

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407852

# 基于分布式观测器的高速列车固定时间跟踪控制\*

赵凯辉<sup>1</sup> 罗美芸<sup>1</sup> 黄宜山<sup>2</sup> 张昌凡<sup>1</sup> 黄浪尘<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学交通与电气工程学院 株洲 412007; 2. 中车时代电动汽车股份有限公司 株洲 412001)

**摘要:**考虑高速列车运行时存在不确定因素及外界干扰等问题,为快速、准确、稳定地跟踪给定目标速度,提出一种基于分布式观测器的固定时间非奇异终端滑模控制策略。首先,根据列车实际运行过程中的受力情况,建立符合其运行规律的多智能体模型。其次,选取终端滑模面,并结合双幂次趋近律,设计领航者车厢的固定时间终端滑模控制器。由于高速列车中部分跟随者车厢与领航者车厢之间不能直接通信,无法获得领航者车厢的位置和速度,因此设计固定时间分布式状态观测器观测领航者车厢的状态信息;同时采用非奇异终端滑模面设计跟随者车厢的固定时间非奇异终端滑模控制器,通过 Lyapunov 稳定性理论分别证明了所设计的观测器和控制器能在固定时间内稳定。最终,以 CRH 型列车参数进行仿真,通过与滑模一致性方法进行比较,验证了所提算法能使跟随者车厢快速、精准跟踪目标速度曲线,速度误差在 $-2\times 10^{-6}\sim 2\times 10^{-6}$  m/s 内,对外部干扰具有强鲁棒性。

**关键词:**高速列车;多智能体系统;固定时间分布式观测器;固定时间跟踪控制

**中图分类号:** U266.2; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4099

## Fixed-time tracking control of high-speed train based on distributed observer

Zhao Kaihui<sup>1</sup> Luo Meiyun<sup>1</sup> Huang Yishan<sup>2</sup> Zhang Changfan<sup>1</sup> Huang Langchen<sup>1</sup>

(1. School of Transportation and Electrical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** Considering the problems of uncertainties and external disturbances during the operation of high-speed train (HST), a fixed-time non-singular terminal sliding mode control method based on the distributed observer is proposed to track a given target speed quickly, accurately, and stably. First, the multi-agent model of HST is constructed by according to the force situation during the actual operation of the train. Secondly, the terminal sliding mode surface is selected and combined with the double power reaching law to design the fixed-time terminal sliding mode controller for the leader vehicle. Since there is no direct communication between some of the follower vehicles and the leader vehicle in HST, the position and speed of the leader vehicle cannot be obtained. A distributed fixed-time observer is designed to observe the state information of the leader vehicle. While, the non-singular terminal sliding mode surface is used to design the fixed-time non-singular terminal sliding mode controller for the follower vehicles. By Lyapunov stability theory, it proves that the designed observer and controller can be stabilized in a fixed time, respectively. Finally, the simulation is carried out with the parameters of CRH-type trains. under the condition of introducing external disturbances. The method is utilized to compare with the sliding-mode consistency method. The results show that the proposed algorithm can enable the follower vehicles to track the target velocity profile quickly and accurately with the velocity error within  $-2\times 10^{-6}\sim 2\times 10^{-6}$  m/s, and with strong robustness compared with the sliding mode consistency method.

**Keywords:** high speed train; multi-agent systems; fixed time distributed observer; fixed time tracking control

## 0 引言

高速列车作为现代交通运输的重要组成部分,在推动国家建设、促进经济发展以及深化民生福祉的进程中发挥着重大作用。由于高速列车运行跨度大、运行时间长、运行工况复杂、运行环境非常恶劣,传统的控制方法难以达到理想的控制效果。因此,研究高速列车运行过程中的建模方法和速度跟踪控制算法具有重要意义。

现阶段高速列车的建模方式主要分为单质点模型和多质点模型两类。传统的单质点建模方式是将整列车简化为一个质点,模型简单,受力易分析。为实现列车的速度-位移跟踪控制,许多学者将不同的控制算法与单质点模型结合,如PID控制<sup>[1]</sup>、自适应控制<sup>[2]</sup>、滑模控制<sup>[3]</sup>、预测控制<sup>[4]</sup>、模糊控制<sup>[5]</sup>等。Zhong等<sup>[6]</sup>基于非线性动力学建立双线性模型,采用模型预测控制和惰性学习算法调节模型及控制器参数,实现了列车速度的稳定跟踪。徐传芳<sup>[7]</sup>采用传统单质点模型,设计了自适应非奇异终端滑模控制器,通过自适应技术对模型参数标称值进行估计,实现了列车对目标速度的精准跟踪。连文博等<sup>[8]</sup>考虑高速列车复杂多变的运行过程,构建了含扰动项的列车单质点模型,设计了自抗扰控制器,提高了列车系统抗干扰能力及目标速度追踪精度。侯涛等<sup>[9]</sup>针对列车自动驾驶受外部扰动导致速度跟踪精度较低的问题,设计了预设非奇异终端滑模控制和列车自动驾驶系统速度控制算法,提高了控制系统的鲁棒性和控制精度。但上述研究都基于单质点模型,均忽略车厢之间的车钩作用力,因此不能真实有效地反映列车的实际运行情况,特别是在工况发生变化时,车钩作用的影响更加突出和重要。

与单质点模型相比,多质点模型能更精确突出高速列车各节车厢的受力特性。许多学者进一步将列车牵引力/制动力分配至各节车厢,考虑车钩特点和车厢之间的相互作用力,并结合多智能体理论,研究高速列车的速度-位移跟踪控制。Guo等<sup>[10]</sup>建立了列车多智能体模型,考虑发生执行器故障,设计了分布式自适应容错控制器,并利用辅助系统应对输入饱和的影响,使得各节车厢速度趋于一致。何暉等<sup>[11]</sup>为突破重载列车的运输瓶颈,基于拉萨尔不变性原理设计协调控制器,实现了列车的协调巡航控制。Wang等<sup>[12]</sup>研究列车发生执行器故障时的故障检测问题,设计了事件触发控制律,保证了列车安全有效运行。魏文军等<sup>[13]</sup>针对列车在移动闭塞条件下协调控制问题,设计分布式协同控制算法,实现了车厢等距运行。但上述研究均未考虑外界扰动对列车运行的影响,无法体现实际运行过程中列车对目标速度-位移曲线的精确跟踪。

滑模控制(sliding mode control, SMC)是一种非线性系统控制技术,能够解决系统自身参数变化和外部扰动对高速列车的影响。赵凯辉等<sup>[14]</sup>考虑了列车运行时外界扰动的影响,利用滑模观测器估计未知扰动,并将其前馈补偿至分布式一致性滑模控制器,有效减少外界扰动的影响,实现列车的平稳运行,但未考虑到车厢间距的安全距离。李中奇等<sup>[15]</sup>针对外界不确定扰动,设计了复合一致性控制器,引入滑模项来加快系统收敛速度,同时引入人工势场函数使车厢间距保持在安全范围内,但未考虑传统滑模在滑模面发生抖振,因而影响了系统的控制性能。张友鹏等<sup>[16]</sup>考虑传统滑模抖振较大的问题,采用超螺旋滑模控制,将滑模不连续项置于积分运算中,使得列车控制输入趋于平滑,但是系统的收敛时间不确定。综上所述,尽管当前高速列车的控制方法在一定程度上提升了列车的跟踪性能,但仍存在改进空间。

因此,考虑高速列车易受外界干扰,且传统单质点模型难以精准反映列车实际运行状态等问题,基于高速列车多质点模型,提出一种基于固定时间分布式状态观测器(fixed time distributed state observer, FTDSO)的滑模控制策略。该方法为每节车厢设计FTDSO估计领航者的状态信息,分别设计领航者车厢的固定时间终端滑模控制器(fixed time terminal sliding mode controller, FTSMC)与跟随者车厢的固定时间非奇异终端滑模控制器(fixed time non-singular terminal sliding mode controller, FTNSTSMC),使系统状态在固定时间收敛,确保各车厢速度同步,以提高列车控制系统的鲁棒性。最后利用CHR型列车参数仿真验证了所提控制算法的有效性和鲁棒性。

## 1 预备知识

### 1.1 图论

将每节车厢视作质点,基于多质点模型构建高速列车多智能体系统。车厢间的信息传递可通过通信拓扑图呈现,多智能体的信息交互则由无向图 $G = \{V_n, E_n, A_n\}$ 进行描述。

1) 节点集 $V_n = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 中的节点对应列车的各跟随者车厢。

2) 边集 $E_n = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V_n, i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j\}$ 描述车厢间的信息传递关系,若车厢 $v_i$ 可向车厢 $v_j$ 传递信息,则 $(v_i, v_j)$ 构成边集中的元素,且 $E_n \subseteq V_n \times V_n$ 。

3)  $A_n = (a_{ij} \in R^{n \times n})$ 为权重连接矩阵,当跟随者车厢 $i$ 和 $j$ 存在信息交流时,矩阵元素 $a_{ij} = a_{ji} = 1$ ,反之则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$ 。

拉普拉斯矩阵为 $L_n = D_n - A_n$ 。 $D_n$ 为度矩阵,其主对

角线元素  $d_{ii}$  为节点  $v_i$  的度值,且非对角线元素  $d_{ij} = 0$ 。若无向图  $G$  中任意节点之间存在信息交流,则  $G$  为连通图,此时  $L_n$  具有对称半正定特性,其特征值满足  $0 = \lambda_1(L_n) \leq \lambda_2(L_n) \leq \dots \leq \lambda_n(L_n)$ 。若定义矩阵  $M = L + B, B = \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$ , 则  $M$  具有对称正定特性<sup>[17]</sup>。

1.2 定义

定义 1 定义  $\text{sig}^\gamma(x) = |x|^\gamma \text{sign}(x)$ , 其中  $\gamma > 0, x \in R, \text{sign}(x)$  为标准符号函数。

1.3 假设

假设 1 高速列车第  $i$  节车厢扰动项  $d_i$  是有界的,即存在  $D_1 > 0$ , 使得  $|d_i| < D_1$ 。

假设 2 高速列车第  $i$  节车厢的位移  $x_i$ 、速度  $v_i$  及其一阶导数存在且有界。

1.4 引理

引理 1<sup>[18]</sup> 考虑非线性系统  $\dot{x}(t) = f(t, x(t))$ ,  $x(0) = x_0$ , 如果存在连续的正定函数  $V(x(t))$  满足:

$$\dot{V}(x(t)) = -\alpha V(x(t))^{\frac{m}{n}} - \beta V(x(t))^{\frac{p}{q}} \quad (1)$$

其中,  $\alpha > 0, \beta > 0, n, m, p, q$  都是奇数且满足  $m > n > 0, q > p > 0$ 。则该系统在固定时间稳定, 稳定时间为:

$$T \leq \frac{1}{\alpha} \frac{n}{m-n} + \frac{1}{\beta} \frac{q}{q-p} \quad (2)$$

引理 2<sup>[19]</sup> 考虑非线性系统  $\dot{x}(t) = f(t, x(t))$ ,  $x(0) = x_0$ , 如果存在连续的正定函数  $V(x(t))$  满足:

$$\dot{V}(x(t)) \leq -\mu V(x(t))^\tau \quad (3)$$

其中,  $\mu > 0, \tau > 0$ 。

当  $\tau = 1$ , 非线性系统在原点稳定; 当  $0 < \tau < 1$ , 系统在有限时间内稳定; 当  $\tau \geq 1$ , 对于任意的  $\varepsilon > 0, V(x) < \varepsilon$  在固定时间内稳定, 收敛时间满足:

$$\begin{cases} T \leq \frac{|V_0|^{1-\tau}}{\mu(1-\tau)}, 0 < \tau < 1 \\ T \leq \frac{1}{\mu(\tau-1)\varepsilon^{\tau-1}}, \tau \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

引理 3<sup>[20]</sup> 假设  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n \geq 0, \omega > 1$ , 则有:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_i^\omega \geq n^{1-\omega} \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i \right)^\omega \quad (5)$$

2 高速列车系统描述

高速列车系统由 1 节领航者车厢和  $i (i=1, \dots, n)$  节跟随者车厢组成。将每节车厢视作一个质点, 并将车厢之间的耦合关系简化为“耦合器”模型, 建立了反映高速列车实际运行状态的多质点模型。

2.1 高速列车阻力

基本阻力为高速列车沿平直轨道运行时由车轮与钢轨之间摩擦产生的阻力, 可表示为:

$$Df_{1i} = a_{1i} + a_{2i}v_i + a_{3i}v_i^2 \quad (6)$$

式中:  $v_i$  为第  $i$  节车厢的运行速度;  $a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}$  为车厢基本运行阻力系数。

高速列车经过坡道、弯道和隧道会产生附加阻力, 附加阻力可表示为:

$$\begin{aligned} Df_{2i} &= \vartheta \\ Df_{3i} &= \frac{600}{R} \\ Df_{4i} &= 0.00013 \cdot L_s \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $Df_{2i}, Df_{3i}, Df_{4i}$  分别为坡道阻力、曲线阻力、隧道阻力;  $\vartheta$  为坡道坡度;  $R$  为曲线半径;  $L_s$  为隧道长度。

所以高速列车在线路运行时第  $i$  节车厢受到的总阻力为  $Df_i = Df_{1i} + Df_{2i} + Df_{3i} + Df_{4i}$ 。

2.2 列车车钩作用力

在分析高速列车车厢之间的相互作用力时, 相邻车厢间的作用关系可简化为“耦合器”模型, 来描述车厢间车钩作用力的变化过程<sup>[10]</sup>, 以精准模拟整个高速列车系统的实际运行状况。“耦合器”模型结构如图 1 所示, 列车车钩作用力表达式为:

$$f_i = k_i(x_{i+1} - x_i) + c_i(v_{i+1} - v_i) \quad (8)$$

式中:  $k_i, c_i$  分别为“耦合器”模型的弹簧系数和阻尼系数;  $x_i$  为第  $i$  节车厢的位移;  $f_i$  表示相邻车厢间的车钩作用力。

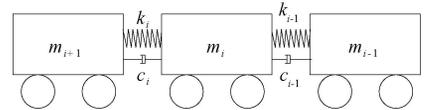


图 1 高速列车“耦合器”模型

Fig. 1 High-speed train “coupler” model

2.3 高速列车多质点模型

综上所述, 将高速列车各节车厢视为一个质点, 通过对每节车厢进行受力分析, 构建高速列车多质点模型的动力学方程为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, (i = 1, 2, \dots, n) \\ m_1 \dot{v}_1 = u_1 - f_1 - Df_1 \\ \dots \\ m_i \dot{v}_i = u_i + f_{i-1} - f_i - Df_i, (i = 2, 3, \dots, n-1) \\ m_n \dot{v}_n = u_n + f_{n-1} - Df_n \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $m_i, u_i$  分别为第  $i$  节车厢的质量和输入。

2.4 高速列车多智能体数学模型

将高速列车各节车厢视为智能体, 相邻车厢之间可

实现速度、位移等状态信息的交互。由式(9)可得高速列车的多智能体模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ m_i \dot{v}_i = u_i + \sum_{i=1}^n (-1)^i a_{ij} f_i - Df_i \end{cases} \quad (10)$$

式(10)进一步简化为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = b_i u_i + d_i \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $b_i = 1/m_i$ ;  $d_i = (\sum_{i=1}^n (-1)^i a_{ij} f_i - Df_i) / m_i$ , 可将其视为未知复合扰动项。

### 3 领航者车厢控制器设计

#### 3.1 系统控制目标

首先,设计 FTSMC 保证领航者车厢速度与给定目标曲线速度特性曲线  $v^*$  一致。领航者车厢的输出速度与目标速度特性曲线满足:

$$\lim_{t \rightarrow T_0} \| v_0 - v^* \| = 0 \quad (12)$$

式中:  $v_0$  为领航者的速度;  $v^*$  给定目标速度。

然后,设计基于 FTDSO 的 FTNSTSMC 使跟随者车厢的状态信息满足:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T_f} \| \Gamma_i(t) - \Gamma_0(t) \| = 0 \\ \Gamma_i(t) = \Gamma_0(t), \forall t \geq T_f \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\Gamma_0(t) = [x_0, v_0]^T$  表示领航者车厢的状态信息;  $\Gamma_i(t) = [x_i, v_i]^T$  表示跟随者车厢的状态信息。

高速列车系统控制框图如图 2 所示。

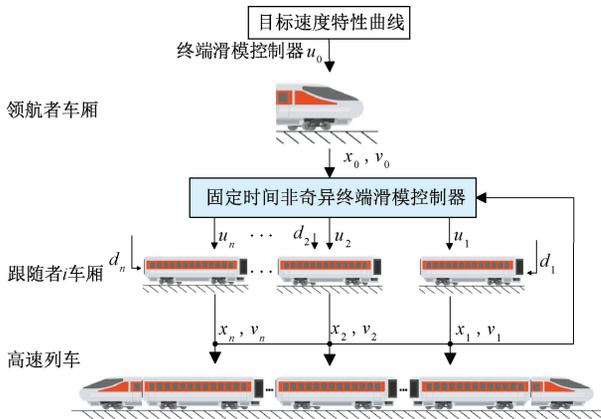


图 2 高速列车系统控制框图

Fig. 2 Control block diagram of high-speed train system

#### 3.2 领航者固定时间终端滑模控制器设计

由于跟随者车厢速度收敛时间与领航者车厢速度收敛时间有直接关系<sup>[14]</sup>,为提高领航者控制器的快速性与

鲁棒性,设计 FTSMC 使领航者的速度与目标速度函数  $v^*$  快速保持一致。

领航者车厢的动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = v_0 \\ \dot{v}_0 = u_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $v_0, x_0, u_0$  分别为领航者车厢的速度、位移和控制输入。

定义速度误差  $e_0$  为领航者的实际速度  $v_0$  与目标速度  $v^*$  之差为:

$$e_0 = v_0 - v^* \quad (15)$$

由式(15)可得:

$$\dot{e}_0 = \dot{v}_0 \quad (16)$$

构造终端滑模面<sup>[21]</sup>为:

$$s_0 = e_0 + \alpha_0 \int_0^t \text{sig}^\kappa(e_0) dt + \beta_0 \int_0^t \text{sig}^\lambda(e_0) dt \quad (17)$$

式中:  $\alpha_0 > 0, \beta_0 > 0, 0 < \kappa < 1, \lambda > 1$ 。

选取双幂次趋近律<sup>[22]</sup>:

$$\dot{s}_0 = -l_1 \text{sig}^{r_1}(s_0) - l_2 \text{sig}^{r_2}(s_0) \quad (18)$$

根据式(17)和(18)得,领航者控制律为:

$$u_0 = -\alpha_0 \text{sig}^\kappa(e_0) - \beta_0 \text{sig}^\lambda(e_0) - l_1 \text{sig}^{r_1}(s_0) - l_2 \text{sig}^{r_2}(s_0) \quad (19)$$

式中:  $l_1 > 0, l_2 > 0, r_1 > 1, 0 < r_2 < 1$ 。

**定理 1** 领航者车厢的速度在控制输入式(19)的作用下,能够在固定时间  $T_0$  内跟踪目标速度特性曲线。

证明:构造 Lyapunov 函数:

$$V_0 = \frac{1}{2} s_0^2 \quad (20)$$

对  $V_0$  求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= s_0 \dot{s}_0 = s_0 (-l_1 \text{sig}^{r_1}(s_0) - l_2 \text{sig}^{r_2}(s_0)) = \\ &= -l_1 |s_0|^{r_1+1} - l_2 |s_0|^{r_2+1} = -2^{\frac{r_1+1}{2}} l_1 V_0^{\frac{r_1+1}{2}} - 2^{\frac{r_2+1}{2}} l_2 V_0^{\frac{r_2+1}{2}} \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)可知,系统满足 Lyapunov 稳定性判据,所设计的控制器稳定,系统状态在固定时间收敛。由引理 1 可知,领航者跟踪目标速度曲线的时间  $T_0$  满足:

$$T_0 \leq \frac{1}{2^{(r_1+1)/2} l_1 ((r_1 + 1)/2 - 1)} + \frac{1}{2^{(r_2+1)/2} l_2 (1 - (r_2 + 1)/2)} \quad (22)$$

证毕。

### 4 基于分布式状态观测器的跟随者车厢固定时间非奇异终端滑模控制器设计

#### 4.1 固定时间分布式状态观测器的设计

在高速列车系统中,由于部分跟随者车厢与领航者

车厢不存在直接信息交流,无法获得领航者的位置和速度,故设计 FTDSO 估计领航者的状态信息。对第  $i$  节跟随者车厢,设计 FTDSO 为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= \hat{v}_i - p_{x1} \cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + b_i(\hat{x}_i - x_0)\right)^{m_1/n_1} - \\ q_{x2} &\cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\hat{x}_i - \hat{x}_j) + b_i(\hat{x}_i - x_0)\right)^{m_2/n_2} \\ \dot{\hat{v}}_i &= u_o - p_{v1} \cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\hat{v}_i - \hat{v}_j) + b_i(\hat{v}_i - v_0)\right)^{m_1/n_1} - \\ q_{v2} &\cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\hat{v}_i - \hat{v}_j) + b_i(\hat{v}_i - v_0)\right)^{m_2/n_2} - \\ \eta &\cdot \text{sign}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\hat{v}_i - \hat{v}_j) + b_i(\hat{v}_i - v_0)\right) \end{aligned} \quad (23)$$

其中,  $m_1, n_1, m_2, n_2$  都是正实数,且满足  $m_1 > n_1, m_2 < n_2$ ;  $p_{x1}, q_{x2}, p_{v1}, q_{v2}$  为正实数;  $\hat{x}_i, \hat{v}_i$  表示第  $i$  节车厢对领航者的位移与速度的估计值。

对于第  $i$  节车厢,定义观测器误差方程为:

$$\tilde{x}_i = \hat{x}_i - x_0, \quad \tilde{v}_i = \hat{v}_i - v_0 \quad (24)$$

对式 (23) 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_i &= \tilde{v}_i - p_{x1} \cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j) + b_i \tilde{x}_i\right)^{m_1/n_1} - \\ q_{x2} &\cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j) + b_i \tilde{x}_i\right)^{m_2/n_2} \\ \dot{\tilde{v}}_i &= -p_{v1} \cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{v}_i - \tilde{v}_j) + b_i \tilde{v}_i\right)^{m_1/n_1} - \\ q_{v2} &\cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{v}_i - \tilde{v}_j) + b_i \tilde{v}_i\right)^{m_2/n_2} - \\ \eta &\cdot \text{sign}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{v}_i - \tilde{v}_j) + b_i \tilde{v}_i\right) \end{aligned} \quad (25)$$

令:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_{x,i} &= \sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j) + b_i \tilde{x}_i \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{v,i} &= \sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{v}_i - \tilde{v}_j) + b_i \tilde{v}_i \end{aligned} \quad (26)$$

定义  $\tilde{\boldsymbol{x}} = [\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n]^T, \tilde{\boldsymbol{v}} = [\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_n]^T, \boldsymbol{\varepsilon}_x = [\boldsymbol{\varepsilon}_{x,1}, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_{x,n}]^T, \boldsymbol{\varepsilon}_v = [\boldsymbol{\varepsilon}_{v,1}, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_{v,n}]^T$ , 则可得到:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_x = \boldsymbol{M} \tilde{\boldsymbol{x}}, \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_v = \boldsymbol{M} \tilde{\boldsymbol{v}} \quad (27)$$

式中:  $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{L} + \boldsymbol{B}$  为对称正定矩阵。

**定理 2** 设计观测器式 (23), 选取合适的参数  $\eta > 0$ , FTDSO 的误差动态方程式 (24) 在固定时间收敛到 0, 并能估计领航者的位移与速度, 且收敛时间  $T_L$  满足  $T_L \leq T_1 + T_2$ 。

证明: 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{v}}^T \boldsymbol{M} \tilde{\boldsymbol{v}} \quad (28)$$

由  $V_1$  求导可得:

$$\dot{V}_1 = \tilde{\boldsymbol{v}}^T \boldsymbol{M} \dot{\tilde{\boldsymbol{v}}} =$$

$$\begin{aligned} &[\boldsymbol{\varepsilon}_{v,1}, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_{v,n}] \left( -p_{v1} [\text{sig}(\boldsymbol{\varepsilon}_{v,1})^{m_1/n_1}, \dots, \text{sig}(\boldsymbol{\varepsilon}_{v,n})^{m_1/n_1}]^T - \right. \\ &q_{v2} [\text{sig}(\boldsymbol{\varepsilon}_{v,1})^{m_2/n_2}, \dots, \text{sig}(\boldsymbol{\varepsilon}_{v,n})^{m_2/n_2}]^T - \\ &\left. \eta [\text{sign}(\boldsymbol{\varepsilon}_{v,1}), \dots, \text{sign}(\boldsymbol{\varepsilon}_{v,n})]^T \right) \leq \\ &-p_{v1} \sum_{j=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}|^{m_1/n_1+1} - q_{v2} \sum_{j=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}|^{m_2/n_2+1} - \eta \sum_{j=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}| \leq \\ &-p_{v1} \sum_{j=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}|^{m_1/n_1+1} - q_{v2} \sum_{j=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}|^{m_2/n_2+1} \end{aligned} \quad (29)$$

根据引理 3, 进一步得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -p_{v1} n^{\frac{n_1-m_1}{2n_1}} \left( \sum_{i=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}|^2 \right)^{\frac{m_1+n_1}{2n_1}} - \\ q_{v2} n^{\frac{n_2-m_2}{2n_2}} \left( \sum_{i=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}|^2 \right)^{\frac{m_2+n_2}{2n_2}} \end{aligned} \quad (30)$$

又因为  $\sum_{i=1}^n |\boldsymbol{\varepsilon}_{v,i}|^2 \geq \lambda_{\min}(\boldsymbol{M}) \tilde{\boldsymbol{v}}^T \boldsymbol{M} \tilde{\boldsymbol{v}} = 2\lambda_{\min}(\boldsymbol{M}) V_1$ , 可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -p_{v1} n^{\frac{n_1-m_1}{2n_1}} (2\lambda_{\min}(\boldsymbol{M}) V_1)^{\frac{m_1+n_1}{2n_1}} - \\ q_{v2} n^{\frac{n_2-m_2}{2n_2}} (2\lambda_{\min}(\boldsymbol{M}) V_1)^{\frac{m_2+n_2}{2n_2}} &\leq \\ -p_{v1} n^{\frac{n_1-m_1}{2n_1}} (2\lambda_{\min}(\boldsymbol{M}))^{\frac{m_1+n_1}{2n_1}} V_1^{\frac{m_1+n_1}{2n_1}} - \\ q_{v2} n^{\frac{n_2-m_2}{2n_2}} (2\lambda_{\min}(\boldsymbol{M}))^{\frac{m_2+n_2}{2n_2}} V_1^{\frac{m_2+n_2}{2n_2}} \end{aligned} \quad (31)$$

根据引理 1, 可以得到  $V_1(t) \equiv 0, \forall t \geq T_1$ , 且固定时间  $T_1$  满足:

$$\begin{aligned} T_1 &\leq \frac{n^{(m_1-n_1)/(2n_1)}}{p_{v1} 2^{\frac{(m_1-n_1)/(2n_1)}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{M})}} \frac{n_1}{m_1-n_1}} + \\ &\frac{n^{\frac{(m_2-n_2)/(2n_2)}}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{M})} \frac{n_2}{n_2-m_2}}{q_{v2} 2^{\frac{(m_2-n_2)/(2n_2)}{\lambda_{\min}(\boldsymbol{M})}} \frac{n_2}{n_2-m_2}} \end{aligned} \quad (32)$$

当  $t \geq T_1$  时,  $\tilde{v}_i = v_i - v_0 = 0$ 。因此, 式 (25) 中的第 1 个等式可简化为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}_i &= -p_{x1} \cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j) + b_i \tilde{x}_i\right)^{m_1/n_1} - \\ q_{x2} &\cdot \text{sig}\left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j) + b_i \tilde{x}_i\right)^{m_2/n_2} \end{aligned} \quad (33)$$

与上述步骤相似, 构造 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{x}}^T \boldsymbol{M} \tilde{\boldsymbol{x}} \quad (34)$$

对  $V_2$  求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -p_{x1} n^{\frac{n_1-m_1}{2n_1}} (2\lambda_{\min}(\boldsymbol{M}))^{\frac{m_1+n_1}{2n_1}} V_2^{\frac{m_1+n_1}{2n_1}} - \\ q_{x2} n^{\frac{n_2-m_2}{2n_2}} (2\lambda_{\min}(\boldsymbol{M}))^{\frac{m_2+n_2}{2n_2}} V_2^{\frac{m_2+n_2}{2n_2}} \end{aligned} \quad (35)$$

根据引理 1, 可以得到  $V_2(t) \equiv 0, \forall t \geq T_2$  且固定时

间  $T_2$  满足:

$$T_2 \leq \frac{n \frac{m_1 - n_1}{2^{n_1}}}{p_{x1} 2^{\frac{m_1 - n_1}{2^{n_1}}} (\lambda_{\min}(\mathbf{M})) \frac{m_1 + n_1}{2^{n_1}} m_1 - n_1} + \frac{n_1}{n} + \frac{q_{x2} 2^{\frac{m_2 - n_2}{2^{n_2}}} (\lambda_{\min}(\mathbf{M})) \frac{m_2 + n_2}{2^{n_2}} n_2 - m_2}{n \frac{m_2 - n_2}{2^{n_2}}} \quad (36)$$

因此在  $T_L = T_1 + T_2$  之后,可以得到  $\hat{x}_i = x_0 = 0$ 。故分布式固定时间观测器在固定时间  $T_L$  内可估计领航者车厢的状态信息。

证毕。

#### 4.2 跟随者车厢固定时间非奇异终端滑模控制器设计

设计上述 FTDSO,跟随者车厢可以在固定时间对领航者车厢的状态做出准确的估计。为使跟随者车厢在固定时间内跟踪领航者车厢速度,设计 FTNSTSMC。

定义跟随者车厢的跟踪误差为:

$$\begin{aligned} e_{xi} &= x_i - \hat{x}_i \\ e_{vi} &= v_i - \hat{v}_i \end{aligned} \quad (37)$$

式中:  $e_{xi}$ 、 $e_{vi}$  分别为第  $i$  节车厢位置误差和速度误差。当  $t \geq T_L$ ,  $\hat{x}_i = x_0$ ,  $\hat{v}_i = v_0$ , 式 (37) 可写为:

$$\begin{aligned} e_{xi} &= x_i - x_0 \\ e_{vi} &= v_i - v_0 \end{aligned} \quad (38)$$

对于跟随者车厢,构造新型非奇异终端滑模面<sup>[23]</sup>:

$$s_1 = \begin{cases} e_{vi} + \beta_1 e_{xi}^{k_1}, & |e_{vi}(t)| > \varepsilon \\ e_{vi} + \alpha_1 \text{sign}(e_{xi}), & |e_{vi}(t)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (39)$$

式中:  $\alpha_1, \beta_1, k_1, \varepsilon$  为正实数且  $\alpha_1 > 0, \beta_1 > 0, k_1 > 1$ 。

设计跟随者车厢  $i$  控制器为:

$$u_i = \begin{cases} m_i(\dot{v}_0 - \beta_1 k_1 e_{xi}^{k_1 - 1} e_{vi} - \alpha_1 \text{sig}^\rho(s_1)) - m_i(\beta_1 \text{sig}^{k_1}(s_1) + D_1 \text{sign}(s_1)), & |e_{vi}(t)| > \varepsilon \\ m_i(\dot{v}_0 - \alpha_1 \text{sig}^\rho(s_1)) - m_i(\beta_1 \text{sig}^{k_1}(s_1) + D_1 \text{sign}(s_1)), & |e_{vi}(t)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (40)$$

式中:  $0 < \rho < 1$ 。

**定理 3** 假定假设 1 成立,多智能体系统式 (10) 在控制输入式 (40) 作用下,系统状态将在固定时间  $T_f = \max(T_3 + T_4, T_5 + T_6)$  收敛,领航者车厢与跟随者车厢状态最终达到一致。

证明: 1) 当  $|e_{vi}| > \varepsilon$  时,验证滑模面  $s_1$  收敛特性,构造 Lyapunov 函数:

$$V_3 = 0.5s_1^2 \quad (41)$$

由  $V_3$  求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= s_1 \dot{s}_1 = s_1(b_i u_i + d_i - u_0 + \beta_1 k_1 e_{xi}^{k_1 - 1} e_{vi}) = \\ &= s_1(-\alpha_1 \text{sig}^\rho(s_1) - \beta_1 \text{sig}^{k_1}(s_1) - D_1 \text{sign}(s_1) + d_i) = \\ &= -\alpha_1 |s_1|^{\rho+1} - \beta_1 |s_1|^{k_1+1} - D_1 |s_1| + s_1 d_i \leq \\ &= -\alpha_1 |s_1|^{\rho+1} - \beta_1 |s_1|^{k_1+1} = \\ &= -2^{(\rho+1)/2} \alpha_1 V_2^{(\rho+1)/2} - 2^{(k_1+1)/2} \beta_1 V_2^{(k_1+1)/2} \end{aligned} \quad (42)$$

根据引理 1,跟随者将在固定时间内到达相应的滑模面,收敛时间  $T_3$  为:

$$T_3 \leq \frac{1}{2^{(k_1+1)/2} \beta_1 ((k_1 + 1)/2 - 1)} + \frac{1}{2^{(\rho+1)/2} \alpha_1 (1 - (\rho + 1)/2)} \quad (43)$$

跟随者车厢到达滑模面后,根据滑模等值原理,得  $s_1 = 0$ ,由式 (39) 可得  $e_{vi} = -\beta_1 e_{xi}^{k_1}$ 。

根据引理 2,如果  $s_1 = 0$ ,跟随者车厢在固定时间内跟踪领航者车厢,收敛于集合  $A = \{e_{xi} : e_{xi} \leq \varepsilon\}$ ,收敛时间  $T_4$  满足  $T_4 \leq 1/(\beta_1(k_1 - 1)\varepsilon^{(k_1-1)})$ 。

2) 当  $|e_{vi}| \leq \varepsilon$ ,由于符号函数符号  $\text{sign}(\cdot)$  是不可微的,因此考虑两种情况。在跟随者跟踪领航者之前,如果  $e_{xi} = 0$  且  $e_{vi} \neq 0$ ,则  $e_{xi}$  将立即离开原点,因此  $e_{xi} = 0$  的状态可以忽略不计,可以得到  $\dot{s}_1 = b_i u_i + d_i - \dot{v}_0$ 。在跟随者跟踪领航者之后,有  $\text{sign}(e_{xi}) = 0$ 。因此也可以得  $\dot{s}_1 = b_i u_i + d_i - \dot{v}_0$ 。综上,无论哪种情况,跟随者车厢将在固定时间到达相应的滑模面。

为分析滑模面  $s_1$  收敛特性,选取 Lyapunov 函数:

$$V_5 = 0.5s_1^2 \quad (44)$$

对  $V_5$  求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_5 &= s_1 \dot{s}_1 = s_1(b_i u_i + d_i - \dot{v}_0) = \\ &= s_1(-\alpha_1 \text{sig}^\rho(s_1) - \beta_1 \text{sig}^{k_1}(s_1) - D_1 \text{sign}(s_1) + d_i) = \\ &= -\alpha_1 |s_1|^{\rho+1} - \beta_1 |s_1|^{k_1+1} - D_1 |s_1| + s_1 d_i \leq \\ &= -\alpha_1 |s_1|^{\rho+1} - \beta_1 |s_1|^{k_1+1} = \\ &= -2^{(\rho+1)/2} \alpha_1 V_2^{(\rho+1)/2} - 2^{(k_1+1)/2} \beta_1 V_2^{(k_1+1)/2} \end{aligned} \quad (45)$$

根据引理 1,跟随者将在固定的时间内到达相应的滑模面,收敛时间  $T_5$  满足:

$$T_5 \leq \frac{1}{2^{(k_1+1)/2} \beta_1 ((k_1 + 1)/2 - 1)} + \frac{1}{2^{(\rho+1)/2} \alpha_1 (1 - (\rho + 1)/2)} \quad (46)$$

根据滑模等值原理,得  $s_1 = 0$ ,由式 (39) 可以得到  $e_{vi} = -\alpha_1 \text{sign}(e_{xi})$ 。

当跟随者车厢到达滑模面  $s_1$  后,为验证其能准确稳定跟踪领航者车厢,选取 Lyapunov 函数:

$$V_6 = 0.5e_{xi}^2 \quad (47)$$

对  $V_6$  求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_6 &= e_{xi} \dot{e}_{xi} = e_{xi} (-\alpha_1 \text{sign}(e_{xi})) = \\ &-\alpha_1 |e_{xi}| = -\alpha_1 2^{1/2} V_6^{1/2} \end{aligned} \quad (48)$$

根据引理 2, 在  $s_1 = 0$  后, 跟随者车厢的速度与位移误差将收敛到 0, 在固定时间内跟踪领航者, 稳定时间满足:  $T_6 \leq \sqrt{2}\varepsilon/\alpha_1$ 。综上, 所设计的控制器稳定。证毕。

### 5 仿真验证及结果分析

为验证所提算法的合理性及有效性, 假设高速列车包含 6 节车厢, 将每节车厢视为智能体, 并建立多智能体系统模型, 利用 MATLAB 软件进行仿真分析。

领航者车厢通过 FTSMC 获取速度目标曲线信号, 为每节跟随者车厢设计 FTDSO 估计领航者的状态信息, 并设计 FTNSTSMC 使得每节跟随者车厢准确跟踪领航者车厢, 从而实现高速列车各节车厢速度一致。

以领航者车厢初始位置为坐标原点, 列车运行方向为正方向, 高速列车多智能体通信拓扑如图 3 所示。

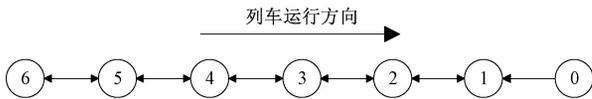


图 3 高速列车通信拓扑图

Fig. 3 Topology of high-speed train communication

由图 3 可得邻接矩阵  $A$  和度矩阵  $D$  为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 2 & & & & & \\ & 2 & & & & \\ & & 2 & & & \\ & & & 2 & & \\ & & & & 2 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

由于高速列车运行过程中包含加速、巡航和制动阶段, 故设计列车速度-位移目标曲线如图 4 所示, 目标速度、位移曲线分别用实线和虚线表示, 该曲线包括两段加速阶段、两段减速阶段以及 3 段匀速阶段, 运行时间为 1 000 s, 最高时速为 80 m/s。

假设 6 节车厢模型参数相同, 如表 1 所示, 上述参数满足 CRH 型列车参数<sup>[16]</sup>, 每节车厢长度为 20 m, “耦合器”模型中弹簧原长为 1 m, 弹性形范围限制在  $[-0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m}]$ , 则相邻车厢安全间距为  $[19.5 \text{ m}, 20.5 \text{ m}]$ , 每节

车厢的初始位置和初始速度如表 2 所示。

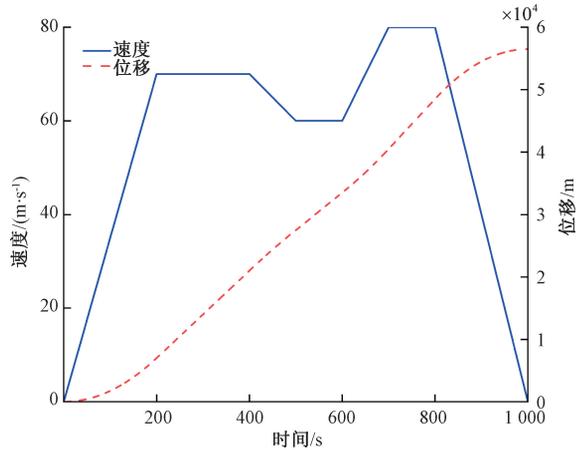


图 4 目标速度-位移曲线

Fig. 4 Target velocity-displacement curve

表 1 高速列车参数

Table 1 High-speed train parameters

参数	数值	单位
$m_i, i = 1, 2, \dots, 6$	8 000	kg
$k_i$	16 000	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
$c_i$	600	$\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1}$
$a_{1i}$	0.011 76	$\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$
$a_{2i}$	0.000 776 16	$\text{Ns} \cdot \text{mkg}^{-1}$
$a_{3i}$	0.000 16	$\text{Ns}^2 \cdot \text{m}^2 \text{kg}^{-1}$

表 2 各节车厢的初始位置和速度

Table 2 Initial position and speed of each car

$i$	1	2	3	4	5	6
$x_i(t_0)/\text{m}$	-20	-40	-60	-80	-100	-120
$v_i(t_0)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0	0	0	0	0	0

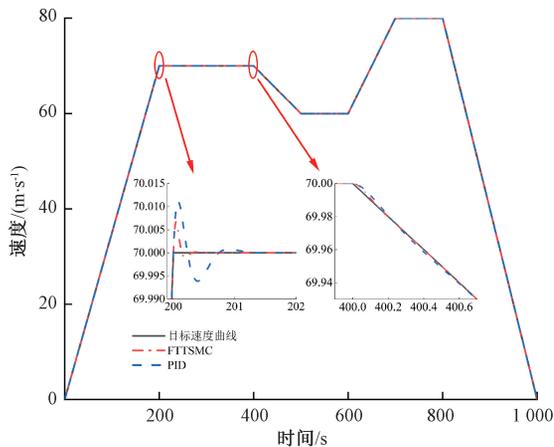
#### 5.1 领航者车厢速度跟踪仿真结果及分析

文献[14]使用传统 PID 控制算法控制高速列车的领航者跟踪目标曲线, PID 控制算法收敛速度较慢且控制精度相对滑模控制较小。领航者车厢采用 FTSMC 控制, 系统收敛速度仅与设计的控制器参数有关, 与外界扰动无关, 系统的收敛时间固定, 达到了更好的控制效果。

图 5 为领航者车厢采用 PID 和 FTSMC 速度跟踪效果对比, 目标速度曲线、FTSMC 和 PID 分别用实线、点划线和划线表示。其中 PID 参数为  $k_p = 200, k_i = 500, k_d = 20$ ; FTSMC 参数为  $\alpha_0 = 3, \beta_0 = 5, \kappa = 1/3, \lambda = 5/3, l_1 = 15, l_2 = 10$ 。

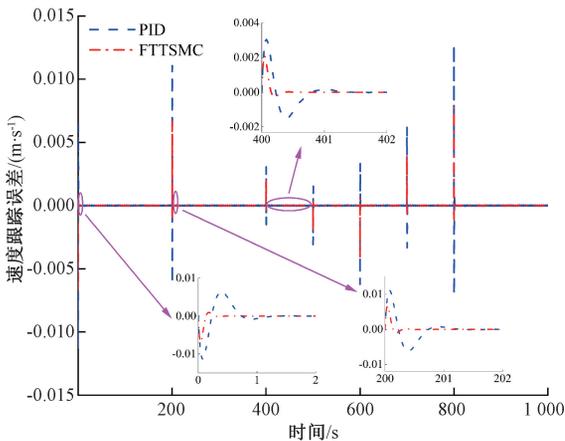
由图 5(a) 可知, 当目标速度曲线出现工况切换时, FTSMC 收敛时间明显少于 PID 控制, 且抖振幅度更小, 体现了 FTSMC 收敛速度较快且鲁棒性更强的特点。由图 5(b) 可知, FTSMC 面对工况切换时, 跟踪误差明显

小于PID,且收敛时间均为固定时间 0.5 s。PID 速度跟踪误差在 $-0.012\sim 0.012$  m/s,FTTSMC 速度跟踪误差在 $-0.004\sim 0.008$  m/s,这表明 FTTSMC 收敛速度更快,能够在固定时间收敛,抗扰动能力更强,达到了更好的控制效果。



(a) PID和FTTSMC速度跟踪对比

(a) Comparison of PID and FTTSMC speed tracking



(b) PID和FTTSMC速度跟踪误差对比

(b) Comparison of PID and FTTSMC speed tracking errors

图5 PID和FTTSMC速度跟踪效果对比

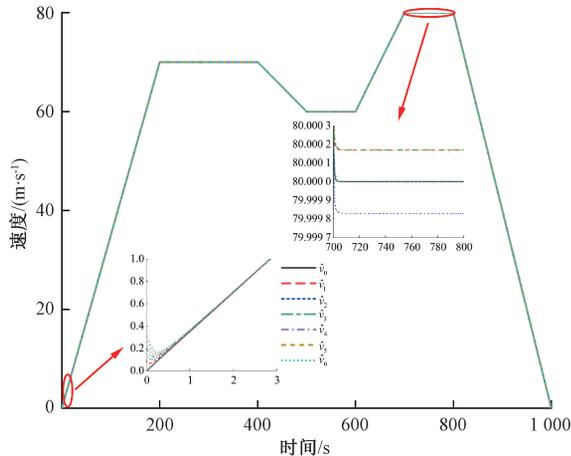
Fig.5 Comparison of PID and FTTSMC speed tracking effects

### 5.2 跟随者车厢分布式固定时间状态观测器性能评估

为了更好地测试 FTDSO 的跟踪精度,使跟随者车厢能够更好地估计领航者车厢的状态信息,假设跟随者车厢的初始速度为 $[v_1(0), \dots, v_6(0)] = [0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35]$ ,设计的 FTDSO 参数分别为 $\eta = 0.1, p_{x_1} = 8, q_{x_2} = 8, p_{v_1} = 8, q_{v_2} = 8, m_1 = 3, m_2 = 5, n_1 = 5, n_2 = 3$ 。

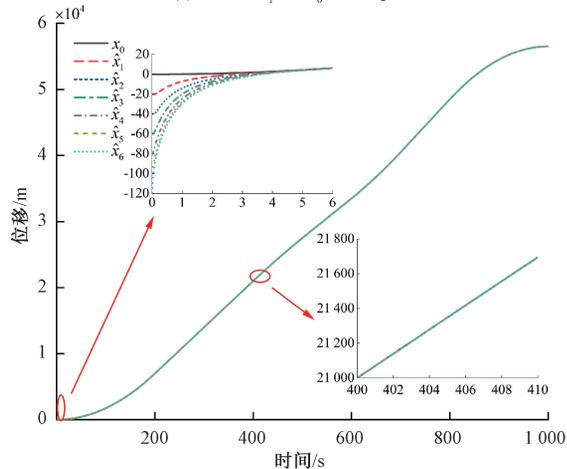
FTDSO 跟踪效果如图 6 所示,领航者车厢的状态和 1~6 节跟随者车厢的状态观测值分别用实线、划线、点线、点划线、短点划线、短点线表示。由图 6(a)可知,跟随者车厢速度在 1.7 s 跟踪领航者速度信息,由图 6(b)可知,跟随者车厢位移在 3.8 s 跟踪领航者位置

信息,通过 FTDSO 使得所有跟随者车厢能够在固定时间内估计领航者的状态信息。FTDSO 观测跟踪速度快,稳定性强。



(a) FTDSO  $\hat{v}_i$ 和 $v_0$ 跟踪效果

(a) FTDSO  $\hat{v}_i$  and  $v_0$  tracking effects



(b) FTDSO  $\hat{x}_i$ 和 $x_0$ 跟踪效果

(b) FTDSO  $\hat{x}_i$  and  $x_0$  tracking effects

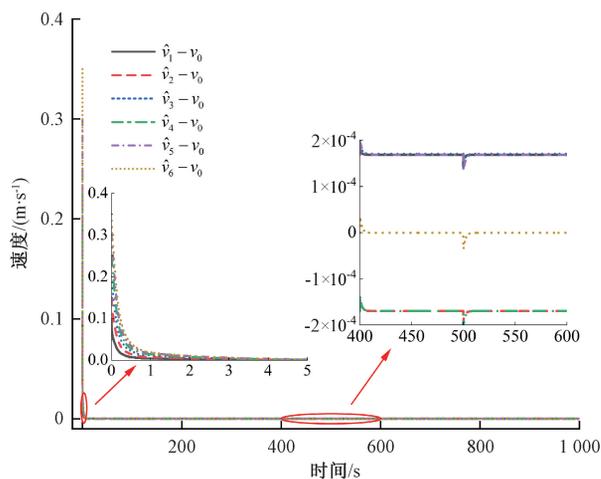
图6 FTDSO跟踪效果

Fig.6 FTDSO tracking effect

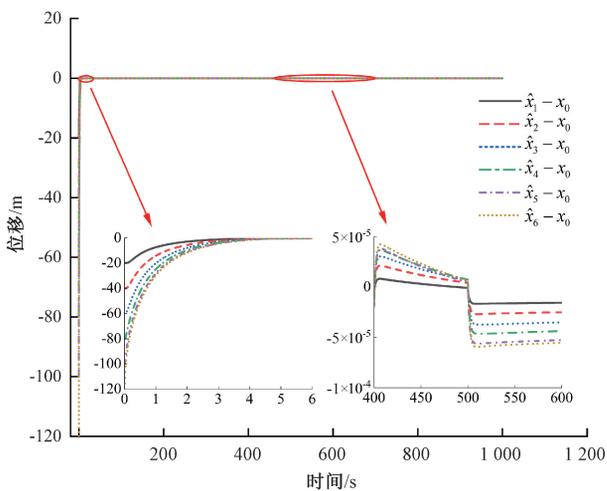
分布式固定时间状态观测器 (27) 的状态估计误差如图 7 所示,1~6 节跟随者车厢的状态观测值与领航者车厢的状态误差分别用实线、划线、点线、点划线、短点划线、短点线表示。由图 7 可知,所有跟随者车厢与领航者车厢的状态误差小,其中,速度误差在 $[-0.0002, 0.0002]$  m/s,位移误差在 $[-0.0001, 0.0002]$  m/s,误差波动范围小,收敛速度快,达到了观测器设计的性能要求。

### 5.3 跟随者车厢固定时间控制器仿真与分析

为了说明 FTNSTSMC 的收敛速度快与鲁棒性强的特点,与滑模一致性控制 (sliding mode consensus controller, SMCC) 进行实验对比,为反应高速列车在实际运行过程中的复杂性,选用阶跃信号、突变信号、脉冲信号、缓变型



(a) FTDSO速度估计误差  $\hat{v}_i - v_i$   
 (a) FTDSO speed estimation error  $\hat{v}_i - v_i$



(b) FTDSO位移估计误差  $\hat{x}_i - x_i$   
 (b) FTDSO displacement estimation error  $\hat{x}_i - x_i$

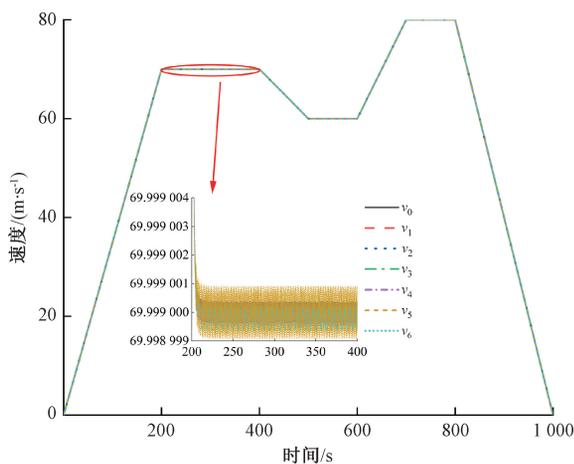
图 7 FTDSO 状态估计误差

Fig. 7 FTDSO state estimation error

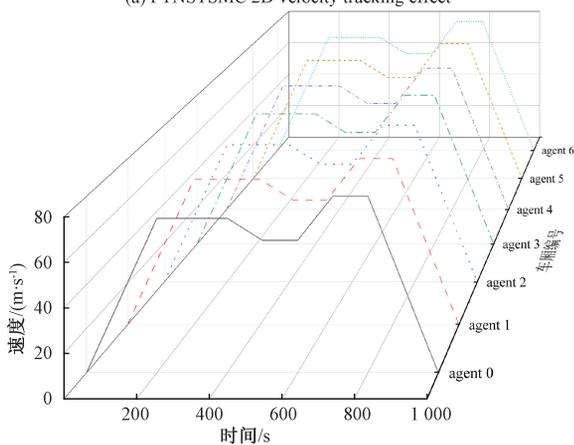
号、正弦信号、高频信号这 6 种信号分别作用在每节车厢上,来模拟高速列车运行过程中受到的未知复合扰动。设计的 FTNSTSMC 参数分别为  $\alpha_1 = 3, \beta_1 = 5, k_1 = 5/3, \rho = 1/3, D_1 = 0.5, \varepsilon = 2$ 。

图 8 为 FTNSTSMC 各跟随者车厢速度效果,其中图 8(b) 为跟随者车厢速度曲线三维图,领航者车厢与 1~6 节跟随者车厢的速度分别用实线、划线、点线、点划线、短点划线、短划线、短点线表示。由图 8(a) 可得,高速列车运行期间中各车厢速度保持平稳,波动幅度极小,且由其局部放大图中可知,速度跟踪效果好,各跟随者与领航者速度误差不超过  $0.0001 \text{ m/s}$ ,曲线有较好地跟踪效果。

图 9 为 FTNSTSMC 各跟随者车厢位移效果,图 9(b) 为跟随者车厢位移曲线三维图,领航者车厢与 1~6 节跟随者车厢的位移分别用实线、划线、点线、点划线、短点划



(a) FTNSTSMC 二维速度跟踪效果  
 (a) FTNSTSMC 2D velocity tracking effect

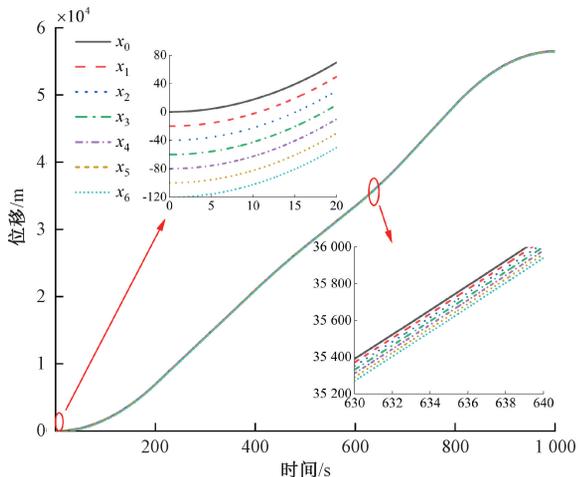


(b) FTNSTSMC 三维速度跟踪效果  
 (b) FTNSTSMC 3D velocity tracking effect

图 8 FTNSTSMC 速度跟踪效果

Fig. 8 FTNSTSMC speed tracking effect

线、短划线、短点线表示。由图 9(a) 可得,高速列车运行中各车厢位移间距保持稳定,且由局部放大图可知,各节车厢运行等间距为  $20 \text{ m}$ 。



(a) FTNSTSMC 二维速度跟踪效果  
 (a) FTNSTSMC 2D velocity tracking effect

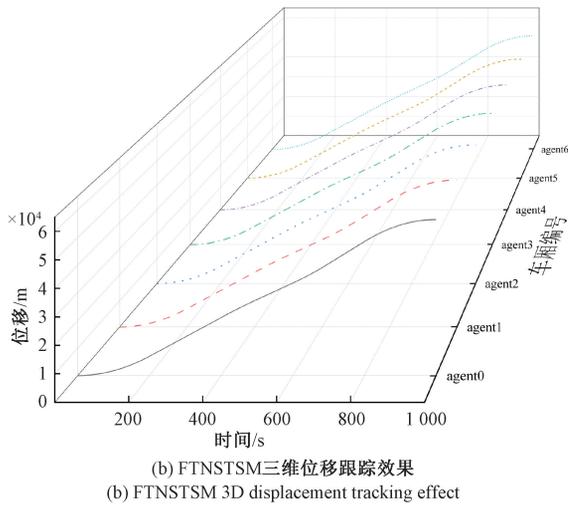


图9 FTNSTSMC 位移跟踪效果

Fig.9 FTNSTSMC displacement tracking effect

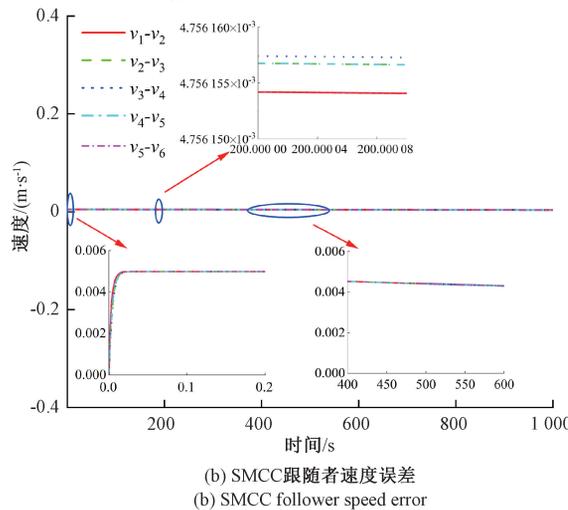
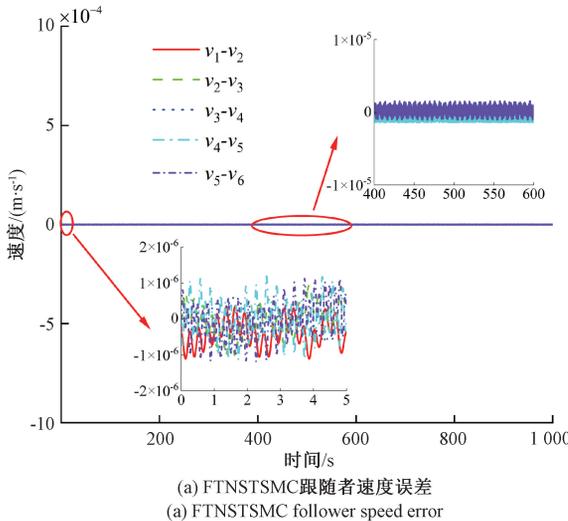


图10 FTNSTSMC 和 SMCC 速度误差对比

Fig.10 Comparison of FTNSTSMC and SMCC velocity errors

图10所示分别为FTNSTSMC与SMCC的高速列车速度误差图,1~6节跟随者车厢两两之间的速度误差分别用实线、划线、点线、点划线、短点划线表示。可以看出SMCC误差抖振较大,而FTNSTSMC抖振较小。由图10(b)可得,列车刚启动时,SMCC相邻车厢最大速度误差为0.005 m/s,列车运行过程中各车厢之间的速度误差稳定在0.004~0.005 m/s之间,由图10(a)可知,FTNSTSMC相邻车厢速度误差快速收敛,相邻车厢速度误差变化范围为 $-2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$  m/s,满足高速列车实际运行的要求,相比于SMCC速度误差更小。综上,FTNSTSMC速度误差更小,抗干扰能力更强,具有更好的鲁棒性。

### 6 结论

针对高速列车运行中易受外界扰动导致速度跟踪效果变差的问题,根据固定时间稳定性理论,提出一种基于FTDSO的高速列车FTNSTSMC策略,以替代跟随者车厢的传统一致性滑模控制算法。领航者车厢利用FTTSMC算法替代传统PID算法后,其速度曲线会快速收敛且在固定时间0.5 s跟踪目标速度曲线,从而使跟随者车厢能在更短时间内跟踪目标速度曲线。设计跟随者车厢FTDSO对领航者车厢的状态信息进行估计,确保跟随者车厢与领航者车厢之间的通信交流;同时设计跟随者车厢FTNSTSMC算法使列车在受到复合未知扰动时,跟随者车厢仍能准确追踪领航者车厢速度,相邻车厢间的速度误差在 $-2 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$  m/s,相邻车厢间距稳定维持在20 m。通过仿真对比分析,证明了基于FTDSO的FTNSTSMC算法在面对复合未知扰动时,抑制扰动方面表现更加优异,提高了列车运行的稳定性。以后可以改进观测器,对未知复合扰动进行观测并反馈补偿,进一步降低外界扰动对列车稳定运行的影响,提高列车运行的鲁棒性。

### 参考文献

[ 1 ] LIU Y H, FAN K G, OU Y Q H. Intelligent traction control method based on model predictive fuzzy PID control and online optimization for permanent magnetic maglev trains[J]. IEEE Access, 2021, 9: 29032-29046.  
 [ 2 ] ZHANG R, PENG J, CHEN B, et al. Prescribed performance active braking control with reference adaptation for high-speed trains [J]. Actuators, 2021, 10(12): 313.  
 [ 3 ] 曹学谦, 葛琼璇, 朱进权, 等. 基于积分滑模的高速磁悬浮列车谐波电流抑制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22):5817-5825.

- CAO X Q, GE Q X, ZHU J Q, et al. Harmonic current suppression strategy for high-speed maglev train based on integral sliding mode [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5817-5825.
- [4] 高俊, 张河山, 彭志远, 等. 基于状态转移约束的永磁同步电机模型预测控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 86-92.
- GAO J, ZHANG H SH, PENG ZH Y. Model predictive control method of permanent magnet synchronous motor based on state transition constraint [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 86-92.
- [5] 刘洋, 行鸿彦, 侯天浩. 四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 46-52.
- LIU Y, XING H Y, HOU T H. Research on attitude control of cascade variable universe fuzzy PID for quadrotor UAV [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 46-52.
- [6] ZHONG W F, LI S K, XU H Z, et al. On-line train speed profile generation of high-speed railway with energy-saving: A model predictive control method [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(5): 4063-4074.
- [7] 徐传芳. 高速列车的有限时间容错跟踪控制[J]. 铁道学报, 2021, 43(11): 69-77.
- XU CH F. Finite-time fault-tolerant tracking control for high-speed trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(11): 69-77.
- [8] 连文博, 刘伯鸿, 李婉婉, 等. 基于自抗扰控制的高速列车自动驾驶速度控制[J]. 铁道学报, 2020, 42(1): 76-81.
- LIAN W B, LIU B H, LI W W, et al. Automatic operation speed control of high-speed train based on ADRC [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(1): 76-81.
- [9] 侯涛, 魏建鹏, 牛宏侠. 基于预设非奇异终端滑模控制的高速列车速度控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1): 38-50.
- HOU T, WEI J P, NIU H X. Research on speed control of high-speed train based on preset nonsingular terminal sliding mode control [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(1): 38-50.
- [10] GUO Y X, WANG Q Y, SUN P F, et al. Distributed adaptive fault-tolerant control for high-speed trains using multi-agent system model [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 73(3): 3277-3286.
- [11] 何晖, 代萌, 陶维杰, 等. 基于多智能体的重载列车虚拟编组协同巡航控制[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(6): 196-205.
- HE H, DAI M, TAO W J, et al. Cooperative cruise control of heavy haul train under VCTF based on multi agent [J]. China Railway Science, 2023, 44(6): 196-205.
- [12] WANG W P, LE J W, WANG Z, et al. Event-triggered consensus control for high-speed train with time-varying actuator fault [J]. IEEE Access, 2020, 8: 50553-50564.
- [13] 魏文军, 葛俊德, 武晓春. 有限时间内的动车组群分布式协同巡航多智能体控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(5): 915-922.
- WEI W J, GE J D, WU X CH. Distributed cooperative cruise multi-agent control of electric multiple units group in finite time [J]. Control Theory and Applications, 2022, 39(5): 915-922.
- [14] 赵凯辉, 邱鹏旗, 张昌凡, 等. 高速列车分布式速度协同跟踪控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 12-20.
- ZHAO K H, QIU P Q, ZHANG CH F, et al. Research on distributed speed coordinated tracking control for high-speed train [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 12-20.
- [15] 李中奇, 王睿. 重载列车多智能体模型的鲁棒一致性控制方法 [J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1448-1456.
- LI ZH Q, WANG R. Robust consistency control method for multi-agent model of heavy haul train [J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1448-1456.
- [16] 张友鹏, 金煜翔, 杨军霞, 等. 高速列车分布式 super-twisting 滑模控制研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 187-196.
- ZHANG Y P, JIN Y X, YANG J X, et al. Research on distributed super-twisting sliding mode control of high-speed train [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 187-196.
- [17] WANG B, YANG J, JIAO H N, et al. Design of auto disturbance rejection controller for train traction control system based on artificial bee colony algorithm [J]. Measurement, 2020(160): 107812.
- [18] ZHANG Z X, SONG H F, WANG H W, et al. Cooperative multi-scenario departure control for virtual coupling trains: A fixed-time approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 8545-8555.
- [19] 刘洋, 井元伟, 刘晓平, 等. 非线性系统有限时间控

制研究综述[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 1-12.

LIU Y, JING Y W, LIU X P, et al. Survey on finite-time control for nonlinear systems [J]. Control Theory and Applications, 2020, 37(1): 1-12.

[20] 孟云斐, 王保防, 蔡明洁. 多机械系统的固定时间一致性设计[J]. 控制工程, 2024, 31(1): 61-69.

MENG Y F, WANG B F, CAI M J. Fixed-time consensus design for multi-mechanical system [J]. Control Engineering of China, 2024, 31(1): 61-69.

[21] 朱伟, 周双. 基于终端滑模控制的多智能体系统有限时间跟踪控制[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023, 35(4): 696-705.

ZHU W, ZHOU SH. Finite-time tracking control of multi-agent systems via terminal sliding mode control[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2023, 35(4): 696-705.

[22] 李天龙, 柏建军. 基于双幂次滑模的多机器人编队控制[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2021, 13(1): 111-115.

LI T L, B J J. Formation control of the multi-robot system based on dual power sliding mode[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 13(1): 111-115.

[23] WANG C, LIU C L, LIU F. Fixed-time consensus tracking of heterogeneous multi-agent systems[C]. 2019 Chinese Automation Congress (CAC), 2019: 984-989.

## 作者简介



**赵凯辉**, 1997年于中南大学获得学士学位, 2005年于东南大学获得硕士学位, 2015年于中南大学获得博士学位, 现为湖南工业大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为永磁同步电机智能控制及故障诊断。

E-mail: zhaokaihui@hut.edu.cn

**Zhao Kaihui** received B. Sc. degree from Central South University in 1997, M. Sc. degree from Southeast University in 2005, and Ph. D. from Central South University in 2015, respectively. Now he is a professor, master supervisor in Hunan University of Technology. His main research interest includes intelligent control and fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor.



**罗美芸**, 2023年于湘南学院获得学士学位, 现为湖南工业大学研究生, 主要研究方向为高速列车速度一致性协同容错控制。  
E-mail: m23085800060@stu.hut.edu.cn

**Luo Meiyun** received his B. Sc. from Xiangnan University in 2023. He is now a M. Sc. candidate in Hunan University of Technology. His main research interests include collaborative fault-tolerant control for high-speed trains.



**黄宜山**, 2008年于曲阜师范大学获得学士学位, 2011年于湖南工业大学获得硕士学位, 现为中车时代电动汽车股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为整车、电驱动系统、动力电池等产品检测及试验技术等。

E-mail: huangyishan.cy@crrecg.com

**Huang Yishan** received his B. Sc. degree from Qufu Normal University in 2008 and received his M. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2011. He is now a senior engineer in CRRC Electric Vehicle Co., Ltd.. His main research interests include vehicle, electric drive system, power battery and other products detection and test technology.



**张昌凡**, 1989年于西南交通大学获得博士学位, 2001年于湖南大学获得博士学位, 现为湖南工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性控制及应用等。

E-mail: zhangchangfan@263.net

**Zhang Changfan** received his M. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 1989, and Ph. D. degree from Hunan University in 2001, respectively. Now he is a professor in Hunan University of Technology. His main research interest includes nonlinear control and applications.



**黄浪尘** (通信作者), 1992年于重庆大学获得学士学位, 2012年于中南大学获得硕士学位, 现为湖南工业大学讲师, 主要研究方向为控制理论与控制工程。

E-mail: 1721847840@qq.com

**Huang Langchen** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 1992 and M. Sc. degree from Central South University in 2012. He is now a lecturer in at Hunan University of Technology. His main research interest includes control theory and control engineering.