑模面, 则基于超扭曲算法的扩张状态观测器的表达式为^[25]:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - x_1 \\ e_2 = z_2 - x_2 \\ e_3 = z_3 - x_3 \end{cases} \quad (16)$$

$$\sigma = \alpha e_1 + e_2 \quad (17)$$

$$u_a = \alpha e_2 + b_1 |\sigma|^{1/2} \operatorname{sgn}(\sigma) + b_2 \sigma - (\alpha \beta) e_1 \quad (18)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 + u_a + bu - g \\ \dot{z}_3 = b_3 \operatorname{sgn}(\sigma) + b_4 \sigma \end{cases} \quad (19)$$

式中: $z_i (i=1, 2, 3)$ 为估计值; β 为观测器增益; $\alpha, b_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为待设计参数; u_a 为处理有界扰动的辅助误差反馈量。

2.3 改进滑模控制律设计

滑模控制滑模控制通过设计滑模面和趋近律, 可使控制变量快速收敛^[26], 不仅响应迅速、调整参数少, 而且对系统不确定性及时变干扰具有很强的鲁棒性^[27]。为便于设计控制器, 定义跟踪误差为:

$$\begin{cases} x_1 = F_r - F \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{F}_r - \dot{F} \end{cases} \quad (20)$$

式中: F_r 为目标夹紧力; F 为实际夹紧力。

结合前文建立的 EMB 数学模型, 对式 (20) 求导可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{F}_r - \dot{F} \\ \dot{x}_2 = \ddot{x}_1 = \ddot{F}_r - (bu + d - g) \end{cases} \quad (21)$$

为减小误差并提高系统响应速度, 对 EMB 系统设计滑模面为:

$$s = c_1 x_1 + c_2 \int_0^t x_1 d\tau + x_2 \quad (22)$$

式中: c_1, c_2 为正常数, 对式 (22) 求导可得:

$$\dot{s} = c_1 \dot{x}_1 + c_2 x_1 + \dot{x}_2 \quad (23)$$

为使 EMB 夹紧力具有良好的动、静态响应品质, 本文对目前广泛应用的指数趋近律进行改进, 得到如下趋近律:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\mu_1 Q(s) \operatorname{sat}(s) - \mu_2 |s|^{\mu_2} (\operatorname{sat}(s) - 1) s \\ Q(s) = \frac{1}{p \left(3^{-q|s|} + \frac{1}{|s|} \right)} \end{cases} \quad (24)$$

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} 1, s > \Delta \\ \frac{s}{\Delta}, |s| \leq \Delta \\ -1, s < -\Delta \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\mu_1, \mu_2, \mu_3, p, q$ 均为正常数。

本文提出的趋近律在经典指数趋近律的基础上引入了可变函数增益项及滑模面幂次项。当 EMB 系统状态距滑模面很远时, 可认为 $|s| > 1$, $|\text{sat}(s)| - 1 = 0$, 趋近律近似由 $-\mu_1 Q(s)$ 和 $-\mu_2 s$ 共同作用。选择合适的参数可使 $(Q)s$ 在趋近过程中达到较大的值, 从而可以获得比指数趋近律更大的趋近速度, 以迅速接近滑模面直至 $s = 1$; 同时, 引入了 $\text{sat}(s)$ 函数, 避免了传统 $\text{sgn}(s)$ 函数产生的抖振。当 EMB 系统状态接近滑模面时, 可认为 $|s| < 1$, 趋近律近似由 $-\mu_1 Q(s)s$ 及 $-\mu_2 |s|^{\mu_3(|\text{sat}(s)|-1)} s$ 决定。由于 $Q(s)$ 和滑模面 s 幂次项的存在, 随着 $|s|$ 的减小, 趋近速度也会随之减小, 在保证一定趋近速率的同时可较好地抑制因传统指数趋近律等速项系数固定带来的系统抖振。

综上, 本文提出的滑模趋近律可以在提高系统收敛速度的同时抑制系统抖振。在忽略系统总的不确定性的条件下, 依据设计的改进趋近律, 可推出夹紧力控制器的表达式为:

$$u_0 = [c_2 x_1 + c_1 x_2 + \ddot{F}_r + \mu_1 Q(s) \text{sat}(s) + \mu_2 |s|^{\mu_3(|\text{sat}(s)|-1)} s] / b + g/b \quad (26)$$

基于前文设计的超扭曲扩张状态观测器, 设计如下的前馈控制律补偿 EMB 总的不确定扰动:

$$u_1 = -\frac{1}{b} z_3 \quad (27)$$

将补偿控制律代入, 得到总控制律为:

$$u = u_0 + u_1 = [c_2 x_1 + c_1 x_2 + \ddot{F}_r + \mu_1 Q(s) \text{sat}(s) + \mu_2 |s|^{\mu_3(|\text{sat}(s)|-1)} s] / b + \frac{g - z_3}{b} \quad (28)$$

2.4 稳定性分析

为分析改进滑模控制律的稳定性, 选取李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \dot{V} = s \dot{s} = \quad (29)$$

$$s \left[-\mu_1 Q(s) \text{sat}(s) - \mu_2 |s|^{\mu_3(|\text{sat}(s)|-1)} s \right] = -\mu_2 |s|^{\mu_3(|\text{sat}(s)|-1)} s^2 - \mu_1 Q(s) \text{sat}(s) s \quad (30)$$

根据前文 $\text{sat}(s)$ 函数的定义可知, 式(30)总是 < 0 的, 由此可推知, 本文设计的改进滑模控制律稳定且有效。

为分析超扭曲扩张状态观测器的稳定性, 给出其误差动态方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - u_a \\ \dot{e}_3 = h - b_3 \text{sgn}(\sigma) - b_4 \sigma \end{cases} \quad (31)$$

$$\dot{\sigma} = \alpha \dot{e}_1 + \dot{e}_2 = \alpha e_2 - (a\beta) e_1 + e_3 - u_a \quad (32)$$

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -b_1 |\sigma|^{1/2} \text{sgn}(\sigma) - b_2 \sigma + e_3 \\ \dot{e}_3 = -b_3 \text{sgn}(\sigma) - b_4 \sigma + h \end{cases} \quad (33)$$

引理^[28]: 对于式(33)所示的系统, 若李雅普诺夫函数 $V(x)$ 在原点的 $U \in R^n$ 邻域内有定义, 当 $\lambda_0 > 0$ 且 $0 < r < 1$ 时, 满足 $\dot{V}(x) + \lambda_0 V^r(x) \leq 0$, 则该系统是局部有限时间稳定的, 且到达稳定的时间为:

$$T \leq \frac{1}{\lambda_0(1-r)} |V(x(0))|^{(1-r)} \quad (34)$$

式中: $x(0)$ 为 x 的初始值。

针对式(33)所示的系统, 为统一表达式形式, 令 $z_\sigma = e_3$, 选取李雅普诺夫函数为:

$$V = 2b_3 |\sigma| + b_4 \sigma^2 + \frac{1}{2} z_\sigma^2 + \frac{1}{2} (b_1 |\sigma|^{1/2} \text{sgn}(\sigma) + b_2 \sigma - z_\sigma)^2 = \zeta^T P \zeta \quad (35)$$

式中:

$$\zeta = \begin{bmatrix} |\sigma|^{1/2} \text{sgn}(\sigma) & \sigma & z_\sigma \end{bmatrix}^T; \quad P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 4b_3 + b_1^2 & b_1 b_2 & -b_1 \\ b_1 b_2 & 2b_4 + b_2^2 & -b_2 \\ -b_1 & -b_2 & 2 \end{bmatrix}$$

当 $\sigma \neq 0$ 时, 有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2b_3 \text{sgn}(\sigma) \dot{\sigma} + 2b_4 \sigma \dot{\sigma} + z_\sigma \dot{z}_\sigma + 2\Delta \zeta^T P \zeta + \\ & (b_1 |\sigma|^{1/2} \text{sgn}(\sigma) + b_2 \sigma - z_\sigma) \left(\frac{b_1 \dot{\sigma}}{2|\sigma|^{1/2}} + b_2 \dot{\sigma} - \dot{z}_\sigma \right) \end{aligned} \quad (36)$$

整理得:

$$\dot{V} = -\frac{1}{|\sigma|^{1/2}} \zeta^T \Omega_1 \zeta - \zeta^T \Omega_2 \zeta + 2\Delta \zeta^T P \zeta \quad (37)$$

式中:

$$\Delta \zeta^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{bmatrix}; \Omega_1 = \frac{b_1}{2} \begin{bmatrix} 2b_3 + b_1^2 & 0 & -b_1 \\ 0 & 2b_4 + 5b_2^2 & -3b_2 \\ -b_1 & -3b_2 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\Omega_2 = b_2 \begin{bmatrix} b_3 + 2b_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & b_4 + b_2^2 & -b_2 \\ 0 & -b_2 & 1 \end{bmatrix}$$

为便于继续分析, 定义如下函数:

$$\begin{aligned}
 V_{\Delta} &= 2\Delta\zeta^T P\zeta = h \left(-b_1 |\sigma|^{1/2} \operatorname{sgn}(\sigma) - b_2 \sigma + 2z_{\sigma} \right) \leq \\
 &\quad \chi \left(-b_1 |\sigma|^{1/2} \operatorname{sgn}(\sigma) - b_2 \sigma + 2z_{\sigma} \right) \leq \\
 &\quad \frac{1}{|\sigma|^{1/2}} \zeta^T \Delta_1 \zeta + \zeta^T \Delta_2 \zeta \quad (38)
 \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned}
 \zeta &= \begin{bmatrix} |\sigma|^{1/2} & |\sigma| & |z_{\sigma}| \end{bmatrix}; \\
 \Delta_1 &= \begin{bmatrix} \chi b_1 & 0 & \chi \\ 0 & 0 & 0 \\ \chi & 0 & 0 \end{bmatrix}; \Delta_2 = \begin{bmatrix} \chi b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

若恰当选取系数 $b_i (i=1, 2, 3, 4)$, 使得式 (39) 成立:

$$\Omega_1 - \Delta_1 > 0, \Omega_2 - \Delta_2 > 0 \quad (39)$$

则可得:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{|\sigma|^{1/2}} \zeta^T (\Omega_1 - \Delta_1) \zeta - \zeta^T (\Omega_2 - \Delta_2) \zeta \quad (40)$$

设 $\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ 分别为矩阵 P 的最大特征值及最小特征值, 可得:

$$\lambda_{\min} \|\zeta\|^2 \leq V \leq \lambda_{\max} \|\zeta\|^2 \quad (41)$$

$$|\sigma| \leq \|\zeta\|^2 \quad (42)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &\leq -\frac{1}{|\sigma|^{1/2}} \lambda_{\min} (\Omega_1 - \Delta_1) \|\zeta\|^2 - \lambda_{\min} (\Omega_2 - \Delta_2) \|\zeta\|^2 \leq \\
 &\quad -\lambda_{\min} (\Omega_1 - \Delta_1) \|\zeta\| - \lambda_{\min} (\Omega_2 - \Delta_2) \|\zeta\| \leq \\
 &\quad -\frac{\lambda_{\min} (\Omega_1 - \Delta_1) \lambda_{\max}^{1/2}}{\lambda_{\max}} V^{1/2} - \frac{\lambda_{\min} (\Omega_2 - \Delta_2)}{\lambda_{\max}} V \leq \\
 &\quad -\frac{\lambda_{\min} (\Omega_1 - \Delta_1) \lambda_{\max}^{1/2}}{\lambda_{\max}} V^{1/2} \quad (43)
 \end{aligned}$$

根据上述引理, 本文设计的 u_a 保证了观测器的估计误差始终保持在 σ 范围内; 又由 Barbalat 引理^[29] 进一步证明, z_{σ} 将在有限时间内收敛于零。综上, 本文设计的超扭曲扩张状态观测器是稳定且有效的。

3 结果与分析

3.1 试验平台

本文搭建了如图 4 所示的试验平台, 该试验平台主要由上位机、RTU-BOX 实时控制器、电源、变频器、力传感器、制动盘、驱动模块、EMB 等组成。上位机与控制器之间通过以太网通信连接, EMB 系统主要参数如表 1 所示。将搭建的 EMB 控制模型通过上位机软件编译为控制算法

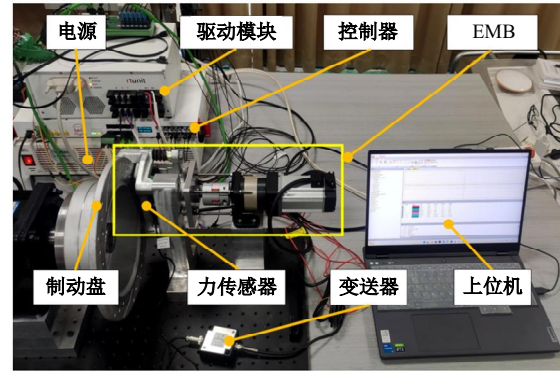


图 4 EMB 试验平台

Fig. 4 Experimental platform of EMB

表 1 EMB 系统主要参数

Table 1 Main parameters of EMB system

结构	名称	符号	参数值
驱动电机	黏性摩擦系数/(N·M·S)	B_v	0.000 8
	定子电阻/ Ω	R	0.13
	定子电感/H	L	0.000 15
	转动惯量/(kg·m ²)	J	0.000 028
	额定电压/V	U	24
	转矩常数	k_T	0.06
减速机构	行星齿轮减速比	i	3
	行星齿轮效率	η_p	0.9
运动转化	丝杠导程/mm	L_0	4
机构	丝杠效率	η_g	0.969 3

下载至 RTU-BOX 实时数字控制器中, 控制器输出控制信号, 驱动功率驱动模块实现对 EMB 驱动电压的控制。EMB 夹紧力传感器信号经实时控制器的 AD 模块采集后, 由信号变送器放大, 最终实时显示在上位机中。

(1) 文献[30]中所提的双幂次趋近律为:

$$\dot{s} = -k_1 |s|^{\alpha} \operatorname{sgn}(s) - k_2 |s|^{\beta} \operatorname{sgn}(s) \quad (44)$$

(2) 文献[31]中所提的快速幂次趋近律为:

$$\dot{s} = -k_1 |s|^{\alpha} \operatorname{sgn}(s) - k_2 s \quad (45)$$

(3) 指数趋近律 SMC 为:

$$\dot{s} = -k_1 \operatorname{sgn}(s) - k_2 s \quad (46)$$

将本文控制算法与上述 3 种控制算法进行比较。为更好地体现本文算法的性能, 调试参数时分别将滑模面幂次项及等速项的系数与其他算法保持一致。其中, 双幂次趋近律、快速幂次趋近律、SMC 的参数为 $k_1=100, k_2=90, \alpha=1.05, \beta=0.95$; 本文控制算法的参数为 $\mu_1=100, \mu_2=90, \mu_3=0.9, p=56, q=12$ 。

3.2 响应与精度分析

为模拟车辆紧急制动工况, 对系统施加阶跃

信号,4种算法的试验结果如图5、图6所示。在4种控制算法下,EMB均能在较短的时间内达到目标值。其中,双幂次及本文算法的响应时间均约为0.21 s,快速幂次及SMC的响应时间分别约为0.22、0.23 s,4种算法的平均稳态误差分别约为1.27%、1.76%、2.37%、0.90%。与双幂次趋近律算法相比,本文算法在阶跃工况下的响应时间与之相当,但平均稳态误差减少了29.13%。综上,本文算法在EMB阶跃工况下具有最优的响应性能与稳态性能。

为模拟常规缓和制动工况,对系统施加三角波信号,4种算法的试验结果如图7、图8所示。其中,在第一个峰值处,双幂次和本文算法的滞后时间均约为0.02 s,快速幂次及SMC的滞后时间分别约为0.04、0.1 s,4种算法的平均跟踪误差分别约为27.95、38.47、57.58、18.91 N。与双幂次趋近律算法相比,本文算法的峰值滞后时间与之相当,但平均跟踪误差减少了32.34%。因此,在常规缓和制动工况下,本文算法响应迅速、平均跟踪误差更小,与目标信号的重合度更好,控制精度更高。

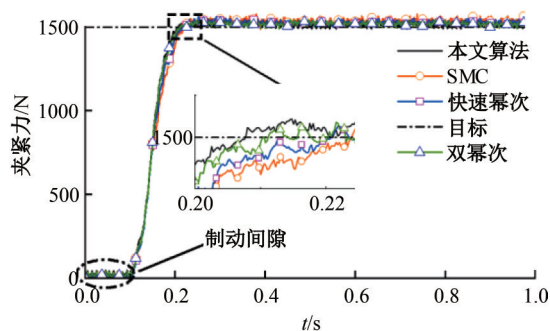


图5 阶跃工况试验结果

Fig. 5 Experimental results of step working conditions

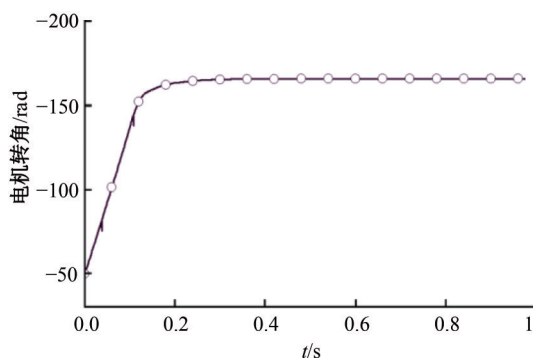


图6 阶跃工况下本文算法电机转角试验结果

Fig. 6 Experimental results of the motor rotation angle of the algorithm proposed in this paper under step working conditions

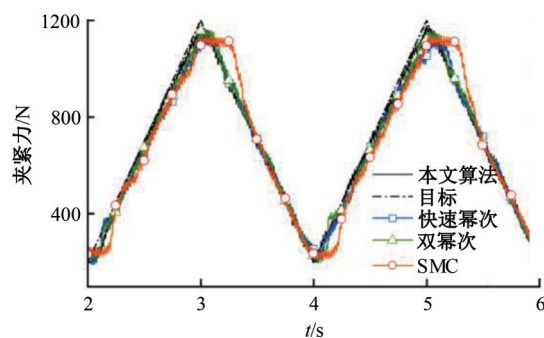


图7 三角波工况试验结果

Fig. 7 Experimental results of triangular wave working conditions

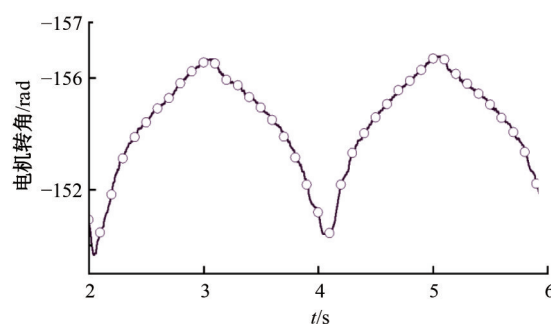


图8 三角波工况下本文算法电机转角试验结果

Fig. 8 Experimental results of the motor rotation angle of the algorithm proposed in this paper under triangular wave working conditions

为验证本文算法的跟踪性能,对系统施加正弦信号,4种算法的试验结果如图9、图10所示。其中,在峰值处,双幂次及本文算法的滞后时间相差无几,均为0.01 s,快速幂次及SMC的滞后时间分别为0.02、0.05 s。在整个跟踪过程中,双幂次、快速幂次、SMC及本文算法的平均跟踪误差分别为22.76、30.03、54.27、14.48 N。与双幂次趋近律算法相比,本文算法在正弦工况下的峰值滞后时间与之相当,但平均跟踪误差减少了36.37%。因此,在正弦工况下,本文算法响应时

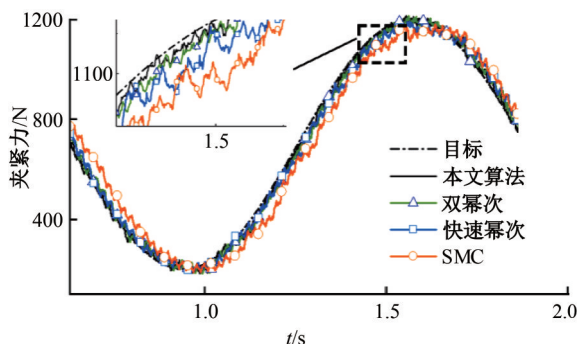


图9 正弦工况试验结果

Fig. 9 Experimental results of sinusoidal working conditions

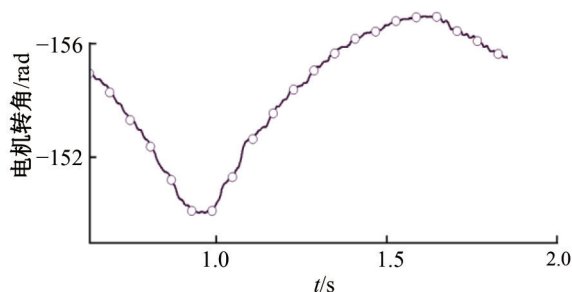


图 10 正弦工况下本文算法电机转角试验结果
Fig. 10 Experimental results of the motor rotation angle of the algorithm proposed in this paper under sinusoidal working conditions

间更短,与目标曲线重合度更高,具有更高的跟踪精度。

3.3 抗干扰性能分析

为验证本文设计的超扭曲扩张状态观测器的扰动观测性能,对系统施加随机干扰信号,试验结果如图 11 所示,可以看出,系统干扰的观测值与实际值吻合度较高,由此表明本文设计的超扭曲扩张状态观测器具备较好的扰动观测性能。

为验证本文算法在外部干扰下的抗干扰性能,对系统施加叠加不同功率随机白噪声干扰的阶跃信号,4 种算法的仿真结果如表 2 所示。在随机白噪声的干扰下,4 种算法的输出均存在一定程度的波动。在不同功率随机干扰下,4 种算法的响应时间相差无几,均能较快地达到目标值,因此表 2 中没有列出比较数据。由表 2 可知,与其他几种算法相比,本文算法在 3 种不同功率干扰下的平均稳态误差最小,稳态控制精度最高;当干扰功率逐渐增大时,各算法的平均稳态误差均有不同程度的恶化,其中本文算法的平均稳态误差增幅最小,恶化程度最轻。与双幂次趋近律算法相比,本文算法在干扰功率分别为 5、10、15 W 时,平均稳态误差分别减小了 11.86%、11.89%、

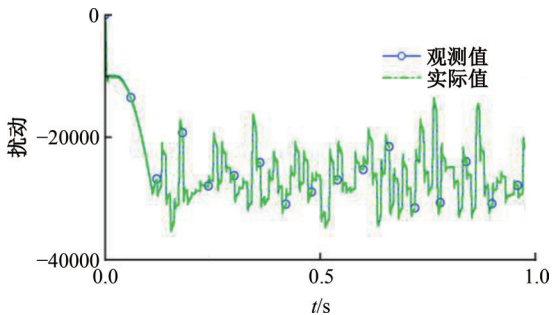


图 11 超扭曲扩张状态观测器对随机扰动的观测结果
Fig. 11 Observation results of super-twisting extended state observer for random disturbances

表 2 不同干扰功率下阶跃工况的结果

Table 2 Results of step working conditions under different disturbance power

干扰功率/W	算 法	平均稳态误差/N
5	本文算法	12.11
	双幂次趋近律	13.74
	快速幂次趋近律	14.91
	SMC	15.57
10	本文算法	17.34
	双幂次趋近律	19.68
	快速幂次趋近律	21.35
	SMC	22.31
15	本文算法	21.24
	双幂次趋近律	24.10
	快速幂次趋近律	26.13
	SMC	27.32

11.87%。综上,本文算法在不同功率的外部随机干扰下具备更强的抗干扰能力。

4 结束语

本文设计了一种改进的滑模趋近律,在传统指数趋近律的基础上引入了可变函数增益项及滑模面幂次项,提高系统收敛速度的同时抑制系统抖振,进而提升响应速度与控制精度,有利于提高 EMB 系统的制动性能,为提升车辆制动时的安全性与可靠性提供了可行方案。其对车辆制动性能的具体影响和定量分析,将作为后续研究内容。

针对 EMB 系统,本文设计了基于超扭曲扩张状态观测器及改进滑模控制律的夹紧力控制器,能够较好地观测系统干扰并给予补偿。与其他几种控制算法相比,本文算法有效提高了系统的抗干扰能力。

参考文献:

[1] 李波,黎德祥,葛文庆,等. 基于直驱阀的快速响应线控系统液压力精确控制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(9): 121-132.
Li Bo, Li De-xiang, Ge Wen-qing, et al. Precision control of hydraulic pressure in fast-response brake-by-wire system based on direct-drive valve[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 121-132.
[2] Xu Z, Gerada C. Enhanced force estimation for electromechanical brake actuators in transportation vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14329-14339.

- [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.
Xiong Lu, Li Cong-cong, Zhuo Gui-rong, et al. Review on electro-mechanical brake structure and control technology[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(12): 2187-2199.
- [4] 何睿, 吴坚, 高吉. 汽车电动助力制动系统摩擦建模与补偿控制[J]. 汽车工程, 2017, 39(6): 683-688.
He Rui, Wu Jian, Gao Ji. Modeling and compensation control of friction in vehicle power assisted braking systems[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(6): 683-688.
- [5] 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]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(4): 1037-1047.
Zhao Li-jin, Yang Shi-chun, Qu Jing-yao. Research progress of EMB systems key technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(4): 1037-1047.
- [6] Li J, Wang M C, He R, et al. A design of electromechanical brake system triple-loop controllers using frequency domain method based on Bode plot[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 795-798.
- [7] 彭晓燕, 何磊, 吕以滨. 基于滑移率的电子机械制动模糊滑模控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49(2): 360-370.
Peng Xiao-yan, He Lei, Lv Yi-bin. Fuzzy sliding mode control based on vehicle slip ratio for electro-mechanical braking systems[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(2): 360-370.
- [8] Lindvai S D, Horn M. Modelling, control & implementation of an electro-mechanic braking force actuator for HEV and EV[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 620-625.
- [9] Lee C F, Line C M C. Explicit nonlinear MPC of an automotive electromechanical brake[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10758-10763.
- [10] 张奇祥, 靳立强, 靳博豪, 等. EMB夹紧力控制与传感器故障诊断研究进展[J]. 汽车工程, 2022, 44(5): 736-746.
Zhang Qi-xiang, Jin Li-qiang, Jin Bo-hao, et al. Research progress of EMB clamping force control and sensor fault diagnosis[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(5): 736-746.
- [11] Ahn J K, Jung K H, Kim D H, et al. Analysis of a regenerative braking system for hybrid electric vehicles using an electro-mechanical brake[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10: 229-234.
- [12] Jo C, Hwang S, Kim H. Clamping-force control for electromechanical brake[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(7): 3205-3212.
- [13] 贺林, 徐子昂, 黄春荣, 等. 线控转向系统转角预测滑模控制算法研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(12): 2200-2208.
He Lin, Xu Zi-ang, Huang Chun-rong, et al. Research on sliding mode control algorithm for angle tracking of steer-by-wire system[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(12): 2200-2208.
- [14] 李智斌, 李亮, 张建强, 等. 双轴音圈电机快速反射镜的系统建模与滑模控制[J]. 光学精密工程, 2023, 31(24): 3580-3594.
Li Zhi-bin, Li Liang, Zhang Jian-qiang, et al. System modeling and sliding mode control of dual-axis voice coil actuator fast steering mirror[J]. Optical Precision Engineering, 2023, 31(24): 3580-3594.
- [15] Han K, Kim M, Huh K. Modeling and control of an electronic wedge brake[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 226(10): 2440-2455.
- [16] 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.
- [17] Park G, Choi S B. Clamping force control based on dynamic model estimation for electromechanical brakes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018, 232(14): 2000-2013.
- [18] Bae J H. Soft computing approach for sensorless control in brake-by-wire systems with electro-mechanical brake[D]. Daegu: Department of Information and Communication Engineering of DGIST, 2017.
- [19] De C R, Todeschini F, Araujo R E, et al. Adaptive-robust friction compensation in a hybrid brake-by-wire actuator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2014, 228(10): 769-786.
- [20] 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.
- [21] 赵逸云, 林辉, 李兵强. 电子机械制动系统无压力传感器控制策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(10): 2711-2720.
- Zhao Yi-yun, Lin Hui, Li Bing-qiang. Clamping force sensorless control strategies for electromechanical brake systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(10): 2711-2720.
- [22] 张荣芸, 邱天, 时培成, 等. 基于反步鲁棒控制与改进跟踪微分器的PMSM无传感器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 87-96.
- Zhang Rong-yun, Qiu Tian, Shi Pei-cheng, et al. Sensorless control of a PMSM based on backstepping robust control and an improved tracking differentiator[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 87-96.
- [23] 葛正, 王维锐, 王俊鼎. 电子机械制动器间隙调整控制策略研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(1): 138-144.
- Ge Zheng, Wang Wei-rui, Wang Jun-ding. Control strategy for brake clearance adjustment of electronic mechanical brake[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(1): 138-144.
- [24] 刘志强, 陈玉锦, 陈林. 电子机械制动器的间隙调控方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(7): 1478-1487.
- Liu Zhi-qiang, Chen Yu-jin, Chen Lin. A gap control method for electromechanical brakes[J]. Journal of Ordnance Industry, 2022, 43(7): 1478-1487.
- [25] Li Y, Tan P L, Liu J L, et al. A super-twisting extended state observer for nonlinear systems[J]. Mathematics, 2022, 10(19): No. 3584.
- [26] 谭草, 任浩鑫, 葛文庆, 等. 直驱阀控液压振动平台改进自抗扰控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2025, 55(1): 84-92.
- Tan Cao, Ren Hao-xin, Ge Wen-qing, et al. Improved active disturbance rejection control for hydraulic vibration stages based on the direct-drive valve[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(1): 84-92.
- [27] 谭草, 鲁应涛, 葛文庆, 等. 直驱式永磁直线电机深度模糊滑模-自抗扰控制[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 185-194.
- Tan Cao, Lu Ying-tao, Ge Wen-qing, et al. Deep fuzzy sliding-mode active disturbance rejection control method of permanent magnet linear motor for direct drive system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 185-194.
- [28] Yan R D, Wu Z. Super-twisting disturbance observer-based finite-time attitude stabilization of flexible spacecraft subject to complex disturbances[J]. Journal of Vibration and Control, 2019, 25(5): 1008-1018.
- [29] 林飞飞, 曾喆昭. 不确定分数阶时滞混沌系统自适应神经网络同步控制[J]. 物理学报, 2017, 66(9): 40-49.
- Lin Fei-fei, Zeng Zhe-zhao. Synchronization of uncertain fractional-order chaotic systems with time delay based on adaptive neural network control[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(9): 40-49.
- [30] 张合新, 范金锁, 孟飞, 等. 一种新型滑模控制双幂次趋近律[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 289-293.
- Zhang He-xin, Fan Jin-suo, Meng Fei, et al. A new double power reaching law for sliding mode control[J]. Control and Decision Making, 2013, 28(2): 289-293.
- [31] Yu S H, Yu X H, Shirinzadeh B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode[J]. Automatica, 2005, 41(11): 1957-1964.