

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306774

高速列车分布式 super-twisting 滑模控制研究*

张友鹏 金煜翔 杨军霞 王 东

(兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070)

摘 要:针对不确定因素及外界干扰下高速列车分布式协同控制问题,提出基于 super-twisting 滑模一致性算法的高速列车速度跟踪控制策略。首先,考虑列车受到的外部干扰、基本阻力及车厢间耦合作用力,构建高速列车多智能体模型;其次,利用相邻车厢的位移和速度信息设计一致性滑模函数,引入 super-twisting 算法削弱控制输入抖振;最后,设计分布式二阶滑模控制律,并采用 Lyapunov 理论验证算法稳定性。以高速列车实际参数进行仿真研究,并加入外界干扰,利用本文方法、普通一致性、PID 一致性及滑模一致性方法进行仿真。结果表明,相较于其他 3 种方法,所提算法能使车厢单元快速、精准跟踪目标速度曲线,速度误差在 $(-0.8 \sim 1.1) \times 10^{-3}$ m/s 内,同时使相邻车厢距离保持在安全范围内,且控制输入较平滑,对外部干扰有较好的鲁棒性。

关键词: 高速列车;多智能体;分布式控制;super-twisting 滑模控制;速度跟踪

中图分类号: U284.48 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on distributed super-twisting sliding mode control of high-speed train

Zhang Youpeng Jin Yuxiang Yang Junxia Wang Dong

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In response to the problem of distributed cooperative control of high-speed trains under uncertain factors and external interference, a high-speed train speed tracking control strategy based on the super-twisting sliding mode consensus algorithm is proposed. Firstly, considering the external interference, basic resistance, and coupling forces between carriages that the train is subjected to, a multi-agent model for high-speed train is established. Secondly, the consistent sliding mode function is designed according to the displacement and speed information of adjacent carriages, and the super-twisting algorithm is introduced to reduce control input chattering. Finally, design a distributed second-order sliding mode control law and use Lyapunov theory to verify the stability of the algorithm. Conduct a simulation study using the actual parameters of a high-speed train and adding external interference, simulation is carried out with the method proposed in this paper, as well as the ordinary consensus, PID consensus, and sliding mode consensus methods. The results show that compared with the other three algorithms, the proposed algorithm can enable the train unit to quickly and accurately track the target speed curve, with a speed error within $(-0.8 \sim 1.1) \times 10^{-3}$ m/s, while keeping the distance between adjacent train cars within a safe range. Moreover, the control input is relatively smooth, and the algorithm has good robustness against external disturbances.

Keywords: high-speed train; multi-agent; distributed control; super-twisting sliding model control; speed tracking

0 引 言

高速列车因其速度快、安全舒适、准点可靠、生态友好等优点得到广泛应用^[1-2]。列车自动控制 (automatic

train control, ATC) 系统用于保证高速列车安全可靠运行,主要包括列车自动防护系统 (automatic train protection, ATP)、列车自动监控系统 (automatic train supervision, ATS)、列车自动驾驶系统 (automatic train operation, ATO) 3 个子系统,其中,ATO 系统控制列车追

踪期望的速度-位移曲线^[3-4]。高速列车运行环境复杂,线路条件、车钩阻尼作用或其他因素会对列车运行产生干扰,使列车不能精确追踪目标速度-位移曲线,从而降低列车运行效率。为此,需要研究具有抗干扰性的列车自动驾驶控制算法,以保证高速列车运行的安全性与高效性。本文基于高速列车多智能体模型,利用 super-twisting 滑模一致性算法 (super-twisting sliding model consensus algorithm, STSMCA) 来研究高速列车速度追踪运行问题。

高速列车的控制策略已经得到了广泛的研究,并取得了丰硕的成果。文献[5]基于数据驱动建立高速列车线性模型,利用扩张状态观测器补偿外部扰动,并结合模型预测控制设计复合控制器,控制高速列车高精度追踪期望曲线。文献[6]考虑高速列车运行时存在未知参数及外部干扰问题,提出鲁棒自适应控制方法,研究了高速列车的鲁棒自适应巡航控制,实现列车速度的渐进追踪和外部干扰抑制。文献[7]针对列车建模误差及未知干扰所导致的追踪精度低的问题,将未知状态作为扩张状态设计自抗扰速度控制器,实现外部环境干扰下列车准确追踪期望速度的目标。文献[8]针对单列车自动驾驶及多车协同控制问题,提出鲁棒自适应控制方法及基于列车线性加权协同控制模型的分布式控制算法,实时调整列车相对位置及速度,保证列车高效安全运行。但以上研究均基于单质点高速列车模型,忽略了车厢间的相互作用力。相较于单质点模型,多质点模型更能准确反映列车运行过程中每节车厢的受力情况,更符合列车实际运行环境。

基于高速列车多质点模型,学者考虑到高速列车动力分散,与多智能体一致性理论结合研究高速列车分布式控制^[9-11],高速列车的每节车厢可视为一个智能体,构建高速列车多智能体模型。文献[9]将列车整体视为一个智能体,建立多车多智能体模型,利用势函数和 LaSalle 不变集原理设计了基于相邻列车信息的协同巡航控制策略,保证了列车之间运行距离在安全范围。文献[10]考虑车厢间相互作用力及列车之间的耦合关系,基于多智能体一致性及集群一致性技术,并利用该技术设计了分布式控制律,分别研究了单列车及多列车的分布式巡航控制。文献[11]研究了移动闭塞下的动车组群系统的协同巡航运行问题,设计了有限时间分布式协同控制律,实现了动车组群等间距协同运行,避免了动车组群发生碰撞。以上研究未考虑存在外界干扰时高速列车能否准确跟踪速度-位移曲线的问题。

滑模控制 (sliding model control, SMC) 作为一种经典的控制策略,能够解决系统不确定性因素和外部干扰对行车的影响,文献[12]考虑了外界未知干扰,提出

了可以增强系统鲁棒性的组合趋近律准滑模控制方法,实现了列车准确停车。文献[13]基于列车动力学模型,通过模糊切换控制补偿列车运行过程中的阻力和干扰,并与滑模控制结合,实现了对参考轨迹的精确跟踪。文献[14]分析了高速动车组车钩缓冲装置对相邻车厢的作用力,建立列车强耦合模型,利用神经网络逼近未知阻力,并使用历史运行数据补偿控制输出,设计神经网络滑模控制方法,以提高动车组速度跟踪精度。但是传统滑模控制在滑模面附近会发生抖动,会影响系统控制性能,super-twisting 二阶滑模控制^[15]将不连续项置于积分运算中,设计连续的控制律,可以有效地抑制抖动。

基于以上讨论,本文以具有分布式动力的单列高速列车为研究对象,考虑相邻车厢之间的耦合作用及外部干扰,研究高速列车分布式控制问题。基于多智能体理论,依据牛顿力学原理,构建高速列车动态多智能体模型;设计具有抗干扰性的 super-twisting 分布式滑模控制律;利用列车实际参数仿真验证本文所提控制策略的鲁棒性与有效性。

1 预备知识

为便于 super-twisting 分布式滑模控制律的设计,将每个车厢视为一个智能体,通过代数图论描述相邻智能体之间的通信拓扑。设通信拓扑由 n 阶加权无向图 $G = \{V, \varepsilon, A\}$ 描述^[16],其中集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 中的每个节点表示高速列车的每一节车厢。 $\varepsilon \subseteq V \times V$ 是图边的集合,边 ε 表示相邻的节点之间可以进行信息交换。 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 表示元素 a_{ij} 非负的加权邻接矩阵,其中, a_{ij} 表示节点 i 与 j 之间的连接权重。如果节点 i 与 j 之间存在边 $(v_i, v_j) \in \varepsilon$, 则 $a_{ij} > 0$, 否则, $a_{ij} = 0$, 同时不考虑自环情况, 则 $a_{ii} = 0$ 。节点 i 的邻居节点表示为 $N_i = \{j \in V \mid (v_j, v_i) \in \varepsilon\}$ 。由于图 G 是加权无向图, 对于任意节点 $i, j \in V$, 存在 $a_{ij} = a_{ji}$ 。图 G 的拉普拉斯矩阵定义为 $L = [l_{ij}]_{n \times n}$, 其中, 当 $i \neq j$ 时, $l_{ij} = -a_{ij}$, 反之, $l_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 。

引理 1^[15] 假设存在一个连续可微的正定函数 $V(x)$, 对于任意的正实数 $\beta > 0$, $\eta \in (0, 1)$, 满足:

- 1) $V(x) > 0 (x \neq 0)$;
- 2) $\dot{V}(x) + \beta V^\eta(x) \leq 0$ 。

则该系统状态 x 在有限时间内达到稳定, 给出收敛时间的估计值为:

$$T(x_0) \leq \frac{V(x_0)^{1-\eta}}{\beta(1-\eta)} \quad (1)$$

2 高速列车多智能体建模

2.1 多质点动力学模型

高速列车由多节动车与拖车组成,各节车厢之间通过车钩连接在一起,需要对每节车厢进行受力分析,建立

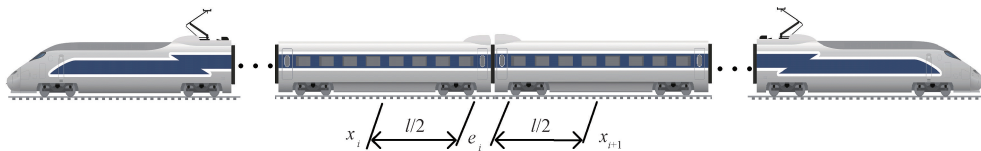


图 1 高速列车结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-speed train structure

列车相邻车厢之间通过车钩缓冲装置连接,车钩安装在车厢之间连接处的地板下方,如图 2 所示。在列车运行过程中,通过车钩传递列车纵向力,起到减小冲击力、避免碰撞的作用。为了便于研究,利用弹簧模型描述车钩耦合器的状态变化^[11],由车钩产生的列车内部车钩力是车厢相对位移和相对速度的线性函数,如式(2)所示:

$$f(e_i(t)) = k_i e_i(t) + \lambda_i \dot{e}_i(t) \quad (2)$$

式中: k_i 和 λ_i 是耦合器的刚度系数和阻尼常数, $e_i(t)$ 表示相邻车厢间的车钩形变量,如式(3)所示:

$$e_i(t) = x_i - x_{i+1} - l \quad (3)$$

式中: x_i 与 x_{i+1} 分别表示相邻的前一节车厢与后一节车厢的位置, $e_i(t) > 0$ 时,耦合器处于拉伸状态,作用力表现为引力,使相邻车厢靠拢防止损坏耦合器; $e_i(t) < 0$ 时,耦合器处于压缩状态,作用力表现为斥力,使相邻车厢分离防止碰撞; $e_i(t) = 0$ 时,耦合器不拉伸也不压缩,高速列车处于平稳运行状态。

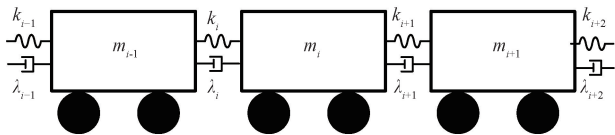


图 2 高速列车各节车厢连接示意图

Fig. 2 High-speed train carriage connection diagram

线路上运行的高速列车会受到基本阻力、附加阻力和其他外部干扰(强风、雨、雪等因素)影响,会出现车厢间速度不相同的现象,导致列车纵向冲动等问题^[17]。本文将高速列车受到的坡道、隧道、曲线附加阻力视为外部干扰,基本阻力由机械阻力和空气阻力组成,如式(4)所示:

$$w_i = c_0 + c_1 v + c_2 v^2 \quad (4)$$

其动力学模型,才能进一步设计合理、稳定、有效的控制策略,从而保证高速列车的安全正常运行。高速列车结构示意图如图 1 所示,图中 e_i 表示第 i 节车厢与第 $i+1$ 节车厢之间车钩的形变量, x_i 表示第 i 节车厢的位置, x_{i+1} 表示第 $i+1$ 节车厢的位置, l 表示车厢长度。

式中: v 是列车速度, c_0, c_1, c_2 的值由风洞试验得出, $c_0 + c_1 v$ 为机械阻力, $c_2 v^2$ 为空气阻力,随着列车速度的增加,空气阻力的影响增大。

高速列车实际运行环境及线路情况复杂,描述其动态运行环境,并对高速列车每节车厢进行受力分析,建立多质点动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, i = 1, 2, \dots, n, \\ m_1 \dot{v}_1 = u_1 - f(e_1) - w_1 - d_1 \\ m_i \dot{v}_i = u_i + f(e_{i-1}) - f(e_i) - w_i - d_i \\ i = 2, 3, \dots, n-1, \\ m_n \dot{v}_n = u_n + f(e_{n-1}) - w_n - d_n \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_i 为第 i 节车厢质量, x_i 为第 i 节车厢位置, v_i 为第 i 节车厢速度, u_i 为第 i 节车厢控制输入力, w_i 为第 i 节车厢基本阻力, d_i 为第 i 节车厢附加阻力和外界干扰。

2.2 高速列车多智能体模型

建立高速列车动力学模型时,将每节车厢视为一个智能体,车厢之间的物理耦合连接和状态信息传输模式可利用代数图论描述。高速列车运行时,假设相邻车厢之间可以进行局部通信,相互传递速度、位移等状态信息。根据式(5),描述相邻车厢的通信关系,建立单列高速列车多智能体模型如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = \hat{u}_i + \hat{k}_i \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} [(x_i - x_j) + l(j-i)] + \\ \hat{\lambda}_i \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} (v_i - v_j) - \hat{\omega}_i - \hat{d}_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{u}_i = \frac{u_i}{m_i}$, $\hat{k}_i = \frac{k_i}{m_i}$, $\hat{\lambda}_i = \frac{\lambda_i}{m_i}$, $\hat{\omega}_i = \frac{\omega_i}{m_i}$, $\hat{d}_i = \frac{d_i}{m_i}$, x_j 和 v_j 分别为相邻车厢的位置和速度。

3 控制器设计及稳定性证明

3.1 控制目标

高速列车运行时,首节车厢车载设备通过无线通信技术与地面列控中心通信以获取行车授权命令,根据线路条件及行车授权命令计算生成参考的行车速度-位移曲线,并将获得的曲线作为虚拟领导者的输入,虚拟领导车厢的动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = v_0 \\ \dot{v}_0 = u_0 \end{cases} \quad (7)$$

当车厢追踪期望速度时,为每节跟随者车厢设计分布式控制律 $\hat{u}_i$ 使其跟踪前一节车厢速度和位移,从而达到如下跟踪效果^[18]:

- 1) 高速列车每节车厢的速度趋于相同, $\lim_{t \rightarrow T} |v_i(t) - v_j(t)| = 0$;
- 2) 高速列车相邻车厢之间距离在安全范围 (h_1, h_2) 之内,即 $\lim_{t \rightarrow T} |x_i - x_j| = h_{ij}$, $h_{ij} \in (h_1, h_2)$, 其中 h_1 为相邻车厢之间的最小安全间距, h_2 为相邻车厢之间的最大安全间距。

3.2 控制器设计

针对高速列车运行过程中受到的外界干扰和不确定性因素,设计具有抗干扰性的 super-twisting 滑模分布式控制律,该算法能够保证高速列车各节车厢速度在有限时间内达到一致性并能削弱控制器抖振现象,高速列车分布式速度控制器框图如图 3 所示。

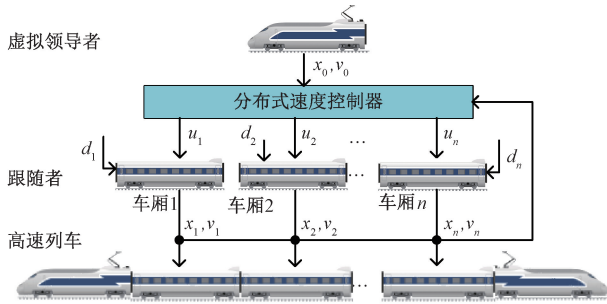


图 3 高速列车分布式速度控制器框图

Fig. 3 Block diagram of distributed speed controller for high-speed train

定义高速列车运行过程中车厢位移和速度跟踪一致性误差:

$$\begin{cases} e_{xi} = \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j - l(j-i)) + b_i(x_i - x_0) \\ e_{vi} = \sum_{j=1}^n a_{ij}(v_i - v_j) + b_i(v_i - v_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中: b_i 是第 i 个车厢和领导者之间的通信权重。

针对式(6),根据相邻车厢之间的位置和速度误差所设计的滑模函数:

$$s_i(t) = c_i e_{xi} + e_{vi} \quad (9)$$

式中: $c > 0$ 为滑模面参数,满足 Hurwitz 条件。

对式(9)求导可得:

$$\dot{s}_i = c\dot{e}_{xi} + \dot{e}_{vi} = c_i \dot{e}_{xi} + \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}(\dot{v}_i - \dot{v}_j) + b_i(\dot{v}_i - \dot{v}_0) \right) \quad (10)$$

为了消除外部干扰和不确定因素对行车的影响,同时抑制抖振现象^[19-20],结合式(6)、(7)、(10),设计基于 super-twisting 算法的分布式滑模控制律来向列车输出牵引或制动命令,从而完成对列车速度的合理控制,如式(11)所示:

$$\begin{aligned} \hat{u}_i = & - \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} + b_i \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(v_i - v_j) + \right. \\ & b_i(v_i - v_0) + \left. \left(\sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} + b_i \right) (f_i - \hat{\omega}_i - \hat{d}_i) - \right. \\ & \left. u_{li} - \sum_{j=1}^n a_{ij}(\dot{v}_j) - b_i u_0 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $f_i = \hat{k}_i \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}[(x_i - x_j) + l(j-i)] + \hat{\lambda}_i \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}(v_i - v_j)$ 为车钩耦合作用力。

$$\begin{cases} u_{li} = -k_{li} \sqrt{|s_i|} \operatorname{sgn}(s_i) + w \\ \dot{w} = -k_{2i} \operatorname{sgn}(s_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中:切换增益 $k_{li} > 0, k_{2i} > 0$ 。

3.3 稳定性证明

证明系统的稳定性^[21]:

联立式(8)和(10),并将式(11)代入其中可得:

$$\begin{cases} \dot{s}_i = -k_{li} \sqrt{|s_i|} \operatorname{sgn}(s_i) + w \\ \dot{w} = -k_{2i} \operatorname{sgn}(s_i) \end{cases} \quad (13)$$

为证明系统的稳定性,构造 Lyapunov 函数:

$$V_i = \zeta_i^T P_i \zeta_i \quad (14)$$

式中: $P_i \in R^{2 \times 2}$ 是正定对称矩阵,取 $\zeta_i = [|s_i|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(s_i), w]^T$ 。

对 ζ_i 求微分得:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_i = & \begin{bmatrix} \frac{\dot{s}_i}{2\sqrt{|s_i|}} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{|s_i|}} \begin{bmatrix} -k_{li} \sqrt{|s_i|} \operatorname{sgn}(s_i) + w \\ -k_{2i} \operatorname{sgn}(s_i) \end{bmatrix} = \\ & \frac{1}{2\sqrt{|s_i|}} \begin{bmatrix} -k_{li} & 1 \\ -2k_{2i} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{|s_i|} \operatorname{sgn}(s_i) \\ w \end{bmatrix} = |\zeta_i|^{-1} A_i \zeta_i \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $|\zeta_i|^{-1} = |s_i|^{-\frac{1}{2}}, A_i = \frac{1}{2|\zeta_i|} \begin{bmatrix} -k_{li} & 1 \\ -2k_{2i} & 0 \end{bmatrix}$ 。

求解 V_i , 代入式(15)得:

$$\dot{V}_i = \dot{\zeta}_i^T P_i \zeta_i + \zeta_i^T P_i \dot{\zeta}_i = |\zeta_i|^{-1} \zeta_i^T (A_i^T P_i + P_i A_i) \zeta_i \tag{16}$$

对于任意给定的对称正定矩阵 $Q_i = Q_i^T$, 都一定存在一个对称正定矩阵 $P_i = P_i^T$, 使得:

$$A_i^T P_i + P_i A_i = -Q_i \tag{17}$$

则式(16)为:

$$\dot{V}_i = -|\zeta_i|^{-1} \zeta_i^T Q_i \zeta_i < 0 \tag{18}$$

通过应用如下不等式:

$$\lambda_{\min}(P_i) \|\zeta_i\|_2^2 \leq \zeta_i^T P_i \zeta_i \leq \lambda_{\max}(P_i) \|\zeta_i\|_2^2 \tag{19}$$

式中: $\lambda_{\min}(P_i)$ 和 $\lambda_{\max}(P_i)$ 分别是对称正定矩阵 $P_i = P_i^T$ 的最小特征值和最大特征值。

可以得出:

$$\|\zeta_i\| = |s_i|^{\frac{1}{2}} \leq \|\zeta_i\|_2 \leq \sqrt{\frac{\zeta_i^T P_i \zeta_i}{\lambda_{\min}(P_i)}} \tag{20}$$

联立式(18)和不等式(20), 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -\frac{1}{|s_i|^{\frac{1}{2}}} \zeta_i^T Q_i \zeta_i \leq -\frac{\lambda_{\min}(Q_i)}{|s_i|} \|\zeta_i\|_2^2 = \\ &= -\frac{\|\zeta_i\|_2 \lambda_{\min}(Q_i)}{|s_i|} \|\zeta_i\|_2 \leq -\lambda_{\min}(Q_i) \|\zeta_i\|_2 \leq \\ &= -\frac{\lambda_{\min}(Q_i)}{\lambda_{\min}(P_i)} V_i^{\frac{1}{2}} = -\delta V_i^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{21}$$

根据引理 1 和以上推导得知, 本文所设计的 super-twisting 分布式滑模控制律是渐进稳定的, 且系统状态在有限时间内收敛。

证明滑模函数的稳定性, 当 $s = 0$ 时, 式(9)所设计的滑模函数为:

$$\dot{e}_{xi} = e_{vi} = -c_i e_{xi} \tag{22}$$

设计 Lyapunov 函数如下:

$$V = \frac{1}{2} e_{xi}^T e_{xi} \tag{23}$$

则:

$$\dot{V} = -c_i e_{xi}^T e_{xi} = -2c_i V \leq 0 \tag{24}$$

$t \rightarrow \infty$ 时, $e_{xi} \rightarrow 0$, 同时 $e_{vi} \rightarrow 0$, 得到一致性跟踪误差式(8)是渐进稳定的, 即各节车厢速度与目标速度误差接近于 0。

4 仿真与分析

为验证所提算法的有效性, 假设铁路线路上运行的一列高速列车有 6 节动力车厢, 每个动力车厢为一个智能体单元, 将整列车视为 6 个智能体单元在 MATLAB 2018b 软件上进行仿真分析。第 1 节车厢通过无线通信得到目标速度, 其余车厢通过速度传感器相互交换状态

信息, 通信拓扑如图 4 所示。

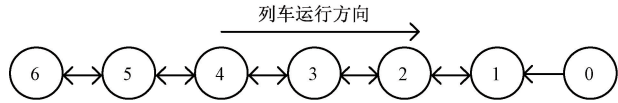


图 4 高速列车通信拓扑

Fig. 4 Communication topology of high-speed train

高速列车车厢通信拓扑邻接矩阵 A 为:

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

考虑高速列车实际运行环境, 设计包含加速、巡航、制动工况的速度-位移曲线如图 5 所示。假设 6 个智能体单元参数相同, 如表 1 所示, 等效弹簧原长 $h = 1$ m, 车厢长度 $l = 81$ m, 弹簧形变量范围设置为 $[-0.5, 0.5]$ m, 相邻智能体单元之间的安全距离为 $[80.5, 81.5]$ m; 假定每个智能体单元的初始位置和初始速度如表 2 所示。

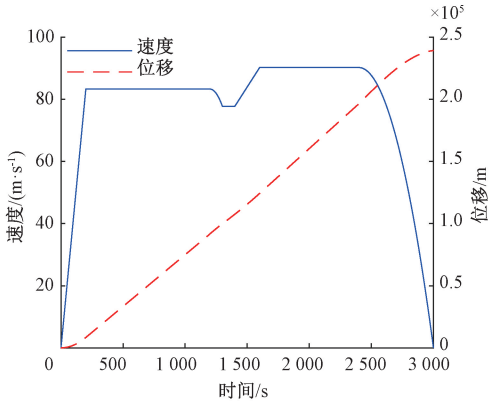


图 5 目标速度-距离曲线

Fig. 5 Target speed-distance curve

表 1 高速列车参数^[22]

Table 1 High speed train parameters

参数	参数值	单位
$m_i, i = 1, 2, \dots, 6$	8×10^4	kg
c_{0i}	0.011 76	N/kg
c_{1i}	0.000 776 16	N s/m kg
c_{2i}	1.6×10^{-5}	N s ² /m ² kg
k	1.6×10^5	N/m
λ	600	Ns/m

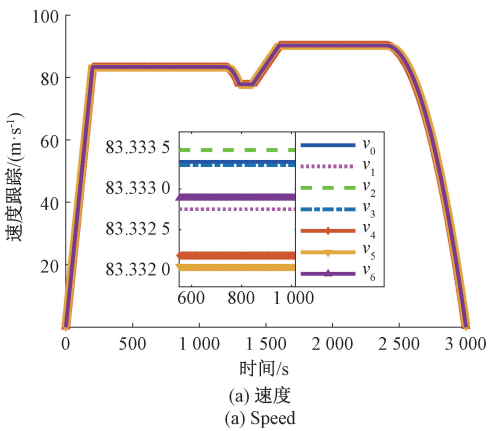
根据式(6)和表 1 高速列车参数, 可以得到高速列车状态空间方程为:

表 2 各节车厢的初始位置和速度

Table 2 Initial positions and speeds of train cars						
i	1	2	3	4	5	6
$x_i(t_0)/\text{m}$	486.6	405.1	324.1	243.2	162	81
$v_i(t_0)/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0	0	0	0	0	0

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = \hat{u}_i + 2 \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} [(x_i - x_j) + 21(j - i)] + \\ 7.5 \times 10^{-3} \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} (v_i - v_j) - 0.011\,76 - \\ 7.761\,6 \times 10^{-4} v_i - 1.6 \times 10^{-5} v_i^2 - \hat{d}_i \end{cases} \quad (25)$$

将式(25)列车动力学模型输入 MATLAB 仿真,并将本文所提算法分别与文献[22]所设计普通一致性算法(common consensus algorithm, CCA)、由式(11)推导得出的滑模一致性算法(sliding mode consensus algorithm, SMCA)、文献[23]所设计的 PID 一致性算法(proportional-integral-derivative consensus algorithm, PIDCA)进行速度、位移跟踪和抗干扰性对比。本文利用阶跃信号、脉冲信号、正弦信号模拟高速列车运行过程中受到的外部干扰、不确定性因素及附加阻力,在不同的时间段给不同的车厢单元加上干扰:



在 $t \in [100, 130]\text{s}$ 时,给第 1 节车厢单元附加脉冲干扰, $t \in [660, 1\,000]\text{s}$ 时,给第 5 节车厢单元附加正弦干扰,在 $t \in [1\,350, 1\,370]\text{s}$ 、 $t \in [1\,450, 1\,460]\text{s}$ 、 $t \in [2\,620, 2\,680]\text{s}$ 时,分别给第 3 节车厢单元、第 2 节车厢单元和第 6 节车厢单元加上阶跃干扰,并假设第 4 节车厢单元未受到干扰。

将文献[23]PID 一致性算法与本文式(8)一致性误差结合,设计位置、速度总误差式(26)并代入文献[23]所提算法中,其中, k_{p_i} 、 k_{i_i} 、 k_{d_i} 分别表示控制器的比例、积分、微分系数。

$$e_i = e_{si} + e_{vi} \quad (26)$$

4 种高速列车分布式控制算法参数设置:CCA 参数与文献[22]相同;SMCA 控制参数 $c = \text{diag}\{1, 1, 1, 1, 1, 1\}$, $b = \text{diag}\{1, 0, 0, 0, 0, 0\}$;PIDCA 参数 $k_{p_i} = 10$, $k_{i_i} = 15$, $k_{d_i} = 0.1$;STSMCA 参数 $c = \text{diag}\{3, 1.5, 2, 3, 1, 1.5\}$, $b = \text{diag}\{1, 0, 0, 0, 0, 0\}$, $k_1 = \text{diag}\{2, 2, 2, 2, 2, 2\}$, $k_2 = \text{diag}\{0.8, 0.91, 0.9, 0.9, 0.88, 0.91\}$ 。

图 6 为 STSMCA 控制下各车厢单元追踪速度-位移曲线效果图,从图 6(a)和(b)中能够明显看到,高速列车运行过程中车厢单元速度和位移无明显波动,从局部放大图中可以看到,速度追踪曲线与目标曲线重合,各节车厢单元等间隔运行。

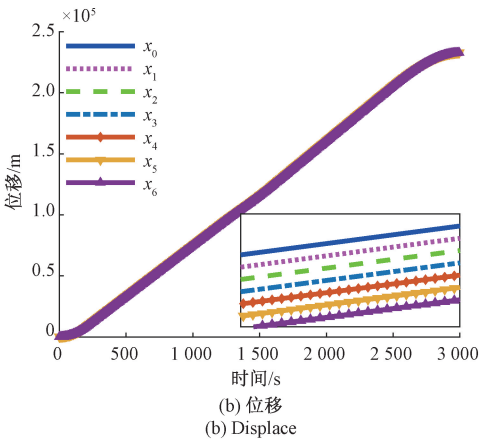


图 6 STSMCA 速度、位移跟踪效果

Fig. 6 Speed and displacement tracking effect of STSMCA

从图 7 中可以看出,未受到干扰时 4 种控制方法都能够保证相邻车厢单元间距在安全距离 $[80.5, 81.5]\text{m}$ 内,车钩等效弹簧形变量也在安全范围。图 7(a)中可以看出列车加速和减速阶段间距波动较大,第 1 个车厢单元与第 2 个车厢单元间距最大达到 81.56m ,巡航工况时稳定在 81m ,当受到干扰时弹簧会被压缩和拉伸,间距会减小或增大;图 7(b)中可以看出,车厢单元间距和初始间距基本相同,受到干扰时间距会发生波动,间距稳定在

安全范围之内,相较于 CCA 控制方法抗干扰性增加,但是弹簧未达到稳定状态且伴随有抖振发生;图 7(c)中可以看出,列车运行一段时间后车厢单元间距会稳定在 81m ,当受到外部干扰时,相邻车厢间距会发生波动,但间距仍然稳定在安全范围之内。相较于 CCA 和 SMCA 控制方法,PIDCA 在列车运行过程中车厢间距较为稳定,但是当面对一定的外部干扰时,相邻车厢间距误差增大,控制精度降低;从图 7(d)中能够明显看出,STSMCA 控

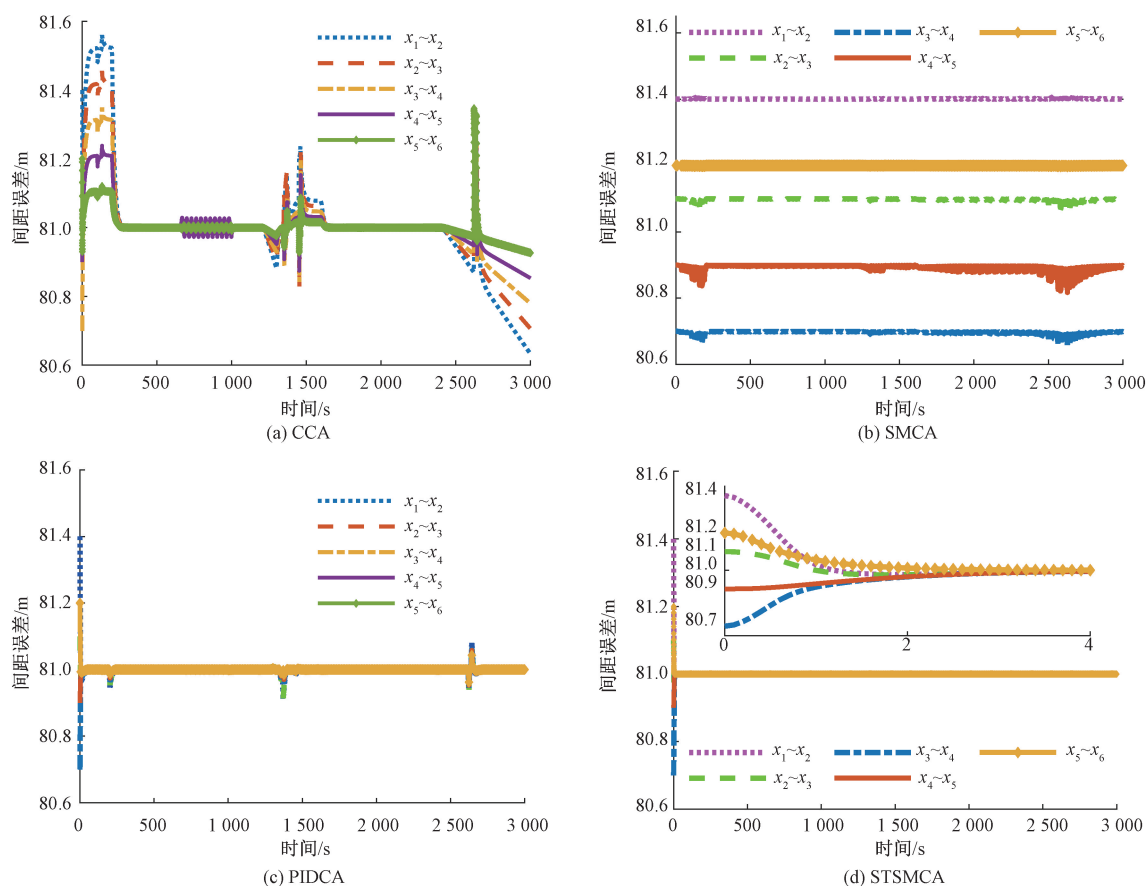


图 7 4 种方法相邻车厢间距对比

Fig. 7 Comparison of spacing between adjacent train cars using four methods

制使各车厢单元间距在 4 s 内达到 81 m, 弹簧处于稳定状态, 且受到外界干扰时, 间距未发生变化, 相比于前 3 种方法控制精度更高。

从图 8(a) 中可以看出, 在受到外部干扰或列车运行工况转换时速度追踪误差相比巡航工况运行明显增大, 从局部放大图中得, 列车刚启动时 CCA 控制方法速度误差最大达到 0.534 m/s, 各车厢单元速度在 6 s 内达到一致。图 8(b) SMCA 控制方法最大速度误差为 0.083 m/s, 列车运行过程中速度追踪误差小, 在受到外部干扰时仍能准确追踪运行, 但速度误差抖振明显, 说明高速列车行驶时速度一直在小范围波动, 控制器切换频繁, 会使控制器劳损, 需要对其进行改善。图 8(c) PIDCA 控制方法最大速度误差在 2 620 s 遭受阶跃干扰时, 为 0.232 6 m/s, 未受到干扰和在 [625, 1 040] s 受到正弦干扰时列车运行过程中各节车厢速度基本保持一致; 遭受阶跃干扰和脉冲干扰时, 速度明显发生波动, 但是较 CCA 算法速度波动小, 又比 SMCA 算法速度波动大。综合考虑前 3 种算法优劣性, 从图 8(d) STSMCA 算法仿真图中得出, 速度误差在 4 s 内收敛, 所有车厢单元快速跟踪到目标速度, 运行过程中误差基本为 0, 从局部

放大图中可以看到, 在 [625, 1 040] s 受到正弦干扰和其他外部干扰时速度未发生波动, 且很好的抑制了 SMCA 控制产生的抖振现象, 体现出 STSMCA 控制方法在外界干扰的环境下仍能准确追踪目标曲线的优越性。

结合式(6)模型方程和式(11)的控制输入计算得到各节车厢控制力如图 9 示, 从图中可以看出, 4 种控制方法的控制力都能满足列车受到干扰时、速度变化时安全自动行驶的要求, STSMCA 控制方法相比于其他 3 种方法, 在加速或减速状态转换到匀速行驶和面对外部干扰时, 控制输出更加平滑, 并且有效抑制了抖振现象。综合分析, 在外部干扰影响下, STSMCA 控制方法能够使车厢单元高精度跟踪目标速度-位移曲线, 误差明显低于其他 3 种控制方法, 且对外部干扰具有强鲁棒性。

5 结 论

本文建立高速列车多智能体模型, 考虑列车运行过程中会遭受外部干扰影响, 基于 super-twisting 滑模算法设计分布式控制律, 得到如下结论:

1) 高速列车相邻车厢间距在 4 s 内达到 81 m 并稳定

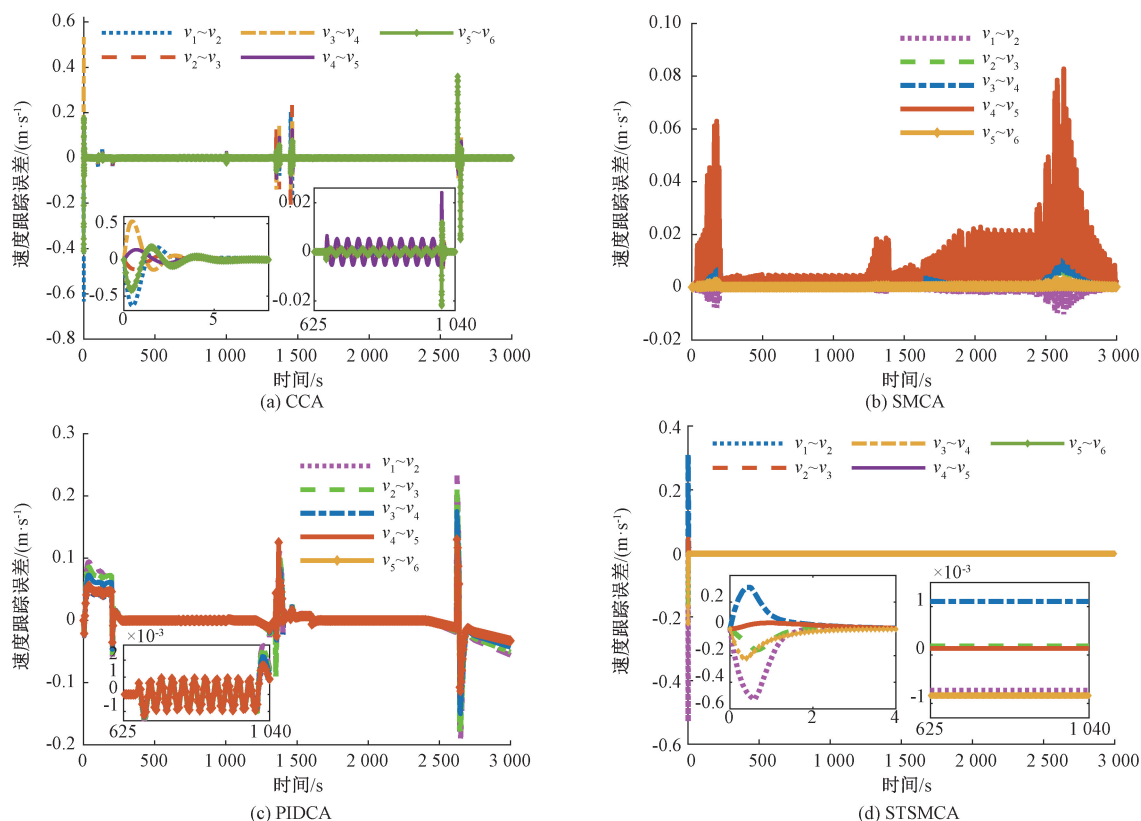


图8 4种方法相邻车厢速度追踪误差对比

Fig. 8 Comparison of tracking errors of adjacent train cars speed between the four methods

在此距离,且受到干扰时列车间距仍能稳定在81 m;

2) 高速列车车厢能够在4 s内精确追踪到目标速度,车厢在受到外部干扰时仍能准确追踪前行车厢速度,其中,第4节车厢追踪第3节车厢速度误差最大,为 1.1×10^{-3} m/s;

3) 各车厢控制力符合列车行驶速度对牵引力的要求,且在受到干扰时控制器能快速增大牵引力以克服阻力对行车的影响,保证列车运行安全。

STSMCA 控制方法在干扰存在或不存在的时候,都能在有限时间内使高速列车各车厢高精度跟踪速度曲线,同时使车钩耦合器保持在稳定状态。与CCA、SMCA、PIDCA 算法控制效果比较,STSMCA 控制方法的跟踪精度更高,并对抖振有较好的抑制性能,为高速列车分布式控制抗干扰研究提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] 熊嘉阳, 沈志云. 中国高速铁路的崛起和今后的发展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 6-29.
- XIONG J Y, SHEN ZH Y. Rise and future development of Chinese high-speed railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 6-29.
- [2] 缪炳荣, 张卫华, 池茂儒, 等. 下一代高速列车关键

技术特征分析及展望[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 58-70.

MIAO B R, ZHANG W H, CHI M R, et al. Analysis and prospects of key technical features of next generation high speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 58-70.

- [3] 董昱, 魏万鹏. 基于RBF神经网络PID控制的列车ATO系统优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 103-109.

DONG Y, WEI W P. Optimization of train ATO system based on RBF neural network PID control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(1): 103-109.

- [4] GAO S, WEI J, SONG H, et al. Fuzzy adaptive automatic train operation control with protection constraints: A residual nonlinearity approximation-based approach[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 96: 103986.

- [5] 侯涛, 唐丽, 牛宏侠. 基于数据驱动的高速列车速度复合控制研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(3): 145-152.

HOU T, TANG L, NIU H X. Research on speed

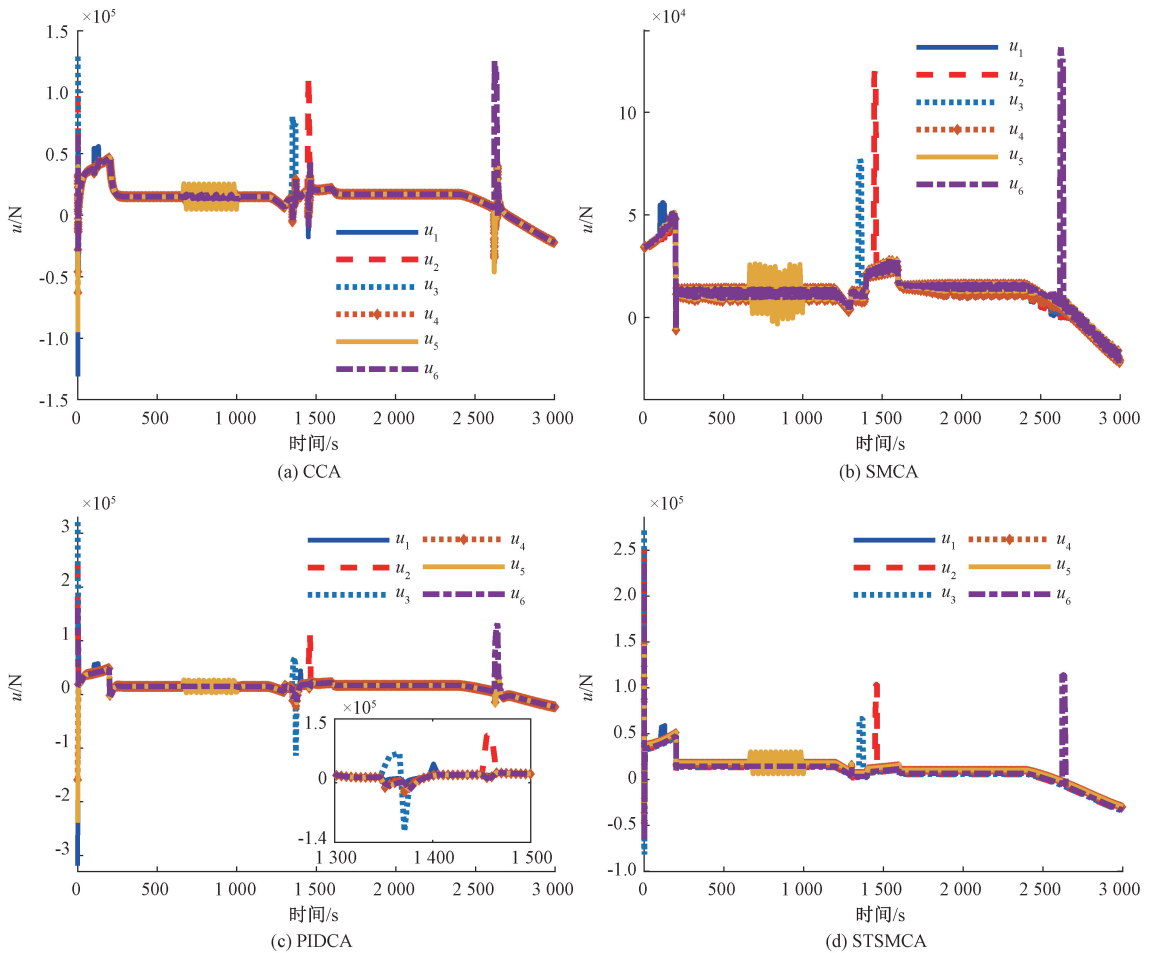


图 9 4 种方法车厢控制力对比

Fig.9 Comparison of train cars control force between the four methods

compound control of high-speed train based on data-driven[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 145-152.

[6] FAIEGHI M, JALALI A. Robust adaptive cruise control of high speed trains [J]. ISA Transactions, 2014, 53(2): 533-541.

[7] 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.

[8] 高士根. 多列车协同运行的若干控制问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

GAO SH G. On several control problems of multi-train cooperation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[9] LI S, YANG L, GAO Z. Coordinated cruise control for high-

speed train movements based on a multi-agent model [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 56: 281-292.

[10] ZHAO Y, WANG T, KARIMI H R. Distributed cruise control of high-speed trains[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(14): 6044-6061.

[11] 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 EMU group in finite time[J]. Control Theory and Applications, 2022, 39(5): 915-922.

[12] 陈东, 牛宏侠, 王刚, 等. 一种组合趋近律准滑模控制的列车停车算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 489-496.

CHEN D, NIU H X, WANG G, et al. A train stopping algorithm based on quasi-sliding mode control of combination research law[J]. Journal of Railway Science

- and Engineering, 2018, 15(2): 489-496.
- [13] 何之煜, 杨志杰, 吕旌阳. 基于自适应模糊滑模的列车精确停车制动控制算法[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(2): 122-129.
HE ZH Y, YANG ZH J, LYU J Y. Braking control algorithm for accurate train stopping based on adaptive fuzzy sliding mode[J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 122-129.
- [14] 李中奇, 金柏, 杨辉, 等. 高速动车组强耦合模型的分布式滑模控制策略[J]. 自动化学报, 2020, 46(3): 495-508.
LI ZH Q, JIN B, YANG H, et al. Distributed sliding mode control strategy for high-speed EMU strong coupling model[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(3): 495-508.
- [15] 许淼, 方一鸣, 李建雄, 等. 基于 super-twisting 算法的多航天器姿态有限时间分布式协同控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 924-932.
XU M, FANG Y M, LI J X, et al. Finite time distributed coordinated control for attitude of multi-spacecraft based on super-twisting algorithm[J]. Control Theory and Applications, 2021, 38(7): 924-932.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] HU X, YANG P, MA B, et al. Consensus sliding-mode fault-tolerant control for second-order multi-agent systems[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2021, 25(6): 974-981.
- [19] 滕青芳, 佐俊, 潘浩, 等. 基于时变增益扩张状态观测器的逆变器系统自适应 super-twisting 电压鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(9): 1880-1894.
TENG Q F, ZUO J, PAN H, et al. Robust voltage control for inverter system using time-varying gain extended state observer-based adaptive super-twisting algorithm[J]. Control Theory and Applications, 2020, 37(9): 1880-1894.
- [20] KELKOUL B, BOUMEDIENE A. Stability analysis and study between classical sliding mode control (SMC) and super twisting algorithm (STA) for doubly fed induction generator (DFIG) under wind turbine[J]. Energy, 2021, 214: 118871.
- [21] MORENO J A, OSORIO M. Strict Lyapunov functions for the super-twisting algorithm[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(4): 1035-1040.
- [22] BAI W, LIN Z, DONG H, et al. Distributed cooperative control of a high-speed train[C]. 2019 American Control Conference (ACC). IEEE, 2019: 2716-2721.
- [23] 梁新荣, 肖龙, 王雪奇, 等. 高速列车速度跟踪神经网络 PID 控制器的设计[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(10): 252-258.
LIANG X R, XIAO L, WANG X Q, et al. Design of neural network PID controller for speed tracking of high-speed train [J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(10): 252-258.

作者简介



张友鹏 (通信作者), 现为兰州交通大学教授, 主要研究方向为交通信息及控制系统理论与技术应用、轨道交通智能理论及应用技术。

E-mail: zhangyoupengypz@126.com

Zhang Youpeng (Corresponding author)

is a professor at Lanzhou Jiaotong University. His main research interests include traffic information and control system theory and technology application, rail transit intelligent theory and application technology.



金煜翔, 现为兰州交通大学硕士研究生, 主要研究方向为高速列车分布式控制。

E-mail: 2356988315@qq.com

Jin Yuxiang is a M. Sc. candidate at

Lanzhou Jiaotong University. His main research interest includes distributed control of high-speed trains.