

基于自适应人工势函数的多列车协同跟踪控制 *

周 峰¹ 涂尔卓² 张 琳³ 刘伟荣⁴ 张晓勇⁴

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院 长沙 410114; 2. 长沙航天学校 长沙 410221;
3. 湖南铁道职业技术学院 株洲 412001; 4. 中南大学电子信息学院 长沙 410083)

摘要:保证高速列车群协同控制中的速度一致性和跟踪区间安全性对提高铁路的营运效率和运行安全十分重要。围绕更高效安全的运行需求,首先根据多列合作的虚拟耦合机制建立了高速列车的动态模型,并利用代数图论构造了列车群的通信拓扑结构;其次,设计了一种基于自适应人工势函数的多列车协同跟踪控制策略。针对安全间距约束问题,设计具有调节能力的势函数,将相对位置误差转化为势能梯度场中的动态补偿量;最后将人工势场法与模糊理论相融合,通过模糊隶属度函数动态修正势场强度系数,使得系统能够动态管理稳定运行状态下的列车的实际间距与期望间距偏差量,根据实际控制需求对安全间距进行灵活调整。通过仿真验证,该方案在控制精度上具有显著优势,所提出的跟踪控制策略可以保证每列高速列车都以要求的速度运行,并在理想的距离范围内跟踪前一列列车,误差控制在-0.12~0.21 km以内,提升了铁路运行效率的同时能够更好适应复杂的运行环境。

关键词:多高速列车;协同巡航控制;模糊控制;人工势场法;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 tracking control of the multiple-high-speed trains system using adaptive artificial potential function

Zhou Feng¹ Tu Erzhuo² Zhanglin³ Liu Weirong⁴ Zhang Xiaoyong⁴

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Changsha Aerospace school, Changsha 410221, China; 3. Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China;
4. School of Electronic Information, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Ensuring the speed consistency and tracking interval safety in the cooperative control of high-speed train group is very important to improve the operational efficiency and operational safety of railroads. Focusing on the demand for more efficient and safe operation, this paper firstly establishes a dynamic model of high-speed trains based on the virtual coupling mechanism of multi-train cooperation, and constructs the communication topology of the train group by using the algebraic graph theory; secondly, a multi-train cooperative tracking control strategy based on adaptive artificial potential function is designed. For the safety spacing constraint problem, a potential function with adjusting ability is designed to transform the relative position error into a dynamic compensation quantity in the potential gradient field; finally, the artificial potential field method is integrated with the fuzzy theory, and the strength coefficients of the potential field are dynamically corrected by the fuzzy affiliation function, so that the system can dynamically manage the deviation of the actual spacing of trains and the desired spacing under the stable operation state, and flexibly adjust the safety spacing according to the actual control demand. The spacing is flexibly adjusted according to the actual control requirements. Through simulation verification, the scheme has significant advantages in control accuracy, and the proposed tracking control strategy can ensure that each high-speed train operates at the required speed and tracks the previous train under the ideal distance range, and the error is controlled within -0.12~0.21 km, which enhances the efficiency of the railroad operation and better adapts to the complex operating environment.

Keywords: multiple high-speed trains; cooperative cruise control; fuzzy control; artificial potential field; safety distance

0 引言

高速列车具有高准点率、运行稳定、方便快捷、大运量、高速度、低能耗等诸多优势,逐渐成为市民出行的首选交通方式,对缓解交通拥堵问题、促进新型城镇化建设、提高交通运输效率具有重要意义^[1]。高速铁路作为国家关键交通基础设施,在区域经济协同发展和公众便捷出行方面发挥着战略支撑作用。随着铁路建设政策的持续深化,运输需求呈现快速增长趋势,这对运营系统的综合效能提出了更高要求。根据《“十四五”铁路科技创新规划》,我国将加大轮轨研发力度,掌握高速铁路更小追踪间隔技术并推广应用,不断完善智能铁路成套技术体系^[2]。当前,我国干线铁路主要采用集中式列车调度控制系统三级(centralized traffic control system level3, CTCS-3)级列控系统,而轨道交通领域广泛应用的基于通讯的列车控制系统技术虽显著提升了线路运输效率,但面对持续攀升的运载量,其最小发车间隔已接近系统设计阈值。因此,如何在轨道交通领域实现列车更高速度、更高密度的追踪运行,已成为轨道交通领域迫切需求。

结合列车协同控制技术,可进一步缩短列车追踪间隔^[3],提高线路的运输能力,解决高峰时段的运输压力^[4]。文献[5]采用车对车通信作为货运列车间数据共享的主要方式,保证虚拟编组技术的实现。基于列车与列车之间通信的协同控制,其核心在于建立精准的跟踪模型,并设计高效的协同策略以驱动列车群以统一速度的运行,同时将与前车的追踪间隔压缩至最小安全范围。随着运载压力的加大和列车速度的提升,如何确保列车安全跟踪间隔,提升运行安全性,已成为当前研究的关键课题。

Wang 等^[6]提出了一种基于扰动观测器的多列高速列车鲁棒分布式巡航控制,以实现运行中的高速列车的期望速度和车头时距。Lin 等^[7]研究了跟踪控制具有速度和输入约束的高速列车离散系统问题。所有列车都能以期望的速度运行,但所设计的控制策略不能满足所有暂态响应下的安全距离要求。基于人工势场和拉萨尔不变集原理,赵凯辉等^[8]设计了一种分布式协同巡航控制策略,以确定系统中的未知参数,使每列列车都能跟踪期望速度并将距离稳定在安全范围内。上述研究均将列车间的间距设定为一个固定的值,只要实际距离与期望距离存在偏差,控制器就会持续调整牵引或制动力以跟踪期望距离。这样的频繁操作加重了控制器的负担,导致的加速度频繁变化也会引发乘客眩晕感,且固定间距无法动态响应突发工况,存在安全风险。

张友鹏等^[9]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,利用相邻车厢的位移和速度信息设计一致性滑模函数使车厢单元快速、精准跟踪目标速度同时使相邻车厢距离保持在安全范围内。周峰等^[10]为了提高多高速列车在协同运行时的安全性以及舒适性,设计了可随列车运行速度实时变化的安全距离间隔,联合加权双曲正切函数给出分布式协同控制策略,该策略能够动态的调节列车之间的安全距离且始终将加速度限制在一定范围之内,确保了多列车跟踪运行的安全性和舒适性。朱爱红等^[11]针对列车运输能力问题提出了一种列车灵活编组方案和短编组小间隔自适应控制方法,基于深度确定性策略梯度满足了列车速度协同要求并将列车安全间隔限制在一定范围以内。李中奇等^[12]设计了改进的基于分布式模型预测控制算法,在运行速度限制、距离限制和控制量限制等约束条件下,通过求解改进的代价指标函数,将距离偏差量控制在一个合理的范围内,有效提高了系统的控制精度与适应性。出于安全考虑,上述研究通常将列车安全间距边界值设定偏大,并要求列车初始间距必须处于该区间内,当列车降速运行时,区间范围仍维持不变,导致实际间距超过必要安全值,制约运输效率提升。

实际列车运行中,由于动态特性复杂且受工况变化影响,难以建立精确的数学模型。传统固定参数控制器难以适应这种动态变化,常导致控制效果下降。而自适应控制能够通过实时追踪列车控制系统的参数变化来动态调节控制指令^[13],使列车在不同运行条件下始终能够维持最佳控制性能。

综上所述,针对列车间的动态耦合特性,为实现速度与位置同步高精度的多列车协同跟踪控制,本文借助列车位置跟踪误差,利用基于位置精度的自适应协同控制方案,当列车实际距离与期望的安全距离相差较大时,列车间距将分布在更加精确的小区间内;当列车实际距离与期望距离较近时,为了避免发生碰撞,列车间距将期望值适当放大,在保障列车运行安全的同时,精准跟踪速度曲线。

1 问题阐述

多列车协同控制与多智能体编队理论具有相似性,通过车间通信网络实现状态共享与协调决策。因此,本研究将多列车系统视为多智能体系统,其中各列车节点具备自主感知与局部决策能力,基于邻车动态信息实时优化牵引/制动策略。

为了研究上述问题,假设由 n 列列车所组成的多智能体系统,其动力学模型描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ m\dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i(t)$ 为列车在 t 时刻的位置; $v_i(t)$ 为列车在 t 时刻的速度; $u_i(t)$ 为列车 i 在 t 时刻所受到的控制输入。

列车群需要通过协同算法的控制下,首先实现各列车间距的精准调控,使其收敛至预设安全值范围内并且能够动态维持;其次需要各列车运动速度达到一致性,逐步消除速度差异以实现相对静止状态。最后在该状态下确保列车运动模式的稳定运行,同时通过实时动态调整避免潜在运动碰撞。为了衡量列车运行是否满足控制要求,在列车速度到达一致性的前提下提升运行效率进一步缩小列车间距,本文所设计的分布式协同跟踪控制目标如下:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_{i+1}(t)\| = d_r \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_j(t) - v_i(t)\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_r - v_i(t)\| = 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_r - x_i(t)\| = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_r 和 x_r 分别为列车的期望速度与期望间距; d_r 为列车期望间距。

针对上述问题,构建高速列车群协同控制系统模型,首先考虑协同控制的核心在于优化列车速度调整、安全间距保持等的纵向运动。这些目标仅依赖牵引/制动系统的协调,故通过运行过程的力学特性分析仅建立列车纵向动力学方程,其次设计基于代数图论的通信拓扑结构表达列车信息交互关系,实现独立运行单元的协同耦合,最终确立多车协同运行的控制目标。

1.1 高速列车纵向动力学模型

针对多列车协同跟踪控制问题,本文研究的多列车运行系统还考虑高速列车在编组数量、列车质量及列车通信能力等关键参数上保持同质化,以消除个体差异对协同控制算法验证的干扰。本文的目标是设计一个协同跟踪控制策略使得每辆列车的速度达到目标收敛值并能够自适应调整相邻列车间距,保证列车运行的安全性与灵活性。

基于以上讨论,将高速列车的纵向运动动力学模型建立如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ m_i \dot{v}_i(t) = u_i(t) - m_i(c_{i0} + c_{i1}v_i(t) + c_{i2}v_i^2(t)) - (3) \\ m_i g \sin \theta - 0.004m_i D \end{cases}$$

式中: m_i 为列车 i 的质量; $x_i(t)$ 为列车在 t 时刻的位置; $v_i(t)$ 为列车在 t 时刻的速度; $u_i(t)$ 为列车 i 在 t 时刻所受到的牵引力与制动力; c_{i0} 、 c_{i1} 和 c_{i2} 为与列车模型相关的经验系数; $c_{i0} + c_{i1}v_i(t)$ 为机械阻力; $c_{i2}v_i^2(t)$ 为空气阻力; θ 为列车的倾斜角; D 为列车轨道段的曲率。

1.2 通信拓扑

多智能体系统中,智能体间的信息传递可以用图论

来建模。将高速列车视为多智能体系统,每列车被视为一个具有位置和速度两种状态的智能体。列车通过通信技术与邻居列车传递状态信息,以此实现多列车分布式协同控制。一个包含 4 列列车协同编队的通信拓扑图如图 1 所示。本文设计的分布式协同跟踪控制策略其优点在于每列车仅需使用自身及前后行列车的状态信息。前后列车首先通过局部信息传递达成局部状态一致,再逐步传递状态,最终实现全局状态一致。

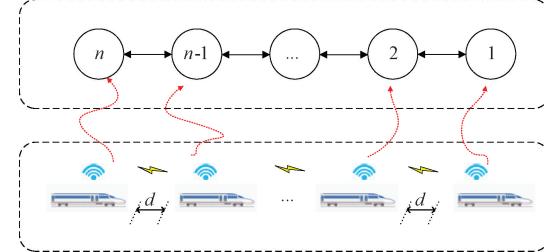


图 1 多高速列车协同巡航控制通信拓扑简化结构

Fig. 1 Simplified structure of multi-high-speed train cooperative cruise control communication topology

一个完整系统的结构模型由图 $G = (V, E)$ 来描述。其中,顶点集 $V = \{1, 2, \dots, n\}$ 指代系统的所有顶点的集合即系统组成单元,边集 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ 指代任意不同顶点间连接边组成的集合。在图 $G = (V, E)$ 中,若顶点集 V 中任意两顶点间均存在边连接,则称 G 为完全图即全连接通信场景。用无序对 $E_{ij} = (v_i, v_j)$ 表示双向连接,如两列列车的实时数据共享。本文采用图论方法对列车通信网络进行建模分析,将每列车视为通信网络中的独立节点,车车/车地通信链路映射为节点间的连接边,并且所有节点支持点对点双向通信。

用邻接矩阵 A_{ij} 来表示图中顶点与边的关系, $A_{ij} = [a_{ij}]_{n \times n}$ 中的元素 $a_{ij} = 1$ 表示顶点 v_i 与 v_j 间存在通信链路且运行正常;元素 $a_{ij} = 0$ 表示两顶点间无直接通信路径;若元素不需要和自身通信,则 $a_{ii} = 0$ 。

2 多高速列车协同跟踪控制策略设计

根据 1.1 所提出的列车动力学模型,为了实现高速列车群的速度一致性和安全间隔距离,采用了一种协同跟踪控制策略。基于人工势场理论,本文依据列车实时运行状态动态调整列车间距。所有高速列车采用一致性算法实现运行控制。图 2 展示了该协同控制策略的简化流程。

2.1 基于人工势场法的协同控制

人工势场(artificial potential field, APF)是多智能体协同控制领域常用的一种控制算法^[14],该方法通过构建虚拟的力场环境,将目标区域设定为吸引力场,将障碍区

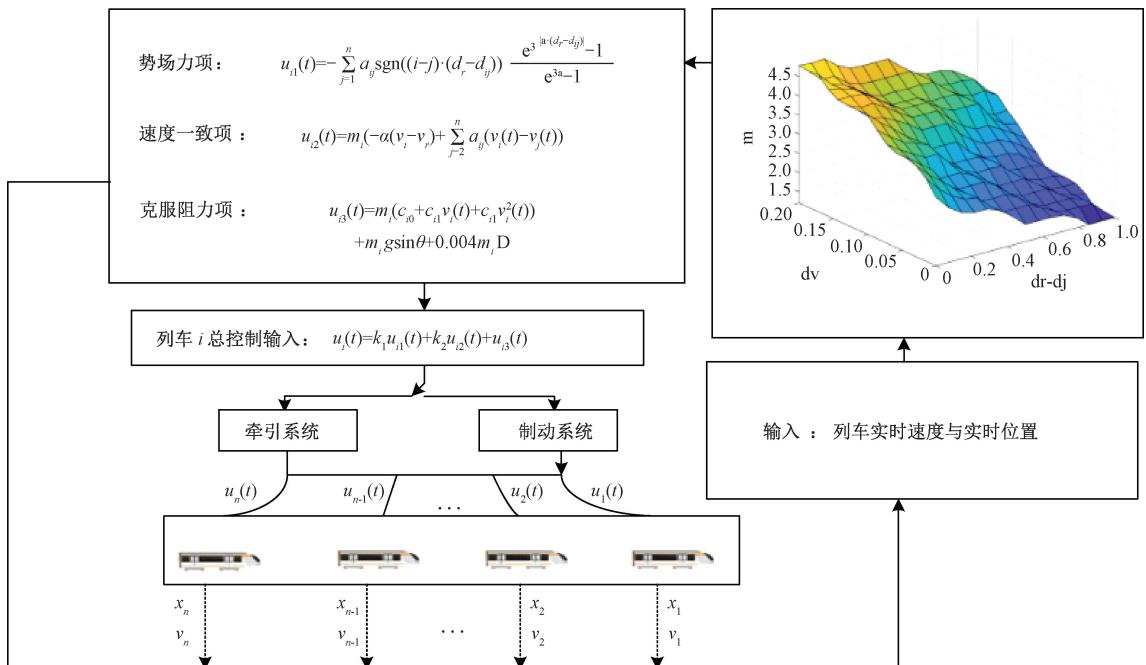


图 2 多高速列车协同巡航控制流程

Fig. 2 The cooperative cruise control flowchart of the multiple high-speed trains

域则形成斥力场。具体来说就是当列车到达目标区域,接近预定目标终点时,吸引力场的引力作用将促使车辆加速靠拢;当与前方列车距离过近时,斥力场发挥作用自动触发减速机制,保证列车间不会发生碰撞。通过这两种力的综合作用,系统能够动态调节列车运行状态,最终实现所需要达到的控制目标。在多智能体系统中,对于目前所研究的智能体来说,相邻的智能体既是不能碰撞的障碍物也是控制方,它们之间需要保持稳定的距离才能完成协同运动^[15]。

多列车协同跟踪控制需在防撞安全与间隔优化间实现动态平衡,考虑到最重要的运行安全要求,当车距小于安全阈值时,必须产生足够的反向作用力来扩大间距,且作用强度需随间距缩减程度动态增强。为此,应重点构建基于列车间距模型,对一致性算法中的距离项结合人工势场方法进行优化处理。建立精准的势函数模型是人工势场设计的核心,本文通过建立与距离相关的势能方程,确保列车间距动态调整过程中安全间距的严格满足与控制响应的渐进平滑,为列车运行提供安全可靠的调控基础。

基于势函数在平衡状态距离处势能最小的特性,所构建的势函数特征在于,期望间距是该势场中势能最低点,相应的此处施加的作用力为 0。当实际间距超过设定值时,势场生成吸引力驱动后车加速缩短间距;当间距低于安全间距时,势场转换为排斥力迫使后车减速拉大间隔。该机制通过势能梯度动态调节控制强度,既保障

列车运行安全又实现运行效率优化。本文所设计的势函数所产生的力表达如下:

$$F_p(d_{ij}) = \operatorname{sgn}(d_{ij} - d_r) \frac{e^{3^{|a \cdot (d_{ij} - d_r)|}} - 1}{e^{3^a} - 1} \quad (4)$$

式中: d_r 在本文中设定为 7.4 km; d_{ij} 为列车 i 与列车 j 的实时距离; a 为正权重系数, 权重系数的大小将直接影响到势函数的形状与性能。适当的增大权重系数, 将进一步放大引力或斥力对于智能体的作用力, 在斥力与引力的共同作用下, 智能体在势场中的移动将变得更加有效。

基于人工势场法的协同运行控制,首先,将所设计的势函数用来设计控制分量,控制相邻列车之间的间距,控制策略如下:

$$u_{ii}(t) = -\sum_{j=1}^n a_{ij} \operatorname{sgn}((i-j)(d_r - d_{ij})) \frac{e^{3^{|a \cdot (d_{ij} - d_r)|}} - 1}{e^{3^a} - 1} \quad (5)$$

式中: $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$; d_r 为列车之间的期望间距距离; d_{ij} 是列车之间的实际间距距离。本文势函数产生的控制输入取决于 a 的大小, 它直接影响列车对距离的跟踪能力。

其次,在高速列车群运行环境下,每列车可实时感知邻近列车的运行状态^[16]。借助列车间的协同协作,形成统一的运行模式。基于其一致性算法实现列车的速度控制,控制策略如下:

$$u_{i2}(t) = m_i(-\alpha(v_i - v_r) + \sum_{j=1}^n a_{ij}(v_i(t) - v_j(t))) \quad (6)$$

式中: x_i 和 v_i 分别为位移和速度; a_{ij} 表示通信关系, 参数 $\alpha > 0, k_{ij} > 0, \beta > 0$ 。该算法的控制目标是当 $t \rightarrow \infty$ 时, $|x_i - x_j| \rightarrow 0, |v_i - v_j| \rightarrow 0$ 列车的位移与速度均达到一致性收敛状态。设计者依据列车运行性能的相关要求完成参数 α 的设置, 若当参数 α 取值较大时, 则每列车将优先实现个体速度向目标值的快速趋近, 最终以一致的期望速度运行; 若当参数 α 取值较小时, 将优先驱动全队列车达成速度协同状态, 以群体同步的模式来逼近目标速度。

最后, 考虑到高速列车运行过程中需要克服的阻力, 设计控制分量 $u_{i3}(t)$:

$$u_{i3}(t) = m_i(c_{i0} + c_{i1}v_i(t) + c_{i2}v_i^2(t)) + m_i g \sin \theta + 0.004 m_i D \quad (7)$$

式中: m_i 是第 i 列列车的重量; $m_i(c_{i0} + c_{i1}v_i(t))$ 是滚动摩擦阻力; $c_{i2}v_i^2(t)$ 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} 是从风洞试验得到的阻力系数。

综上所述, 列车协同控制策略如下:

$$u_i(t) = k_1 u_{i1}(t) + k_2 u_{i2}(t) + u_{i3}(t) \quad (8)$$

式中: $u_{i1}(t)$ 为距离安全项, 根据列车实时运行速度动态调整理想的安全间距; $u_{i2}(t)$ 为速度一致项, 使得每一列列车都能够精准跟踪目标速度; $u_{i3}(t)$ 为阻力抵消项, 克服高速列车在运行过程中所受到的阻力。在列车协同跟踪控制策略(7)中包含两个系数 k_1, k_2 , 当系数值调整时, 控制系统表现也会随之改变。若将 k_1 的值设置得相对较大, 则高速列车群系统对列车间距的安全性要求更高; 若将 k_2 的值设置得相对较大, 则高速列车群系统对列车速度一致性的要求更高。

2.2 基于模糊控制的自适应算法

分析式(4)中的性质, 假设 $d_r = 10$ 并将参数 a 的值分别设置为 1、3、5。人工势函数随着实际距离变化如图 3、4 所示。

可以看出, 列车间距的偏差绝对值与势场强度呈单调递增关系, 即随着实际间距与期望值的扩大, 势场作用力呈现逐渐增强。当列车间的实际间距大于 d_r 时, 势场力大于 0, 此时协同控制输入表示为牵引力, 驱动后车加速; 当列车间的实际距离小于 d_r 时, 协同控制输入表示为排斥力, 迫使后车减速; 当列车间的实际距离与 d_r 相匹配时, 势场产生的势能最小且控制输入量为 0, 列车控制系统维持当前运行状态。

手动设置权重值来平衡不同特征或目标函数之间的重要性的静态权重设置方法无法适应不同数据分布和问题特性的变化, 导致算法在某些情况下表现不佳^[17]。为了解决这一问题本研究提出一种融合动态势场与模糊决策的列车协同控制方法, 通过整合牵引/制动控制变量与

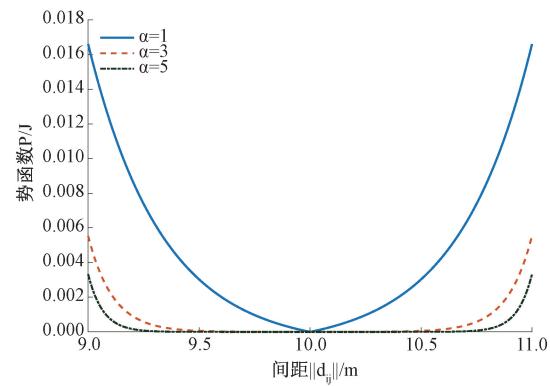


图 3 人工势函数随实际距离 d_{ij} 的变化曲线

Fig. 3 Plot of artificial potential function with actual distance d_{ij}

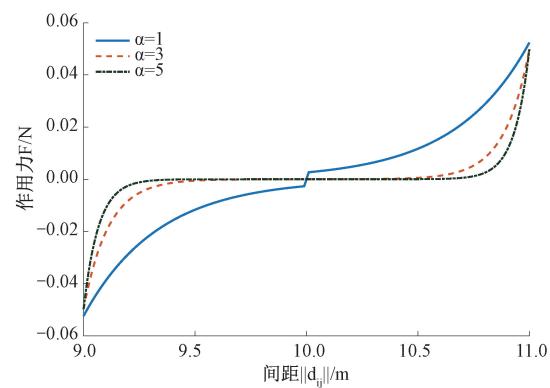


图 4 人工势场产生的力 $F_p(d_{ij})$ 随实际距离 d_{ij} 的变化曲线

Fig. 4 The curve of the force $F_p(d_{ij})$ generated by the artificial potential field with the actual distance d_{ij}

列车状态交互信息, 实现安全追踪与运行效能的动态平衡。区别于传统固定权重分配方式, 采用表 1 中的模糊逻辑实时调节控制参数权重, 结合人工势场法生成动态列车安全区间再经模糊推理模块输出最优控制指令, 得到最终的协同控制策略。

表 1 人工势场权重 a 的模糊规则

Table 1 a inference rules of artificial potential field

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB
NM	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB
NS	NS	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
PM	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO	PS
PB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO

将期望距离同实际距离之间的误差绝对值和列车期望速度的变化率绝对值描述成模糊输入。在列车跟踪过程中, 列车跟踪决策主要依据前后车速度差与距离偏离

差决定加速或减速。当列车实际距离与期望的安全距离相差较大时,列车跟踪收敛至稳定状态需要做出更大的调整。为了提升铁路运行效率,列车间距需要有一个更加精确的收敛小区间。此时 a 应该是一个较小的值;当列车实际距离与期望距离较近时,为了避免发生碰撞,此时 a 应该是一个较大的值。而当速度的变化率绝对值较大时,为了方便能够快速让各列车速度趋于一致,此时将 a 设定为一个较大的值;当速度的变化率绝对值较小时,为了确保加速度的稳定,减小列车速度的频繁调整,此时 a 应该是一个较小的值。

3 数值仿真与结果分析

使用 MATLAB 2022a 验证所提可调势函数的多高速列车自适应协同跟踪控制策略。列车初始状态如表 2 所示。

表 2 各列车的初始位置和初始速度

Table 2 The initial position and initial speed of each train

i	train1	train 2	train 3	train 4	train 5
$x_i(t_0)/\text{km}$	57.3	49.8	42.7	35.3	28.5
$v_i(t_0)/(\text{m/s})$	68	60	45	49	12

根据图 1,本文的列车集邻接矩阵如下:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

k_1 、 k_2 为决定各部分输出值的正参数。 a_{ij} 是与多列车系统拓扑相对应的邻接矩阵。每一列列车的质量均为 400 000 kg^[18]。本文选择在一条高速铁路正线上有序运行的 5 列高铁列车,忽略中间有列车合流或出线的意外情况。列车运行相关系数如表 3 所示。

表 3 高速列车参数

Table 3 Parameters of high-speed trains

Symbol	Value	Unit
m_i	400	t
c_{i0}	0.011 76	N/kg
c_{i1}	0.000 776 16	Ns/mkg
c_{i2}	0.000 016	$\text{Ns}^2/\text{m}^2\text{kg}$

为了更好的仿真验证,本文将期望间距设置为 7.4 km。控制策略(7)中的系数 k_1 和 k_2 分别设为 1 和 0.05。仿真时间 6 000 s,假设列车在运行过程中经历一个加速阶段和一个减速阶段。其参考速度由式(9)给出:

$$v_r = \begin{cases} 65 \text{ m/s}, & 0 \text{ s} < t \leq 2000 \text{ s} \\ 73 \text{ m/s}, & 2000 \text{ s} < t \leq 4000 \text{ s} \\ 70 \text{ m/s}, & 4000 \text{ s} < t \leq 6000 \text{ s} \end{cases} \quad (10)$$

在仿真开始阶段,由于高速列车运行状态差异,所有列车在不同的加速度下进行加速或减速,根据控制策略(8)的计算结果产生相应的牵引力或制动力。相邻列车之间的安全距离将根据后车实时速度进行动态调整,确保列车群在变速过程中的运行安全,随着控制策略的持续影响,全部列车将逐步收敛至期望速度,安全间距同步稳定。每列列车之间的速度误差曲线与追踪间隔曲线分别如图 5、6 所示。

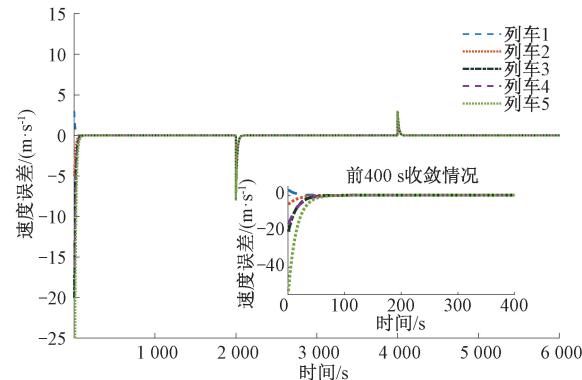


图 5 本文协同跟踪控制策略下的各列车速度误差曲线

Fig. 5 The speed error curve of each train under the cooperative tracking control strategy in this paper

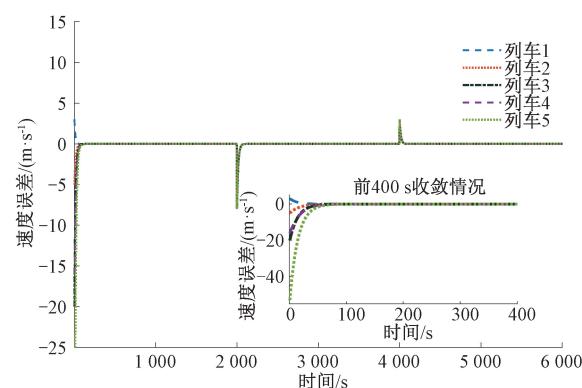


图 6 本文协同跟踪控制策略下的各列车距离曲线

Fig. 6 This paper presents the distance curves of each train under the collaborative tracking control strategy

由图 5 可知,在人工势场的作用下,各列车在初始阶段展现出快速的速度调整能力,80 s 即收敛至 65 m/s 目标值,最大速度误差不超过 5 m/s。当运行至 2 000 s 时,参考速度提升至 73 m/s,所有列车在短短 10 s 内完成跟踪,速度误差控制在 8 m/s 以内。后续 4 000 s 的速度下

调至70 m/s同样在30 s内平稳过渡。全程速度误差维持在负25 m/s至正5 m/s的合理区间,特别是3 000 s后的稳态阶段,误差始终低于 ± 3 m/s。在本文所设定的控制策略下,列车稳态间距在收敛前分布在期望数值的一个小范围内,这是由于在模糊控制的作用下,可调势函数的参数值在列车运行状态改变的过程中进行了自适应调整,从图6中观察到偏差始终维持在-120~210 m。

为验证本文所提自适应协同跟踪控制策略性能,在初始状态和系统参数相同的情况下,将对文献[19-20]的控制策略进行模拟仿真实验。

应用文献[19]的协同跟踪控制策略至列车群系统,仿真结果如图7、8所示。固定间距策略表现出明显的振荡特性,初始阶段出现剧烈速度波动,最大负误差达到48 m/s,直至150 s才实现65 m/s的速度收敛。随后间距稳定收敛于7.4 km且始终精准保持在此期望值上。该策略缺乏自适应机制,无法抑制误差沿列车传递的积累,列车运行初期的多次明显震荡与较大的超调对于乘客乘坐舒适性指标有巨大影响。除此之外,一旦所有的高速列车都达到一致状态,无论期望的速度如何变化,相邻列车之间的距离都不会改变。

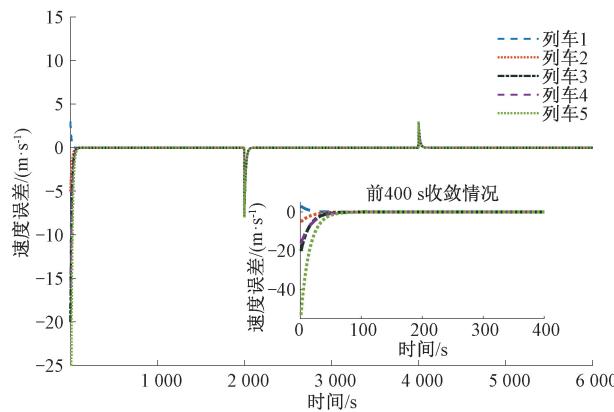


图7 应用文献[19]的协同跟踪控制策略下的各列车速度误差曲线

Fig. 7 Apply the speed curves of each train in the cooperative tracking control strategy in reference [19]

应用文献[20]的协同跟踪控制策略至列车群系统,仿真结果如图9、10所示。在初始加速阶段,由不同的状态偏差,列车呈现出渐进但迟缓的收敛过程,列车耗时320 s才达到速度同步,比本文方法慢4倍。速度误差范围在-30~5 m/s,头尾车最大偏差达35 m/s,表明协同控制效果不足且在列车速度遇到突变时,恢复过程耗时最长。运行初始阶段虽然较文献[19]方法避免了剧烈震荡,但收敛速度更为缓慢。列车间距方面,基于统一设定的安全距离边界值,即便期望速度发生切换,相邻列车之

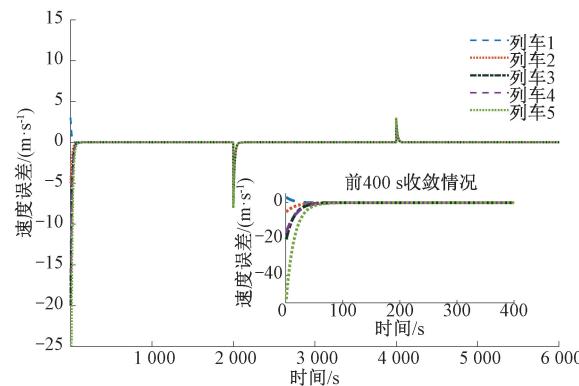


图8 应用文献[19]的协同跟踪控制策略下的各列车距离曲线

Fig. 8 Speed error profile of each train under the application of the cooperative tracking control strategy in reference [19]

间仍无需进行距离调节操作。列车间距在320 s后列车间距始维持在一个安全范围7.32~8.79 km之内。对比本文方案,其核心问题在于安全边界调整滞后,列车在速度变化时适应时间较长,远不及本文的响应速度,实际运行过程中可能导致无法及时压缩安全区间的情况。此外,若实际车间间距大于期望安全距离,主要影响线路运输效能,不会直接危及行车安全。然而对于列车运行安全性要求,若实际车间间距小于期望安全距离时,将无法满足紧急制动所需的缓冲空间,在突发工况下存在追尾的风险。

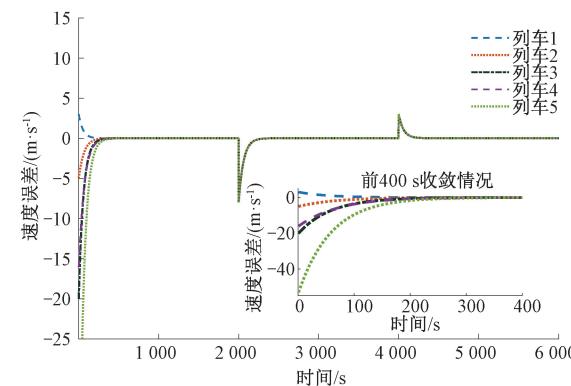


图9 应用文献[20]的协同跟踪控制策略下的各列车速度误差曲线

Fig. 9 Speed error profile of each train under the application of the cooperative tracking control strategy in reference [20]

为了更好的比较3种控制策略,选取收敛时间、最大距离超调与距离收敛区间3项指标进行分析,具体结果如表4所示。由表4可知,本文所提出的方法具有最小的距离超调量,能更加快速准确地跟踪目标速度曲线。

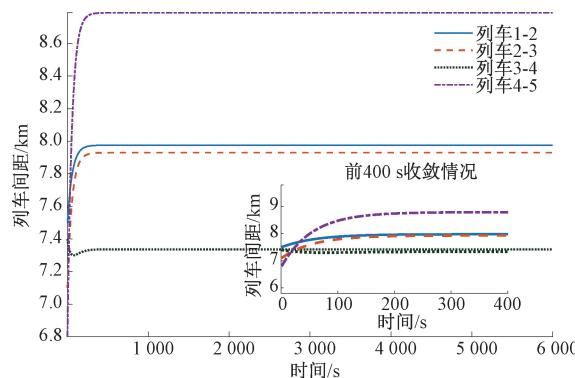


图 10 应用文献[20]的协同跟踪控制策略下的各列车距离曲线

Fig. 10 Apply the distance curves of each train in the cooperative tracking control strategy in reference[20]

此外,在距离收敛区间方面,相较于文献[19-20],本文所提出的方法列车稳态间距在收敛前分布在期望数值的一个小范围内,既能够保证列车不发生碰撞,也提升了铁路运行效率,更加符合实际运行需求。借助人工势场法实时调控的快速性,列车收敛至期望值的时间也十分迅速。在参考速度发生阶跃变化的3种不同工况下,6 000 s 内各列车间距的平均稳态误差始终保持在 0.21 km 以内,充分验证了控制算法具有很好的鲁棒性系统,能在不同运行速度下维持稳定的距离跟踪精度。综上所述,本文提出的协同跟踪控制策略列车在运行期间能够跟踪期望距离的同时,可以针对列车运行状态,更加安全高效的分配运行安全间距,仿真结果表明,该方法在控制精度与灵活度上具有显著优势,列车能够更好的适应复杂的运行环境。

表 4 不同控制策略下的各指标比较

Table 4 Comparison of various indicators under different control strategies

控制策略	收敛时间	最大距离超调量	距离收敛区间	距离平均稳态误差
文献[19]	150 s	5.43 km	7.40 km	[0,0,0,0] km
文献[20]	320 s	1.41 km	[7.32~8.79] km	[0.58,0.53,0.12,1.39] km
本文	80 s	0.21 km	[7.28~7.61] km	[0.21,0.11,0.01,0.13] km

4 结 论

本文针对高速铁路高密度运营场景下的列车协同控制难题,突破传统固定间隔控制模式的约束,通过引入可调人工势函数建立列车间距的动态调节机制,将安全距离拓展为自适应的弹性区间。研究融合了模糊算法与人工势场理论,设计势能函数描述列车间距偏差,使得列车回归安全运行区间;针对势场参数静态设置的局限性,创新性地引入模糊控制理论构建双输入单输出的自适应调节器,以前后车距偏差和速度变化率为模糊变量,实现势场强度系数的动态优化分配,使系统具备工况自适应的间距调节能力,在高速场景下的间距波动幅度降低至 ± 210 m 以内。未来将对列车群在通信非理想状态下的最优分布式协同控制设计进一步研究探讨。

参考文献

[1] 罗劲文. 新型城镇化背景下综合轨道交通一体化建设需求分析[J]. 山西建筑, 2018, 44(15):15-16.

LUO J W. Analysis of the demand for integrated comprehensive rail transit construction in the context of new urbanisation [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(15): 15-16.

[2] 国家铁路局. “十四五”铁路科技创新规划[J]. 铁道

技术监督, 2022, 50(1):9-15,20.

National Railway Administration. 14th five-year plan for railway science and technology innovation [J]. Railway Technology Supervision, 2022, 50(1):9-15,20.

[3] QUAGLIETTA E, WANG M, GOVERDE R M P. A multi-state train-following model for the analysis of virtual coupling railway operations [J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2020, 15: 100195.

[4] DUAN H, YANG Y, DUAN Y, et al. Research on virtual coupling train operations based on moving-block and vehicle-to-vehicle communication [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020.

[5] MORENO J, RIERA J M, DE HARO L, et al. A survey on future railway radio communications services: Challenges and opportunities [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(10): 62-68.

[6] 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, 2021, 22 (1): 267-279.

[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] 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 Co-tracking Control Method for High-speed Trains [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (9) : 12-20.

[9] 张友鹏, 金煜翔, 杨军霞, 等. 高速列车分布式 super-twisting 滑模控制研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (11) : 187-196.

ZHANG Y, JIN Y, YANG J, et al. Research on Distributed Super-Twisting Sliding Mode Control for High-Speed Trains [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (11) : 187-196.

[10] 周峰, 陶克武, 杨迎泽, 等. 面向乘客舒适性的多列车协同巡航控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (2) : 151-159.

ZHOU F, TAO K W, YANG Y Z, et al. Multi-train cooperative cruise control for passenger comfort [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (2) : 151-159.

[11] 朱爱红, 田晓晴, 何明. 列车大小交路通信协同运行自适应控制方法 [J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21 (3) : 969-979.

ZHU AI H, TIAN X Q, HE M M. Adaptive control method for coordinated operation of large and small train routes [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21 (3) : 969-979.

[12] 李中奇, 裴玲玉, 杨辉. 虚拟编组列车的分布式协同预测控制 [J]. 交通运输工程学报, 2024, 24 (5) : 362-378.

LI ZH Q, ZHONG L Y, YANG H. Distributed cooperative predictive control of virtual train formation [J]. Journal of Transportation Engineering, 2024, 24 (5) : 362-378.

[13] 孙非, 崔特, 曹宇赫, 等. 基于模糊反馈线性化和自适应扩张状态观测器的 USM 六自由度镇定控制 [J]. 仪器仪表报, 2024, 45 (5) : 311-318.

SUN F, CUI T, CAO Y H, et al. Six-degree-of-freedom stabilisation control of USM based on fuzzy feedback linearisation and adaptive expansion state observer [J]. Instrumentation and Measurement, 2024, 45 (5) : 311-318.

[14] WANG H, ZHAO Q, LIN S, et al. A reinforcement learning empowered cooperative control approach for IIoT-based virtually coupled train sets [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17 (7) : 4935-4945.

[15] LIU J, LI Y, YANG Z. A dynamic sliding mode control method for multi-agent formation [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1754 (1) : 012101.

[16] 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.

[17] 贺忠海, 朱温涵, 陈旭旺, 等. 基于自适应密度聚类的多准则主动学习方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45 (3) : 179-187.

HE ZH H, ZHU W H, CHEN X W, et al. Multi-criteria active learning method based on adaptive density clustering [J]. Journal of Instrumentation and Measurement, 2024, 45 (3) : 179-187.

[18] XUN J, YIN J, LIU R, et al. Cooperative control of high-speed trains for headway regulation: A self-triggered model predictive control based approach [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 102 : 106-120.

[19] 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.

[20] 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.

作者简介



周峰, 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: zhoulengcsu@csust.edu.cn

Zhou Feng 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.



涂尔卓, 2022 年于湖南文理学院获得学士学位, 2025 年于长沙理工大学获得硕士学位, 现为长沙航天学校讲师, 主要研究方向为智能交通控制等。

E-mail: 578417390@qq.com

Tu Erzhuo received his B. Sc. degree from Hunan University of Science and Arts in 2022, and M. Sc. degree from Changsha University of Science and Technology in 2025. Now he is a lecturer in Changsha Aerospace School. His main research interests include intelligent transportation control, etc.



张琳(通信作者), 1994 年于大连交通大学获得学士学位, 2011 年于武汉理工大学获得硕士学位, 现为湖南铁道职业技术学院副教授, 主要研究方向为电力机车控制等。

E-mail: 10482672@qq.com

Zhang Lin (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Dalian Jiaotong University in 1994, and M. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2011, respectively. Now she is an associate professor in Hunan Railway Professional Technology College. Her main research interests include electric locomotive control, etc.