

# 基于多智能体系统的动车组有限时间预设性能鲁棒一致性控制

陶克武<sup>1,2</sup>, 王小敏<sup>1,2†</sup>, 邓红元<sup>1,3</sup>, 陈勇<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 611756; 2. 四川省列车运行控制技术工程研究中心, 成都 611756; 3. 通号城市轨道交通技术有限公司, 北京 100010)

**摘要:** 针对动车组运行过程中存在的集总扰动 (未知时变扰动、附加阻力、单元间耦合力和基本阻力)、输入饱和及有限缓冲器行程等多重约束问题, 联合人工势函数提出一种基于多智能体理论的分布式有限时间预设性能鲁棒一致性控制器. 首先, 根据缓冲器行程的不同区间, 提出一种新的势场力作用判断机制, 并构建基于相对速度和距离的自适应斥力势函数和引力势函数; 其次, 结合余弦函数和指数函数, 提出一种新型的有限时间预设性能函数, 有效约束各动力单元跟踪误差的收敛边界与稳定时间; 此外, 引入扰动观测器和基于滤波补偿方法来处理集总扰动和输入饱和的影响. 相较于现有方案, 研究主要优势在于动车组系统的控制性能可预先得到保障, 还能兼顾实际有限时间稳定性、串稳定性与动力单元安全间距保持, 并具备更强的鲁棒性; 最后, 以 CRH380A 型高速动车组为研究对象, 从理论分析和数值仿真两个层面验证了所提出控制器的有效性与可行性.

**关键词:** 动车组系统; 有限时间预设性能函数; 人工势函数; 一致性控制; 扰动观测器; 多智能体系统

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1002

引用格式: 陶克武, 王小敏, 邓红元, 等. 基于多智能体系统的动车组有限时间预设性能鲁棒一致性控制 [J].

## Finite-time prescribed performance robust consensus control of EMU based on multi-agent system

Tao Ke-wu<sup>1,2</sup>, Wang Xiao-min<sup>1,2†</sup>, Deng Hong-yuan<sup>1,3</sup>, Chen Yong<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. Sichuan Provincial Engineering Research Center for Train Operation Control Technology, Chengdu 611756, China; 3. CRSC Urban Rail Transit Technology Co., Ltd, Beijing 100010, China)

**Abstract:** To address the multiple constraints faced during the operation of EMU, including aggregated disturbances (unknown time-varying disturbances, additional resistance, inter-unit coupling forces, and basic resistance), input saturation, and limited buffer stroke, a distributed finite-time prescribed performance robust consensus controller based on multi-agent theory is proposed in combination with artificial potential function. First, according to the different working ranges of the buffer stroke, a new judging mechanism of potential force is proposed, and an adaptive repulsive and attractive potential functions are constructed using the logarithmic function. Second, combining cosine function and exponential function, a novel finite-time prescribed performance function is designed, which effectively constrains the convergence boundary and settling time of the tracking errors of each power unit, thus achieving predefined dynamic performance. In addition, a fixed-time disturbance observer and a filter-based compensation approach are introduced to handle the effects of aggregated disturbances and input saturation. Compared with existing methods, the main advantage of this paper is that the control performance of the EMU system can be guaranteed in advance, while simultaneously ensuring practical finite-time stability, string stability and safe inter-unit spacing, and providing stronger robustness. Finally, with the CRH380A high-speed EMU as the research object, both theoretical analysis and numerical simulations

收稿日期: 2025-09-22; 录用日期: 2026-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62303383); 四川省科技计划项目 (2024ZHCG0001, 2025YFHZ0161, 2024NSFSC1493); 上海轨道交通无人驾驶列控系统工程技术研究中心课题 (SUTC-2024KT-02).

责任编辑: 贾英民.

†通信作者. E-mail: xmwang@swjtu.edu.cn.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

are conducted to verify the effectiveness and feasibility of the proposed control method.

**Keywords:** EMU; Finite-time prescribed performance function; artificial potential function; disturbance observer; consensus control; multi-agent system

## 0 引言

在实际运行过程中, 动车组常处于复杂线路环境之中, 线路坡度、曲线、隧道及外部扰动等因素均可能导致动力单元间速度不同步, 从而引发纵向冲击等不利现象<sup>[1]</sup>. 此外, 若动力单元间距过小或过大, 不仅会降低运行平稳性, 还可能造成耦合器损伤甚至断裂, 存在安全隐患<sup>[2]</sup>. 因此, 复杂线路条件下的动车组控制器设计对保障运行安全与稳定性具有重要意义.

诸多学者针对动车组速度追踪控制展开研究, 并取得了一系列研究成果<sup>[3-5]</sup>. 然而, 这些工作均忽略了内部耦合力. 为更真实反映车辆动力学特性, 多质点模型被广泛采用, 主要集中在逐车辆建模<sup>[6-8]</sup>与划分动力单元建模<sup>[9-11]</sup>两类方法. 前者虽能细致描述车辆动力学行为, 但在长编组列车中具有参数多和计算复杂等缺点, 因此在工程应用中受限. 相反, 后者可以减少控制器的尺寸, 使系统小于常规大小仍具有相同的控制效果, 更适用于工程实践. 基于此, 本文采用划分动力单元的方法构建系统模型, 但如何在此模型基础上实现多单元的状态一致性控制成为关键.

近年来, 多智能体系统一致性理论的成熟为动车组运行控制提供了新的思路. Huang等<sup>[12]</sup>基于多智能体框架提出自适应迭代学习控制, 有效提高了速度的跟踪精度. Guo等<sup>[13]</sup>为了实现高速列车的跟踪控制, 提出一种基于多智能体模型的分布式自适应终端滑模控制方法. Yang等<sup>[14]</sup>则针对非线性模型和未知车辆间耦合力, 设计了鲁棒自适应控制器. 然而, 上述研究均未考虑动车组运行过程中子系统间距的约束问题. 安全运行是首要任务, 而耦合器装置内部有限的缓冲器行程对此提出了更为严格的要求. 人工势函数因其结构简洁、易于实现而受到关注. Chen等<sup>[15]</sup>基于对称有界势函数设计了分布式一致性控制算法, 使车辆间距稳定于安全范围内. 类似人工势函数在文献[2,16]中也有提及. 然而, 这类仅依赖距离信息的势函数在动态运行中表现保守, 难以准确判断缓冲器行程变化趋势.

上述方法虽在速度跟踪或间距保持上各有侧重, 但均难以对系统瞬态与稳态性能进行预先设定, 控制性能高度依赖参数整定. 预设性能控制方法为解决上述问题提供了切实可行的方案. 侯涛等<sup>[17]</sup>采用

扩张状态观测器与预设性能非奇异终端滑模控制实现速度跟踪. Zhang等<sup>[18]</sup>等将预设性能函数整合到控制器中, 严格保证了高速动车组制动系统的瞬态和稳态控制性能. Gao等<sup>[19]</sup>提出一种增强型预设性能控制框架, 能将动车组位置与速度误差的收敛过程显式约束在预定义范围内. 然而, 这些文献中所采用的性能函数主要侧重于约束边界的设定, 其不足之处在于跟踪误差通常只能渐近收敛至残差集, 缺乏对收敛时间的严格约束, 难以满足对运行时间有硬性限制的动车组系统.

尽管现有高速动车组的控制器设计精巧且直观, 但大多建立在理想化的运行假设之上, 即执行器能够无限制地提供所需控制输入, 且外部未知扰动被忽略<sup>[20-21]</sup>. 然而, 在实际运行中, 执行器受物理条件限制, 其可用牵引/制动力幅值存在明显约束, 这可能导致指令输入与实际控制力之间产生较大偏差, 从而引发控制系统的不稳定. 同时, 未知时变扰动亦可能导致单元间速度不同步, 进而产生纵向冲击等安全隐患. 因此, 在动车组控制器设计过程中, 必须充分考虑输入饱和及未知时变扰动等实际约束条件.

与现有研究相比, 本文的主要贡献如下:

1. 不同于文献[2,15,16]仅基于间距的传统人工势函数, 本文构建了一种基于间距和相对速度的自适应人工势函数, 并引入新的势场力作用判断机制. 该机制能够准确识别耦合器潜在的过度拉伸或压缩趋势, 进而动态调节势场力大小, 确保相邻单元间距始终维持在预设的安全范围内.

2. 与文献[17-19]中只能实现渐近收敛的性能函数不同, 本文为动车组系统构建了一种有限时间预设性能函数, 这种设计可使各单元的跟踪误差在设定的时间内收敛至有界邻域.

3. 本文为多动力单元构成的动车组系统设计了一种新型控制方案. 该方案去除了文献[20-21]中的理想化假设, 能够在同时存在干扰和输入饱和约束下使所有单元在有限时间内追踪到期望速度, 并使单元间距保持在平衡状态. 仿真结果验证了其有效性.

## 1 系统建模

### 1.1 耦合力

动车组通常由多个动力单元构成, 相邻单元通过柔性耦合器连接以传递纵向牵引力与制动力. 在

纵向动力学建模中,耦合器通常等效为弹簧-阻尼元件,其耦合力与相邻单元间的相对位移和相对速度呈线性关系.依据经典的弹簧-阻尼模型,耦合力 $f(e_i(t))$ 可表示为 $e_i(t)$ 与 $\dot{e}_i(t)$ 的线性函数,即<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} f(e_i(t)) &= k e_i(t) + p \dot{e}_i(t), \\ e_i(t) &= x_i(t) - x_{i+1}(t) - (\chi l + r), \\ \dot{e}_i(t) &= v_i(t) - v_{i+1}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $k > 0$ ,  $p > 0$ 分别为弹簧系数和阻尼系数; $l$ 为车长; $r$ 为耦合器的原长; $x_i(t)$ ,  $v_i(t)$ 和 $x_{i+1}(t)$ ,  $v_{i+1}(t)$ 分别为第 $i$ 个单元和第 $i+1$ 个单元在 $t$ 时刻的位置和速度; $\chi$ 表示由相邻单元各自取一半车辆组成的车辆总数.

## 1.2 运行阻力

基本阻力 $f_{bi}(t)$ 用戴维斯方程描述如下<sup>[22]</sup>:

$$f_{bi}(t) = m_i(c_{i0} + c_{i1}v_i(t) + c_{i2}v_i^2(t)), \quad (2)$$

式中: $m_i$ 为每个单元的质量; $v_i(t)$ 为每个单元的速度; $c_{i0}$ 、 $c_{i1}$ 和 $c_{i2}$ 是正阻力系数; $c_{i0} + c_{i1}v_i(t)$ 为单位质量机械阻力; $c_{i2}v_i^2(t)$ 为单位质量空气阻力.

动车组运行在线路的不同区段会受到由坡道、弯道以及隧道产生的附加阻力 $f_{ai}(t)$ <sup>[22]</sup>,可描述为:

$$f_{ai}(t) = m_i g \theta + 2m_i g / R + 1.3 \times 10^{-7} m_i g L_s, \quad (3)$$

式中: $\theta$ 为道路坡度千分数, $g$ 为重力加速度; $R$ 为线路曲线半径; $L_s$ 为隧道长度.

## 1.3 多质点纵向动力学模型

为简化符号,下文将省略 $(t)$ ,除非在推导过程中需要明确指出,否则这一省略不会引起歧义.

如图1所示,对动车组运行过程进行动力学分析,根据式(1)至式(3),并利用牛顿第二定律得到动车组动力单元数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, & i = 1, 2, \dots, n \\ m_1 \dot{v}_1 = u_1 - f(e_1) - f_{b1} - f_{a1} + \omega_1, \\ m_i \dot{v}_i = u_i + f(e_{i-1}) - f(e_i) - f_{bi} - f_{ai} + \omega_i, \\ m_n \dot{v}_n = u_n + f(e_{n-1}) - f_{bn} - f_{an} + \omega_n, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_i$ 和 $v_i$ 分别为第 $i$ 个单元的位置和速度; $u_i$ 为控制力; $\omega_i$ 为外部扰动.

定义 $\hat{u}_i = \frac{1}{m_i} u_i$ ,  $\kappa_i = \frac{k}{m_i}$ 和 $\vartheta_i = \frac{p}{m_i}$ .然后,动力学模型(4)可进一步化简为:

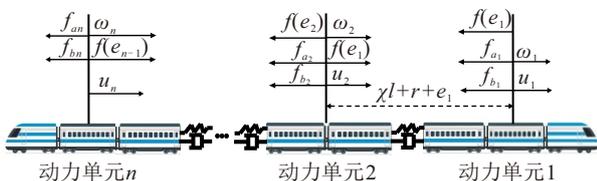


图1 动车组运行过程动力学分析

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, & i = 1, 2, \dots, n \\ \dot{v}_i = \hat{u}_i + w_i, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $w_i = \kappa_i \sum_{j=1, j \neq i}^n \hat{a}_{ij} (x_j - x_i + (j-i)(\chi l + r))$

+  $\vartheta_i \sum_{j=1, j \neq i}^n \hat{a}_{ij} (v_j - v_i) - f_{ai}/m_i - f_{bi}/m_i + \omega_i/m_i$

表示作用到第 $i$ 个单元的单位质量集总扰动,其来源包括耦合力、附加阻力、基本阻力及未知时变扰动, $\hat{a}_{ij}$ 用于判断第 $i$ 个单元和第 $j$ 个单元之间是否存在耦合器,如果存在,则 $\hat{a}_{ij} = 1$ ,否则 $\hat{a}_{ij} = 0$ .

考虑到各动力单元的执行器均受物理极限约束,控制器设计中需引入输入饱和约束,如下所示:

$$\hat{\mu}_i = \min(\max(\hat{u}_i, \hat{u}_{\min}), \hat{u}_{\max}). \quad (6)$$

式中, $\hat{u}_i$ 为待设计的单位质量控制输入; $\hat{\mu}_i$ 表示由执行器最终施加到系统的控制输入; $\hat{u}_{\max}$ 和 $\hat{u}_{\min}$ 分别为控制输入的上界和下界.

为了补偿输入饱和的影响,本文引入一种基于滤波器的著名饱和补偿模块对控制系统进行修正.输入饱和和补偿的辅助变量可设计为<sup>[23]</sup>:

$$\dot{\zeta}_i = -\varsigma_i \zeta_i + \Delta \hat{u}_i, \quad (7)$$

式中: $\varsigma_i > 0$ ;  $\Delta \hat{u}_i = \hat{\mu}_i - \hat{u}_i$ .

**假设1** 单位质量集总扰动 $w_i$ 是有界的,满足 $|w_i| \leq \bar{w}_i$ ,其中 $\bar{w}_i$ 为正常数.

## 2 控制器设计

本文的主要控制目标是融合有限时间预设性能函数、扰动观测器、饱和补偿器和人工势函数,设计一种分布式有限时间预设性能一致性控制器,使动车组系统在存在集总扰动和输入饱和的情况下,能够使编队误差在有限时间内收敛至有界邻域.同时,耦合器中缓冲器行程严格约束在安全范围内.

### 2.1 有限时间预设性能函数设计

为确保动车组系统的瞬态性能和稳态性能均符合预设条件,对每个单元的跟踪误差施加约束,使其始终限制在如下所定义的性能区域内:

$$-\rho_i < z_i < \rho_i, \quad (8)$$

式中: $z_i$ 表示跟踪误差; $\rho_i$ 为待设计的性能函数.

本文在文献[24]的基础上构造了一种有限时间预设性能函数,如式(9)所示:

$$\rho_i = \begin{cases} (\rho_0 - \rho_{t_m}) \cos\left(\frac{\pi t^\ell}{2t_m^\ell}\right) \exp\left(\frac{t^\ell}{t^\ell - t_m^\ell}\right) + \rho_{t_m}, & t \in [0, t_m) \\ \rho_{t_m}, & t \in [t_m, +\infty) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\ell$ 用于调整性能函数的形状; $t_m$ 为收敛时间.

**性质 1** 有限时间预设性能函数 (9) 在  $\rho_0 > \rho_{t_m} > 0, t_m > 0, \ell > 0$  条件下具有以下性质:

- 1) 正定性:  $\rho_i > 0$ ;
- 2) 单调非增性:  $\dot{\rho}_i \leq 0$ ;
- 3) 连续性:  $\lim_{t \rightarrow t_m} \rho_i = \rho_{t_m}$ ;
- 4) 稳态性: 任意  $t > t_m, \rho_i = \rho_{t_m}, \rho_{t_m}$  为正常数.

为便于控制器设计, 本文引入如下标准误差信号将受约束误差转换为无约束变量:

$$\varepsilon_i = z_i / \rho_i, \quad (10)$$

计算  $\varepsilon_i$  的时间导数如下:

$$\dot{\varepsilon}_i = (\dot{z}_i - \dot{\rho}_i z_i / \rho_i) / \rho_i. \quad (11)$$

**注 1** 本文构建的新型有限时间预设性能函数 (9) 克服了文献 [17-19] 中设性能函数只能实现跟踪误差渐近收敛的局限性. 此外, 本文引入了余弦函数, 相较于文献 [24] 中性能函数在  $[0, t_m]$  s 时间段的变化具有更平滑的形状, 有助于改善动车组系统的瞬态性能. 此外, 新的设计无需引入类似文献 [17] 中基于对数函数的误差变换, 从而简化了控制器设计过程.

## 2.2 扰动观测器设计

为使动车组系统 (5) 在单位质量集总扰动影响下实现良好的控制性能, 需将扰动估计值反馈至控制器中进行补偿. 为此, 引入如下固定时间扰动观测器<sup>[26]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\hat{v}}_i = \hat{\mu}_i + \hat{w}_i, \\ \hat{w}_i = \lambda_{i1} \text{sig}(\bar{v}_i)^{\lambda_{i4}} + \lambda_{i2} \text{sig}(\bar{v}_i)^{\lambda_{i5}} + \\ \int_0^t \lambda_{i3} \text{sign}(\bar{v}_i(s)) ds, \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\hat{v}_i$  和  $\hat{w}_i$  分别为  $v_i$  和  $w_i$  的估计值;  $\bar{v}_i = v_i - \hat{v}_i$  是速度估计误差;  $\lambda_{i1} > 0, \lambda_{i2} > 0, \lambda_{i3} > 0, \lambda_{i4} \in (0, 1)$  和  $\lambda_{i5} > 1$  是观测器增益; 此处  $\text{sig}(\bar{v}_i)^{\lambda_{i4}} = \text{sign}(\bar{v}_i) |\bar{v}_i|^{\lambda_{i4}}, \text{sig}(\bar{v}_i)^{\lambda_{i5}} = \text{sign}(\bar{v}_i) |\bar{v}_i|^{\lambda_{i5}}$ .

## 2.3 势函数设计

为了防止缓冲器装置行程触及最小压缩边界, 进而导致耦合器变形或碰撞. 本文设计了一种基于对数函数的势函数对压缩长度施加约束. 需要注意的是, 当动力单元  $i$  在动力单元  $j$  后面, 且  $v_i > v_j$ , 或动力单元  $i$  在动力单元  $j$  前面, 且  $v_i < v_j$  时, 单元间距将趋于缩短, 此时耦合器存在过度压缩的潜在趋势. 因此, 是否应用势场斥力的判断不能仅依靠间距长度, 应由此时的状态变化趋势来决定, 即由相邻单元的相对速度和间距共同决定. 具体为:

$$\begin{cases} \|x_i - x_j\| \in [r_1, r_1 + \delta_1] \\ v_i - v_j < 0, i < j \\ v_i - v_j > 0, i > j \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $r_1$  为最小间距. 因此, 斥力函数设计为:

$$\psi_c(\|x_{ij}\|) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \exp(\|v_{ij}\|) \ln\left(\frac{\|x_{ij}\|^2 - r_1^2 + Q_c}{2r_1\delta_1 + \delta_1^2 + Q_c}\right), \\ \text{满足式 (13)} \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\|x_{ij}\| = \|x_i - x_j\|, \|v_{ij}\| = \|v_i - v_j\|; Q_c > 0$  用于保证函数 (15) 的有界性;  $\delta_1 \in (0, r - r_1]$ .  $\psi_c(\|x_{ij}\|)$  是严格递减的, 当  $\|x_{ij}\| = r_1$  时取得最大值, 而当  $\|x_{ij}\| = r_1 + \delta_1$  时为 0. 因此, 控制子项  $\hat{u}_{ci}$  可构建为:

$$\hat{u}_{ci} = -k_c \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_c(\|x_{ij}\|), \quad (15)$$

式中:  $k_c > 0$  是由设计者选择的控制参数.

同时, 为了确保缓冲器装置行程不超过最大拉伸边界, 避免过度拉伸引起耦合器断裂. 本文设计如下引力势函数, 其设计原理与斥力势函数相反, 具体为:

$$\begin{cases} \|x_i - x_j\| \in [r_2 - \delta_2, r_2] \\ v_i - v_j > 0, i < j \\ v_i - v_j < 0, i > j \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $r_2$  为最大间距. 因此, 引力函数设计为:

$$\psi_s(\|x_{ij}\|) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \exp(\|v_{ij}\|) \ln\left(\frac{r_2^2 - \|x_{ij}\|^2 + Q_s}{2r_2\delta_2 - \delta_2^2 + Q_s}\right), \\ \text{满足式 (16)} \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $Q_s > 0$  用于保证函数 (17) 的有界性;  $\delta_2 \in (0, r_2 - r]$ . 值得注意的是,  $\psi_s(\|x_{ij}\|)$  在区间  $[r_2 - \delta_2, r_2]$  严格递增, 当  $\|x_{ij}\| = r_2$  时取得最大值, 而当  $\|x_{ij}\| = r_2 - \delta_2$  时为 0. 因此, 控制子项  $\hat{u}_{si}$  可构建为:

$$\hat{u}_{si} = -k_s \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_s(\|x_{ij}\|), \quad (18)$$

式中:  $k_s > 0$  是由设计者选择的控制参数.

当相邻单元间距位于区间  $[r_1, r_1 + \delta_1]$ , 且速度关系满足式 (13) 时, 势函数产生排斥力, 使后单元减速、前单元加速, 从而增大间距, 避免缓冲器过度压缩. 当间距位于区间  $[r_2 - \delta_2, r_2]$ , 且速度关系满足式 (16) 时, 势函数产生吸引力, 使后单元加速、前单元减速, 以缩短间距, 避免缓冲器过度拉伸. 上述两

种势场力会驱动缓冲器行程向区间  $[r_1 + \delta_1, r_2 - \delta_2]$  收敛, 直到进入该区间后, 各单元不再受势场力作用。

#### 2.4 分布式有限时间预设性能一致性控制器设计

定义位移误差  $\tilde{x}_i = x_i - x_r + (i-1)(\chi l + r)$  和速度误差  $\tilde{v}_i = v_i - v_r$ ,  $x_r = \int_0^t v_r dt$  为期望位置,  $v_r$  为期望速度. 引入全局跟踪误差  $z_{xi}$  和状态误差面  $z_{vi}$ :

$$z_{xi} = \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_i - x_j + (i-j)(\chi l + r)) + h_i(x_i - x_r + (i-1)(\chi l + r)), \quad (19)$$

$$z_{vi} = v_i - \alpha_i, \quad (20)$$

式中:  $a_{ij} > 0$  表示单元间的位置和速度信息交互;  $h_i > 0$  表示单元是否能接收期望速度;  $\alpha_i$  是后续为第  $i$  个单元设计的虚拟控制器。

基于反步法框架, 控制器设计流程如下。

**Step 1.** 将式 (19) 代入式 (11) 中得到:

$$\dot{\varepsilon}_{xi} = \frac{l_i}{\rho_{xi}}(z_{vi} + \alpha_i - \frac{1}{l_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} v_j - \frac{h_i}{l_i} v_r - \frac{\dot{\rho}_{xi}}{l_i \rho_{xi}} z_{xi}), \quad (21)$$

式中:  $\varepsilon_{xi}$  为  $\rho_{xi}$  的转换误差;  $\rho_{xi}$  的定义与式 (9) 中的  $\rho_i$  保持一致;  $l_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} + h_i$ 。

根据 (21), 第  $i$  个单元的虚拟控制器被设计为:

$$\alpha_i = -k_{xi} \varepsilon_{xi} + \frac{1}{l_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} v_j + \frac{h_i}{l_i} v_r + \frac{\dot{\rho}_{xi}}{l_i \rho_{xi}} z_{xi}, \quad (22)$$

式中:  $k_{xi}$  为待设计的控制参数。

选择如下形式的李雅普诺夫函数:

$$V_{xi} = \frac{1}{2} \varepsilon_{xi}^T \varepsilon_{xi}, \quad (23)$$

接着将式 (22) 代入式 (21), 计算式 (23) 的时间导数:

$$\dot{V}_{xi} = \frac{l_i \varepsilon_{xi}^T}{\rho_{xi}} z_{vi} - \frac{l_i k_{xi}}{\rho_{xi}} \varepsilon_{xi}^T \varepsilon_{xi}. \quad (24)$$

**Step 2.** 将式 (20) 代入式 (11) 中得到:

$$\dot{\varepsilon}_{vi} = \frac{1}{\rho_{vi}}(\hat{u}_i + \Delta \hat{u}_i + \hat{w}_i - \dot{\alpha}_i - \frac{\dot{\rho}_{vi}}{\rho_{vi}} z_{vi}) + \sigma_i, \quad (25)$$

式中:  $\sigma_i = \tilde{w}_i / \rho_{vi}$ ,  $\tilde{w}_i = w_i - \hat{w}_i$  为单位质量集总扰动估计误差. 由于  $\tilde{w}_i$  和  $\rho_{vi}$  是有界的, 因此存在一个正常数  $\bar{\sigma}_i$ , 满足  $\|\sigma_i\| \leq \bar{\sigma}_i$ 。

根据式 (25), 一致性控制项  $\hat{u}_{fi}$  构建如下:

$$\hat{u}_{fi} = -k_{vi} \varepsilon_{vi} - \hat{w}_i + \dot{\alpha}_i + \frac{\dot{\rho}_{vi}}{\rho_{vi}} z_{vi} - \frac{\hat{\sigma}_i \rho_{vi} \varepsilon_{vi}}{\|\varepsilon_{vi}\|} + \zeta_i, \quad (26)$$

式中:  $k_{vi}$  为待设计的控制参数,  $\hat{\sigma}_i$  是  $\bar{\sigma}_i$  的估计值. 为了获得  $\hat{\sigma}_i$ , 设计如下所示自适应律:

$$\dot{\hat{\sigma}}_i = \beta_i (\|\varepsilon_{vi}\| - 2\phi_i \hat{\sigma}_i), \quad (27)$$

式中:  $\beta_i > 0$  和  $\phi_i > 0$ 。

整合式 (15), 式 (18) 和式 (26),  $\hat{u}_i$  的具体形式如下:

$$\hat{u}_i = -k_c \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_c(\|x_{ij}\|) - k_s \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_s(\|x_{ij}\|) - k_{vi} \varepsilon_{vi} - \hat{w}_i + \dot{\alpha}_i + \frac{\dot{\rho}_{vi}}{\rho_{vi}} z_{vi} - \frac{\hat{\sigma}_i \rho_{vi} \varepsilon_{vi}}{\|\varepsilon_{vi}\|} + \zeta_i. \quad (28)$$

定义  $\tilde{\sigma}_i = \bar{\sigma}_i - \hat{\sigma}_i$ , 选择李雅普诺夫函数为:

$$V_{vi} = \frac{1}{2} \varepsilon_{vi}^T \varepsilon_{vi} + \frac{1}{2} \frac{\tilde{\sigma}_i^2}{\beta_i}. \quad (29)$$

根据不等式  $\phi_i \tilde{\sigma}_i \hat{\sigma}_i \leq -\frac{\phi_i(2\sigma_i - 1)}{2\sigma_i} \tilde{\sigma}_i^2 + \frac{\phi_i \sigma_i}{2} \bar{\sigma}_i^2$ , 对式 (29) 求时间导数:

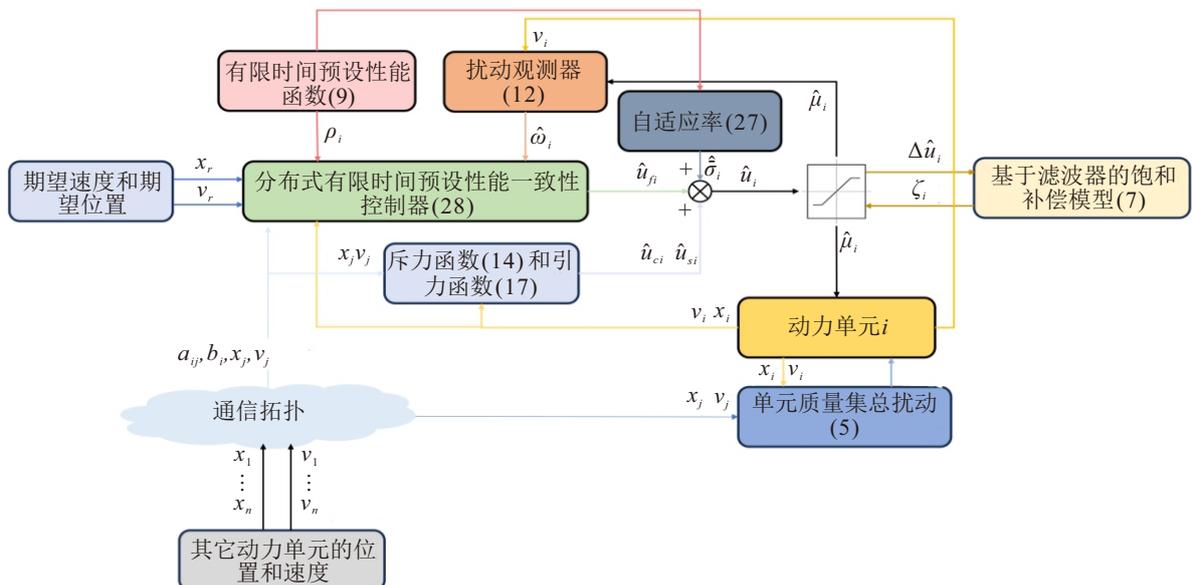


图2 控制器简化流程图

$$\begin{aligned} \dot{V}_{vi} \leq & -\frac{k_{vi}}{\rho_{vi}} \varepsilon_{vi}^T \varepsilon_{vi} + \frac{\varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}} \zeta_i - \\ & \frac{k_c \varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}} \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_c(\|x_{ij}\|) - \\ & \frac{k_s \varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}} \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_s(\|x_{ij}\|) - \frac{\phi_i(2o_i - 1)}{o_i} \tilde{\sigma}_i^2 + \\ & \phi_i o_i \tilde{\sigma}_i^2 + \frac{\varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}} \Delta \hat{u}_i. \end{aligned} \quad (30)$$

式中:  $o_i > 1/2$ .

图2总结了所提方法的整体设计流程.

## 2.5 稳定性分析

**定理 1** 对于配备控制器 (28) 的动车组系统 (5), 若控制参数满足以下条件:  $k_{xi} > 1/2$ ,  $k_{vi} > 1$ ,  $\phi_i > 0$  和  $\varsigma_i > 1/2$ , 则动车组各单元的预设性能标准误差信号保持最终一致稳定, 且追踪误差  $z_{xi}$  和状态误差面  $z_{vi}$  均满足实际有限时间稳定性要求. 此外, 所提出的控制器能确保动车组系统中相邻单元间距处于安全范围内.

**证明** 构造总李雅普诺夫函数如下所示:

$$V_i = V_{xi} + V_{vi} + \frac{\zeta_i^2}{2} + \sum_{j=1}^n (\psi_c(\|x_{ij}\|) + \psi_s(\|x_{ij}\|)). \quad (31)$$

结合式 (7)、式 (24) 和式 (30), 计算  $V_i$  的一阶导, 并根据杨氏不等式得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i \leq & -\frac{l_i}{\rho_{xi}} (k_{xi} - \frac{1}{2}) \varepsilon_{xi}^T \varepsilon_{xi} + \frac{l_i z_{vi}^2}{2\rho_{xi}} - (\varsigma_i - \frac{1}{2}) \zeta_i^2 - \\ & \frac{1}{\rho_{vi}} (k_{vi} - 1) \varepsilon_{vi}^T \varepsilon_{vi} + \frac{1}{2\rho_{vi}} \zeta_i^2 + \phi_i o_i \tilde{\sigma}_i^2 - \\ & \frac{\phi_i(2o_i - 1)}{o_i} \tilde{\sigma}_i^2 + (\frac{1}{2} + \frac{1}{2\rho_{vi}}) \Delta \hat{u}_i^2 + \\ & (v_i - \frac{k_c \varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}}) \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_c(\|x_{ij}\|) + \\ & (v_i - \frac{k_s \varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}}) \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_s(\|x_{ij}\|). \end{aligned} \quad (32)$$

从势函数和预设性能函数的定义可知,  $\psi_c(\|x_{ij}\|)$ ,  $\psi_s(\|x_{ij}\|)$  和  $\rho_{vi}$  是有界的. 此外, 考虑到高速动车组系统 (5) 和输入饱和补偿器 (7) 的连续性,  $v_i$ ,  $\varepsilon_{vi}$  和  $\zeta_i$  在有限时间  $(0, t_m]$  内有界. 因此, 存在一个未知的常数  $M_i$  使得以下不等式成立:

$$\begin{aligned} M_i \geq & \frac{1}{2\rho_{vi}} \zeta_i^2 + (v_i - \frac{k_c \varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}}) \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_c(\|x_{ij}\|) + \\ & (v_i - \frac{k_s \varepsilon_{vi}^T}{\rho_{vi}}) \sum_{j=1}^n \nabla_{x_i} \psi_s(\|x_{ij}\|). \end{aligned} \quad (33)$$

基于式 (33), 式 (32) 可重写为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i \leq & -\frac{l_i}{\rho_{xi}} (k_{xi} - \frac{1}{2}) \varepsilon_{xi}^T \varepsilon_{xi} + \frac{l_i z_{vi}^2}{2\rho_{xi}} - (\varsigma_i - \frac{1}{2}) \zeta_i^2 - \\ & \frac{1}{\rho_{vi}} (k_{vi} - 1) \varepsilon_{vi}^T \varepsilon_{vi} - \frac{\phi_i(2o_i - 1)}{o_i} \tilde{\sigma}_i^2 + \\ & \phi_i o_i \tilde{\sigma}_i^2 + (\frac{1}{2} + \frac{1}{2\rho_{vi}}) \Delta \hat{u}_i^2 + M_i. \end{aligned} \quad (34)$$

考虑到式 (32) 中的交叉项均可通过杨氏不等式分解为可由对应负定二次项吸收的部分, 以及一项可统一归入常数的剩余项, 后者已在式 (33) 的常数  $M_i$  中体现. 此外, 在控制参数满足  $k_{xi} > 1/2$ ,  $k_{vi} > 1$ ,  $\phi_i > 0$  和  $\varsigma_i > 1/2$  的条件下, 负定二次项具有足够主导性, 使得式 (34) 可进一步整理为式 (35) 所示的线性负定形式:

$$\dot{V}_i \leq -\Theta_{i1} V_i + \Theta_{i2}, \quad (35)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Theta_{i1} = \min\{ & 2(k_{xi} - \frac{1}{2}), 2(k_{vi} - 1), \\ & \frac{2\phi_i(2o_i - 1)}{o_i}, 2(\varsigma_i - \frac{1}{2})\}, \end{aligned}$$

$$\Theta_{i2} \geq \frac{l_i z_{vi}^2}{2\rho_{xi}} + \phi_i o_i \tilde{\sigma}_i^2 + (\frac{1}{2} + \frac{1}{2\rho_{vi}}) \Delta \hat{u}_i^2 + M_i.$$

根据文献 [25] 中的定义 1, 可得:

$$V_i(t) \leq (V_i(0) - \frac{\Theta_{i2}}{\Theta_{i1}}) e^{-\Theta_{i1} t} + \frac{\Theta_{i2}}{\Theta_{i1}} \leq E_0, \quad (36)$$

于是可以进一步得出  $\varepsilon_{xi}$ ,  $\varepsilon_{vi}$ ,  $\tilde{\sigma}_i$  和  $\zeta_i$  均保持最终一致有界. 这意味着对于  $\forall t \in [0, t_m]$ ,  $z_{xi}$  和  $z_{vi}$  将始终处于性能函数的约束范围内. 也就是说, 当  $t = t_m$  时,  $\varepsilon_{xi}$  和  $\varepsilon_{vi}$  将收敛至有界邻域, 即

$$V_i(t_m) \leq (V_i(0) - \frac{\Theta_{i2}}{\Theta_{i1}}) e^{-\Theta_{i1} t_m} + \frac{\Theta_{i2}}{\Theta_{i1}}. \quad (37)$$

由式 (37) 可得:  $\|\varepsilon_{xi}(t_m)\| \leq \sqrt{2V_i(t_m)}$  和  $\|\varepsilon_{vi}(t_m)\| \leq \sqrt{2V_i(t_m)}$ . 根据变换关系  $\|z_i(t)\| \leq \|\rho_i(t)\| \times \|\varepsilon_i(t)\|$ , 当  $t \geq t_m$  时,  $z_{xi}$  和  $z_{vi}$  将满足:  $\|z_{xi}(t)\| \leq \rho_{xi, t_m} \|\varepsilon_{xi}(t)\|$  和  $\|z_{vi}(t)\| \leq \rho_{vi, t_m} \|\varepsilon_{vi}(t)\|$ . 由于  $\rho_{xi, t_m}$  和  $\rho_{vi, t_m}$  的值很小, 且  $\|\varepsilon_{xi}(t)\|$  和  $\|\varepsilon_{vi}(t)\|$  收敛至有界邻域, 所以基于控制器 (28) 的动车组系统 (5) 符合文献 [23] 中定义的实际有限时间稳定性.

另外, 根据式 (31)~(37) 得到:

$$\sum_{j=1}^n \psi_c(\|x_{ij}\|) + \sum_{j=1}^n \psi_s(\|x_{ij}\|) \leq E_0. \quad (38)$$

当  $\|x_{ij}\| = r_1$  和  $\|x_{ij}\| = r_2$  时, 有  $\max \varphi_c(\|x_{ij}\|) = -0.5 \exp(\|v_{ij}\|) \ln(Q_c / (2r_1 \delta_1 + \delta_1^2 + Q_c))$ ,  $\max \varphi_s(\|x_{ij}\|) = -0.5 \exp(\|v_{ij}\|) \ln(Q_s / (2r_2 \delta_2 - \delta_2^2 + Q_s))$ . 通过合适的选择参数  $Q_c$  和  $Q_s$ , 可使  $-0.5 \exp(\|v_{ij}\|)$

$\ln(Q_c/(2r_1\delta_1 + \delta_1^2 + Q_c)) - 0.5\exp(\|v_{ij}\|) \ln(Q_s / (2r_2\delta_2 - \delta_2^2 + Q_s)) > E_0$ . 考虑到  $\psi_c(\|x_{ij}\|)$  和  $\psi_s(\|x_{ij}\|)$  的单调性, 如果单元间距超出安全范围, 则与式 (39) 矛盾. 因此,  $r_1 \leq \|x_{ij}\| \leq r_2$  始终成立. 证毕.

## 2.6 串稳定性分析

**定义 1** 若对任意  $h > 0$ , 存在  $\lambda(h) > 0$  使得  $\|\tilde{s}(0)\|_\infty < h \Rightarrow \sup_{t \geq 0} \|\tilde{s}(t)\|_\infty \leq \lambda(h)$  成立<sup>[27]</sup>, 则称动车组系统在  $L_\infty$  意义下是串稳定的.

**证明** 首先, 定义单元间距误差为

$$\tilde{s}_i(t) = s_i(t) - (\chi l + r),$$

式中:  $s_i(t) = x_i(t) - x_{i+1}(t)$  为单元间距. 令  $\tilde{s}(t) = [\tilde{s}_1(t), \dots, \tilde{s}_{n-1}(t)]^T$ .

此外, 由定理 1 的证明可知, 对任意  $t \geq 0$  有  $r_1 \leq s_i(t) \leq r_2$ . 于是可得  $|\tilde{s}_i(t)| = |s_i(t) - (\chi l + r)| \leq \gamma$ , 其中  $\gamma \triangleq \max\{|r_2 - (\chi l + r)|, |(\chi l + r) - r_1|\}$ . 于是可知任意  $t \geq 0$ ,  $\|\tilde{s}(t)\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq n-1} |\tilde{s}_i(t)| \leq \gamma$  成立, 从而可得  $\sup_{t \geq 0} \|\tilde{s}(t)\|_\infty \leq \gamma$ . 给定任意  $h > 0$ , 取  $\lambda(h) = \max\{h, \gamma\}$ , 则当  $\|\tilde{s}(0)\|_\infty < h$  时必有  $\sup_{t \geq 0} \|\tilde{s}(t)\|_\infty \leq \gamma \leq \lambda(h)$ .

由定义 1 验证了系统在  $L_\infty$  意义下是串稳定的.

**注 2** 在稳定性分析中已经证明了预设性能函数 (9) 能够保证跟踪误差在有限时间  $t_m$  内收敛. 理论上,  $t_m$  越小, 系统收敛速度越快, 但可能导致控制输入显著增大; 反之, 若取值过大, 则会降低动态响应性能. 此外, 控制参数  $k_{x_i}$ 、 $k_{v_i}$ 、 $k_c$ 、 $k_s$  和  $\phi_i$  共同决定了闭环系统的控制性能. 一般而言, 适当增大上述参数有助于加快系统的收敛过程, 但也将导致控制输入幅值增大, 从而扩大误差的稳态收敛域.  $\varsigma_i$  主要用于调节饱和误差的衰减速率. 增大该参数可加快饱和补偿过程, 但过大的取值可能放大瞬态控制作用, 因此需结合执行器能力进行合理选取.  $\lambda_{i1}$ 、 $\lambda_{i2}$ 、 $\lambda_{i3}$ 、 $\lambda_{i4}$  和  $\lambda_{i5}$  共同决定了扰动估计误差的收敛速度. 较大的观测器增益有助于提高扰动估计速度, 但可能增强对测量噪声的敏感性, 因此其取值应在保证固定时间收敛条件成立的基础上, 通过仿真进行适当调节.

## 3 仿真实验结果与分析

本节选取 8 编组 CRH380A 型高速动车组作为数值仿真对象, 以验证所提方法的有效性. 根据车辆动力配置, 动车组第 1~3 节车辆构成单元 1, 第 4~5 节车辆构成单元 2, 第 6~8 节车辆构成单元 3<sup>[10]</sup>.

## 3.1 仿真参数

CRH380A 动车组各单元质量分别为  $m_1 = 150 \text{ t}$ ,  $m_2 = 100 \text{ t}$  和  $m_3 = 150 \text{ t}$ , 车辆长为  $l = 25 \text{ m}$ . 耦合器在稳定状态下的原长  $r = 1 \text{ m}$ , 近似弹簧刚度系数  $k = 1.6 \times 10^5 \text{ N/m}$ , 阻尼系数  $p = 600 \text{ Ns/m}$ , 基本阻力  $f_{bi} = m_i(0.01176 + 0.00077616v_i + 0.0000016v_i^2)$ , 等效车辆数  $\chi = 2.5$ .

仿真中设置邻接矩阵系数  $a_{ij} = 1$ , 牵制增益矩阵系数  $h_i = 1$ . 期望速度和限速曲线如图 3 所示. 总运行时间为 1000 s. 使用的坡道、弯道及隧道线路信息均来自于成渝客运专线某段实际线路, 其具体信息如图 4 所示. 此外, 式 (39) 给出了 3 个单元在对应时刻遭受的未知时变扰动, 其余时刻扰动均为零.

$$\omega_1 = 0.12\sin(0.1t), \quad 105 \text{ s} < t < 334 \text{ s}$$

$$\omega_2 = 0.2\sin(0.3t)\cos(0.2t), \quad 451 \text{ s} < t < 618 \text{ s}$$

$$\omega_3 = 0.134\tanh(t)\cos(0.7t), \quad 802 \text{ s} < t < 963 \text{ s} \quad (39)$$

根据 CRH380A 型动车组牵引/制动力与速度的关系, 确定每个单元的控制输入饱和上下界如下<sup>[22]</sup>

$$\hat{u}_{\max} = \begin{cases} 197100n_i/6m_i, & 0 \text{ m/s} \leq v_i \leq 44.4 \text{ m/s} \\ 31512000n_i/10.8v_im_i, & v_i > 44.4 \text{ m/s} \end{cases}$$

$$\hat{u}_{\min} = \begin{cases} (154.8v_i - 586120) \times n_i/8m_i, & 0 \text{ m/s} \leq v_i < 13.89 \text{ m/s} \\ -(45.36v_i^2 - 2580.5v_i + 654080)n_i/8m_i, & 13.89 \text{ m/s} \leq v_i \leq 111.11 \text{ m/s} \end{cases}$$

式中:  $n_i$  表示单元  $i$  中具有牵引力输出能力的车辆数;  $n_i$  表示具有制动力输出能力的车辆数.

设置各单元的初始速度为  $v_1(t_0) = 55 \text{ m/s}$ ,

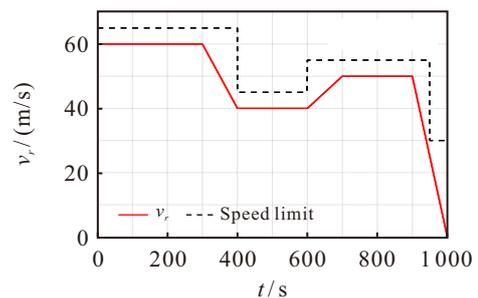


图3 期望速度曲线

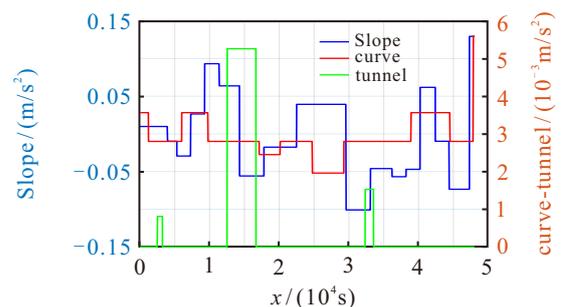


图4 单位质量附加阻力

$v_2(t_0) = 55.1 \text{ m/s}$  和  $v_3(t_0) = 55.2 \text{ m/s}$ . 初始位置为  $x_1(t_0) = 387.02 \text{ m}$ ,  $x_2(t_0) = 323.5 \text{ m}$  和  $x_3(t_0) = 260.06 \text{ m}$ . 初始单元间距满足处于安全范围内的要求.

### 3.2 本文控制器仿真与分析

本文提出的分布式有限时间预设性能一致性控制器参数设置如下:  $k_c = 0.4$ ,  $k_s = 0.1$ ,  $k_{x_i} = 4$ ,  $k_{v_i} = 1.1$ ,  $\rho_{x_i} = 500$ ,  $\rho_{x_i, t_m} = 1$ ,  $\rho_{v_i} = 10$ ,  $\rho_{v_i, t_m} = 0.1$ ,  $\ell = 2$ ,  $t_m = 100$  和  $\varsigma_i = 10$ . 从文献 [28] 中得知橡胶缓冲器装置行程为  $96 \text{ mm}$ , 那么设计动力单元间距在  $63.5 \text{ m} \pm 96 \text{ mm}$ , 即  $63.404 \text{ m} \sim 63.596 \text{ m}$  范围内是安全的.  $\delta_1 = 0.066$ ,  $\delta_2 = 0.036$ ,  $Q_c = 0.01$  和  $Q_s = 0.01$ .

从图 5 可以观察到, 观测器能够有效估计各单元所受的集总扰动, 有效提升了系统的鲁棒性. 从图 6 和图 7 中可以观察到, 各单元在设定的时间

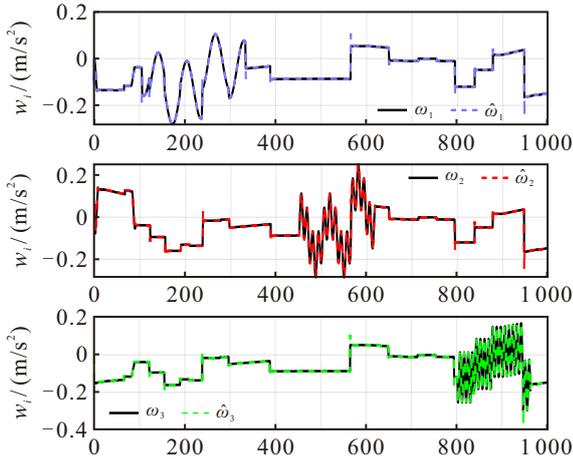


图5 各动力单元单位质量集总扰动估计值

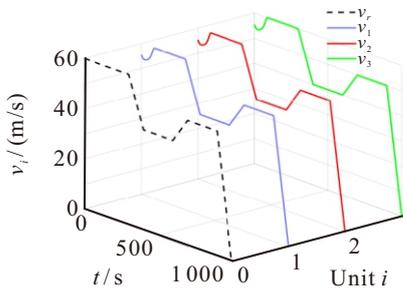


图6 各单元速度追踪曲线

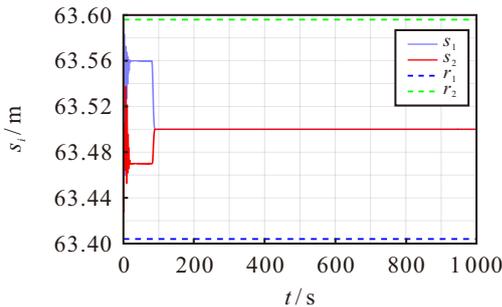


图7 相邻单元间距曲线

$t_m = 100 \text{ s}$  内追踪到期望速度, 且间距始终保持在  $[63.404, 63.596] \text{ m}$  安全范围内, 随着速度趋于一致, 间距最终稳定在固定值  $63.5 \text{ m}$ .

从图 8 和图 9 的局部放大图可以观察到, 当单位质量集总扰动信号发生阶跃突变时, 速度误差和间距误差虽出现一定幅度的波动, 但速度误差最大值始终小于  $0.015$ , 间距误差最大值始终小于  $10^{-4}$ . 从而可知, 在  $t_m = 100 \text{ s}$  时, 各单元的速度误差和间距误差已分别收敛至区域  $|\tilde{v}_i| \leq 0.015 \text{ m/s}$  和  $|\tilde{s}_i| \leq 10^{-4} \text{ m}$  的有界邻域. 此外, 对于任意  $t \geq 0$  间距误差明显小于  $0.096$ . 上述仿真结果验证了系统的串稳定性.

从图 10 中可以观察到, 控制输入始终满足预设的约束条件, 未出现超出执行机构能力的情况, 从而

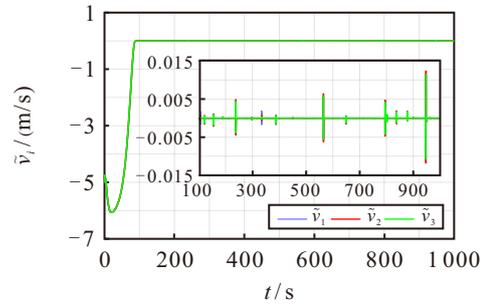


图8 各单元速度误差曲线

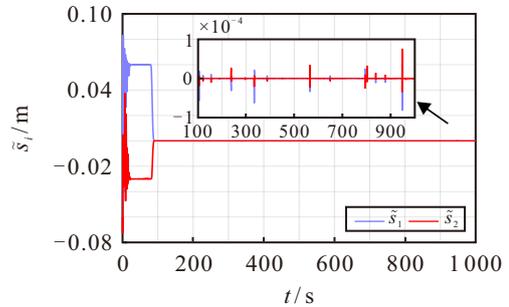


图9 间距误差曲线

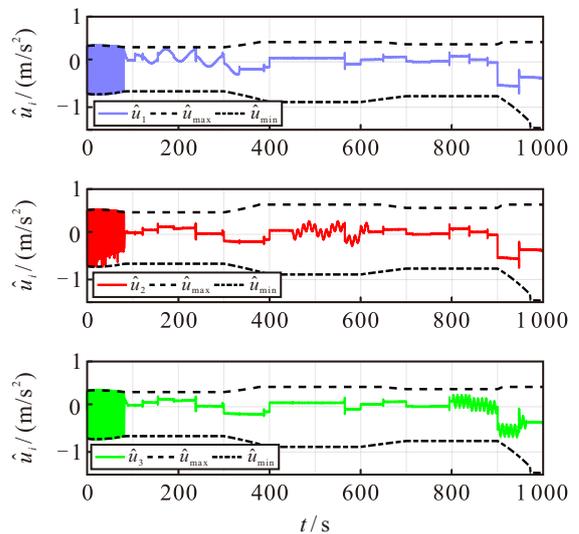


图10 各单元的单位质量控制输入曲线

有效保证了系统的可控性与运行稳定性. 另外, 从图 11 可知各单元的加速度始终维持在  $(-1, 1) \text{ m/s}^2$  区间内, 保证了乘客的乘车舒适性.

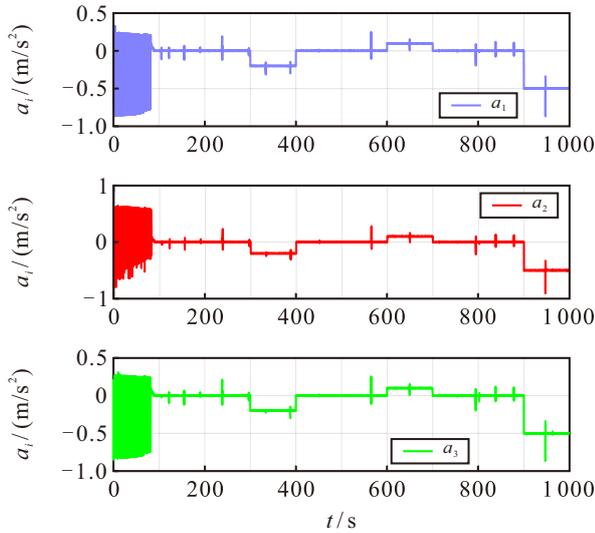


图11 各单元加速度曲线

从图 12 可以观察到, 在有限时间预设性能函数 (9) 的作用下, 跟踪误差始终在预设的衰减范围内演变, 并在设定时间  $t = 100\text{s}$  内收敛至有界邻域. 这一结果从仿真角度验证了系统的实际有限时间稳定性.

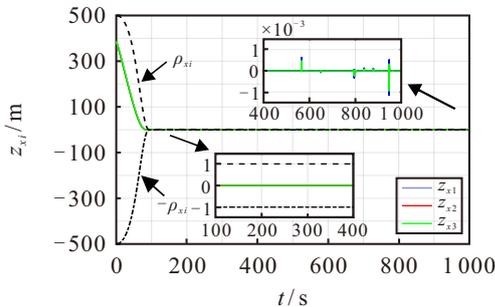


图12 各单元跟踪误差曲线

### 3.3 对比仿真与分析

首先, 为体现所提势函数的优越性, 与不含势函数的控制器以及文献 [2] 提出的对称势函数进行对比; 其次, 与文献 [17] 的传统指数型预设性能函数 (Prescribed Performance Function, PPF)、文献 [24] 的有限时间预设性能函数 (Finite-time Prescribed Performance Function, FtPPF) 进行对比来凸显本文有限时间预设性能函数的优势.

从图 13 中可以观察到, 单元 1 和单元 2 之间的间距在  $[1.6, 33.4]\text{s}$  超出了最大允许值, 单元 2 和单元 3 之间的间距在同一时间区间内低于最小允许值. 缓冲器在收敛前长时间的过度压缩和拉伸会造成耦合器损伤和断裂, 存在较大安全隐患. 相比之下, 当引入势函数后, 所有单元间隔均处于安全范围以内.

从图 14 可以观察到, 所有相邻单元间距可以在安全范围内变化, 但不能使耦合器收敛至平衡状态, 意味着耦合器的缓冲器一直处于拉伸或压缩的状态, 持续受力会加剧疲劳积累, 从而缩短耦合器的使用寿命.

从图 15 至图 20 可以观察到, 两种函数同样可以实现控制目标, 并使跟踪误差始终处于预设区域内. 但 PPF 的收敛速度相对较慢, 且在收敛之前, 单元间距的波动幅度明显大于本文方法. 此外, FtPPF 相比本文方法缺少余弦函数, 表现出更大的瞬态误差以及更慢的收敛速度. 为了定量分析动车组系统

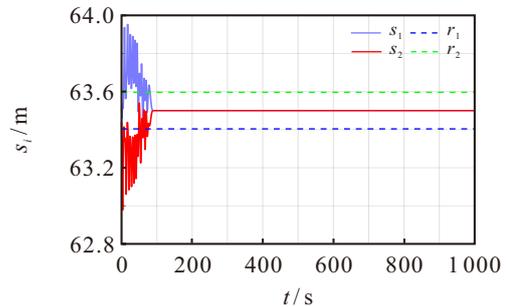


图13 不含势函数时相邻单元间距曲线

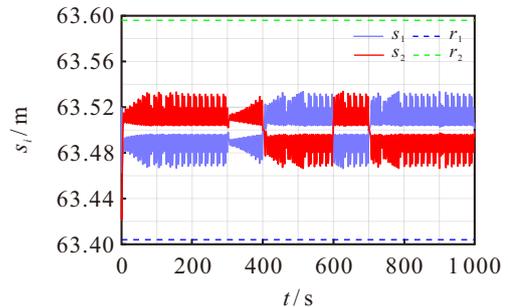


图14 基于文献 [2] 对称势函数时相邻单元间距曲线

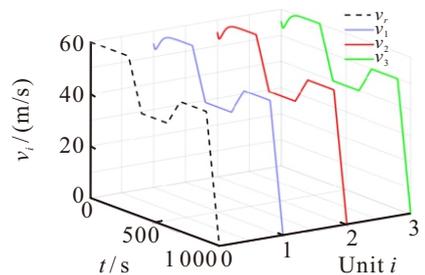


图15 基于文献 [17] 中 PPF 的速度曲线

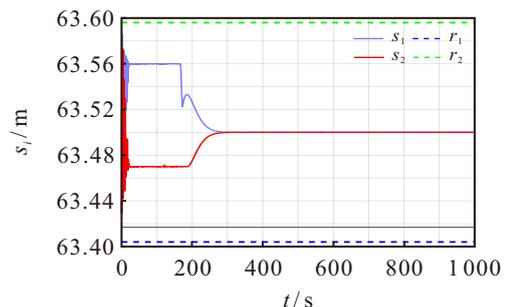


图16 基于文献 [17] 中 PPF 的相邻单元间距曲线

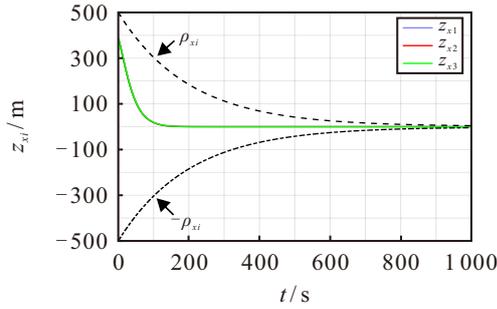


图17 基于文献 [17] 中 PPF 的跟踪误差曲线

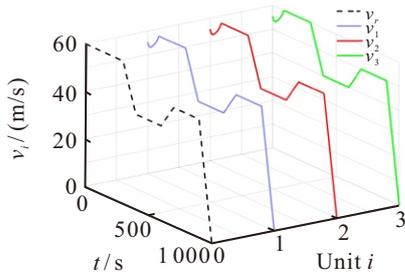


图18 基于文献 [24] 中 FtPPF 的速度曲线

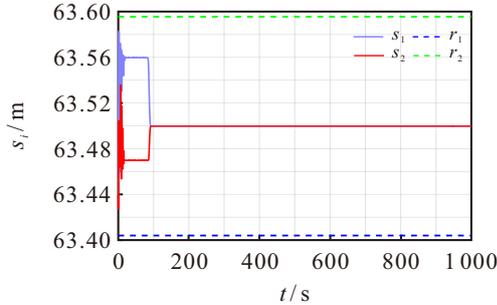


图19 基于文献 [24] 中 FtPPF 的相邻单元间距曲线

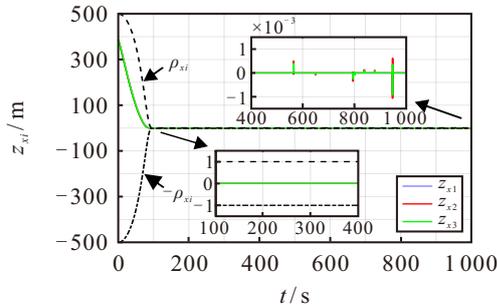


图20 基于文献 [24] 中 FtPPF 的跟踪误差曲

的性能表现, 选取  $PI_1 = \sum_{t=0}^{1000} \left( \sum_{i=1}^3 \|z_{xi}\|^2 \right)^{1/2}$ 、

$PI_2 = \sum_{t=0}^{1000} \left( \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (a_{ij} \|x_i - x_j\|)^2 \right)^{1/2}$  和收敛时间为

性能指标. 对比结果如表 1 所示, 结果表明本文预设性能函数表现出更优的性能.

表1 3种预设性能函数的性能指标对比

性能指标	收敛时间/s	$PI_1/m$	$PI_2/m$
本文方法	80	$3.2228 \times 10^7$	$7.8011 \times 10^7$
FtPPF	86	$3.3089 \times 10^7$	$1.3472 \times 10^8$
PPF	300	$3.6365 \times 10^7$	$7.8013 \times 10^7$

## 4 结论

本文设计了一种分布式有限时间预设性能鲁棒一致性控制器, 用于实现多单元动车组系统协同控制. 通过构建基于势场力判断机制的自适应势函数, 确保缓冲器行程始终处于安全区间内, 有效提升了系统运行的安全性与稳定性. 同时, 融合扰动观测器和基于滤波的饱和补偿器, 设计分布式有限时间预设性能一致性控制子项, 使动车组系统追踪期望速度曲线, 并使单元间距收敛到平衡状态. 理论分析和数值仿真均验证了系统的实际有限时间稳定性与串稳定性. 对比仿真进一步表明, 本文方法在收敛速度、间距保持与控制性能方面均优于现有方法. 然而, 本文侧重于单元间距与状态一致性控制, 尚未考虑运行能耗、通信质量等因素的影响. 未来将针对通信时延下具有节能优化的动车组鲁棒一致性控制展开研究.

## 参考文献 (References)

- [1] 田帅涛, 侯忠生. 多列车系统数据驱动无模型自适应 PID 控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(05): 1447-1456. (Tian S T, Hou Z S. Data-driven model-free adaptive PID control for multi-train systems[J]. Control and Decision, 2025, 40(05): 1447-1456.)
- [2] 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 Z Q, Wang R. Robust consistency control method for multi-agent model of heavy haul train[J]. Control and Decision, 2023, 38(5): 1448-1456.)
- [3] 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, 2022, 23(5): 4063-4074.
- [4] Yao X M, Park J H, Dong H R, et al. Robust adaptive nonsingular terminal sliding mode control for automatic train operation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(12): 2406-2415.
- [5] Chen Y, Huang D Q, Li Y N, et al. A novel iterative learning approach for tracking control of high-speed trains subject to unknown time-varying delay[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2022, 19(1): 113-121.
- [6] Wang X, Li S K, Tang T. Periodically intermittent cruise control of heavy haul train with uncertain parameters[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(13): 6989-7008.
- [7] Wang T, Liao J P, Jin J. Robust decoupled cruise control design of the high-speed train as uncertain large-scale system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(11): 16096-16106.
- [8] Chen Y, Huang D Q, Xu C, et al. Iterative learning tracking control of high-speed trains with nonlinearly

- parameterized uncertainties and multiple time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 20476-20488.
- [9] Chen Z B, Li S K, Yang L X, et al. Hierarchical model predictive control for automatic high-speed train operation with multiple traction/braking units[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2025, 13(1): 2515487.
- [10] Zhou L, Li Z Q, Yang H, et al. Adaptive terminal sliding mode control for high-speed EMU: A MIMO data-driven approach[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, 22: 1970-1983.
- [11] Wang D, Su S, Han L G, et al. Finite-time distributed adaptive coordinated control for multiple traction units of high-speed trains[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(8): 8499-8513.
- [12] Huang D Q, Chen Y, Meng D Y, et al. Adaptive iterative learning control for high-speed train: A multi-agent approach[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(7): 4067-4077.
- [13] 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*, 2024, 73(3): 3277-3286.
- [14] Yang R, Liu F, Li P. Multi-agent based adaptive tracking and coordination control for high speed trains[C]. 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference. Kunming, Piscataway: IEEE, 2021: 6629-6634.
- [15] Chen B, Zhang R, Zhou F, et al. An observer-driven distributed consensus braking control method for urban railway trains with unknown disturbances[J]. *Actuators*, 2023, 12(3): ■-■.
- [16] Zhao Y, Wang T Z. Distributed control for high-speed trains movements[C]. 2017 29th Chinese Control and Decision Conference. Chongqing, Piscataway: IEEE, 2017: 7591-7596.
- [17] 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. 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.)
- [18] 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): ■-■.
- [19] Gao S G, Si W X, Li M J. Reinforced performance control for automatic train operation with speed measurement deviation: A recollection observer approach[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2025, 113(2): 1371-1388.
- [20] Xi W J, Zhang J L, Chang Z H, et al. Distributed optimal control design with the feed-forward compensator for high-speed train[J]. *ISA Transactions*, 2025, 156: 271-281.
- [21] Wang T, Liao J P, Li J K. Robust cruise control for large-scale system of high-speed train with parameter uncertainties and time-varying delay[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2024, 22(10): 3083-3094.
- [22] 朱颖, 吕希奎, 许佑顶. 动车组牵引计算与仿真系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 183.  
(Zhu Y, Lu X K, Xu Y D. EMU traction calculation and simulation system[M]. China Railway Publishing House, 2015: 183.)
- [23] Zhou Y H, Chen Y, Zhang L J, et al. Distributed finite-time prescribed performance for multiple unmanned aerial vehicle with time-varying external disturbance[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(9): 16969-16980.
- [24] Li G F, Zhong Q L, Zuo Z Y, et al. Performance prescribed cooperative guidance against maneuvering target under malicious attacks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, 54(12): 7770-7782.
- [25] Wang H C, Wang X M, Wei W B, et al. Safe reinforcement learning meets event-triggered optimized backstepping: Toward eco-autonomous driving of FCHEVs[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2026, 27(2): 2101-2117.
- [26] 孙小童, 郭戈, 张鹏飞. 非匹配扰动下的多智能体系统固定时间一致跟踪[J]. *自动化学报*, 2021, 47(06): 1368-1376.  
(Sun X T, Guo G, Zhang P F. Fixed-time Consensus Tracking of Multi-agent Systems Under Unmatched Disturbances[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(06): 1368-1376.)
- [27] 李永福, 曾柯月, 黄龙旺, 等. 通信中断条件下基于组合间距策略的车辆队列控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(8): 2569-2578.  
(Li Y F, Zeng K Y, Huang L W, et al. Vehicle platoon control based on combined spacing policy in communication interrupted conditions[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(8): 2569-2578.)
- [28] 李瑞淳. 动车组车钩缓冲装置统型研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2013, 16(8): 64-69.  
(Li R C. Unified design for draught-gear for electric multiple unit[J]. *Urban Mass Transit*, 2013, 16(8): 64-69.)

## 作者简介

陶克武 (1998-), 男, 博士生, 从事轨道交通运行控制、多智能体系统等研究, E-mail: [kwtao@my.swjtu.edu.cn](mailto:kwtao@my.swjtu.edu.cn);

王小敏 (1974-), 男, 教授, 博士生导师, 从事轨道交通运行控制、智能运维等研究, E-mail: [xmwang@swjtu.edu.cn](mailto:xmwang@swjtu.edu.cn);

邓红元 (1974-), 男, 正高级工程师, 从事轨道交通运行控制、智能运维等研究, E-mail: [dhy@crscu.com.cn](mailto:dhy@crscu.com.cn);

陈勇 (1991-), 男, 博士, 从事轨道交通运行控制、迭代学习控制等研究, E-mail: [chenyong679@163.com](mailto:chenyong679@163.com).