

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205989

面向乘客舒适性的多列车协同巡航控制*

周峰¹ 陶克武¹ 杨迎泽² 李烁¹ 朱正发¹ 梁宏坤¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院 长沙 410114; 2. 中南大学计算机学院 长沙 410083)

摘要: 为了提高多高速列车在协同运行时的安全性以及舒适性,提出了一种基于改进分布式一致性算法的多高速列车协同巡航控制策略。首先,设计了可随列车运行速度实时变化的安全距离间隔。其次,联合加权双曲正切函数给出分布式协同控制策略;同时通过坐标变换将列车闭环动力学误差模型转换为典型的二阶多智能体系统模型,并利用李雅普诺夫稳定性证明了闭环系统在误差状态下的渐进稳定性。最后,通过仿真对所提方法进行验证,所提方法能动态的调节列车之间的安全距离,且始终将加速度限制在 $[-0.7, 0.7] \text{ m/s}^2$ 以内。结果表明了多列车跟踪运行的安全性和舒适性都能得到保障。

关键词: 多高速列车;协同巡航控制;舒适性;安全距离

中图分类号: TP13.1; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Cooperative cruise control for multiple trains with ride comfort

Zhou Feng¹ Tao Kewu¹ Yang Yingze² Li Shuo¹ Zhu Zhengfa¹ Liang Hongkun¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to enhance the safety as well as comfort of multiple high-speed trains in cooperative operation, a cooperative cruise control strategy of multiple high-speed trains based on improved distributed consensus algorithm is proposed. Firstly, the safety distance interval is designed that can change with the train speed in real time. Secondly, the distributed cooperative control strategy is given by combining weighted hyperbolic tangent function. Meanwhile, the error model of the closed-loop train dynamics is transformed into a typical second-order multi-agent system model by coordinate transformation, and the asymptotic stability of the closed-loop system under the error state is proved by using Lyapunov's stability theorem. Finally, the proposed method is verified by simulation, the proposed method can dynamically adjust the safety distance between trains and always keep it within $[-0.7, 0.7] \text{ m/s}^2$. The results show that the safety and comfort of multiple trains tracking operation can be guaranteed.

Keywords: multiple high-speed trains; cooperative cruise control; comfort; safety distance

0 引言

高速列车凭借承载能力大、安全、快速等特点,在交通运输领域具有巨大的优势。列车实际运行的环境复杂多变,经常遭受到类似于地形、气候等不规则事件带来的影响,从而导致相邻列车之间的实际速度存在较大的差异,进而引发纵向冲动等问题^[1-2]。在当前列车群小间

隔、大密度的运行背景下,多列车系统的安全性更加无法得到保证,不能有效地实现多列车的协同运行控制。因此,研究如何确保列车安全追踪运行间隔,提升列车运行安全性,成为了广受关注的研究课题。

多列车协同运行控制过程涉及多个相互耦合的列车子系统,其基本思想是通过设计协同巡航控制器使所有列车最终能够达成速度和位移一致,并保持安全距离避免碰撞。在目前,多列车协同巡航控制的研究已经有了

收稿日期: 2022-11-11 Received Date: 2022-11-11

* 基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61502055)、湖南省自然科学基金面上项目(2021JJ30876)、长沙理工大学科研创新项目(CXCLY2022077)资助

较多的成果^[3-7]。Wang 等^[3]根据相邻列车之间的通信关系,建立多智能体模型,基于干扰观测器,设计了一种鲁棒的分布式协同控制策略使列车之间的距离收敛至最小安全距离。Bai 等^[4]利用相邻列车之间位置的关系设计分布式协同算法使列车实现巡航的同时将车距控制收敛至固定的标称常数。为了提升控制器的灵活性,Gao 等^[5]基于预设性能控制方法,将列车的速度和距离限制在允许的范围之内。Li 等^[6]基于人工势场和拉萨尔不变集原理,设计了一种自适应分布式协同巡航控制策略来确定系统中的未知参数,使每列列车都能跟踪期望速度并稳定距离在一个安全范围内。然而将距离控制在固定的范围区间内降低了列车的运行效率,当列车运行速度变化时,范围区间也不能相应地调整。Lin 等^[7]研究了具有速度和输入约束的多列车跟踪运行控制问题,提出的方法可以使所有列车都按一个期望的速度运行,但设计的控制策略无法保障列车的所有瞬态响应都满足安全距离。上述研究方法只能将列车之间的距离限制在一个固定的值,然而,在实际运行工况中安全距离长度应与列车的运行速度有关,因此针对安全距离随列车运行速度变化自动进行调整的问题需要进一步研究。

除了安全性问题,列车运行时保障乘客乘车舒适性在设计列车控制系统时也是不可忽略的。许多学者认为列车动力学对乘客舒适性带来的影响很大^[8-12]。张友兵等^[8]研究了控车时的舒适度,认为影响舒适度的是冲击率,而冲击率的大小与加速度的变化率有关。Laura 等^[9]通过考虑列车运行的加速度来评估舒适度。Ding 等^[10]通过分析列车运行时三轴加速度来评估列车运行的舒适度。Xu 等^[11]通过设置合适的加速度阈值,确保列车行驶的加速度在舒适的范围。王龙达等^[12]在评估列车运行舒适度时将单位距离或单位时间的加速度变化值作为衡量列车运行舒适度的重要性能指标。这些工作都是在单列列车的基础上进行分析的,没有考虑到相邻列车之间的作用情况,当协同巡航的两列车距离较远或者较近时,列车制动和启动时过大的加速度极有可能引起乘客的不舒适感。

围绕上述研究工作中出现的问题,本文将主要考虑纵向冲击影响下多列车协同运行时乘车舒适性以及安全距离随列车运行速度变化时对多列车协同巡航时的影响。本文提出了一种基于改进分布式一致性算法的多高速列车协同巡航控制策略。设计了可随列车运行速度实时改变安全距离间隔,能动态调节列车之间安全距离的协同控制器,提高了运行的安全性和行车效率。同时,结合加权双曲正切函数将多列车协同运行时的加速度始终限制在舒适的范围内,以确保列车运行时乘客乘车舒适性。最后,严格地证明了多列车系统能在设计的控制策略下渐进稳定,并通过仿真验证了该方法的合理性。

1 问题阐述

针对多列车分布式协同巡航控制问题,考虑到实际运行工况下,铁路线长度以及跟踪运行安全距离都要长于列车编组,因此在分析过程中将整列列车简化成一个单质点模型,即无论列车编组数量多少,列车在运行过程中所承受的力都集中在一个质点上^[13]。在本节中,为了能清晰地描述高速列车的动态行为特性,根据牛顿第二定律对运行中的高速列车进行受力分析,得到高速列车纵向动力学模型;其次,为了方便理解后续设计的分布式协同控制策略,利用代数图论对相邻列车的通信拓扑进行一个简单的描述。

1.1 高速列车纵向动力学模型

列车运行阻力 $H_i(t)$ 一般由机械阻力、空气阻力、坡道阻力以及曲率阻力组成^[14]。具体表达形式如下所示:

$$H_i(t) = m_i(c_{i0} + c_{i1}v_i(t) + c_{i2}v_i^2(t)) + m_i g \sin\theta + 0.004m_i D \quad (1)$$

其中, m_i 指的是第 i 列列车的重量, $m_i(c_{i0} + c_{i1}v_i(t))$ 指的是机械阻力, $m_i v_i^2(t)$ 描述的是空气阻力。 $v_i(t)$ 为各列车运行到 t 时刻的速度。 c_{i0} , c_{i1} 和 c_{i2} 是通过风洞试验得到的阻力系数。从式(1)中得知列车在低速运行时,基本阻力的主要成分为机械阻力,由于空气阻力中速度与阻力成正比,随着列车不断的提速,空气阻力将成为基本阻力中的主要阻力。列车所承受的轨道斜率和曲率阻力分别为 $m_i g \sin\theta$ 和 $0.004m_i D$, 其中 θ 为列车的坡度角, D 为列车轨道段的曲率。

对运行中的列车进行受力分析,根据文献[14]中描述的建模指南,得到高速列车纵向动力学模型如下所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ m_i \dot{v}_i(t) = u_i(t) - H_i(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x_i(t)$ 和 $v_i(t)$ 表示第 i 列列车运行到 t 时刻时的位置和速度, $u_i(t)$ 为牵引力或者制动力,在后续设计中作为控制输入。

1.2 通信拓扑

列车能够依靠成熟的通信技术与邻居列车进行状态信息的传递,是实现多列车分布式协同控制的基础。本文所设计的分布式协同控制策略具有每列列车的控制设计,仅需要使用自身及其后行列车的状态信息的优点。前后列车之间进行局部的信息传递,率先达成局部状态信息一致,然后经过信息交互过渡一段时间之后逐渐实现全局状态信息一致。

本文利用代数图论描述相邻智能体通信关系的方法^[15]来描述列车之间的通信拓扑。假设多列车的通信拓扑结构用 $G = (V, \mathcal{E}, \mathbf{A})$ 表示,其中 $V = (v_1, \dots, v_n)$ 指的

是所有列车数的集合, $\varepsilon = V \times V$ 表示一组边, 用来描述列车之间相互作用关系。本文给定列车的通信拓扑为有向图, 其有向边用 (v_i, v_j) 表示, v_i 是信息发出端, v_j 是信息接收端。 $A = [a_{ij}]$ 为邻接矩阵, 表示列车 i 与列车 j 之间的连接权重, 如果列车之间能传递状态信息, 则 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。 $D = \text{diag}([d_1, d_2, \dots, d_n])$ 表示度矩阵, 在有向图中度矩阵的系数为每个结点的出度数。 $L = D - A$ 为拉普拉斯矩阵, 用 $L = [l_{ij}]$ 表示, 常用来描述系统的收敛性, 其定义为 $l_{ii} = \sum_{i \neq j} a_{ij}, l_{ij} = -a_{ij}$ 。

2 多高速列车分布式协同巡航控制器设计

根据列车动力学模型(2), 设计一个合适的协同控制器使所有列车在确保运行安全以及乘车舒适性的前提下准确追踪期望速度曲线是一项具有挑战性的研究工作。 本文将列车的牵引力与制动力集中到控制变量 $u_i(t)$ 中, 利用前后列车之间状态信息相互作用情况, 结合加权双曲正切函数, 设计一种依赖前车位置信息和后行列车速度信息的改进分布式一致性算法的多高速列车协同巡航控制策略, 能够确保每列车都能安全且稳定地追踪到前行列车的速度。 所设计的协同控制策略的简化流程如图 1 所示。

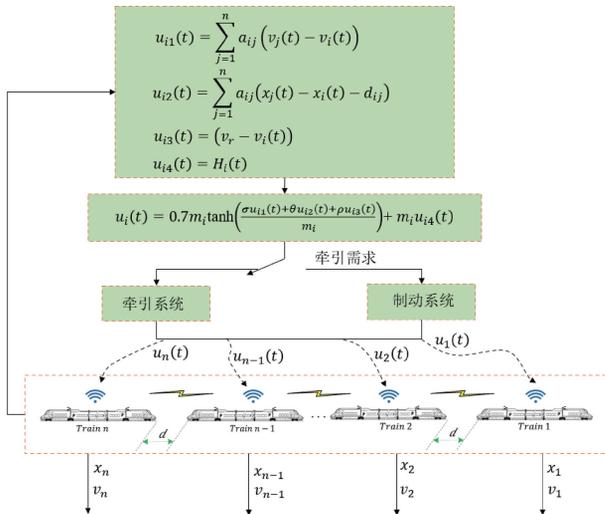


图 1 多高速列车协同巡航控制简化流程

Fig. 1 The cooperative cruise control simplified flowchart of the multiple high-speed trains

2.1 改进分布式协同控制器设计

每列列车的协同控制器都由 4 个部分构成, 分别为速度交互项 $u_{i1}(t)$, 编队跟踪控制项 $u_{i2}(t)$, 速度追踪项 $u_{i3}(t)$ 以及阻力抵消项 $u_{i4}(t)$ 。

关于列车速度状态信息交互项的设计如下所示^[4]:

$$u_{i1}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(v_j(t) - v_i(t)) \quad (3)$$

其目的是使多列车系统具有较好的速度收敛性能, 以便于所有列车能在运行一段时间后能够将速度达成一致。

编队跟踪控制项 $u_{i2}(t)$ 的设计是本文的重点, 其基础设计形式描述如下:

$$u_{i2}(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}(x_j(t) - x_i(t) - d_{ij}) \quad (4)$$

其中, d_{ij} 表示列车 j 相对于列车 i 的期望相对位移。在文献[7]的工作中将其作为满足线路的最小安全距离给出, 虽然相邻列车之间的距离会逐渐稳定在一个固定的数值, 但是并不能根据线路状况实时调节距离长度。然而实际运行中常有其他线路的列车并入线路一起运行以及节假日乘客增多需要增开列车等特殊情况, 当实际安全距离一旦小于设定的安全距离时, 所设计的控制策略不能友好地应对此类事件的发生, 使得设计的控制策略失效。于是本文在此基础上考虑一种基于追踪列车速度, 能够根据运行工况实时调节列车安全间距的协同控制策略。从移动闭塞“撞硬墙”运行模式中得到启发, 后行列车在追踪运行时始终视前行列车为静止状态, 认为前行列车为一面不可撞击的“硬墙”, 通过速度计算动态的调整安全距离使列车能在“硬墙”之前安全停车。移动闭塞“撞硬墙”模式中速度与位移之间的关系如下所示:

$$S_i = \frac{v_i^2(t) - v_j^2(t)}{2a_{\max}} \quad (5)$$

其中, $v_i(t)$ 为追踪列车的实际速度, a_{\max} 指的是列车的最大加速度, S_i 为两车之间的相对位移, $v_j(t) = 0$ 为前车的速度。式(5)可重写为:

$$S_i = \frac{v_i^2(t)}{2a_{\max}} \quad (6)$$

相邻列车安全距离的设计中需要添加一个安全裕度, 以避免列车紧急制动时速度陡降至 0 m/s 造成追尾事故。根据 CTCS-3(中国列车控制系统)列车运行控制系统的要求^[16], 一般采用如下公式:

$$L_i = 40 + 0.5 \times v_i(t) \quad (7)$$

由式(6)和(7)得到相邻列车之间的期望的安全距离为:

$$d_{ij} = S_i + L_i = \frac{v_i^2(t)}{2a_{\max}} + 40 + 0.5 \times v_i(t) \quad (8)$$

所有列车在控制项 $u_{i1}(t)$ 的作用下只能将速度达成一致, 具体的追踪目标需要设计其他的控制项来补偿。关于追踪项 $u_{i3}(t)$ 的设计, 本文希望在第 1 列车获得所需的期望速度 v_r 并跟踪它之后, 后行列车 $i = 2, 3, \dots, n$ 只需获取该列车前进的速度就能依次完成全部列车的

速度追踪。选用 Zhao 等^[17]在具有领导者-跟随者的多智能体系统一致性研究中的设计方式,具体形式如下所示:

$$u_{i3}(t) = (v_r - v_i(t)) \quad (9)$$

结合式(4)~(9)可知相邻列车之间的安全距离会随后行列车速度的变化实时做出调整,直到所有列车追踪到期望速度 v_r ,列车之间的安全间距逐渐稳定在使用期望速度计算出来的距离。因此,在实际运行中,可以根据线路饱和度选择适合的期望速度 v_r ,使列车与相邻列车始终保持安全距离。此算法对最小行车密度具有较好的鲁棒性,此外所有列车按相同的期望速度运行,还避免了没有统一的期望运行速度而导致多列车系统的安全性无法得到保障的缺陷。

考虑到后续研究需要对列车的加速度进行约束,而列车运行阻力是外界施加,无法通过人为进行干预,因此设计一个控制项 $u_{i4}(t)$ 来克服阻力的影响^[14],具体如下所示:

$$u_{i4}(t) = H_i(t) \quad (10)$$

2.2 纵向冲动下多列车协同运行舒适性

2018年国铁集团在京沈线组织高铁进行自动驾驶试验,得出新的舒适度评判标准,只有当加速度满足在 $[-0.7, 0.7] \text{ m/s}^2$ 之间才能保障乘客乘车舒适性要求,如果大于 0.7 m/s^2 就会出现明显不舒服的症状。因此还需要选择一种舒适性函数对上述设计的改进协同控制器进行限制以确保列车运行的加速度处于舒适的范围。关于舒适性函数的选择,必须满足以下两个要求:1)函数的上下界为 $[-0.7, 0.7]$,2)函数具有连续可导的特性。双曲正切函数很好的满足这些要求。于是本文通过对双曲正切函数进行加权将列车运行加速度约束至舒适的范围内。加权双曲正切函数的具体表达形式由式(11)给出,其示意图如图2所示。

$$f(\alpha) = 0.7 \times \tanh(\alpha) = 0.7 \times \frac{e^\alpha - e^{-\alpha}}{e^\alpha + e^{-\alpha}} \quad (11)$$

整合式(3)~(11)得到约束后列车控制输入的表达式:

$$\delta_i = \frac{(\sigma u_{i1}(t) + \theta u_{i2}(t) + \rho u_{i3}(t))}{m_i} \quad (12)$$

$$u_i(t) = 0.7m_i \tanh(\delta_i) + m_i u_{i4}(t)$$

由于列车 i 的控制输入等价于其纵向运行的加速度,因此列车乘车舒适性与控制输入(12)直接相关。需要注意的是,直接引入加权双曲正切函数在一定程度上会对设计的协同控制器造成影响,于是通过选择一组控制增益 $\sigma > 0, \theta > 0$ 和 $\rho > 0$ 为每列列车提供一种灵活的协同控制器来减小控制输入的幅度,以应对加权双曲正切函数的影响。关于控制增益的选取应该符合以下要求:

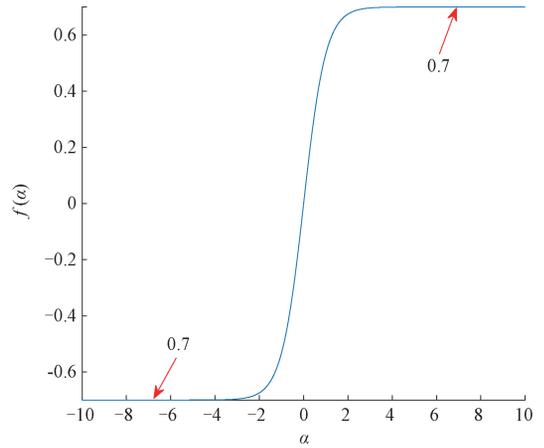


图 2 加权双曲正切函数示意图

Fig. 2 The schematic diagram of weighted hyperbolic tangent function

1) 为了确保列车速度的追踪性能, ρ 的取值需尽可能的大。

2) “撞硬墙”模式下每列列车的初始状态误差都非常大,为了提高追踪精度,并将列车之间的速度误差和位置误差控制在 $[0, 1]$ 之间, θ 的取值应该大于 σ 。

考虑到引入加权双曲正切函数(12)将加速度限制在 $[-0.7, 0.7] \text{ m/s}^2$ 以内,同时“撞硬墙”模式考虑的又是列车最大加速度,因此式(6)中 $a_{\max} = 0.7 \text{ m/s}^2$ 。

2.3 稳定性分析

1) 状态变换和坐标变换

当所有列车追踪到期望速度后,意味着多列车系统达到了一个具有统一状态信息的相对稳定状态,在该状态下每列列车的速度和位置分别为 $\tilde{v}_i(t) = \dots = \tilde{v}_n(t) = v_r$, $\tilde{x}_i(t) = \dots = \tilde{x}_n(t) = x_r = v_r \times t$ 。为了方便研究以期望跟踪速度运行的多列车协同巡航控制问题,分别定义每列列车的速度偏差,位置偏差为 $\hat{v}_i(t) = v_i(t) - v_r$, $\hat{x}_i(t) = x_i(t) - x_r$ 。结合式(2)和(12)得到高速列车的误差动态模型如下所示:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_i(t) = \hat{v}_i(t) \\ \dot{\hat{v}}_i(t) = 0.7 \tanh\left(\frac{1}{m_i} \left(\sigma \sum_{j=1}^n a_{ij}(\hat{v}_j(t) - \hat{v}_i(t)) - \rho \hat{v}_i(t) + \theta \sum_{j=1}^n a_{ij}(\hat{x}_j(t) - \hat{x}_i(t)) - \frac{1}{1.4} (v_r + \hat{v}_i(t))^2 - 40 - 0.5 \times (v_r + \hat{v}_i(t))\right)\right) \end{cases} \quad (13)$$

由于控制项 $u_{i2}(t)$ 中 d_{ij} 的存在,导致在对系统进行稳定性分析时很难写成全局形式,于是本文利用坐标变化公式(14)将列车闭环动力学模型转化为典型的二阶

多智能体系统模型^[18]。

$$\begin{aligned} \hat{x}_i(t) &= \hat{e}_i(t) - \sum_{i=2}^n (i-1) \left(\frac{1}{1.4} v_r^2 + 0.5v_r + 40 \right) \\ \hat{x}_j(t) &= \hat{e}_j(t) - \sum_{j=1}^n (j-1) \left(\frac{1}{1.4} v_r^2 + 0.5v_r + 40 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

转换之后重新得到新的误差动态模型如下:

$$\begin{cases} \hat{e}_i(t) = \hat{v}_i(t) \\ \hat{v}_i(t) = 0.7 \tanh \left(\frac{1}{m_i} \left(\sigma \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{v}_j(t) - \hat{v}_i(t)) - \rho \hat{v}_i(t) + \theta \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{e}_j(t) - \hat{e}_i(t)) - \theta \sum_{j=1}^n a_{ij} \left(\frac{v_r}{0.7} + 0.5 \right) \hat{v}_i(t) - \frac{\theta}{1.4} \sum_{j=1}^n a_{ij} \hat{v}_i^2(t) \right) \right) \end{cases} \quad (15)$$

从式(15)得知,如果满足 $\hat{e}_j(t) \rightarrow \hat{e}_i(t) \rightarrow 0, \hat{v}_j(t) \rightarrow \hat{v}_i(t) \rightarrow 0, \hat{v}_i(t) \rightarrow 0$, 说明转变之后相邻列车之间的安全距离和速度状态信息能够趋于一致,也意味着初始系统 $x_j(t) - x_i(t) \rightarrow \frac{1}{1.4} v_r^2(t) + 40 + 0.5v_i(t), v_j(t) - v_i(t) \rightarrow v_r$ 成立,即原系统保证相邻列车安全运行距离的问题转化为二阶多智能体系统一致性问题。

2) 系统稳定性证明

定理 1: 假设存在 n 列列车在一条高速铁路主线上依次运行,每列列车的初始位置和初始速度可以任意给定,且列车之间的通信含有一棵有向生成树,那么在分布式协同控制策略(12)下能够实现高速列车巡航控制。并得到以下结论:

(1) 相邻列车实时安全距离在实现巡航之前跟随前行列车的位置以及追踪列车的速度变化,在每列列车都追踪到期望速度后由期望速度决定。

(2) 列车在进行牵引和制动时的最大加速度都小于 0.7 m/s^2 , 保障了列车运行的舒适性。

证明: 针对误差动力学(15), 选取如下 Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned} V_1(t) &= \sum_{i=1}^n \hat{v}_i^2(t) \\ V_2(t) &= \frac{0.7}{2m_i} \theta \partial \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{e}_j(t) - \hat{e}_i(t))^2 \\ V(t) &= V_1(t) + V_2(t) \end{aligned}$$

其中, $V(t) > 0$, 对构造的 Lyapunov 函数进行求导:

$$\dot{V}_1(t) = 1.4 \times (1 - \tanh^2(u_i)) \sum_{i=1}^n \hat{v}_i(t)$$

$$\left[\frac{\sigma}{m_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{v}_j(t) - \hat{v}_i(t)) - \right.$$

$$\begin{aligned} & \left. \frac{\rho}{m_i} \hat{v}_i(t) + \frac{\theta}{m_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{e}_j(t) - \hat{e}_i(t)) - \frac{\theta}{m_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} \left(\frac{v_r}{0.7} + 0.5 \right) \hat{v}_i(t) - \frac{\theta}{1.4 \times m_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} \hat{v}_i^2(t) \right] = \\ & 1.4 \times (1 - \tanh^2 u_i) \left[- \frac{\sigma}{m_i} \hat{v}^T L \hat{v} - \frac{\rho}{m_i} \hat{v}^T \hat{v} - \frac{\theta}{m_i} \hat{v}^T L \hat{e} - \right. \\ & \left. \frac{\theta}{m_i} \left(\frac{v_r}{0.7} + 0.5 \right) \hat{v}^T L \hat{v} - \frac{\theta}{1.4 * m_i} \hat{v}^T L \hat{v}^2 \right] \end{aligned}$$

$$\dot{V}_2(t) = - \frac{0.7\theta}{m_i} \partial \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} (\hat{e}_j(t) - \hat{e}_i(t)) (\hat{v}_j(t) - \hat{v}_i(t))$$

从文献[19]中得到:

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij} (\hat{v}_j(t) - \hat{v}_i(t)) f((\hat{e}_j(t) - \hat{e}_i(t))) = \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij} \hat{v}_i(t) f((\hat{e}_j(t) - \hat{e}_i(t))) \end{aligned}$$

综合可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= \frac{1.4 \times \theta}{m_i} \partial \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij} (\hat{e}_j(t) - \hat{e}_i(t)) \hat{v}_i(t) = \\ & \frac{1.4 \times \theta}{m_i} \partial \hat{v}^T L \hat{e} \end{aligned}$$

令 $\partial = (1 - \tanh^2(u_i))$, 结合 $\dot{V}_1(t)$ 和 $\dot{V}_2(t)$ 推断出:

$$\dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) + \dot{V}_2(t) =$$

$$\begin{aligned} & 1.4 \times (1 - \tanh^2 u_i) \left[- \frac{\sigma}{m_i} \hat{v}^T L \hat{v} - \frac{\rho}{m_i} \hat{v}^T \hat{v} - \right. \\ & \left. \frac{\theta}{m_i} \left(\frac{v_r}{0.7} + 0.5 \right) \hat{v}^T L \hat{v} - \frac{\theta}{1.4 * m_i} \hat{v}^T L \hat{v}^2 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

根据 $1 - \tanh^2(u_i) > 0, \sigma > 0, \rho > 0, \theta > 0, L > 0, m_i > 0$ 得知 $\dot{V}(t) \leq 0$ 。找到系统的平衡点 $\hat{e}_i = 0, \hat{e}_j = 0, \hat{v}_i = \hat{v}_j =$

0, 即 $\hat{x}_i = 0, \hat{x}_j = \frac{1}{1.4} v_r^2 + 0.5v_r + 40$ 。由式(16)可知, 只有

当 $\hat{v} = 0$ 时才有 $\dot{V}(t) = 0$, 即集合 $A\{\hat{e}_i(t), \hat{v}_i(t) \mid \hat{v}_i(t) = 0\}$ 是 $B\{\hat{e}_i(t), \hat{v}_i(t) \mid \dot{V}(t) = 0\}$ 包含的最大不变集。由拉萨尔不变集原理可知, 从任意初始条件下开始的每个解都会渐进收敛至最大不变集 $\{\hat{e}_i(t), \hat{v}_i(t) \mid \dot{V}(t) = 0\}$ 。当 $\dot{V}(t) = 0$ 时, 存在 $\hat{v} = 0$, 即

$$v_1(t) = \dots = v_n(t) = v_r, x_j(t) - x_i(t) \rightarrow \frac{v_i^2(t)}{1.4} + 40 +$$

$0.5v_i(t)$ 成立, 意味着所有列车的速度都会渐进收敛至期望速度 v_r , 并最终在跟踪期望速度时保持安全距离, 证毕。

3 数值仿真与结果分析

本节通过数值仿真验证了所提出的改进分布式一致性算法的多高速列车协同巡航控制策略的有效性。仿真

模拟在 MATLAB 2021a 版本中运行。该仿真实验选取 4 列在高速铁路上有序运行的高速列车。需要注意的是,本仿真只针对某条铁路主线上运行的 4 列列车。考虑到驶出的列车与驶入的列车在离开和进入线路时就能与邻居列车取消或建立通信关系,不会对本文的多列车协同控制产生负面影响,因此忽略了途中可能有列车退出线路,或者有其他列车驶入线路的情况^[14]。高速列车运行的相关系数借用于文献[20]并在表 1 中指出。

表 1 高速列车参数

Table 1 Parameters of high-speed trains

参数符号	参数值	单位
m_i	600	t
c_{i0}	0.011 76	N/kg
c_{i1}	0.000 776 16	Ns/mkg
c_{i2}	0.000 016	Ns ² /m ² kg

根据取值要求,选取一组协同控制增益 $\theta = 6, \sigma = 5.5$ 以及 $\rho = 200$ 。仿真时间为 0~2 000 s。为了更好地模拟验证所设计的协同控制器能使列车之间的安全距离最终取决于期望速度,选取 CRH2A 型列车最低运行速度和最高运行速度作为所有列车所要追踪的期望速度。该仿真实验模拟列车在给定的运行时间内经历两次提速的过程。

$$v_r = \begin{cases} 50 \text{ m/s}, & 0 \leq t \leq 900 \text{ s} \\ 70 \text{ m/s}, & t > 900 \text{ s} \end{cases}$$

每列列车的初始位置和初始速度如表 2 所示。

表 2 各列车初始位置与初始速度

Table 2 The initial position and initial speed of each train

i	1	2	3	4
$x_i(t_0)/\text{m}$	1 180	930	620	360
$v_i(t_0)/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0	0	0	0

在协同巡航控制策略(12)的作用下,每列列车的速度追踪曲线和相邻列车的追踪间隔曲线分别如图 3 和 4 所示。由于本文只考虑第 1 列车能接收到虚拟领导列车的状态信息,即虚拟领导列车的信息需要过渡一段时间才能传递到所有列车,因此从图 3 中明显观察到,第 1 列车比剩余 3 列车具有更快的收敛速度,在运行至 $t = 85 \text{ s}$ 时率先追踪到期望速度 $v_r = 50 \text{ m/s}$ 。由于“撞硬墙”模式下追踪列车的速度信息会越来越大,随着状态信息的依次传递,后行的 3 列车需要处理的信息也会依次变大,因此越靠后运行的列车收敛所花费的时间越长。在图 3 中,后行的 3 列车分别在 $t = 356 \text{ s}, t = 520 \text{ s}$ 和 $t = 600 \text{ s}$ 左右追踪到期望速度,在第 4 列车追踪到期望速度时多列车系统达成了一致性。所有列车均遵循期望

速度运行,直到 $t = 900 \text{ s}$ 第 1 列车重新接收到期望速度为 $v_r = 70 \text{ m/s}$ 的指令,所有列车进行第 2 次提速,每列列车在之前保持速度一致的基础上再次进行调整,及时根据前行列车的状态实时更新自身速度大小,在运行至 $t = 1\ 600 \text{ s}$ 左右后再次追踪到期望速度,并以该速度运行到 $t = 2\ 000 \text{ s}$ 。在第 2 次提速过程中所有列车在先前达成的一致性会因为期望速度的改变而发生中断,但是由于 $u_{i1}(t)$ 的存在,会使每列列车在通过与前行列车通信调整自身速度状态信息之后又能重新达成新的一致性。

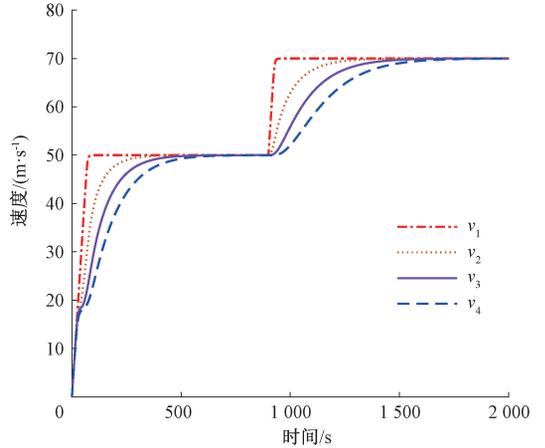


图 3 本文所提协同控制器作用下的速度追踪曲线
Fig. 3 The speed tracking curve under the action of the proposed cooperative controller in this paper

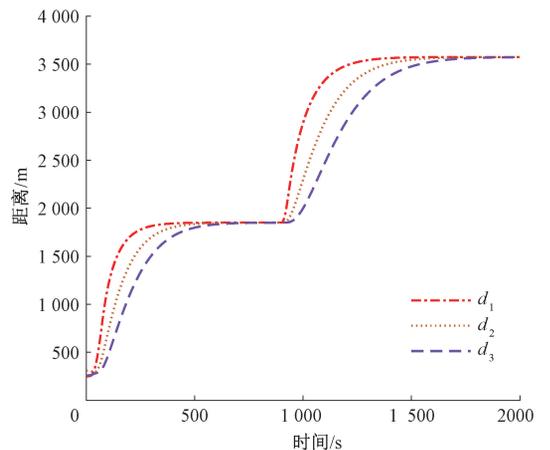


图 4 本文所提协同控制器作用下的安全距离曲线
Fig. 4 The safety distance curve under the action of the proposed cooperative controller in this paper

设 $d_i = x_i(t) - x_{i+1}(t), i = 1, 2, \dots, n - 1$ 为相邻列车之间的追踪间隔。相邻列车追踪间隔演变曲线如图 4 所示。从图 4 中观察到相邻列车的追踪间隔跟随期望速度的变化而收敛至不同的值,随着所有列车的速度不断加快,在 $u_{i2}(t)$ 的作用下,相邻列车的安全距离也会跟随其

一起变长,直到第4列列车在 $t=600\text{ s}$ 追踪到速度 $v_r=50\text{ m/s}$ 时逐渐稳定至 $1\ 850.7\text{ m}$ 。相类似地,在 $t=1\ 600\text{ s}$ 追踪到速度 $v_r=70\text{ m/s}$ 时相邻列车之间的距离逐渐稳定至 $3\ 575\text{ m}$ 。

为了更好地验证所提分布式协同控制器的性能,与文献[7]中所提出的控制策略进行对比。该仿真仍然对4列依次运行的高速列车进行模拟仿真试验,列车运行的基本参数与第1个仿真相同。基于文献[7]中的协同巡航控制器,多列车巡航控制的速度追踪曲线以及追踪间隔曲线分别如图5和6所示。

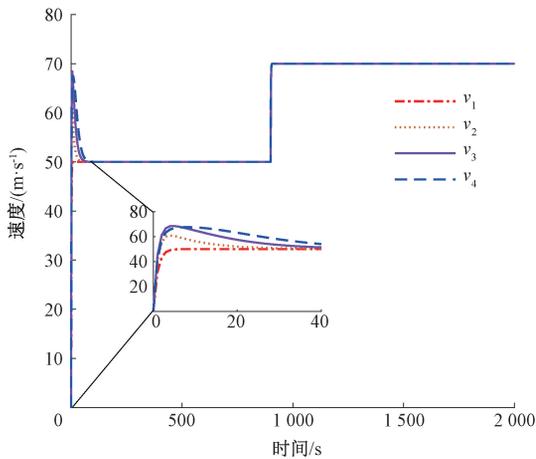


图5 基于文献[7]中协同控制器作用下的速度追踪曲线

Fig. 5 The speed tracking curve under the action of the proposed cooperative controller based on literature [7]

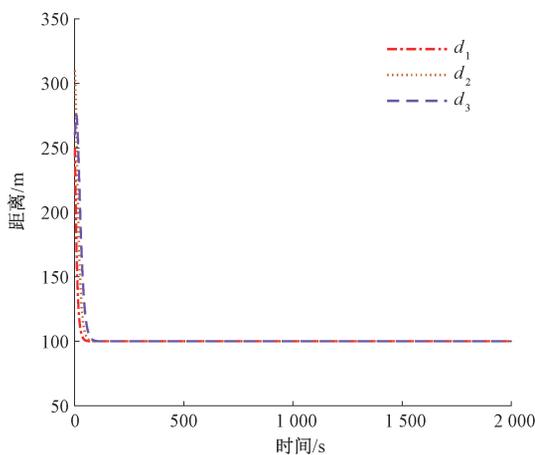


图6 基于文献[7]中协同控制器作用下的安全距离曲线

Fig. 6 The safety distance curve under the action of the proposed cooperative controller based on literature [7]

首先对比分析图3和5可知,文献[7]中采用的控制策略较本文的控制策略(12)使得系统有更快的收敛速度,从图5中观察到,在第1次提速时所有列车收敛至期

望速度轨迹只需 $t=55\text{ s}$ 左右。在第2次加速时,所有列车的运行速度在每个时刻都一样,速度曲线收敛轨迹没发生改变,即在加速完成后就能追踪到期望速度。

其次对比分析图4和6可知,在本文设计的控制策略作用下,列车之间的巡航追踪间距可以根据期望速度动态调节,且整个跟踪过程安全距离变化曲线平滑。而文献[7]中采用的控制策略只能使巡航追踪间距保持在一个固定的数值,对最佳行车密度不太友好,不能灵活的应对现实运行工况下线路容纳量减小的情况。特别的是,文献[7]中采用的协同控制策略需要每一列列车都知道虚拟领导列车的状态信息,因此无论期望速度是否发生变化,每列列车都不会由于速度变化的滞后或者超前,导致相邻列车之间的距离增加或缩短。同时,每一列列车都需要知道虚拟领导列车的状态信息在一定程度上削弱了列车之间的分布式特征,也造成了不必要的通信资源浪费。

最后对比分析多列车协同运行乘客舒适性。基于文献[7]中提出的协同巡航控制策略,从图7中观察到,所有列车的初始加速度都超出了 0.7 m/s^2 ,分别达到 31.61 、 40.93 、 44.82 和 41.77 m/s^2 ,根据新的舒适度评判标准得知已经严重超出纵向冲击下乘车舒适性要求,而且在这种加速度下会给乘客的内脏器官或者精神层面带来更大的压力。从图8中观察到,在本文提出的协同巡航控制策略作用下4辆列车的加速度始终都被限制在 $[-0.7, 0.7]\text{ m/s}^2$ 以内,保障了乘车舒适性。

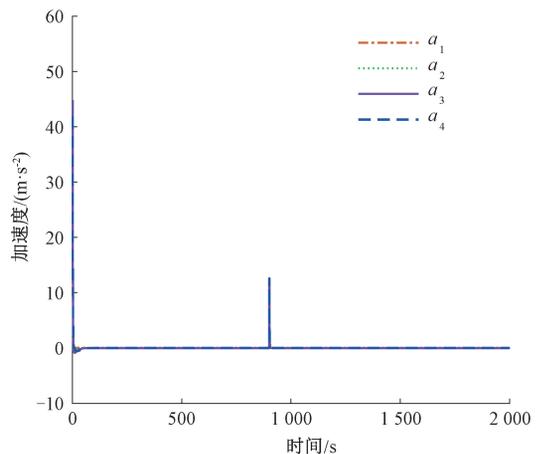


图7 基于文献[7]中协同控制器作用下的加速度曲线

Fig. 7 The acceleration curve under the action of the proposed cooperative controller based on literature [7]

经过上述对比仿真,虽然本文所设计的控制策略在追踪期望速度轨迹上花费了较长的时间,但是曲线收敛轨迹平滑,整个过程中相邻列车之间始终保持安全距离,而且加速度始终处于舒适度范围内。因此在一般情况下,所花费的时间在一个合适的可承受的范围之内。

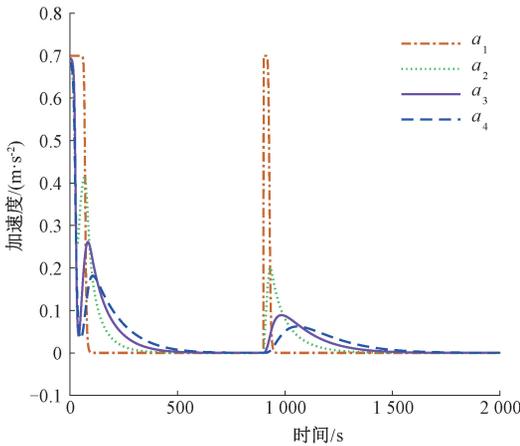


图 8 本文所提协同控制器作用下的加速度曲线

Fig. 8 The acceleration curve under the action of the proposed cooperative controller in this paper

4 结 论

本文研究了考虑安全性和舒适性的多列车协同巡航控制问题。为了解决此问题,在“撞硬墙”运行模式启发下,提出了一种基于改进分布式一致性算法的协同控制策略,使得每列列车都能以期望的速度运行,并能与相邻列车保持对应计算的安全距离。然后采用加权双曲正切函数对协同控制策略进行限制,确保了每列列车的加速度能够始终限制在运行舒适的范围之内。仿真结果验证了本文所提的方法为多列车协同巡航控制问题的研究提供了一种新的有效的思路。此外,本文虽然对运行安全以及舒适性展开了研究,但是没有考虑列车协同运行时的巨大能量消耗,具有节能优化的多列车分布式协同巡航控制问题将是一个有趣的问题,将会在未来进行研究。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张昌凡, 殷晓飞, 刘建华, 等. 高速列车制动力分配优化控制算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3):80-87.
ZHANG CH F, YIN X F, LIU J H, et al. Research on optimal control algorithm for braking force distribution of high-speed train[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3):80-87.

- [3] WANG X, ZHU L, WANG H, et al. Robust distributed cruise control of multiple high-speed trains based on disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 22 (1): 267-279.
- [4] BAI W, LIN Z, DONG H, et al. Distributed cooperative cruise control of multiple high-speed trains under a state-dependent information transmission topology [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(7):2750-2763.
- [5] GAO S, DONG H, NING B, et al. Cooperative prescribed performance tracking control for multiple high-speed trains in moving block signaling system [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(7):2740-2749.
- [6] 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, 2015, 56:281-292.
- [7] LIN P, HUANG Y, ZHANG Q, et al. Distributed velocity and input constrained tracking control of high-speed train systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 51 (12): 7882-7888.
- [8] 张友兵, 陈志强, 王建敏, 等. 高速铁路 ATO 系统控车舒适度技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3):67-71.
ZHANG Y B, CHEN ZH Q, WANG J M, et al. Research on the comfort control technology of the ATO system in high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3):67-71.
- [9] EBOLI L, MAZZULLA G, PUNGILLO G, et al. Measuring bus comfort levels by using acceleration instantaneous values-sciencedirect [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 18:27-34.
- [10] DING T, LIN J, CHEN X. Comfort evaluation and analysis of high-speed train [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1986(1):012089.
- [11] XU J, YIN J, ZHOU Y, et al. Train cooperative control for headway adjustment in high-speed railways [C]. Intelligent Vehicles Symposium. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2017: 328-333.
- [12] 王龙达, 王兴成, 刘罡, 等. 城市轨道交通列车速度曲线预测函数控制改进算法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2):273-283.
WANG L D, WANG X CH, LIU G, et al. An improved predictive function control algorithm for velocity curve of urban rail vehicle [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2):273-283.

- [13] WANG P, HUANG Z, ZHOU F, et al. Comfort-aware cooperative cruise control of multiple high-speed trains: An artificial potential field approach [J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2):15223-15228.
- [14] HUANG Z, WANG P, ZHOU F, et al. Cooperative tracking control of the multiple-high-speed trains system using a tunable artificial potential function[J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022(3639586):11.
- [15] DU S L, XIA W, REN W, et al. Observer-based consensus for multiagent systems under stochastic sampling mechanism[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics, 2018, 48(12):2328-2338.
- [16] LI K P, GAO Z Y, TANG T. Modelling and simulation for train movement control using car-following strategy [J]. Communications in Theoretical Physics, 2011, 55(1):29-34.
- [17] ZHAO S, GAO L, HUANG N. Distributed observers design for leader-following control of nonlinear multi-agent systems with heterogeneous topologies [C]. 2017 36th Chinese Control Conference. Dalian, China; IEEE, 2017: 8317-8323.
- [18] ZHOU F, HUANG Z, GAO K, et al. Distributed cooperative tracking control for heavy haul trains with event-triggered strategy [C]. American Control Conference. Boston, MA; IEEE, 2016: 770-775.
- [19] BAI W Q, LIN Z L, DONG H R, et al. Distributed cooperative control of a high-speed train [C]. 2019 American Control Conference (ACC). Philadelphia, USA; IEEE, 2019:2716-2721.
- [20] LI S, YANG L, GAO Z, et al. Optimal guaranteed cost cruise control for high-speed train movement[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(10):2879-2887.

作者简介



周峰(通信作者),2011年于中南大学获得学士学位,2017年于中南大学获得博士学位,现为长沙理工大学讲师,主要研究方向为智能交通控制等。

E-mail: zhoufengcsu@csust.edu.cn

Zhou Feng (Corresponding author)

received his B. Sc. degree from Central South University in 2011, and Ph. D. degree from Central South University in 2017. Now he is a lecturer in Changsha University of Science and Technology. His main research interests include intelligent transportation control, etc.



陶克武,2020年于湖南文理学院芙蓉学院获得学士学位,现为长沙理工大学硕士研究生,主要研究方向为智能交通控制等。

E-mail: 1034364908@qq.com

Tao Kewu received his B. Sc. degree

from Furong College, Hunan University of Science and Arts in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Changsha University of Science and Technology. His main research interests include intelligent transportation control, etc.



杨迎泽,2003年于中南大学获得学士学位,2006年于中南大学获得硕士学位,2010年于中南大学获得博士学位,现为中南大学副教授,主要研究方向为分布式网络控制系统等。

E-mail: yangyingze@csu.edu.cn

Yang Yingze received his B. Sc. degree from Central South University in 2003, M. Sc. degree from Central South University in 2006, and Ph. D. degree from Central South University in 2010, respectively. Now he is an associate professor in Central South University. His main research interests include distributed network control system, etc.