

控制与决策

Control and Decision

重载列车多智能体模型的鲁棒一致性控制方法

李中奇, 王睿

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0405>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分布式观测器的多自主水下机器人确定学习控制

Deterministic learning control of multiple autonomous underwater vehicles based on a distributed observer

控制与决策. 2023, 38(2): 388–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0958>

带有执行器故障的多水面船固定时间分布式滑模协同控制

Fixed-time distributed sliding mode cooperative control for multiple surface vessels with actuator faults

控制与决策. 2023, 38(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0747>

多电机驱动系统的一致性控制

Consensus control of multi motor drive systems

控制与决策. 2022, 37(3): 654–660 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1274>

多智能体系统的事件触发无模型迭代学习双向一致性

Event-triggered model-free adaptive iterative learning bipartite consensus control for multi-agent systems

控制与决策. 2022, 37(10): 2552–2558 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0401>

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

重载列车多智能体模型的鲁棒一致性控制方法

李中奇^{1,2†}, 王睿^{1,2}

(1. 华东交通大学 江西省先进控制与优化重点实验室, 南昌 330013;
2. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 南昌 330013)

摘要: 重载列车全长数公里, 其运行过程是复杂的动力学系统. 重载列车自动驾驶的关键核心技术是跟踪给定的速度曲线. 以重载列车智能货车方案为基础, 通过分析列车运行动力学过程, 建立重载列车多智能体模型; 考虑列车运行时外界的未知干扰, 同时保证车厢间处于安全距离, 提出一种重载列车复合一致性控制器: 用相邻车厢单元的速度等信息构建一致性算法并引入滑模控制加快系统速度一致性收敛; 列车不同车厢受到干扰视为未知扰动, 且随着滑模增益增加会使系统抖动较大、鲁棒性削弱, 所以设计观测器估计扰动并补偿至控制器保证系统收敛并提高抗干扰性; 引入人工势函数确保相邻车厢单元间距处于安全范围内, 减小纵向冲动. 采用 Matlab 软件进行仿真, 跟踪给定速度曲线, 并用多种干扰来模拟未知因素对列车的影响, 与不加观测器的控制器效果进行对比. 仿真结果表明: 该复合一致性控制器能够较好跟踪设定速度曲线, 速度误差保持在 ± 0.4 km/h 以内, 且车厢间距处于设定的安全范围内; 与不加观测器的控制器在同样干扰下作对比, 所提出的控制器的速度跟踪误差仍然在 ± 4 km/h 以内, 且对于未知干扰有较好的鲁棒性.

关键词: 重载列车; 多智能体; 人工势函数; 鲁棒性; 一致性控制; 滑模观测器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0405

引用格式: 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.

Robust consistency control method for multi-agent model of heavy haul train

LI Zhong-qi^{1,2†}, WANG Rui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The full length of heavy haul train is several kilometers, and its operation process is a complex dynamic system. The key technology of automatic heavy haul train driving is tracking the running speed profile. Based on the intelligent wagon train scheme of a heavy haul train, this paper establishes a multi-agent model of the heavy haul train by analyzing the dynamic process of heavy haul train operation. Considering the unknown interference of the outside world to the train while the train is running, and ensuring the safe distance between carriages, a composite consistency controller for the heavy haul train is proposed. A consistency algorithm is constructed by using the speed displacement information of adjacent carriage units to make the system speed consistency converge, and then the sliding mode control term is introduced to accelerate the convergence speed. The different disturbances received by different carriages of the train are regarded as unknown disturbances, and the system buffet will be large and the robustness will be weakened with the increase of sliding mode gain. Therefore, an observer is designed to estimate the disturbance and compensate it to the controller to ensure the convergence of the system and improve the anti-interference ability. The artificial potential function is introduced to ensure that the distance between adjacent car units is in a safe range and reduce the longitudinal impulse. The Matlab software is used for simulation experiments to track the given speed curve, and various disturbances are used to simulate the influence of unknown factors on the train, which is compared with the effect of the controller without the observer. The simulation results show that the composite consistency controller can better track the set speed curve, the speed error is within ± 0.4 km/h, and the compartment spacing is within the safe range, that is, the travel of the coupler buffer is within the specified range. Compared with the controller without the observer, the speed tracking error of the proposed controller is still within ± 4 km/h. Although the distance between the two cars is within the safe range, The proposed controller is also robust to unknown bounded disturbances.

Keywords: heavy haul-trains; multi-agent; artificial potential function; robust; consensus control; sliding mode observer

收稿日期: 2022-03-16; 录用日期: 2022-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52162048).

责任编辑: 杨涛.

†通讯作者. E-mail: lzq0828@163.com.

*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.

0 引言

重载列车以其牵引质量大、效率高的特点逐渐受到重视,近年来发展迅速^[1]。目前重载列车的传统控制方法中控制信号传输至各个车厢有延迟,车厢间不同步的动作易导致纵向冲动^[2],且重载列车运行过程环境复杂,地形或其他因素会对列车产生干扰,使不同车厢间距过小或过大,对行驶安全产生较大影响,在此实际工程背景下对重载列车控制进行研究具有较为重要的意义。

Bai等^[3]提出了一个多目标优化模型,该模型将能量效率、正点率和行驶平顺性的加权和最大化,且该模型的约束系统地覆盖了一些运行中的实际条件。Zhang等^[4-7]利用MPC(model predictive control)模型预测控制方法作为主体,为减轻列车中相邻车厢的车钩振动,提高列车整体性能,试图在MPC框架内对长时间行驶的列车进行调度;另外还在构造的成本函数中给出两个惩罚因子,一个用于制动力,一个用于车钩阻尼效应,以减少制动产生的能量浪费,减轻车钩的循环振动。Wang等^[8]结合重载列车人工驾驶经验,设计了周期性间歇巡航控制器,在能量效率和控制时间上表现出了良好的优势。付雅婷等^[9]分析重载列车钩缓系统受力原理,设计了列车理想运行速度目标曲线,可较好地改善安全正点和节能等关键性指标。

随着多智能体新技术的发展,多智能体一致性控制也逐渐应用到轨道交通领域。一致性控制使用较少的信息交换和简单的控制器结构,使大型复杂多智能体系统中的状态(如位置和速度)逐渐趋近一致性^[10]。Zhao等^[11]建立了高速列车多智能体模型,将列车动态模型转化为leader-follower模式的多智能体系统;Li等^[12]研究了多列高速列车的自适应协调控制问题,引入人工势函数并设计了一种列车自适应协调控制算法来跟踪期望速度;He等^[13]利用多智能体领导跟随一致性控制研究了高速列车鲁棒协同制动算法。对于重载列车而言,为满足控制,需要一些新技术应用到实际场景。大秦线采用美国GE公司的LOCOTROI系统,该系统的机车无线同步操控技术可以实现机车分布式独立操控^[14],电控气动(electronically controlled pneumatic, ECP)系统已可以通过有线网络部署到每节车厢,可以大幅减小列车内力^[15];Chou等^[16]和Zhuan等^[17]验证了装备ECP系统的重载列车优化调度与控制的可行性;Tian等^[18]提出了一种坡道坡度采用卡尔曼滤波器实时估计,使

不同坡度上的车厢随着坡度的变化而改变制动力,以保持每辆车的瞬时减速度一致,从而减少车厢间的纵向冲击;Zhu等^[19]利用一致性控制协议,研究了重载列车非线性轨迹跟踪控制;Zhang等^[20]研究了大量车辆组成的列车系统的一致性,研究了借助基于最优切换分层线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)的列车系统牵引运行方法;Zhou等^[21]以最小内力为目标跟踪期望速度,设计了重载列车分布式事件触发系统控制策略;Gao等^[22-24]将重载列车纵向动力学模型简化为双重积分器形式设计分布式协同控制器,在保证列车作用力最小的前提下调节系统速度达到期望值,还提出了新的基于博弈策略的仅利用局部信息的分布式最优控制方法来控制重载列车;Liu等^[25]将重载列车各个车厢分成状态信息共享的智能体单元,提出一种分布式协作观测器估计车厢间相对位移;王风洲等^[26]提出将列车内货车分成若干货车单元,货车单元内有一辆货车增加控制单元成为智能货车,实现货车单元独立控制;Ren等^[27]研究了一致性算法在多车系统协同控制中的应用。

以上文献中基本包含目前主流研究重载列车的控制方法,但其中有缺点或考虑不足:文献[3, 4, 7, 18, 20]等基于多质点重载列车建模,结合控制器提高了一定的控制性能,但是其中应用的二次规划、博弈策略的分布式最优控制、MPC围栏子系统、LQR切换分层、卡尔曼实时估计坡道坡度等方法计算量大,使得这些控制设计过于复杂,造成了高难度和在工程实现中的某些缺点。文献[5, 6, 8, 14-17, 22-24]考虑了地形扰动但将其视为固定值,列车的超长长度导致不同车厢受到的扰动并不一样。文献[9]从列车钩缓结构考虑,使整体建模变得相对复杂。文献[10-12, 27]应用的一致性算法鲁棒性不强。文献[19, 21]考虑了结构简单的一致性控制器并应用于重载列车,但是仅限于机车作为智能体而将货车全部视为刚体,使货车间纵向冲动难以展现,且文献[19]并未考虑地形对列车的影响。文献[25-26]以新技术构建的方案可以建立重载列车多智能体模型,且文献[26]提出的智能货车实现独立控制,但是并未给出具体控制方案。事实上,每个车厢单元可以视作一个智能体(agent),一列重载列车在ECP系统基础上可视为多智能体(multi-agent system, MAS)系统。

针对上述提到的问题,并且考虑到文献[26]的智能货车方案以及重载列车ECP系统新技术,本文旨在建立多智能体重载列车模型,研究重载列车一致性

跟踪控制问题,设计具有抗干扰能力的复合一致性控制器,使各车厢运动状态趋于一致;引入人工势函数保证相邻车厢单元间距处于安全范围内,避免列车纵向冲动过大;将地形等因素引起的干扰视为未知扰动设计观测器,将其估计值反馈进控制器提高系统的鲁棒性;最后针对该控制器进行仿真实验来说明其有效性.

1 预备知识

代数图论是研究多智能体一致性控制的重要工具,所以有必要提及基本的图论概念与原理^[27]:图 $G = (V, E, A)$ 为一个无向图. 其中: $V = \{1, 2, \dots, n\}$ 是非空节点集合;图的边是 $(i, j), E \subseteq V \times V$ 是图边的集合; $A = [a_{ij}]$ 是图的非负邻接矩阵, a_{ij} 表示两点之间的耦合强度. 仅当节点 i 能收到节点 j 的信息时, $(i, j) \in E$, 此时 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$. $\varsigma_i = \{j \in V | (i, j) \in E\}$ 表示节点 i 的邻居节点集合. 假设任意 $i, j \in V$, 都有 $a_{ij} = a_{ji}$, 则图称为无向图. 图 G 的拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}]$ 定义为

$$L_n = D_n - A_n. \tag{1}$$

其中: D_n 为图的度矩阵, $D = [d_{ij}]$, 而 $d_{ij} = 0, i \neq j$, 且 $d_{ij} = \sum_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n$.

对于无向图而言,任意两节点间均有连通路经,则可称为连通图. 显然无向图的邻接矩阵和拉普拉斯矩阵是对称的. 由此有以下必要的性质^[28]:

- 1) 零是矩阵 L 的特征值, 且有对应的特征向量 1_n ;
- 2) 如果图 G 连通且对称, 则 L 也对称, 且 $L \geq 0$, 其所有特征值非负, 有 $0 = \lambda_1(L) \leq \lambda_2(L) \leq \dots \leq \lambda_n(L)$;
- 3) 如果矩阵 $H = \text{diag}\{a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}\}$, 则 $L_n +$

H 是对称正定矩阵, 当且仅当其连通时其特征值全为正.

2 模型建立与公式描述

2.1 列车多质点动力学模型

重载列车由多节货车和机车通过车钩装置链接而成, 相比于单质点模型, 多质点模型更复杂更能准确描述其运行状态. 结合图1(排头末尾为机车, 其余为货车)与整列车的动力学模型^[7]对各车厢受力分析得

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, \\ m_i \dot{v}_i = u_i + f_{i-1}^{\text{in}} - f_i^{\text{in}} - D_{fi} - \Phi_i. \end{cases} \tag{3}$$

其中: x_i 为第 i ($i = 1, 2, \dots, n$) 节车厢的位移, $x_i - x_{i+1}$ 为相邻车厢的位移差; h 为车厢中心到车厢边的长度(半车长); z 为车钩缓冲系统^[9]平衡状态的原长; Δx_i 为相邻车厢间车钩拉伸或压缩的形变量. 列车内部车钩力可由刚度系数 k 的线性弹簧近似表示 $f_i^{\text{in}} = k\Delta x_i$ ^[8], 车厢受到前后车钩力 f_{i-1}^{in} 和 f_i^{in} 作用, 排头机车和末尾机车仅受相邻车厢的一个车钩力作用; v_i 为车厢速度; m_i 为车厢质量; u_i 为控制输入, 表现为牵引/制动力(仅机车有牵引力); D_{fi} 为列车基本阻力^[16], 公式为

$$D_{fi} = m_i(c_0 + c_1 v_i + c_2 v_i^2), \tag{4}$$

$m_i(c_0 + c_1 v_i)$ 为机械阻力, $m_i c_2 v_i^2$ 为空气阻力, c_0, c_1, c_2 为阻力公式常数; Φ_i 为附加阻力及其他扰动, $\Phi_i = \Phi_{i1} + \Phi_{i2} + \Phi_{i3}$, 有

$$\Phi_{i1} = 9.98 m_i \sin \theta, \tag{5}$$

$$\Phi_{i2} = 0.002 m_i \frac{d_{wb}}{R}, \tag{6}$$

Φ_{i1} 为坡道阻力, Φ_{i2} 为轨道曲线阻力, Φ_{i3} 为隧道阻力和其他扰动, d_{wb} 为车厢前后轮距离, R 为轨道曲线半径.

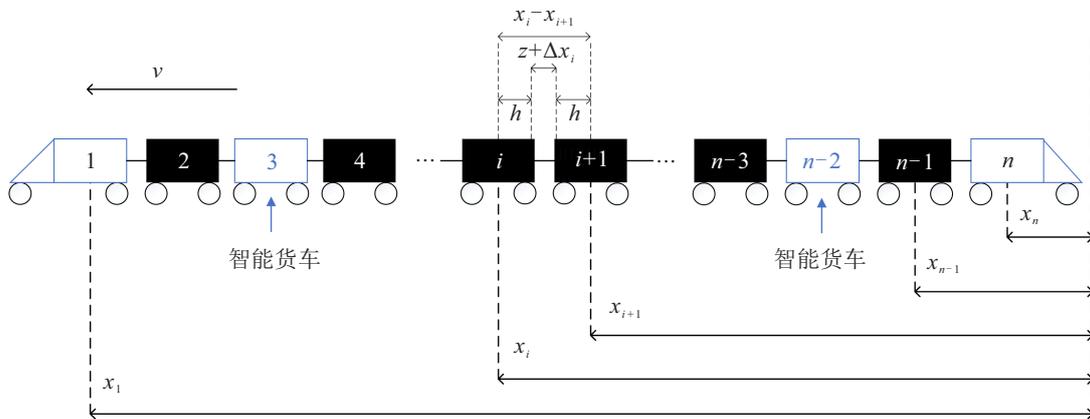


图1 重载列车动力学模型

假设1 只要列车是正常运行状态,则列车所受阻力 D_{f_i} 和未知扰动 Φ_i 都视为有界的.

假设2 在列车正常运行状态下,初始相邻车厢间距离是安全的,在运行过程中如果车钩没有损坏,则车厢间距离不会无限增加或减少,因此 Δx_i 和 f_i^{in} 视为有界的.

2.2 列车多智能体模型

将重载列车系统进行多智能体建模,每个车厢单元视为智能体,利用图论建立通信拓扑模型.引入虚拟领导者^[1]以获得需要追踪的目标曲线,使得车厢单元能最终趋于一致的位移和速度.所有单元都可对其相邻单元传输信息,且领导者信息对前后机车可见,对于任意两个车厢单元,都存在连接路径,并且图是强连接的.重载列车的通信拓扑如图2所示.

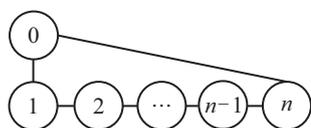


图2 重载列车通信拓扑

leader-follower 模式的多智能体系统里,虚拟领导者的动态输出作为多智能体系统达到一致性的参考信号^[28].虚拟领导者模型为

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

其中: x_0 、 v_0 分别为其位移与速度, u_0 为其控制输入.根据之前的动力学模型(3),列车多智能体动力学模型可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t), \\ m_i \dot{v}_i(t) = u_i(t) + \sum_{j=1}^n (-1)^i a_{ij} f_i^{\text{in}} - D_{f_i} + \Phi_i. \end{cases} \quad (8)$$

令

$$\begin{cases} \frac{\Phi_i}{m_i} = b_{r_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \\ I_i \sum_{j=1}^n (-1)^i a_{ij} f_i^{\text{in}} - I_i(c_0 + c_1 v_i + c_2 v_i^2) = d_{r_i}(\cdot); \\ I_i = \frac{1}{m_i}. \end{cases} \quad (9)$$

则式(8)可以写成

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t), \\ \dot{v}_i(t) = I_i u_i(t) + d_{r_i}(\cdot) + b_{r_i}. \end{cases} \quad (10)$$

$\sum_{i=1}^n (-1)^i a_{ij} f_i^{\text{in}}$ 代表相邻智能体之间的耦合关系,

D_{f_i} 为系统的阻力, b_{r_i} 为未知扰动.因此,该领航者-跟随者系统具有非线性和不确定扰动,且为二阶多智能体系统^[29].根据假设1和假设2,因为将列车内力和阻力扰动视为有界变量,所以 $d_{r_i}(\cdot)$ 和 b_{r_i} 也是有界的.

3 控制器设计

重载列车的一致性本质上是一个具有不确定性的二阶一致性控制问题.对于重载列车实际运行情况而言,本文期望列车在与给定目标状态趋于一致的同时,使其车厢间距在安全范围内,并且对于外部扰动拥有一定抗干扰能力.假设列车初始位置与速度已知,初始状态下相邻车厢间距在设定的安全范围内,则期望设计控制 u_i 可以满足

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i - v_0\| = 0; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i - x_j\| = r_{ij}, \quad r_{ij} \in (r_1, r_2). \end{cases} \quad (11)$$

其中: r_1 、 r_2 分别为相邻车厢保证安全的最小间距和最大间距, r_{ij} 为相邻车厢动态间距.假设车厢长12m即半车长6m,系统处于平衡状态时车厢间距1m,考虑MT-2缓冲器装置行程83mm^[9],那么设置间距(从车厢中心位置算起)在 $13\text{m} \pm 83\text{mm}$ 即 $12.917\text{m} \sim 13.083\text{m}$ 范围内认为是安全的.

针对上述二阶多智能体系统,设计如下复合型控制器形式:

$$u_i = u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}. \quad (12)$$

其中: u_{i1} 为传统一致性控制器和复合项; u_{i2} 为人工势函数部分; u_{i3} 为滑模观测器的反馈值.

3.1 复合一致性控制器部分

一致性控制器是为了确保多智能体系统速度能一致性收敛,则复合型的一致性控制器 u_{i1} 设计为

$$u_{i1} = m_i \left(- \sum_{j=0}^n a_{ij} [(v_i - v_j) + (x_i - x_j - r_{ij})] - \eta_i \text{sat}(s_i) \right) + \bar{u}_i. \quad (13)$$

该控制器可分为3部分.一部分为二阶系统标准一致性控制器

$$- \sum_{j=0}^n a_{ij} [(v_i - v_j) + (x_i - x_j - r_{ij})], \quad (14)$$

其中 a_{ij} 表示车厢间的速度和位移的信息交换,如果信息能够从 i 车厢传递到 j 车厢,则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$.另一部分为平衡状态控制输入,由于稳定状态下列车加速度为零,车钩缓冲系统处于平衡状态.此时 f_i^{in} 为零,不考虑其他附加阻力的情况下,得到平

平衡状态控制输入

$$\bar{u}_i = m_i(c_0 + c_1v_0 + c_2v_0^2). \quad (15)$$

最后一部分为滑模控制项,因为传统一致性控制收敛速度较慢且鲁棒性欠佳,所以选取该控制项并用速度误差做滑模面,即 $s_i = v_i - v_0$,则设计滑模控制项为

$$\eta_i \text{sat}(s_i), \quad (16)$$

η_i 为待设计常数. 为了减小切换函数引起抖振,这里使用饱和函数 $\text{sat}(s_i)$,如下所示(其中 $\Delta = 0.05$):

$$\text{sat}(s_i) = \begin{cases} 1, & s_i > \Delta; \\ k_a s_i, & |s_i| \leq \Delta, k_a = 1/\Delta; \\ -1, & s_i < -\Delta. \end{cases} \quad (17)$$

3.2 人工势函数部分

在多智能体系统中引入的人工势函数方法^[13]已经拥有比较成熟的研究,使智能体在避开障碍、路径规划等应用中表现出良好效果. 考虑初始状态时列车相邻车厢间距处于安全范围,为缓解列车运行状态中可能会出现纵向冲动过大导致车钩损伤问题,利用人工势函数确保车厢间距始终处于安全的范围,因此有如下设计:

$$u_{i2} = -m_i \sum_{j=1}^n a_{ij} \nabla U_{ij}(x_{ij}); \quad (18)$$

$$U_{ij}(x_{ij}) = \frac{1}{|x_{ij}|^2 - r_1^2} + \frac{1}{r_2^2 - |x_{ij}|^2}, \quad (19)$$

$$r_1 < |x_{ij}| < r_2.$$

其中: u_{i2} 与人工势函数在负梯度方向上向量对应; x_{ij} 是相邻车厢间的动态距离; r_1 、 r_2 分别表示相邻车厢间需满足的最大和最小间距,即缓冲器最大行程内. 参照式(11),如果上式中 $r_1 = 12.917$, $r_2 = 13.083$,则有界人工势函数示意图如图3所示.

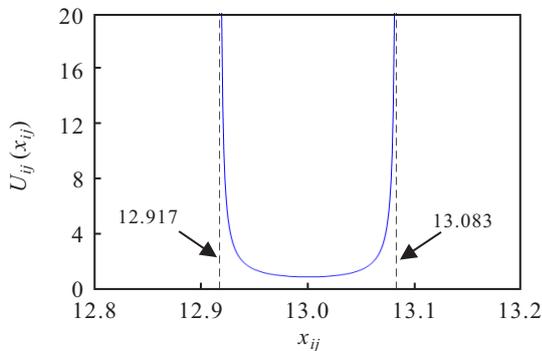


图3 人工势函数

当相邻车厢间距处于安全间隔内,即 $r_1 < |x_{ij}| < r_2$ 时,人工势函数会输出一个较小且稳定的控制动作,然而相邻车厢间距逼近或达到安全间距边界

时,势函数会输出极大的控制动作,起到聚合或分隔的作用,由此防止列车运行中出现的车厢间距过近压缩或过远拉伸造成的车钩损伤.

3.3 滑模观测器部分

上述复合控制器鲁棒性欠佳,再加上 u_{i1} 中引入了滑模控制项,随着滑模参数增大可能会影响跟踪精度,同时引入的平衡状态控制输入(15)也只考虑了处理已知的扰动没有考虑未知扰动,而重载列车由于各车厢长度不同不一定受到同样的固定扰动,在运行过程中可能会遇到其他未知影响,所以设计未知扰动估计值 \hat{b}_{ri} 反馈至复合控制器是有意义的.

令该控制项为 u_{i3} 并反馈至复合控制器用于解决系统不确定性. 为了提高其抗干扰能力和跟踪精度,设计滑模观测器^[13],有

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = \hat{v}_i(t) + \gamma_i \text{sat}(\xi_{i1}), \\ \dot{\hat{v}}_i(t) = I_i u_i(t) + d_{ri}(\cdot) + w_i \text{sat}(\xi_{i2}). \end{cases} \quad (20)$$

由观测器得到列车位移观测值 $\hat{x}_i(t)$,观测误差为 $\xi_{i1} = x_i - \hat{x}_i$;速度观测值为 $\hat{v}_i(t)$,观测误差为 $\xi_{i2} = v_i - \hat{v}_i$; γ_i 和 w_i 为待设计的常数. 令总的误差向量为 $\xi_i = [\xi_{i1} \ \xi_{i2}]^T$,取 $s_i = \xi_i$ 为滑模面.

如果待设计常数选取得当,满足 $\gamma_i - |\xi_{i2}|_{\max} > 0$, $w_i - |d_{ri}(\cdot)|_{\max} > 0$,则构造的正定李雅普诺夫函数 $\dot{V}_i < 0$,此外 $\dot{V}_i \rightarrow 0$ 当且仅当 $\xi_i \rightarrow 0$. 根据滑模理论,误差会在有限时间 T 内达到滑模面. 上述公式经变换可得

$$\lim_{x \rightarrow T} \hat{b}_{ri} = b_{ri} = w_i \text{sat}[\gamma_i \text{sat}(x_i - \hat{x}_i)]. \quad (21)$$

此为扰动观测值,能够证明观测器收敛,最终得控制项 $u_{i3} = -m_i \hat{b}_{ri}$. 因此,上述复合的控制器如下:

$$u_i = u_{i1} + u_{i2} + u_{i3} = m_i \left(- \sum_{j=0}^n a_{ij} [(v_i - v_j) + (x_i - x_j - r_{ij})] - \eta_i \text{sat}(s_i) \right) + \bar{u}_i - m_i \sum_{j=1}^n a_{ij} \nabla U_{ij}(x_{ij}) - m_i \hat{b}_{ri}. \quad (22)$$

4 仿真实验与分析

以大秦线机车HXD1和C80货车为例,为了达到控制效果与通信成本的平衡,减少观测器和控制器的尺寸,参照文献[26]将10辆车厢分为一组视为一个货车单元,每个货车单元内有一辆货车可独立控制,实现货车单元独立控制,即每个货车单元视为一个质点,从而构建智能体单元. 这样,系统小于常规大小却可以提供所需的控制效果,更详细的分析可参见

文献[7].以100节车厢,即10组多智能体为仿真对象,用Matlab仿真验证所提出的控制器和多质智能体模型.另外对同样条件下带观测器和不带观测器时的仿真结果作比较,并附加突变、脉冲、白噪声等信号,代替运行过程中不确定的干扰,分别在不同时间施加在不同车厢单元上,以此反映运行时的复杂与多变.

4.1 一致性控制器仿真与分析

假设所有车厢参数相同.基本阻力参数如式(4)所示,取 $c_0 = 1.2 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$, $c_1 = 6.5 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot (\text{m} \cdot \text{kg})^{-1}$, $c_2 = 2.79 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{kg})^{-1}$;机车质量92000 kg,货车质量100000 kg,半车长 $h = 6 \text{ m}$,平衡状态车间距 $z = 1 \text{ m}$,近似弹簧刚度系数 $k = 1 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$,设计滑模增益 $\eta = \text{diag}[4, 6, 2, 3, 5, 4, 5, 3, 5, 4]$,系统邻接矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{10 \times 10} \quad (23)$$

对列车的控制实际上是对目标曲线的跟踪控制,目标信息传递给头车,剩余车厢单元两两相邻信息交换(见图2).目标曲线如图4所示,初速度约为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,最高速度约 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;在100 s时,速度切换为约 $65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;在350 s时,速度切换为约 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;在900 s时,速度下降为约 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.总共持续时间约1200 s.设定间距在 $[12.917, 13.083]$ 范围内是安全的.

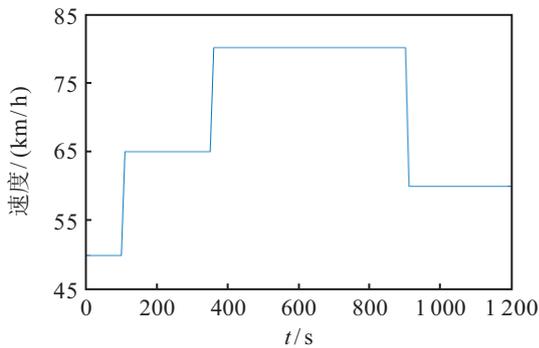


图4 目标速度曲线

图5为多车速度位移曲线的三维图,展示了整个列车系统不同智能体车厢单元的速度位移关系.不失一般性,设置各车厢初始速度各不相同,从头至尾分别为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $49.9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $50.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $50.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $49 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $49.88 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、

$50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $49.8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $50.01 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.初始位置分别为123 m、110 m、97 m、84 m、71 m、58 m、45 m、32 m、19 m、6 m.即,头车初始位置在123 m处,各车厢单元初始间距为13 m.

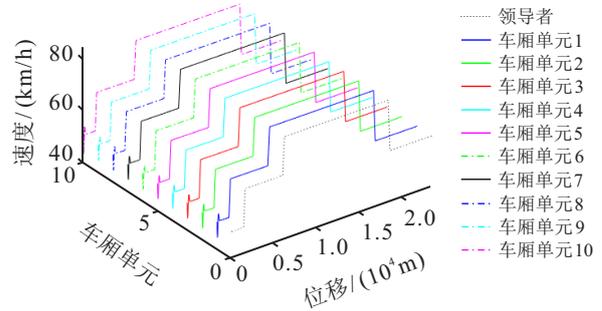


图5 多车速度位移曲线

图6为速度跟踪效果,由图可知重载列车系统速度在约20 s时实现了一致性跟踪,即各车厢单元跟踪上目标曲线.

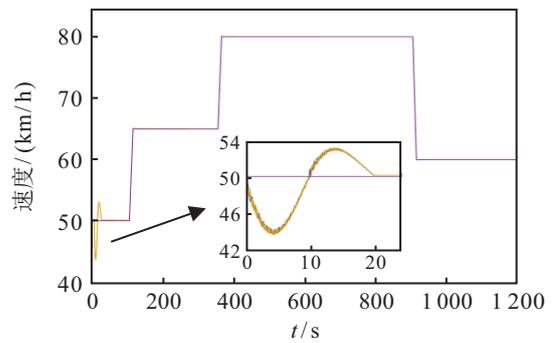


图6 速度跟踪效果

图7为速度跟踪误差,整个多智能体系统在约20 s时误差大致收敛到零,在20 s后分别在各速度切换时有较大的波动,误差最大处小于 $0.35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,其他过程中速度跟踪始终保持较高的跟踪精度.

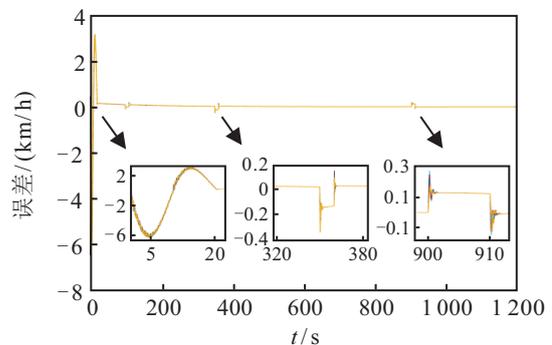


图7 速度跟踪误差

图8为运行过程中相邻车厢间距变化,可见在刚开始阶段间距变化较大,在12.98 m和13.02 m内波动,但是整个运行过程期间,其间距始终保持在设定的安全范围内,即小于车钩缓冲装置最大行程,始终

处于 $[12.917, 13.083]$ 范围内. 这是在复合控制器作用下, 相邻车厢单元间距不会超过设定的范围, 保证了列车系统车厢单元间的安全距离.

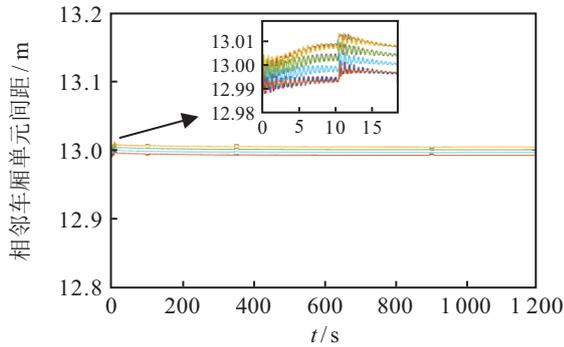


图8 相邻车厢单元间距

4.2 控制器抗干扰性对比仿真与分析

为了说明本文设计的抗干扰性, 在不改变上述系统各参数和仿真参数的条件下, 做出有无观测器的对比实验, 即移除观测器在控制器中的反馈和不移除时作对比, 以检验其对于不同未知扰动的抗干扰能力. 为反映扰动的随机性和不确定性, 选择阶跃、白噪声和脉冲信号表示未知扰动 Φ_i , 分别在不同时间段加在不同车厢单元上.

第1组、第10组在 $130\text{ s} \sim 330\text{ s}$ 时加上阶跃干扰; 第3组、第8组在 $400\text{ s} \sim 800\text{ s}$ 时加上正态分布的随机白噪声干扰; 第5组、第6组在 $920\text{ s} \sim 1020\text{ s}$ 时加上脉冲干扰. 其他参数设置为

$$\gamma = \text{diag}[15, 5, 20, 15, 10, 30, 15, 10, 15, 15],$$

$$\omega = \text{diag}[15, 33, 5, 32, 30, 20, 20, 20, 22, 15].$$

相邻车厢安全距离仍为 $[12.917, 13.083]$.

由图9可知, 在3段时间, 即a、b、c处分别加上不同干扰, 其速度跟踪效果虽呈现小范围波动, 但大体上较好地跟踪上了目标曲线, a处误差最大不超过 $3\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, b处误差最大约为 $1\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, c处误差最大约为 $2\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

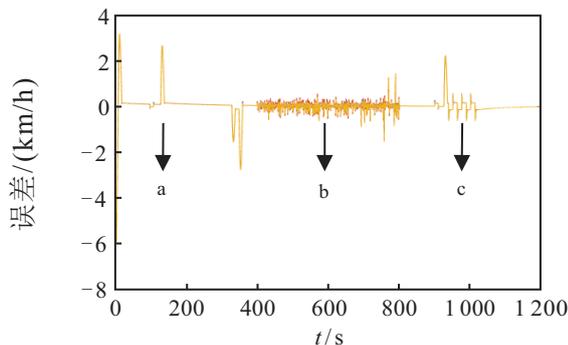


图9 带观测器的速度跟踪误差

图10为带观测器与不带观测器时速度跟踪误差对比. 两种情况下速度跟踪误差对比明显, 绿色表示带观测器, 红色表示不带观测器. a处红色误差依然大于 $4\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; b处红色误差最大已超过 $2\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 全程误差均大于绿色; c处红色误差更是超过 $5\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 跟踪曲线出现明显发散. 通过对比可见带观测器的复合控制器鲁棒性更好, 面对未知扰动产生的跟踪误差更小, 跟踪精度更高, 这表明各个智能体间速度误差会更小, 即车钩缓冲器行程变化更小; 以MT-2型为例, 其最大阻力 2270 kN , 文献[9]指出在加载和卸载阶段平均行程变化 1 mm , 车钩力变化 80 kN , 则速度误差大意味着行程变化更加剧烈, 纵向冲动更大. 因此, 带观测器的控制器能更好地面对运行过程中未知扰动的干扰, 使控制更加平稳.

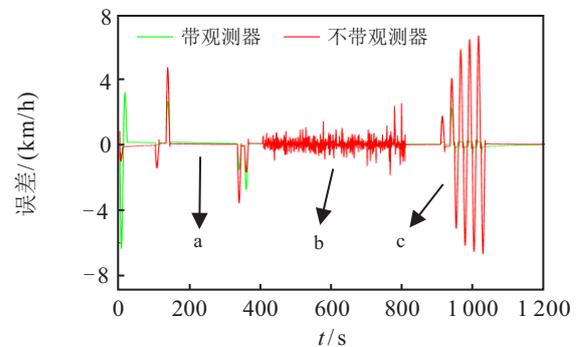


图10 两种情况的速度跟踪误差对比

图11显示了带观测器下受到干扰时相邻车厢的位移误差, 即相邻车厢间距变化效果. 全程间距处于 $[12.98, 13.02]$ 的范围内, 小于设定的安全范围. a处、c处在 $[12.99, 13.01]$ 范围内波动, b处在 $[12.99, 13.02]$ 范围内波动.

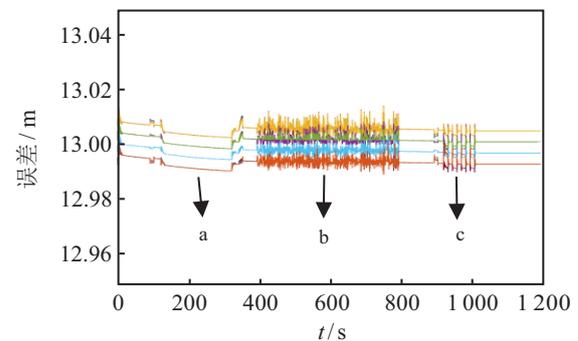


图11 带观测器时相邻车厢间距

图12为不带观测器下受到干扰时相邻车厢的位移误差, 即相邻车厢间距变化效果. 可见与带观测器时相比较间距波动明显变大, 但是仍处于 $[12.98, 13.02]$ 的安全范围内, 可见在有人工势函数的复合控制器作用下, 能保证运行过程中车厢间距处于设定范

围,使车钩缓冲装置处于安全行程,减小其磨损,保证行车安全.

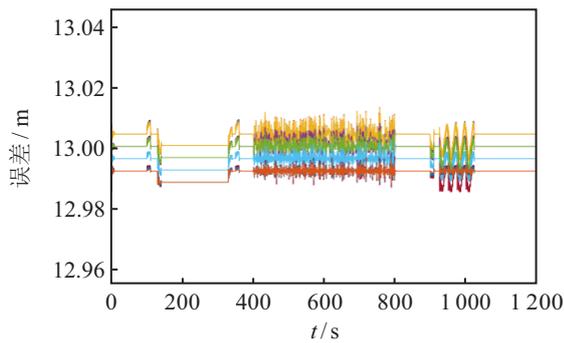


图 12 不带观测器时相邻车厢间距

5 结论

本文分析了重载列车运行过程的特点,针对列车车厢纵向冲动较大,以及不同车厢可能会受到未知扰动的问题,以智能货车单元为基础建立了重载列车多智能体模型.

在一致性控制中引入人工势函数来确保相邻车厢间距处于安全范围内,由此缓解重载列车运行过程中易出现的纵向冲动、车钩循环振动问题.仿真结果表明相邻车间距始终处于 $[12.98, 13.02]$ 范围内,属于安全距离.

不同于将铁路上地形阻力视为固定扰动,而是针对列车长度且不同车厢受到不同扰动影响的实际情况,将扰动视为未知扰动,构造观测器并将其未知扰动观测值反馈至复合控制器中,提高了系统的鲁棒性以及应对其他未知扰动的能力.仿真结果表明,带观测器时速度跟踪误差小于 $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,而不带观测器时误差最大超过 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,所以带观测器的控制器可使缓冲器行程变化剧烈程度降低.以MT-2型为例,可减少其车钩力变化幅度,使纵向冲动降低,使列车运行过程更安全.

后续将研究系统中出现一些智能体间通信失效之后的控制问题,改进控制器使通信失效后仍能跟踪目标状态.

参考文献(References)

[1] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
(Zhai W M, Zhao C F. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.)

[2] 刘豫湘, 方长征, 万建兵. 列车制动系统技术现状及发展趋势[J]. 电力机车与城轨车辆, 2014, 37(5): 1-4.
(Liu Y X, Fang C Z, Wan J B. Technology status and

development trend of train braking system[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2014, 37(5): 1-4.)

- [3] Bai B X, Xiao Z, Wang Q Y, et al. Multi-objective trajectory optimization for freight trains based on quadratic programming[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(11): 466-477.
- [4] Zhang L J, Li Q, Zhuan X T. Energy-efficient operation of heavy haul trains in an MPC framework[C]. IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings. Beijing, 2013: 105-110.
- [5] Zhang L J, Zhuan X T. Optimal operation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems using model predictive control methodology[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(1): 13-22.
- [6] Zhang L J, Zhuan X T. Development of an optimal operation approach in the MPC framework for heavy-haul trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3): 1391-1400.
- [7] Zhang L J, Zhuan X T. The fence on the MPC of heavy haul trains[C]. The 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Taiyuan, 2012: 3545-3550.
- [8] 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.
- [9] 付雅婷, 原俊荣, 李中奇, 等. 基于钩缓约束的重载列车驾驶过程优化[J]. 自动化学报, 2019, 45(12): 2355-2365.
(Fu Y T, Yuan J R, Li Z Q, et al. Optimization of heavy haul train operation process based on coupler constraints[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(12): 2355-2365.)
- [10] Wu H, Su H S. Discrete-time positive edge-consensus for undirected and directed nodal networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(2): 221-225.
- [11] Zhao Y, Wang T Z, Karimi H R. Distributed cruise control of high-speed trains[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(14): 6044-6061.
- [12] Li S K, Yang L X, Gao Z Y. Adaptive coordinated control of multiple high-speed trains with input saturation[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(4): 2157-2169.
- [13] He J, Yang B C, Zhang C F, et al. Robust consensus braking algorithm for distributed EMUs with uncertainties[J]. IET Control Theory & Applications, 2019, 13(17): 2766-2774.
- [14] Huang Z W, Tong H T, Fan Y F. The longitudinal dynamics of heavy-haul trains in the asynchronous

- brake control system[C]. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha, 2010: 900-903.
- [15] Zhuan X, Xia X. Cruise control scheduling of heavy haul trains[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 757-766.
- [16] Chou M, Xia X, Kayser C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(4): 501-509.
- [17] Zhuan X, Xia X H. Optimal scheduling and control of heavy haul trains equipped with electronically controlled pneumatic braking systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(6): 1159-1166.
- [18] Tian C, Wu M L, Zhu L, et al. An intelligent method for controlling the ECP braking system of a heavy-haul train[J]. Transportation Safety and Environment, 2020, 2(2): 133-147.
- [19] Zhu B, Xia X H. Nonlinear trajectory tracking control for heavy-haul trains[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(11): 41-46.
- [20] Zhang R, Peng J, Liu W R, et al. A consensus control with application to heavy haul trains based on switched hierarchical LQR[C]. International Conference on Collaboration Technologies and Systems(CTS). Orlando, 2016: 342-348.
- [21] Zhou F, Huang Z W, Kai G, et al. Distributed cooperative tracking control for heavy haul trains with event-triggered strategy[C]. American Control Conference (ACC). Boston, 2016: 770-775.
- [22] Gao K, Huang Z W, Peng J, et al. An online distributed game optimal control for heavy haul trains with limited communication[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 158695.
- [23] Gao K, Huang Z W, Wang J, et al. Distributed cooperative control of heavy-haul trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(1): 51-59.
- [24] Gao K, Huang Z W, Wang J, et al. Decentralized control of heavy-haul trains with input constraints and communication delays[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(4): 420-427.
- [25] Liu W R, Wang D Y, Gao K, et al. Design of distributed cooperative observer for heavy-haul train with unknown displacement[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2017, 11(4): 239-247.
- [26] 王凤洲, 李培署, 李国平. 长大重载货物列车制动控制方案探讨[J]. 铁道车辆, 2014, 52(10): 31-35.
(Wang F Z, Li P S, Li G P. Discussion of the braking control scheme for heavy duty freight trains[J]. Rolling Stock, 2014, 52(10): 31-35.)
- [27] Ren W, Chao H Y, Bourgeois W, et al. Experimental validation of consensus algorithms for multivehicle cooperative control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(4): 745-752.
- [28] Ni W, Cheng D Z. Leader-following consensus of multi-agent systems under fixed and switching topologies[J]. Systems & Control Letters, 2010, 59(3/4): 209-217.
- [29] Ren W, Atkins E. Second-order consensus protocols in multiple vehicle systems with local interactions[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. San Francisco, 2005: 6238.

作者简介

李中奇(1975—),男,教授,博士生导师,从事轨道交通自动化与运行优化、列车运行过程建模及优化控制等研究, E-mail: lzq0828@163.com;

王睿(1996—),男,硕士生,从事轨道交通运行优化控制的研究, E-mail: wr_controlmethod@yeah.net.

(责任编辑: 齐 霖)