

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.04.007

基于滑模观测器的半主动悬架滑模容错控制

何 静¹, 黄健涛¹, 贾 林²

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 轨道交通学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对高速列车半主动悬架系统的执行器部件容易产生故障问题, 提出了一种基于观测器的积分滑模容错控制方法。首先, 构建了考虑执行器故障的高速列车非线性动力学模型, 再对系统状态方程进行降阶处理, 设计了滑模观测器对执行器故障值进行实时估计, 得出故障表达式; 然后, 以列车位移偏差为反馈信号设计了相应的积分滑模容错控制器, 计算得出保持悬架稳定的输出阻尼力, 结合李雅谱诺夫稳定性理论对滑模容错控制器稳定性进行分析; 最后, 通过仿真及实验验证所设计观测器的跟踪精度在故障发生后 0.5 s 内达 93% 左右, 且与传统 PID 控制算法对比, ICSMC 控制算法能使各状态变量更快稳定至零域附近, 保证列车以稳定的姿态运行。

关键词: 高速列车; 姿态控制; 执行器乘性故障; 滑模观测器; 积分滑模控制器

中图分类号: U264.91

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)04-0048-09

引文格式: 何 静, 黄健涛, 贾 林. 基于滑模观测器的半主动悬架滑模容错控制 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(4): 48-56.

Fault-Tolerant Control of Semi-Active Suspension Sliding Mode Based on Sliding-Mode Observers

HE Jing¹, HUANG Jiantao¹, JIA Lin²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Railway Transportation, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Due to the fact that when the actuator components of the semi-active suspension system of the high speed train are prone to malfunction. In view of a solution of this problem, an observer-based integrated sliding mode fault-tolerant control method has thus been proposed. Firstly, a nonlinear dynamic model is constructed of high-speed trains considering actuator faults, followed by a reduction of the system state equation and a design of a sliding mode observer for an estimation of the actuator fault values in real time, thus obtaining the fault expression. Then, a corresponding integral sliding mode fault-tolerant controller is designed with the displacement deviation of the train as the feedback signal, with the output damping force to maintain suspension stability calculated, followed by an analysis of the stability of the sliding mode fault-tolerant controller with Lyapunov stability theory combined together. Finally, based on a simulation and experimental verification, the tracking accuracy of the designed observer reaches around 93% within 0.5 seconds after the fault occurs. Compared with traditional PID control algorithms, the ICSMC control algorithm can stabilize each state variable to near zero domain faster, thus ensuring a stable posture of the trains in

收稿日期: 2024-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52172403, 62303178); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (23A0426, 22B0577); 湖南省自然科学基金资助项目 (2023JJ50193)

作者简介: 何 静, 女, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为故障检测与诊断, 协同控制,

E-mail: hejing@hut.edu.cn

通信作者: 贾 林, 男, 湖南工业大学讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为轨道交通智能运维技术,

E-mail: jialin@hut.edu.cn

operation.

Keywords: high-speed train; attitude control; actuator multiplicative malfunction; sliding mode observer; integral sliding form controller

0 引言

姿态控制系统是列车的重要子系统, 由于列车在恶劣工况下长时间运行, 面临不确定的诸多复杂因素影响, 悬架系统不可避免地会发生执行器故障, 一旦发生故障以及扰动, 悬架系统的性能将会发生较大的损失, 进而车体各姿态呈现比较明显的晃动形态。因此, 设计具有主动容错能力的控制策略对于提高列车在轨可靠性和安全性, 减少安全隐患风险、防止系统灾难性事故发生具有重要意义。而半主动悬架相较于被动悬架有着更加优异的性能, 同时又可以避免全主动控制所需能量大的缺点^[1]。其中车体、转向架、轮对及可调阻尼器是半主动悬架的主要组成部分。列车车体与转向架构架、轮对与转向架构架之间都加装了弹簧设备, 该设备将高速列车各部分连接起来, 结合可调阻尼器(执行器)输出相应的阻尼力来减少轨面激励等外部干扰带来的影响。

许多学者对高速列车悬架故障容错控制问题进行了研究, 提出了不同的主动容错控制策略。如基于自适应估计技术、滑模观测器技术、区间观测器技术的容错控制等。Sun Y. G. 等^[2]针对悬架执行器部分失效故障提出了自适应补偿非线性容错控制策略。Ho C. M. 等^[3]针对执行器故障提出了基于神经状态观测器的自适应容错控制策略。Liu L. 等^[4]使用神经网络识别未知函数, 并定义相应的自适应律来消除执行器故障对主动悬架造成的影响。V. Kumar 等^[5]针对电动液压执行器故障提出了一种双线性变换的 PID 容错控制策略。Li Y. M. 等^[6]提出了自适应模糊输出反馈容错控制方法解决 1/4 悬架的电磁执行器故障问题。Wang G. 等^[7]提出了基于观测器的终端滑模容错控制方法, 解决主动悬架电机执行器故障问题。Pang H. 等^[8]针对主动悬架执行器故障提出了基于滑模观测器的滑模容错控制策略。孙晋伟等^[9]针对主动悬架执行器故障问题, 设计了主动悬架二阶滑模容错控制器。李德仓等^[10]针对执行器随机故障问题, 提出了主动悬架滑模容错控制策略。向锦涛等^[11]针对主动悬架执行器故障问题, 提出了基于线性观测器的滑模容错控制策略。以上方法多数以主动悬架为研究对象, 但是主动悬架的容错控制需要多个主动元件和许

多传感器来控制多个系统的振动模式, 并适应系统参数摄动和未知故障带来的影响, 这样会使得控制策略的成本大大增加。此外, 滑模控制相较于自适应控制, 同样适用于各种不确定条件的非线性系统, 它能有效处理参数扰动和未知故障下的复杂动态系统; 且其简单性、鲁棒性和良好的控制性能, 已被广泛应用于悬架控制系统中。

鉴于此, 为了保证悬架故障情况下列车运行的经济性、平稳性以及控制系统的实用性, 本研究提出了一种结合观测器的积分滑模容错控制方法, 使得半主动悬架系统在发生执行器故障的情况下依然能以稳定的姿态运行。本文的主要贡献如下: 构建了考虑执行器故障的半主动悬架系统降阶模型, 提出了基于滑模观测器的未知故障值估计方法, 能有效观测控制器所需未知量; 根据观测器得出的故障观测值, 设计了积分滑模控制器, 实现了系统鲁棒主动容错控制。

1 考虑执行器乘性故障的半主动悬架系统模型

在建立动力学模型的过程中, 为方便计算仅考虑主要因素来简化悬架系统的数学模型。简化结构后的半主动悬架系统模型如图 1。其中 M_c 为车身的总质量, M_t 和 M_w 分别为车体转向架以及轮对的总质量, K_1 为悬架系统的弹簧系数, K_0 为轮对的弹簧系数, C_1 为悬架系统的阻尼系数, C_0 为轮对的阻尼系数。此外, 车体、转向架以及轮对的位移距离通过传感器传递给测量系统, 最后结合控制器输出相应的控制力保证车体运行的稳定性。高速列车悬架系统的主要状态变量如表 1 所示。

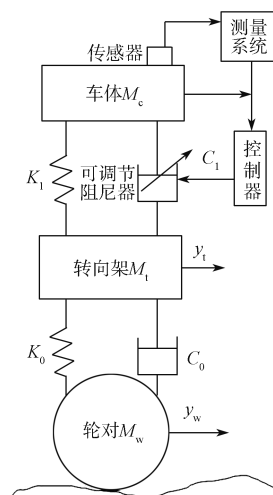


图 1 半主动悬架系统简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of a semi-active suspension system

表 1 高速列车状态变量符号表

Table 1 Symbols of the state variables of high-speed trains

参数符号	释义	参数符号	释义
y_{wi}	轮对横向位移	f_{syt1c}	执行器上产生的作用力
y_{ti}	转向架横向位移	f_{syt2c}	
y_c	车体横向位移	f_{pyw2t1}	
φ_{wi}	轮对摇头角度	f_{pyw2t2}	质量系数矩阵
φ_{ti}	转向架摇头角度	M	
φ_c	车体摇头距离	C	
ϕ_{wi}	转向架侧滚角度	K	刚度系数矩阵
ϕ_c	车体侧滚角度	E	被控阻尼力系数矩阵

注: $i=1, 2, 3, 4$ 。

根据高速列车悬架系统的各部件耦合配置, 结合力学原理, 高速列车十七自由度微分方程^[12]可表示为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = Eu. \quad (1)$$

式中: u 为半主动悬架系统控制器的输入量, 且

$$u = [f_{syt1c} \ f_{syt2c} \ f_{pyw2t1} \ f_{pyw2t2}]^T; \quad (2)$$

y 为半主动悬架系统输出向量, 且

$$y = [y_{wi} \ y_{ti} \ y_c \ \varphi_{wi} \ \varphi_{ti} \ \varphi_c \ \phi_{wi} \ \phi_c]^T. \quad (3)$$

选取悬架系统状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = [y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}, \varphi_{w1}, \varphi_{w2}, \varphi_{w3}, \varphi_{w4}, y_{t1}, \\ y_{t2}, \phi_{w1}, \phi_{w2}, \varphi_{t1}, \varphi_{t2}, y_c, \phi_c, \varphi_c]^T \in \mathbf{R}^{17 \times 1}; \\ x_2 = [\dot{y}_{w1}, \dot{y}_{w2}, \dot{y}_{w3}, \dot{y}_{w4}, \dot{\varphi}_{w1}, \dot{\varphi}_{w2}, \dot{\varphi}_{w3}, \dot{\varphi}_{w4}, \dot{y}_{t1}, \\ \dot{y}_{t2}, \dot{\phi}_{w1}, \dot{\phi}_{w2}, \dot{\varphi}_{t1}, \dot{\varphi}_{t2}, \dot{y}_c, \dot{\phi}_c, \dot{\varphi}_c]^T \in \mathbf{R}^{17 \times 1}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_1 为可测的状态变量; x_2 为未知量。

结合式 (1) ~ (4), 可以将悬架系统微分方程转换至系统状态方程组为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = Ax_1 + Bu_a + Fx_2, \\ y = Cx_1. \end{cases} \quad (5)$$

在高速列车主动悬架系统中, 常见的执行器 (可调节阻尼器) 故障为加性故障和乘性故障^[13]。其中, 乘性故障对系统性能影响最大。故本论文仅分析乘性故障, 故障下控制器输出 $u_a(t)$ 可以表示为^[14]

$$u_a(t) = \rho u(t), \quad (6)$$

式中: ρ 为执行器健康因子, 且 $\rho_i \in (0, 1]$; $u(t)$ 为无故障下控制器输出。

将式 (6) 代入式 (5) 可得执行器乘性故障时的系统状态方程组为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = Ax_1 + B\rho_i u(t) + Fx_2, \\ y = Cx_1. \end{cases} \quad (7)$$

式中: $A \in \mathbf{R}^{17 \times 17}$; $B \in \mathbf{R}^{17 \times 4}$; $u(t) \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$; $F \in \mathbf{R}^{17 \times 17}$;

$C \in \mathbf{R}^{17 \times 17}$; $\rho = \text{diag}[\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4]$ 。

对方程 (7) 进行降阶处理: 令 $x_3 = [x_1 \ x_2]^T$,

$A_1 = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & F \end{bmatrix}$, $C_1 = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B_1 = [0 \ B]^T$, 其中 I 为十七阶单位矩阵, 则含执行器乘性故障状态方程可转化为

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = A_1 x_3 + B_1 u(t) - B_1 G, \\ Y = C_1 x_3. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $G = (I - \rho_i) \times u(t)$; $A_1 \in \mathbf{R}^{34 \times 34}$; $B_1 \in \mathbf{R}^{34 \times 34}$; $C_1 \in \mathbf{R}^{34 \times 34}$; $G \in \mathbf{R}^{4 \times 1}$; 矩阵 A_1 、 B_1 、 C_1 为已知的常量矩阵。

2 滑模观测器设计

一般来说, 在列车实际运行过程中, 故障矩阵 G 是未知的, 并且状态变量 x_3 是不完全可测的。因此, 为获得高速列车半主动悬架系统的未知状态信息, 本节设计一种观测器对式 (8) 中的未知量进行实时估计, 为后续控制器设计提供基础。令 $\hat{x}_3$ 为状态变量 x_3 的观测值, $\hat{\rho}$ 为乘性故障 ρ 的观测值。

定义观测器偏差为 $e_x = \hat{x}_3 - x_3$, (9)

输出偏差为 $e_y = \hat{Y} - Y = C_1 e_x$ 。 (10)

对状态方程式 (8) 构造观测器方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_3 = A_1 \hat{x}_3 + B_1 u(t) + B_1 v - L(\hat{Y} - Y), \\ \hat{Y} = C_1 \hat{x}_3. \end{cases} \quad (11)$$

式中: v 为不连续项, 且

$$v = \begin{cases} -\varepsilon F_1 e_y / \|F_1 e_y\|, & \text{if } e_y \neq 0; \\ 0, & \text{if } e_y = 0. \end{cases} \quad (12)$$

观测器偏差方程的倒数为

$$\dot{e}_x = \dot{\hat{x}}_3 - \dot{x}_3 = (A_1 - LC_1)e_x + B_1(v + G). \quad (13)$$

由于 (A_1, C_1) 是可观的, 这样存在 $L \in \mathbf{R}^{34 \times 34}$ 使得 $\sigma[A_0] \in c^-$ 。其中 $A_0 = A_1 - LC_1$ 。则存在两个正定对称矩阵 $Q \in \mathbf{R}^{34 \times 34}$ 、 $P \in \mathbf{R}^{34 \times 34}$, 结果满足李雅普诺夫方程 $A_0^T P + P A_0 = -Q$, (14)

存在 $F_1 \in \mathbf{R}^{4 \times 34}$, 满足式子 $F_1 = B_1^T \times P^T \times C_1^{-1}$ 。 (15)

式 (8) 中 G 为有界不确定项, 做出如下假设:

假设 1 在实际工程应用中控制输出 u 是有界的, 即满足 $\|G\| \leq \tau$ 。

定理 1 针对式 (8) 所描述的一阶悬架故障系统, 设计式 (11) 状态观测器, 若待设计的常数 ε 满足 $\|G\| \leq \tau \leq \varepsilon$, 则观测器偏差 e_x 在时间 Ω 内指数收敛至 0。

证明 选取李雅普诺夫函数 $V_1 = e_x^T P e_x$, (16)

对式 (16) 求导得出:

$$\dot{V}_1 = \dot{e}_x^T P e_x + e_x^T P \dot{e}_x,$$

$$\dot{V}_1 = \dot{e}_x^T (A_0^T P + P A_0) e_x + 2e_x^T P B_1 (v + G),$$

$$\dot{V}_1 = -\dot{e}_x^T Q e_x + 2(F_1 e_y)^T (-\varepsilon (F_1 e_y / \|F_1 e_y\| + G) + G),$$

$$\dot{V}_1 = -\dot{e}_x^T Q e_x - 2\varepsilon \|F_1 e_y\| + 2(F_1 e_y)^T G.$$

$$\dot{V}_1 \leq -(\lambda_{\min}(Q))\|e_x\|^2 + 2(\|G\| - \varepsilon)\|F_1 e_y\|. \quad (17)$$

$$\text{结合假设 1 可以得出: } \dot{V}_1 \leq 0. \quad (18)$$

证明完毕。

根据李雅普诺夫原理, e_x 在时间 Ω 内指数收敛至 0。得出: $\lim_{t \rightarrow \Omega} e_x \rightarrow 0, \lim_{t \rightarrow \Omega} \dot{e}_x \rightarrow 0, \lim_{t \rightarrow \Omega} e_y \rightarrow 0$ 。

实际上, 结合滑模控制的概念, 不连续开关项 v 会导致系统发生抖振现象。为了减少其抖动, 利用式 (19) 饱和函数替代。

$$v = -\varepsilon (F_1 e_y / \|F_1 e_y\| + \delta), \quad (19)$$

式中 δ 为一个取值较小的标量。

当 $t < \Omega$ 时, 根据式 (8) 和式 (11) 求出乘性故障估计值表达式为

$$\rho = -\varepsilon (F_1 e_y / \|F_1 e_y\| + \delta) \cdot u(t)^{-1} + I_1, \quad (20)$$

式中 I_1 为四阶单位阵。

所设计的观测器能够得出悬架系统中的执行器故障广义表达式, 并且将结合后续的控制律输出得到最终的故障估计值。

3 积分滑模容错控制器设计

由于列车实际运行过程中只有位移向量是可测得的, 各姿态的速度及加速度都是未知量, 于是在设计积分滑模控制器时选择合适的滑模面避免更多未知量的出现, 并且结合状态观测器所观测出的故障表达式, 利用滑模等值原理^[15]将控制律 $u(t)$ 设计为

$$u(t) = -B_{\text{left}}^{-1} \cdot [c x_1 + A x_1 + F S_1 + K_1 \text{sgn}(S_1) + \gamma S_1 + F \ddot{x}_d - F c \int (x_1 - x_d) - c x_d - \ddot{x}_d], \quad (21)$$

式中: K_1 、 γ 及 F 为待设计的正常数; x_d 为预设值; c 为滑动模态控制参数, 且 $c > 0$, 用于调节速度, 在此速度下状态在时间 Ω_1 内收敛为 0。

本文搭建的滑模容错控制结构图如图 2 所示。

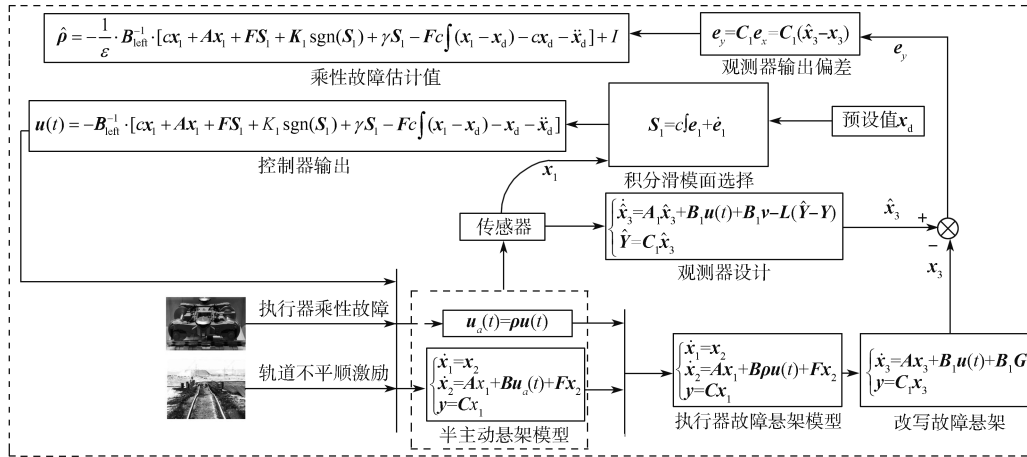


图 2 滑模容错控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of the sliding mode fault-tolerant control

定理 2 对于式 (8) 所描述的列车十七自由度非线性强耦合执行器故障动力学系统模型, 如果控制器输出 $u(t)$ 满足式 (21), 则系统在发生故障的情况下保持稳定, 并且输出的各个变量最终能够收敛到期望值, 即 $\lim_{t \rightarrow T} \tilde{x}_1 \rightarrow 0, \lim_{t \rightarrow T} \tilde{x}_2 \rightarrow 0$ 。

证明 定义实际值 x_1 与预设值 x_d 之间的误差为

$$e_1 = x_1 - x_d, \quad (22)$$

$$\text{则 } \dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d, \quad (23)$$

设计系统的积分滑模面如下:

$$S_1 = c \int e_1 + \dot{e}_1. \quad (24)$$

选取李雅普诺夫函数:

$$V_1 = 1/2 S_1^T S_1, \quad (25)$$

对其求导数可得出

$$\dot{V}_1 = S_1^T \cdot (c e_1 + \dot{e}_1),$$

$$\dot{V}_1 = S_1^T \cdot (c x_1 + A x_1 + B \rho u(t) + F x_2 - c x_d - \ddot{x}_d), \quad (26)$$

$$\text{由于 } S_1 = \dot{e}_1 + c \int e_1 = x_2 - \dot{x}_d + c \int (x_1 - x_d), \quad (27)$$

则式 (26) 通过放缩得到:

$$\dot{V}_1 \leq \|S_1^T\| \cdot (c \|x_1\| + \|A\| \|x_1\| + \|B\| \|u(t)\| + \|F\| \|S_1\| + \|F\| \|\ddot{x}_d\| - F c \int (x_1 - x_d) - c x_d - \ddot{x}_d). \quad (28)$$

将式 (21) 代入式 (28) 得出:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \|S_1^T\| \cdot (-K_1 \operatorname{sgn}(S_1) - \gamma S_1), \\ \dot{V}_1 &\leq -K_1 \|S_1\| \leq 0.\end{aligned}\quad (29)$$

系统满足 Lyapunov 稳定性条件, 确保系统状态轨迹在时间 Ω_1 内到达滑模面上, 证明完毕。

当预设值 $x_d=0$ 时, 控制输出为

$$\begin{aligned}u(t) &= -B_{\text{left}}^{-1} \cdot [cx_1 + Ax_1 + FS_1 + \\ &K_1 \operatorname{sgn}(S_1) + \gamma S_1 - Fc \int x_1].\end{aligned}\quad (30)$$

将故障控制输出 $u(t)$ 代入式 (20), 得到故障估计

$$\begin{aligned}\hat{\rho}_i &\text{ 为 } \hat{\rho}_i = -\frac{1}{\varepsilon} \cdot B_{\text{left}}^{-1} \cdot [cx_1 + Ax_1 + FS_1 + \\ &K_1 \operatorname{sgn}(S_1) + \gamma S_1 - Fc \int x_1] + I_1.\end{aligned}\quad (31)$$

4 仿真参数设置与实验结果分析

4.1 仿真参数设置

为了验证本文所设计的观测器以及积分滑模控制器有着良好的性能。采用 Matlab/Simulink 平台进行仿真实验, 采用美国 5 级线路谱来模拟轨面情况; 运用数值仿真以及对比实验来验证所设计的滑模容错控制策略的有效性。车体子系统的滑模控制器运行参数分别为 $K_1=10$ 、 $p=150$ 、 $L=6$ 、 $F=15$ 、 $L=6$ 、 $\varepsilon=3.6$ 。在 Matlab/Simulink 仿真和 RT-LAB 半实物实验中使用的列车悬架的主要参数^[16]取值见表 2。

表 2 列车悬架参数取值
Table 2 Train suspension values

参数	取值	参数	取值
M_w/kg	1 650	转向架轮对间距 H_w/m	0.174 5
M_l/kg	2 280	轴距一半 l_c/m	9
一系悬挂横向距离 d_w/m	1	定距一半 l_l/m	1.25
车辆轨矩 a/m	1.435	轮对半径 R_0/m	0.457 5
二系悬挂与转向架间距 H_{wl}/m	0.094 5	轨距一半 b/m	0.746 5

本文考虑在列车运行时执行器发生突变跳变故障以及缓变故障, 仿真时间为 4 s。跳变故障的执行器效率因子 ρ 选取为

$$\rho_i = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1; \\ 0.1, & 1 \leq t \leq 4. \end{cases}$$

缓变故障的执行器效率因子 ρ 选取为

$$\rho_i = \begin{cases} 0.8, & 0 \leq t \leq 1; \\ 0.5 + 0.3 \sin(11t + 3), & 1 < t \leq 4. \end{cases}$$

4.2 仿真结果分析

4.2.1 观测器的性能分析

执行器跳变故障情况下的车体横移状态观测图和执行器故障值观测图分别如图 3 和图 4 所示。

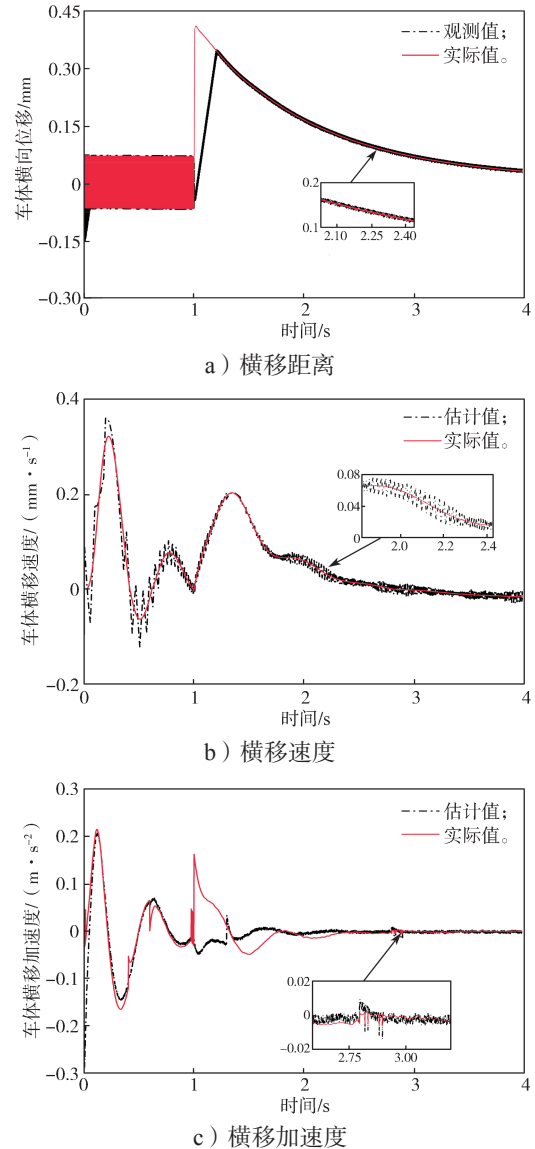


图 3 跳变故障下车体横移状态观测图

Fig. 3 Observation diagram of each state of the vehicle body traversing under the jump fault

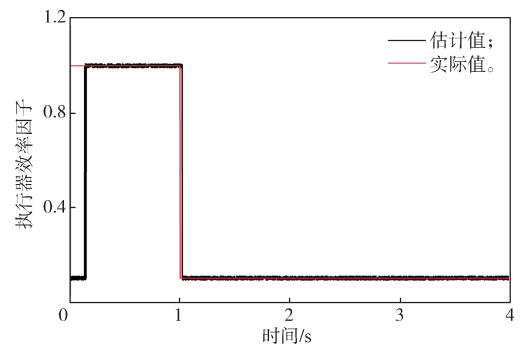


图 4 跳变故障下执行器故障值观测图

Fig. 4 Observation of actuator fault value under jump fault

仿真时间为 4 s, 执行器在 1 s 的时刻效率因子从 1.0 跳变至 0.1。可以从图中明显地看出, 在状态变量实际值与估计值初值不同的情况下, 观测值曲线在故障发生后的 0.5 s 之内速度、加速度都能很好

地跟踪到实际值的曲线, 跟踪精度保持在 93% 左右, 验证了所设计观测器的有效性。执行器缓变故障情况下车体横移状态观测图和执行器故障值观测图分别如图 5 和图 6 所示。

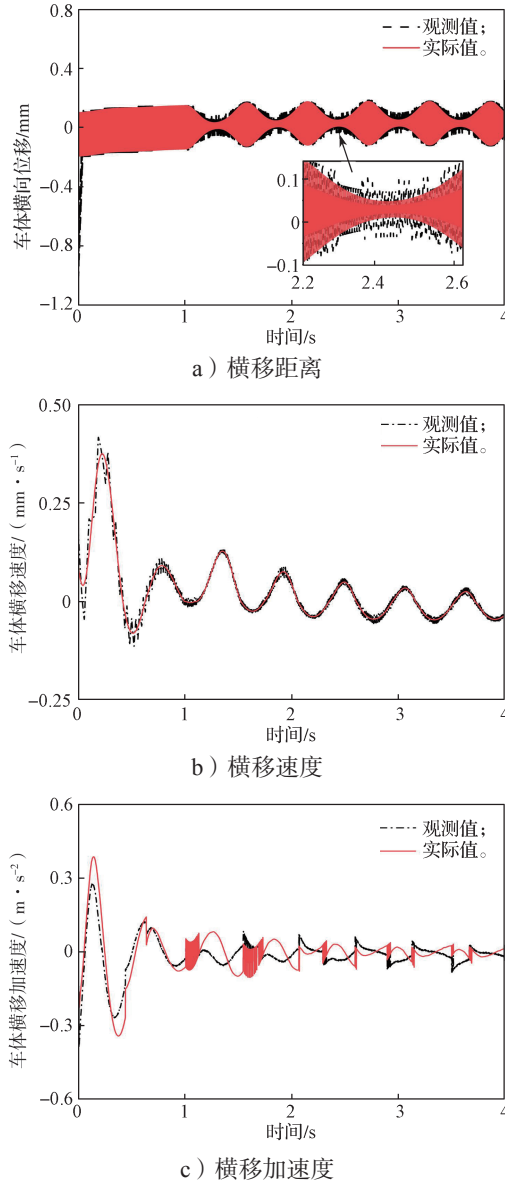


图 5 缓变故障下车体横移状态观测图

Fig. 5 Observation diagram of the traversing state of the car body under the slow change fault

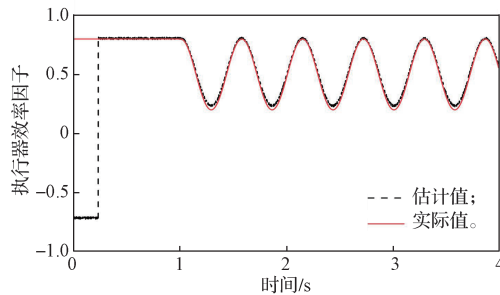


图 6 缓变故障下执行器故障值观测图

Fig. 6 Observation of actuator fault value under slow variable fault

由图 6 可知, 仿真时长为 4 s, 执行器在 1 s 时刻效率因子开始正弦变化。在实际值与估计值初值不同的情况下, 观测器所观测的状态曲线在故障发生后的 0.25 s 左右能跟踪到实际值的变化曲线, 并且估计值与实际值的误差趋近于 0, 验证了所设计观测器良好的跟踪性能。

4.2.2 积分滑模控制器的性能分析

图 7 为悬架执行器发生跳变故障情况下采用两种不同控制策略的车体横移状态对比图。

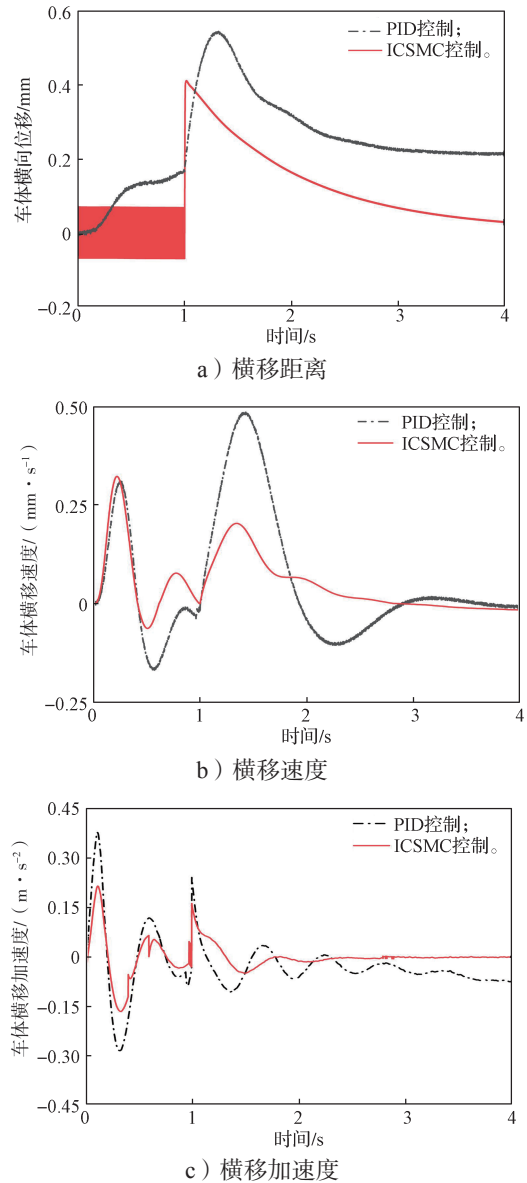


图 7 跳变故障下车体横移状态对比图

Fig. 7 Comparison diagram of the traversing state of the car body under the slow change fault

由图 7a 可知, 当 $1 \leq t \leq 4$ 时, 执行器的效率因子从 1.0 跳变至 0.1, 通过 ICSMC (integral continuous sliding mode control) 控制器的作用可以使得车体横移距离稳定至 0.1 mm 左右, 而传统的 PID 控制器只能使横移距离维持在 0.24 mm, 验证了所设计

积分连续滑模控制器的有效性。由图 7b 可知, 当 $0 \leq t \leq 1$ 时, 系统通过 ICSMC 的调节使横移速度峰值降低了 70%, 当 $1 \leq t \leq 4$ 时, 执行器的效率因子从 1.0 跳变至 0.1, 通过 ICSMC 控制器的作用使得车体横移速度在跳变 2.3 s 后稳定至 0.11 mm/s 左右, 比 PID 控制器的收敛时间短 0.9 s。由图 7c 可知, 当 $0 \leq t \leq 1$ 时, 系统通过 ICSMC 的调节, 使得加速度峰值降低了 50%, 当 $1 \leq t \leq 4$ 时, 执行器的效率因子从 1.0 跳变至 0.1, ICSMC 控制器在故障发生后 1.5 s 左右使得车体横移加速度值稳定至 0.02 m/s^2 左右, 而 PID 控制器需要 3.0 s 左右才能保持稳定, 证明了所设计 ICSMC 控制器良好的鲁棒性。

图 8 为悬架执行器发生缓变故障情况下采用两种不同控制策略的车体横移状态对比图。

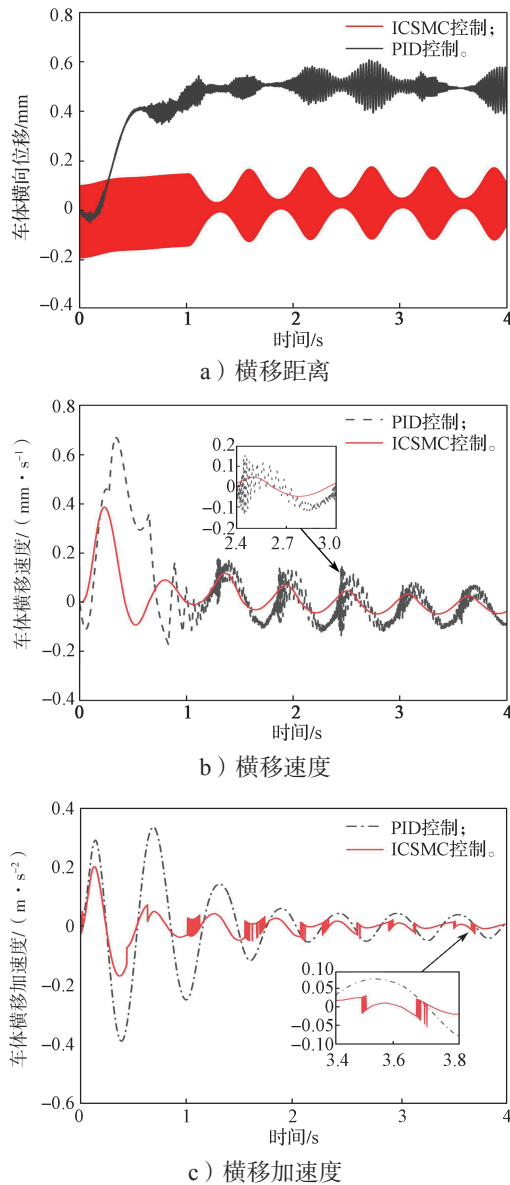


图 8 缓变故障下车体横移状态对比图

Fig. 8 Comparison diagram of the traversing state of the car body under the slow change fault

从图 8a 可以看出, 当 $0 \leq t \leq 1$ 时, 执行器未发生故障, ICSMC 控制器可以使得车体横移距离保持在 $-0.2 \sim 0.1 \text{ mm}$ 之间, 而 PID 控制在 0.8 s 左右达 0.4 mm。当执行器效率因子出现正弦变化后, ICSMC 控制器相较于 PID 控制器能使车体横移距离峰值降低了 0.4 mm, 并且稳定至 $\pm 0.15 \text{ mm}$ 左右。由图 8b 可知, 当 $0 \leq t \leq 1$ 时, 系统通过 ICSMC 的调节, 使得横向移动速度降低了 42%, 当 $1 \leq t \leq 4$ 时, 执行器出现正弦变化的故障后, 在 2.5 s 后系统经过 ICSMC 控制器的调节, 使得横移速度稳定至 $\pm 0.05 \text{ mm/s}$ 左右, 对比 PID 控制器, 速度降低了 61%。由图 8c 可知, 当 $0 \leq t \leq 1$ 时, 系统通过 ICSMC 的调节, 使得加速度峰值降低至 0.015 m/s^2 , 执行器出现正弦变化的故障后, ICSMC 控制器的作用使得横移加速度值小幅变化维持在 $\pm 0.05 \text{ m/s}^2$ 左右, 相较于 PID 控制器减少了 75%。

从时域角度出发, 横向、纵向以及垂向加速度的均方根值^[17]由式 (32) 以及式 (33) 计算。

$$a_{vi} = \sqrt{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2)/n} \quad (32)$$

$$a_v = \sqrt{(w_x \cdot a_{vx}) + (w_y \cdot a_{vy}) + (w_z \cdot a_{vz})} \quad (33)$$

式 (32) (33) 中: a_n 为横向、纵向以及垂向的第 n 个加速度值 (角加速度值); n 为采样次数; w 为横向、纵向、垂向的加权系数。

根据仿真结果以及相应肢体加权系数计算得出各个姿态总加权加速度均方根值小于 0.3 m/s^2 , 满足人体乘坐车辆的舒适度要求。

5 半实物实验平台与结果分析

5.1 半实物实验平台

该实验采用 RT-LAB 实现 PMSM 驱动系统的硬件仿真实验。实验平台由 TMS320F2812 型号的 DSP 控制器、RT-LAB OP5600 仿真电机、上位机、示波器 (oscilloscope) 及相关连接线组。图 9 为所使用的 RT-Lab 试验台, RT-LAB HILS 平台的系统参数见表 2。

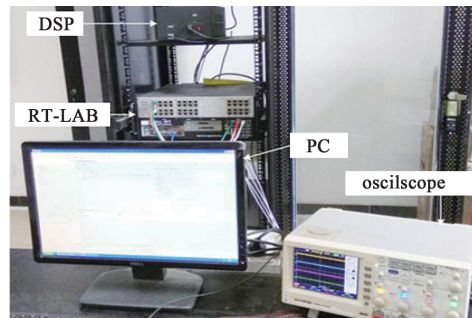
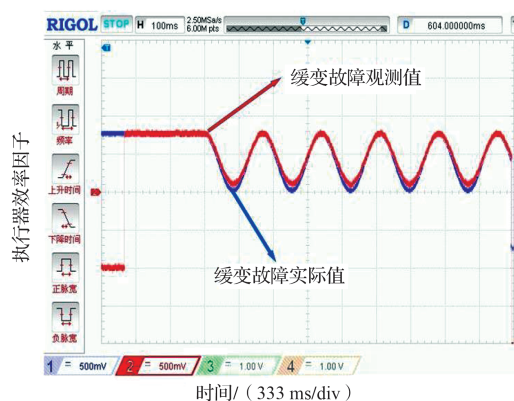


图 9 RT-LAB 实验平台图

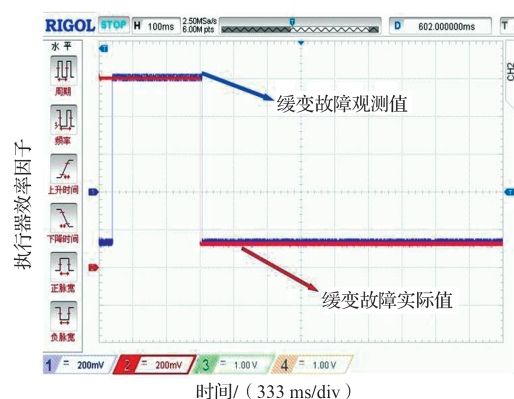
Fig. 9 Diagram of the RT-LAB experimental platform

5.2 实验结果分析

图 10 为执行器缓变故障值和执行器跳变故障的跟踪实验图,通过将高速列车半主动悬架 Simulink 模块导出并转成代码导入 RT-LAB 实验平台的运行结果,可知本文设计的滑模观测器能在故障观测值与故障实际值初值不同的情况下,在 400 ms 左右观测值迅速跟踪上实际值,且跟踪精度为 96%。



a) 缓变故障跟踪

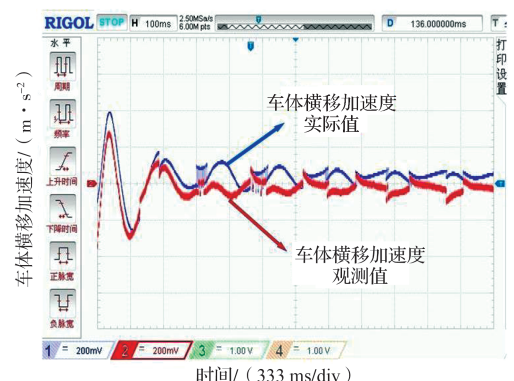


b) 跳变故障跟踪

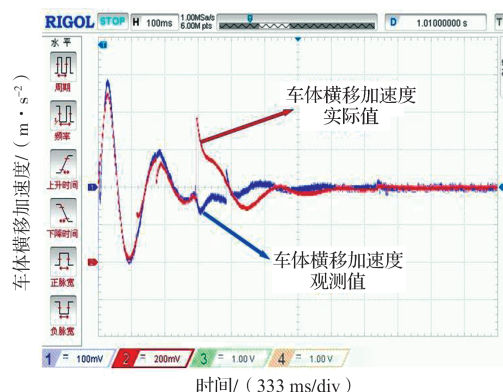
图 10 不同故障跟踪 RT-LAB 实验结果图

Fig. 10 Experimental results of RT-LAB with slowly variable fault tracking

图 11 为缓变故障和跳变故障的车体横向振动加速度实验图。



a) 缓变故障



b) 跳变故障

图 11 不同故障下车体横移加速度 RT-LAB 实验图

Fig. 11 RT-LAB experiment diagram of the transverse acceleration of the car body under the jump fault

从半实物仿真实验平台的运行结果可知,当高速列车运行过程中执行器发生乘性故障时,通过积分滑模控制器的作用使得列车半主动悬架在故障发生后,可在很短的时间内使车体横移加速度值在两种不同形式的故障情况下收敛至 0 左右。研究结果表明本研究所提方法有一定的可行性。

6 结论

针对列车运行过程中悬架执行器部件出现乘性故障问题,本研究提出了一种基于观测器的积分连续滑模主动容错控制策略,该策略将半主动悬架系统状态方程降阶后,设计了观测器对执行器故障未知值进行实时估计,利用所设计的积分滑模控制器得出故障估计值。并结合 Laypunov 稳定性证明方法证明了悬架系统的稳定性。最后通过 Matlab/Simulink 数值仿真以及半实物实验,完成两种不同执行器乘性故障的容错控制实验。由仿真与实验结果可知,本文所提出的滑模容错控制策略,可以提高高速列车悬架系统的可靠性和稳定性,对于悬架部分出现执行器乘性故障情况具有较强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 王 鹏,杨绍普,刘永强,等. 高速列车磁流变半主动悬挂控制策略研究[J]. 力学学报, 2023, 55(4): 1004-1018.
WANG Peng, YANG Shaopu, LIU Yongqiang, et al. Research on Control Strategy of Magnetorheological Semi-Active Suspension for High-Speed Train[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(4): 1004-1018.
- [2] SUN Y G, LI F X, LIN G B, et al. Adaptive Fault-

- Tolerant Control of High-Speed Maglev Train Suspension System with Partial Actuator Failure: Design and Experiments[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2023, 24(3): 272–283.
- [3] HO C M, AHN K K. Observer Based Adaptive Neural Networks Fault-Tolerant Control for Pneumatic Active Suspension with Vertical Constraint and Sensor Fault[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(5): 5862–5876.
- [4] LIU L, ZHU C Q, LIU Y J, et al. Performance Improvement of Active Suspension Constrained System via Neural Network Identification[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, 34(10): 7089–7098.
- [5] Kumar V, Rana K P S. A Novel Fuzzy PID Controller for Nonlinear Active Suspension System with an Electro-Hydraulic Actuator[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(4): 189.
- [6] LI Y M, MA S, LI K W, et al. Adaptive Fuzzy Output Feedback Fault-Tolerant Control for Active Suspension Systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2024, 9(1): 2469–2478.
- [7] WANG G, CHADLI M, BASIN M V. Practical Terminal Sliding Mode Control of Nonlinear Uncertain Active Suspension Systems with Adaptive Disturbance Observer[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(2): 789–797.
- [8] PANG H, SHANG Y T, WANG P. Design of a Sliding Mode Observer-Based Fault Tolerant Controller for Automobile Active Suspensions with Parameter Uncertainties and Sensor Faults[J]. IEEE Access, 2020, 8: 186963–186975.
- [9] 孙晋伟, 刘 秋, 顾 亮. 主动悬架的二阶滑模容错控制研究[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(9): 1370–1377.
- SUN Jinwei, LIU Qiu, GU Liang. Second Order Sliding Mode Fault Tolerant Control of Active Suspension Systems[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(9): 1370–1377.
- [10] 李德仓, 彭伟尧, 胥如迅, 等. 高速列车主动悬架滑模容错控制器设计[J]. 现代制造工程, 2022(9): 40–47.
- LI Decang, PENG Weiyao, XU Ruxun, et al. Design of Sliding Mode Fault-Tolerant Controller for Active Suspension of High-Speed Train[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(9): 40–47.
- [11] 向锦涛. 基于滑模控制的非线性主动悬架线性干扰观测器设计方法研究[D]. 温州: 温州大学, 2021.
- XIANG Jintao. Research on Design Method of Linear Disturbance Observer for Nonlinear Active Suspension Based on Sliding Mode Control[D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2021.
- [12] SINGH S, KUMAR A. Modelling and Analysis of a Passenger Train for Enhancing the Ride Performance Using MR-Based Semi-Active Suspension[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2022, 10(5): 1737–1751.
- [13] 孟建军, 彭伟尧, 胥如迅, 等. 基于故障补偿的高速列车主动悬架主动容错控制[J]. 现代制造工程, 2022(10): 34–42, 33.
- MENG Jianjun, PENG Weiyao, XU Ruxun, et al. Active Fault Tolerant Control of High-Speed Train Active Suspension Based on Fault Compensation[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(10): 34–42, 33.
- [14] VIADERO-MONASTERIO F, BOADA B L, BOADA M J L, et al. H_∞ Dynamic Output Feedback Control for a Networked Control Active Suspension System under Actuator Faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 162: 108050.
- [15] 赵凯辉, 易金武, 刘文昌, 等. 一种永磁同步电机无模型超螺旋快速终端滑模控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 88–98.
- ZHAO Kaihui, YI Jinwu, LIU Wenchang, et al. A Model-Free Super-Twisting Fast Terminal Sliding Mode Control Method for a Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 88–98.
- [16] HE J, LIU Z T, ZHANG C F. Sliding Mode Control of Lateral Semi-Active Suspension of High-Speed Train[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2020, 24(7): 925–933.
- [17] 孙效杰, 顾鹏飞, 李培刚. 铁路客车乘坐舒适性评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 642–648.
- SUN Xiaojie, GU Pengfei, LI Peigang. Riding Comfort Ability Evaluation of Railway Passenger Cars[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(3): 642–648.

(责任编辑: 姜利民)