

基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线生成方法

刘宏杰^{1,2}, 郎颖辉¹, 张蕾^{1,3}, 唐涛⁴

1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044
2. 北京交通大学轨道交通运行控制系统国家工程研究中心, 北京 100044
3. 交控科技股份有限公司交控研究院, 北京 100070
4. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044

摘要 面向虚拟编组在城市轨道交通中的应用需求, 提出了对虚拟编组列车运行具有重要影响的停站时间不同步问题, 并定义了停站时间差的计算方式; 在分析相关领域多智能体协同控制方法的基础上, 提出了基于信息汇总集中决策型协同控制方式的虚拟编组列车参考曲线生成方法; 构建了虚拟编组列车参考曲线生成问题的数学优化模型, 并设计了基于强化学习 DQN (deep Q network) 的求解方法, 在考虑全局优化目标的基础上为每一个列车单元生成各自的参考曲线, 指导各列车单元协同运行控制实现虚拟编组列车整体运行的目标; 基于北京地铁 11 号线真实数据进行了数值仿真实验并与既有文献中的虚拟编组列车运行控制方式进行了对比, 实验结果验证了所提基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线生成方法的有效性。

关键词 城市轨道交通; 虚拟编组列车; 协同控制; 参考曲线; 强化学习

随着中国大中型城市都市圈的成型和城市轨道交通建设的推进, 越来越多的人采用城市轨道交通这一安全便捷高效的交通方式作为通勤的首选手段^[1]。但在城市轨道交通发展过程中, 载客量逐年增加, 呈现出客流时间空间分布不均匀的特性。

传统列车运行组织方式存在高峰期客运量饱和、乘客无法上车, 低谷期空载率过高、能量利用率过低的问题, 一方面, 为乘客的出行造成很大不便; 另一方面, 能源的浪费也不符合绿色城轨发展理念^[2-3]。在这种情况下, 虚拟编组列车凭借其编组调整的灵

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2022JBQY001); 北京市自然科学基金项目(L201004); 城市轨道交通北京实验室项目; 中国铁道科学研究院集团有限公司项目(2021YJ149)

作者简介: 刘宏杰, 副研究员, 研究方向为列控系统设计与集成与优化, 电子信箱: hjlju2@bjtu.edu.cn

引用格式: 刘宏杰, 郎颖辉, 张蕾, 等. 基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线生成方法[J]. 科技导报, 2023, 41(10): 62-72; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.10.005

活性和对现有基础设施改造要求小等特点引起了人们的关注^[4],成为城市轨道交通未来的发展方向之一。

虚拟编组列车由2个(含多个)具有牵引制动能力的列车单元构成,由3个列车单元构成的虚拟编组列车示意如图1所示,图中每一个部分称为一个列车单元,整体称为一个虚拟编组列车^[5]。虚拟编组列车的列车单元之间取消了传统列车车厢之间的车钩连接,通过车车通信和主动控制方式实现虚拟连接。通过先进的控制方式,列车单元间可以维持较小的间隔稳定运行,因此,从列车运行组织

和乘客服务角度看,虚拟编组列车等同于一辆物理编组列车,能够实现与物理编组列车类似的乘客运输服务的功能和性能。同时,受益于列车单元间虚拟连接的灵活性,可根据客流量的动态变化实时灵活编组或解编(调整虚拟编组列车所包含的列车单元数量),达到运力运量匹配和绿色运行的目的。已有研究指出,虚拟编组技术的发展为快慢车运行、运行图优化等运行调整技术提供了更大的发挥空间^[5-8]。为便于阅读,如无特别说明,下文前车和后车分别指虚拟编组列车中位于前方的列车单元和后方的列车单元。

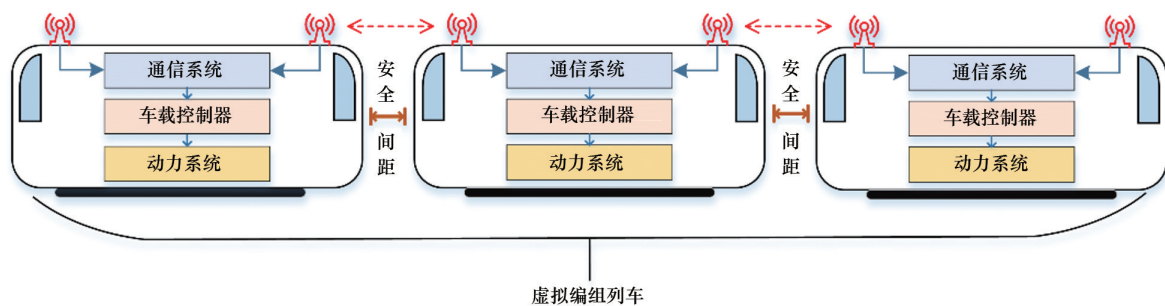


图1 虚拟编组列车结构示意图

先进的控制方式是实现虚拟编组列车安全平稳运行的前提和关键^[9-11]。既有虚拟编组列车运行控制普遍采用独立分步规划和控制的方式,即前车根据运行计划独立规划其参考曲线,并控制本车运行,后车实时接收前车的状态信息,将最小距离追踪前车作为控制目标,在两车安全间隔的约束下规划自身参考曲线并控制后车运行。在这种方式下,由于前车规划参考曲线时未考虑后车的实际状态和追踪能力,因此难以保证后车追上前车和保持两车同步运行。在城市轨道交通中实际应用时,虚拟编组列车表现最突出的问题是两车停车时间不同步,即前车在站台停车的时间至后车停稳的时间差值过大,从而影响虚拟编组列车在站台的有效作业时间,或无法做到所有列车单元同步开关车门和乘客上下车,不满足城轨列车在站台的作业要求。因此,实现虚拟编组列车单元间同步停车是虚拟编组技术在城市轨道交通实际应用中亟待解决的问题。

针对上述问题,本文结合城市轨道交通列车运行控制分为规划和控制两层的特征,在综合分析相关协同控制方式的基础上,将信息汇总集中决策型协同控制方式引入虚拟编组列车曲线规划部分,从虚拟编组列车整体需求出发,生成满足整体运行指标的所有列车单元的参考曲线,从而在跟踪控制层不需改变的情况下即可实现所有列车单元的协同运行,通过简洁易行的方式解决虚拟编组列车单元间停车不同步的问题。

1 既有虚拟编组列车运行控制方式及问题

1.1 既有虚拟编组列车运行控制方式

目前虚拟编组列车的运行控制普遍采用各列车单元独立分步规划和控制的方式,其基本原理如图2所示,即前车根据运行计划规划其参考曲线并控制本车运行,后车实时接收前车的状态信息,将

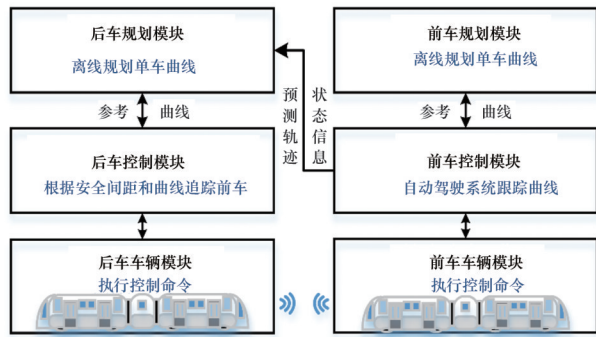


图2 独立分步规划和控制模式示意

最小距离追踪前车作为控制目标,在两车安全间距的约束下规划自身参考曲线并控制后车运行。该运行控制方式因其清晰的控制层次,逐渐成为虚拟编组研究中普遍使用的控制方式。一些学者已经基于这种控制模式开展了研究工作,例如,文献[12]研究了基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的方法,实现了各列车单元的小间距追踪运行;文献[13]针对虚拟编组列车巡航运行过程,提出了一种基于最优控制的方法,保证了列车单元追踪间距的队列稳定性;文献[14]设计了基于分布式MPC的追踪控制方法,能够实现虚拟编组列车稳定追踪。

1.2 站台停车不同步问题

既有列车运行控制方式能够较好地实现虚拟编组列车单元在站间的小间隔追踪运行,但对于列车进站停车过程的需求关注不足,主要表现为列车单元间的停站时刻不一致(站台停车不同步)。为便于表述,将虚拟编组列车在站台停车时,前车停车时刻与后车停车时刻差值的绝对值称为停站时间差,计算公式为

$$T_s = |t_s^1 - t_s^2| \quad (1)$$

式中, t_s^1 、 t_s^2 分别为前、后车在站台的停车时刻,下标 s 表示停车(stop),上标表示列车单元的编号,其中 1 表示前车、2 表示后车; T_s 为两车的停站时间差。

值得说明的是,虽然此处所提的虚拟编组列车只包含 2 个列车单元,但可很容易扩展至包含多个列车单元的情形。虚拟编组各列车单元在同一站

台的停站时间差过大、超过站台作业能够容忍的极限时称为列车单元停车不同步。列车单元停车不同步的客观表现是前、后车的停车时刻差异过大,无法满足城市轨道交通列车在站台同时开/关车门等作业需求,或者需要等最后一个列车单元停稳后才能打开车门进行乘客乘降,影响站台作业效率。结合在站台作业时虚拟编组列车等同于物理编组列车的需求以及虚拟编组列车运行控制技术的实际发展情况,通常期望列车单元间的停站时间差应该小于 $2 \text{ s}^{[15]}$ 。

现有的虚拟编组列车独立分步规划和控制方式中,前车在制定自身运行策略时没有考虑后车的状态和追踪能力,仅依靠后车的追踪能力实现虚拟编组列车的控制目标。但是,作为安全-苛求系统,为了保证追踪过程中安全性,后车需要始终和前车保持一定的安全距离。一方面,受限于列车安全防护的特征,上述安全距离具有随两车速度增大而增大的基本特征;另一方面,受限于站台长度的限制等因素,期望在站台停车时列车单元能够保持非常小的间距。因此,虚拟编组列车站间运行必然面临随着出站时速度增高而增大两车间距、在进站时随着速度降低而减小两车间距的过程。在传统前车运行完全不考虑后车控制能力的运行控制方式下,存在后车难以追踪前车、进而存在较大停站时间差的问题。两车进站停车阶段的时空关系和停站时间差如图 3 所示。

综上所述,虚拟编组列车单元的站台停车不同步问题主要有 3 方面原因:一是独立分步规划和控制方式下前车运行控制方式未考虑后车的控制能力,无法达到全局最优;二是后车在运行时受限于虚拟编组安全间距约束条件,在高速运行时两车被迫保持大间距;三是虚拟编组列车在站台停车时需要以最小间距停车。上述 3 点综合起来导致了既有虚拟编组列车运行控制方式无法做到所有列车单元同步停车,不满足地铁运行要求。由于后 2 点难以改变,因此对虚拟编组列车运行控制方式的优化成为解决该问题的首选方式。

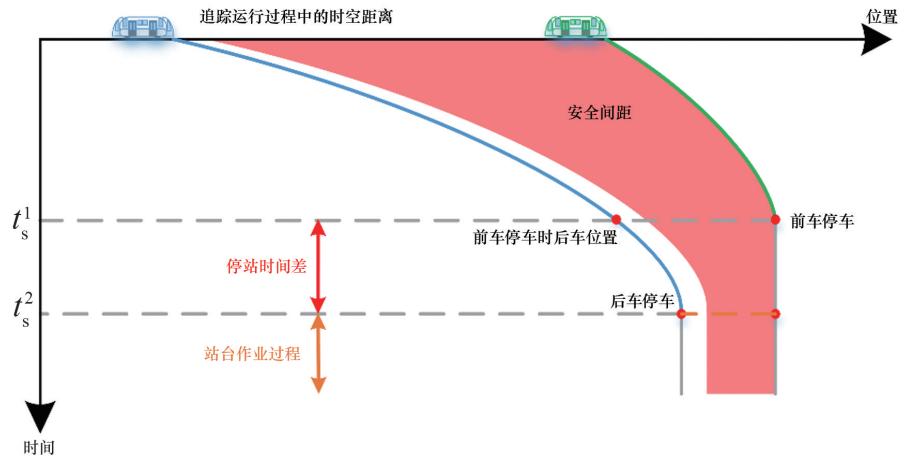


图3 停站阶段示意

2 协同控制方式及其在虚拟编组列车运行控制中的应用

通过前面的分析不难看出,通过两车协同控制实现全局最优是解决虚拟编组列车单元在站台停车不同步问题的关键。因此,本节调研汽车、无人机、航天、轨道交通、机器人等相关领域的协同控制方式应用现状,分析总结协同控制广泛应用的方式。在此基础上,通过分析各种协同控制方式的优劣,结合虚拟编组列车运行控制的特征,最终选择了信息汇总集中决策型协同方式作为虚拟编组列车运行控制中采用的方式。

2.1 协同控制的应用方式分析

协同控制广泛应用于各行各业的多智能体工作场景中,发挥着引导多智能体系统协调稳定工作的重要作用^[16-18]。经过广泛调研整理,可将协同控制方式分为4种,如图4所示。

2.1.1 相互感知独立决策型协同方式

该类型协同控制方式中,所有智能体类型均相同,每个智能体通过感知相邻或其他智能体的状态来对自身所处的环境做出分析,按照工作目标和约束做出自身的决策并执行。在所有智能体中有一个领导智能体拥有已知的运动策略,以该智能体为基础启动系统,除领导智能体之外其他的智能体决策逻辑均相同,通过所有智能体的独立分布式决策控制实现整体多智能体系统的协调一致运作。例

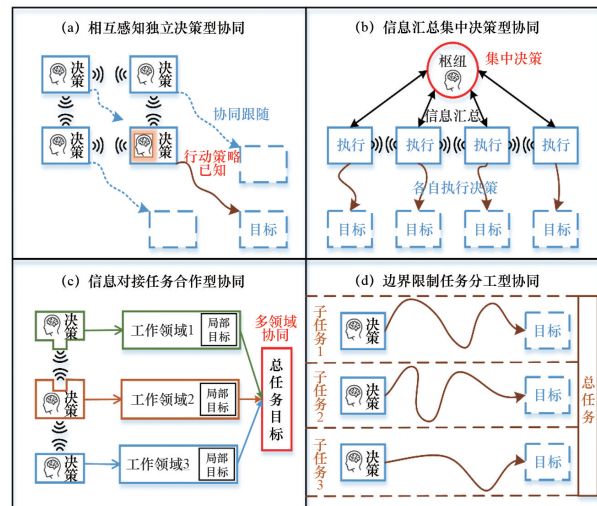


图4 协同控制方式分类

如,文献[19]实现了无人机之间通过互相观察来不断修正自身行动,保证所有无人机始终在信号控制范围内,从而实现整体无人机编队的协同运作。文献[20]针对高速列车的巡航控制问题,基于车车通信为每一辆车设置协同控制律,在避撞的同时维持列车间距,从而实现所有列车一致性运行。文献[21]构建了高速列车协同巡航控制的多智能体模型,通过相互通信检测相邻列车的状态,指定自身控制律在追踪期望速度的同时保持间距在安全范围内。文献[22]针对汽车的协同控制,设计了一种人工势场法和模型预测控制相结合的控制算法,每

辆汽车通过观察路况和其他汽车的动态来决定自身的控制率,从而实现与周围车辆的协同运行。

该类型协同方式的优点是仅仅通过单个智能体本身的检测、通信和控制手段就能实现决策的产生,智能体的运作逻辑较为简洁明了,并且分布式控制的动作执行更加迅速,指令的传输基本不会受到环境因素的影响。缺点是决策的发出者是智能体本身,因此决策的视角也固定在了单个智能体身上,缺少了对整体系统的把控,决策只代表局部最优的选择,系统存在不稳定因素。

2.1.2 信息汇总集中决策型协同方式

该类型协同控制方式中,每个智能体的自身信息和观测得到的其他智能体信息全部通过联网或者其他方式汇总到一个枢纽,由枢纽分析整体系统的状态并结合整体工作目标生成决策,再下发给各个智能体执行,通过集中式控制实现整体系统的协同运行。其中枢纽可以独立于所有智能体之外,也可以是某一个智能体。例如,文献[23]针对太空航天器编队飞行,为了协同控制所有航天器,选取了一个领导航天器,领导航天器定位并收集所有航天器的信息,分析计算后统一发出控制命令来控制整个编队运行。文献[24]中的车路协同智能系统,通过智慧视角(intelligent look)来协同管理道路交通中车辆的运行,汇总整个车地系统的信息,并下达命令到每辆汽车,改善了单个车辆独立决策可能出现的陷入局部最优的问题。

该类型协同方式的优点是决策指令由掌控整个系统信息的枢纽做出,不局限于某个智能体,有利于做出全局最优的决策以及系统协同运行。缺点是当智能体较多时,汇总所有智能体的信息困难,信息传输过程容易出现延迟或者丢包的情况,并且枢纽的计算压力会较大,对设备的计算性能要求较高。

2.1.3 信息对接任务合作型协同方式

该类型协同控制方式中,智能体的类型一般不同。功能性质差异很大的智能体合作完成一个工作目标时,需要将总体目标拆分为各个智能体的单体目标,并根据不同类型的智能体来设计全新的接口,扩充智能体决策时可以获得的信息。决策仍然

由各智能体独立完成,但每个智能体的决策逻辑并不相同,通过各智能体的任务分工和各自决策,最终实现多个不同类型智能体之间的协同工作。例如,文献[25]利用无人机和水下航行器的协同工作来实现更复杂的任务,将无人机需要的大型设备通过水下航行器携带,而由无人机负责侦测大范围的环境动态,通过协作使整体系统的功能性、鲁棒性和适应性大大提升。文献[26]制定了一套人类与无人机交互的动态规则,实现了人类与无人机更加便捷安全的协同工作。文献[27]针对协作机器人应用场景,将人类的智慧优势和协作机器人的工作优势相结合,制定了一系列对接规则,通过人与机器人之间的交互来提高整体工作效率。

该类型协同方式的优点是综合了各种不同类型智能体的优势,取长补短,能够处理复杂的问题,另外,由多种智能体参与的系统,其鲁棒性和适应性也更强。但是,其缺点也很明显,如不同类型智能体的功能和工作方式都不同,想要协同必须制定能够适应双方的全新接口规则,需要保证各方能够发挥应有功能,且不影响其他类型智能体的工作,复杂度较高。

2.1.4 边界限制任务分工型协同方式

该协同方式多用于相同类型的多智能体。多智能体在执行一个任务时,将任务划分为边界清晰的子任务,子任务之间有硬性的边界约束,可以减少智能体之间的信息对接需求。每个智能体只负责一个子任务,只需要处理分配的子任务即可,不需要依赖与其他智能体的交互。通过所有智能体同时处理子任务,实现整体任务的协同推进。例如,文献[28]针对多无人机侦查工作,通过将目标区域按照无人机观测能力划分为多个子区域,每个无人机只需观测所分配的子区域,而不需要观察相邻的无人机,减轻了无人机的工作压力和系统设计的复杂度。文献[29]针对无人机编队协同搜索过程中搜索区域冲突、效率低等问题,建立了无人机编队搜索区域单边角区域分割的数学模型,通过精确划分搜索区域边界,提高协同无人机编队的搜索效率。

该类型协同方式的优点是,单个智能体不需要

实时获取其他智能体的活动,只需要专注于自身分配的任务即可,降低了单个智能体的工作负担,提高了任务的执行效率。缺点是,需要事先对任务进行清晰划分,子任务之间必须有明确的约束关系。但是,由于大部分任务无法明确划分边界,因此该协同方式只适用于少部分协同工作场景。

2.2 协同控制在虚拟编组列车运行控制中的应用

虚拟编组列车单元属相同类型的智能体,结合虚拟编组列车在进站停车过程中的控制需求,需要考虑所有智能体的整体状态和相互关系来制定运行策略,同时虚拟编组列车又有整体的运输任务需要完成。结合上述特征对前文提到的4种协同方式在虚拟编组列车运行控制中的适用性进行分析。

相互感知独立决策型协同方式需要提前获得前车的运行策略,而且前车的运行策略会影响虚拟编组列车的整体运行效果。但显然,如果前车的运行策略不考虑后车(与既有虚拟编组列车运行控制方式一致)将会存在站台停车不同步的问题,而对于前车采取何种策略能够减小虚拟编组列车整体的停站时间差目前并不清楚,因此,对于前车的策略不能简单地获得,而是需要综合所有列车单元进行考虑和优化,本协同方式难以完全适用于虚拟编组列车运行控制。

信息汇总集中决策型协同方式需要汇总所有列车单元的信息,并在枢纽进行分析后,生成全局最优的所有列车单元的运行策略,来确保各列车单元在站台的同步作业。从全局角度进行决策能够构建起虚拟编组所有列车单元之间的协作关系,不再是前车与后车割裂运行的情况,从问题适应性角度分析该协作方式较为适合虚拟编组站间运行场景。针对智能体较多时该方式容易出现的通信传输和枢纽的计算压力大等问题,由于城市轨道交通中组成虚拟编组列车的列车单元数量较少(通常为2),因此,该方式的缺点在城市轨道交通虚拟编组列车中几乎可以忽略。

信息共享任务合作型协同方式可以实现不同类型多智能体系统的协作,但要求能够对各智能体的任务进行合理的分工,通过不同智能体之间的信息共享和各自决策,从不同工作角度出发来完成总

体任务。提前对任务分工的要求对于虚拟编组列车运行控制来说难度较高。

边界限制任务分工型协同方式也需要对任务进行明确的边界约束划分,但是虚拟编组站间运行任务基本无法将任务完全按照列车单元划分为固定的子任务,各列车单元的运行相互影响互相牵制,因此也无法借鉴该协同方式。

综上所述,信息汇总集中决策型协同方式是目前较为适合虚拟编组站间运行的协同方式。城市轨道交通中,虚拟编组列车的列车单元数量不多,恰好可以规避该协同方式对通信和枢纽的计算要求过高等缺点。结合城市轨道交通中列车运行的线路条件较为固定等特征,还可以为列车提前计算参考曲线供列车运行控制时查询使用,从而可以通过离线规划来承担枢纽的大部分计算负担,因此这种协同方式在城市轨道交通虚拟编组列车运行控制中具有较好的应用前景。

3 基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线规划

将信息汇总集中决策型协同方式应用到虚拟编组列车的参考曲线规划中,从枢纽角度统筹考虑所有列车单元的运行状态和控制需求,构建虚拟编组列车的站间运行控制优化模型,并设计基于强化学习的方法求解该模型以获得满足所有列车单元同步停车和其他运行指标的参考曲线。通过在列车单元实际运行时按照各自参考曲线的指引进行控车,可实现虚拟编组列车的整体运行控制,实现同步停车等目标。

3.1 优化模型构建

虚拟编组列车的站间运行优化模型主要由3部分构成:优化目标、约束条件和决策变量。

3.1.1 优化目标

根据虚拟编组列车特征与城市轨道交通运营要求,将站台同步停车、精确停车和准点运行作为优化目标。

1) 同步停车:通过最小化前、后车的停站时间差来实现同步停车的优化目标要求。

$$T_s = |t_s^1 - t_s^2| \quad (2)$$

2) 精确停车:通过最小化列车单元的目标停车位置与参考曲线中停车位置的差值实现精确停车。

$$\begin{aligned} P_s^1 &= |p_g^1 - p_s^1| \\ P_s^2 &= |p_g^2 - p_s^2| \end{aligned} \quad (3)$$

式中, p_g^1, p_g^2 和 p_s^1, p_s^2 分别代表前后车的目标停车位置和参考曲线中的停车位置; P_s^1, P_s^2 分别为前、后车的停车位置的偏差。

3) 准点运行:列车运行的准点性是城市轨道交通相比于其他城市交通方式的重要优势。在所有列车单元同步停车的基础上,通过最小化前车的目标停车时刻与参考曲线中停车时刻的差值(接车时间准点性)即可保证虚拟编组列车运行的准点性。

$$T_p = |t_s^1 - t_s^2| \quad (4)$$

式中, T_p 为前车的接车时间误差。

3.1.2 约束条件

虚拟编组列车的站间运行过程中还需要满足列车动力学约束、线路限速约束和安全间距约束等,并且在设计约束条件时应考虑实际追踪控制过程中可能出现的控制误差,详细说明如下。

1) 动力学约束:根据牛顿第二定律,虚拟编组列车单元仿真运行需要满足如下动力学约束。

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ m\dot{v} = F_t - F_b - f - f_g - f_r - f_l \end{cases} \quad (5)$$

式中, x, v 分别为列车单元的位置和速度; m 为列车单元质量; f, f_g, f_r, f_l 分别为线路基本阻力、坡道附加阻力、曲线附加阻力和隧道附加阻力; F_t, F_b 分别为牵引力和制动力,这2种力不会同时出现,且根据列车牵引制动特性需要满足如下约束。

$$\begin{cases} F_t \leq F_t^m(v) \\ F_b \leq F_b^m(v) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $F_t^m(v), F_b^m(v)$ 分别为列车单元在速度 v 下所能提供的最大牵引力和最大制动力。

2) 线路限速约束:列车在站间运行时的速度不能超过线路限速的限制。

$$v \leq V_e - k_1 \quad (7)$$

式中, V_e 为线路限速; k_1 为因考虑实际控制误差原因预留的速度余量。

3) 安全间距约束:为了保证安全,虚拟编组列车单元间距需要始终大于安全间距,这一安全间距会随列车单元速度的提高而增大。

$$d_e + k_2 \leq x^1 - x^2 - L \leq d_e + k_3 \quad (8)$$

式中, x^1, x^2 分别为前、后车的车头位置; L 为列车单元的长度; d_e 为当前条件下允许的最小安全间距; k_2 为考虑实时控制误差原因预留的距离余量; k_3 为前后车间距的上限约束常量,超出后将不符合虚拟编组列车作为整列车运行的预期目标。

3.1.3 决策变量

通过控制加速度序列可以获得每一辆列车单元的运行策略,进一步决定了列车单元的参考曲线。因此,将所有列车单元的控制加速度序列作为决策变量,即 $u_1^i, u_2^i, u_3^i, \dots, u_j^i, \dots, u_n^i$, 其中 $i=1, 2$ 代表前车1和后车2, u_j^i 为第 i 辆列车单元在第 j 个时刻的控制加速度值,取值范围为 $-1 \text{ m/s}^2 \leq u_j^i \leq 1 \text{ m/s}^2$, n 为加速度序列的时刻数。

3.2 基于强化学习的求解方法

针对虚拟编组列车运行控制优化模型具有的决策空间维度高、列车状态空间维度高、模型计算复杂度高特点,采用求解适应性强的强化学习DQN(deep Q network)算法进行求解^[30]。首先将模型转化到DQN算法的应用框架下,其中,将优化模型中的列车动力学和线路条件作为DQN中的环境(environment),将列车单元的位置、速度、时间作为状态(state),将控制加速度作为动作(action)。智能体(agent)获得动作,并通过与环境交互不断更新状态,对应到虚拟编组运行场景即:虚拟编组列车从初始状态开始选择合适的控制加速度指令,结合列车动力学和线路条件进行仿真运行,可获得下一状态。对强化学习中的相关函数设置方式说明如下。

1) 奖励函数(reward function):结合优化目标和约束条件设置奖励函数来对虚拟编组列车的运行状态进行评价。如果存在已知可行的参考曲线则设置经验奖励围绕可行参考曲线进行小范围寻优。具体奖励函数设置规则如表1所示。

表1 奖励函数设置规则

规则内容	奖励设置
列车单元速度超过线路限速约束	二级负奖励
虚拟编组列车单元间距小于安全间距约束	二级负奖励
列车单元未停在预定停车点	一级负奖励
虚拟编组列车未能准时到站	一级负奖励
虚拟编组列车在同一时刻的状态在可行解设定范围内	二级正奖励
虚拟编组列车符合指标要求到站停车	一级正奖励

注：一级奖励数值大于二级奖励，体现奖励对算法搜索的影响程度。

2) 价值函数(value function):由深度神经网络构成,用来对每次决策的正确性进行评分。网络输

入为当前虚拟编组列车状态和控制加速度的组合,输出为这一组控制决策的未来价值,即本次选择的控制加速度是否有利于列车完成预定运行目标。

3) 策略函数(policy function):根据价值函数选取最有利于实现目标的决策,即选择价值最高的控制加速度。

通过多次虚拟编组列车仿真运行,算法不断积累数据存放至记忆回放(memory replay)空间中,间隔一定时间抽取数据来训练价值函数,最终实现价值函数能够准确地按照虚拟编组列车运行指标要求对不同决策作出正确的价值判断,从而引导虚拟编组列车按照目标运行,获得符合要求的参考曲线。所设计的DQN算法的整体逻辑流程如图5所示。

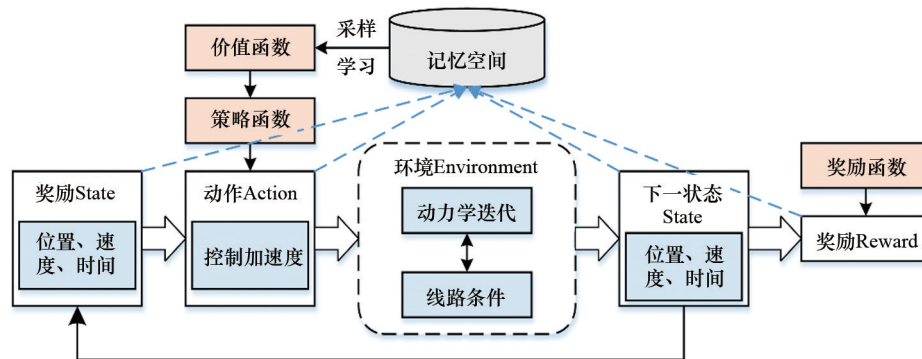


图5 DQN算法逻辑流程

4 仿真结果分析

基于北京地铁11号线的真实车辆和线路数据,对本文提出的基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线生成方法进行了仿真实验,并与既有的独立分布规划控制模式的运行曲线进行了对比。

北京地铁11号线线路由4个车站构成,仿真实验使用的相关线路参数与真实线路数据保持一致。对比实验中的独立分步规划和控制模式下的列车单元控制算法采用模型预测控制,设计方法可参考文献[12]。DQN算法的相关参数设置如表2所示。

根据上述数据进行仿真实验,得到的基于既有独立分步规划和控制模式的虚拟编组运行轨迹和

表2 DQN算法相关参数设置

参数含义	数值	参数含义	数值
神经网络层数	5	每层网络节点数	50
时间计算步长/s	0.2	目标网络更新周期	50
最大训练次数	50000	衰减率	0.9
记忆空间采样数据个数	100	记忆回放区大小	10000
一级正奖励	1000	二级正奖励	5
一级负奖励	-100	二级负奖励	-5

基于协同控制的虚拟编组列车站间运行参考曲线分别如图6和图7所示,其中EBI为紧急制度触发。

为便于对比,提取出2种方式下列车单元在各具体站台的停站时间差如表3所示。

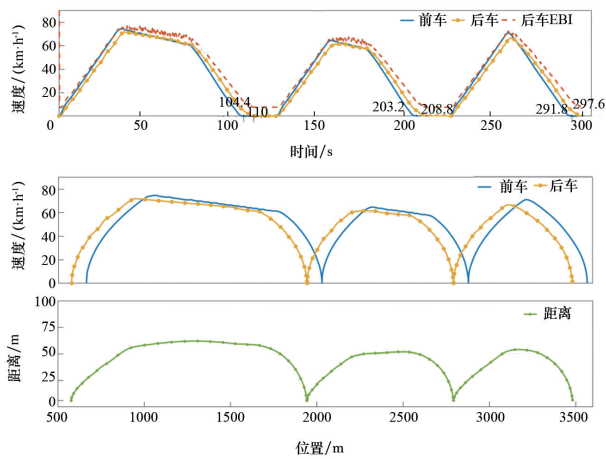


图6 独立分步规划和控制模式下的运行曲线

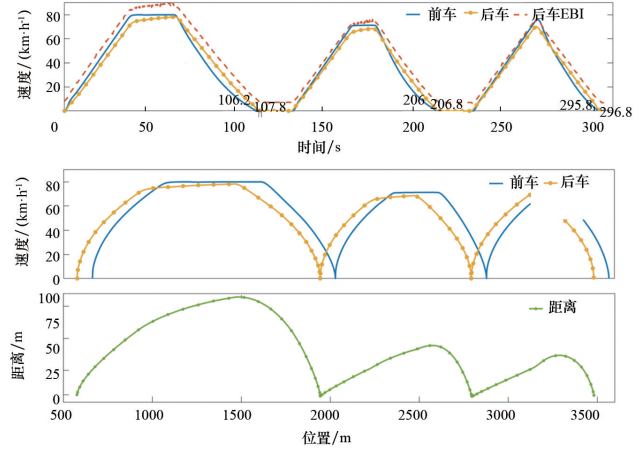


图7 基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线

表3 2种方式下的停站时间差数据对比

控制方式	停站时间差/s		
	站台2	站台3	站台4
独立分步规划和控制方式	5.4	5.2	5.8
基于协同控制的参考曲线生成方法	1.6	0.8	1.0

从实验结果对比可以看出,既有的独立分步规划和控制方式下,列车单元在站台的停站时间差较大,基本无法满足虚拟编组在城市轨道交通的应用需求;采用本文所提基于协同控制的参考曲线生成方法之后,虚拟编组列车单元间的停站时间差明显减小,最小缩减幅度 70.4%,最大缩减幅度达到 84.6%,且优化后的停站时间差均保持在 2 s 以内(符合地铁运行的期望)。另外,在紧急制动触发速度与实际速度差值方面,基于协同控制的参考曲线差值保持得更稳定,这是因为这种优化方式更加充分地考虑了虚拟编组列车单元追踪的安全稳定,使列车单元之间更加高效的运行。综上所述,基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线优化方法能够提升虚拟编组列车的性能指标、显著减小停站时间差,而站间旅程时间几乎不受影响,甚至能够减小旅程时间。不仅满足了虚拟编组技术在城市轨道交通中的应用需求,而且对其他性能指标的影响较小,能够实现虚拟编组列车安全、稳定、同步运行,证明了本文所提基于协同控制的参考曲线生成方

法的可行性和有效性。

5 结论

分析了既有虚拟编组列车运行控制模式无法实现同步停车的问题,在综合分析相关协同控制方式的基础上,借鉴信息汇总集中决策型协同控制方式的理念提出了虚拟编组列车参考曲线生成方法,从虚拟编组列车整体运行角度构建了各列车单元协同优化的数学模型,并设计了基于强化学习 DQN 的求解方法。利用生成的参考曲线来指导虚拟编组列车单元的运行,可在满足相关约束条件的前提下达到同步停车的目标。通过基于北京地铁 11 号线真实车辆和线路数据的仿真实验,将采用既有列车运行控制方法在所有站台均在 5 s 以上的停站时间差全部缩短至 2 s 以内,实验结果表明了本文所提基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线生成方法的有效性。

本文所提基于协同控制的虚拟编组列车参考曲线生成方法求解速度尚无法满足列车运行过程中实时在线优化的需求。城市轨道交通列车运行具有较大的计划性和重复性,因此该方法能够满足大多数情况下的应用需求,但对于突发事件或异常情况下该方法仍有提升空间。下一步将在该方法和结果的基础上,继续研究在线协同优化方法,进

一步提升协同控制在虚拟编组列车运行控制中的有效性,以便更加充分地发挥虚拟编组列车运行控制技术在城市轨道交通中的实际应用价值。

参考文献(References)

- [1] 马胜艳. 新时期城市轨道交通发展方向探究[J]. 居舍, 2021(8): 1-2, 19.
- [2] 施仲衡, 丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 1-4, 11.
- [3] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案[J]. 城市轨道交通, 2022(8): 20-35.
- [4] Bock U, Varchmin J U. Enhancement of the occupancy of railroads using virtually coupled train formations[C]// World Congress on Railway Research (WCRR). Paris: International Union of Railways, 1999: 19-23.
- [5] 白佳薇, 张琦, 鲁放. 城市轨道交通虚拟编组列车快慢车组织方案研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(1): 126-133.
- [6] 陈永明, 崔佳诺. 基于虚拟编组技术的重载铁路列控系统研究[J]. 铁道标准设计, 2022, 10.13238/j.issn.1004-2954.202203170001.
- [7] 纪玉清, 欧冬秀, 常鸣, 等. 列车虚拟编组应用需求及关键技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(11): 57-61.
- [8] Niu H M, Zhou X S, Gao R H. Train scheduling for minimizing passenger waiting time with time-dependent demand and skip-stop patterns: Nonlinear integer programming models with linear constraints[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 76: 117-135.
- [9] 武强. 城市轨道交通虚拟编组列车控制技术实现方法[J]. 电子测试, 2022(16): 41-43.
- [10] 张友兵, 刘岭. 基于虚拟编组的列车控制系统研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(3): 94-100.
- [11] 王建坤, 贾嘉琪. 轨道交通列车运行控制系统的应用分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(6): 194-196.
- [12] Felez J, Kim Y, Borrelli F. A model predictive control approach for virtual coupling in railways[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(7): 2728-2739.
- [13] Liu Y F, Zhou Y, Su S, et al. An analytical optimal control approach for virtually coupled high-speed trains with local and string stability[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 125: 102886.
- [14] Liu Y F, Liu R H, Wei C F, et al. Distributed model predictive control strategy for constrained high-speed virtually coupled train set[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(1): 171-183.
- [15] 刘宏杰, 唐涛, 张艳兵, 等. 城轨虚拟编组关键性能指标及技术探讨[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 28-35.
- [16] 马子玉, 何明, 刘祖均, 等. 无人机协同控制研究综述[J]. 计算机应用, 2021, 41(5): 1477-1483.
- [17] 张志伟, 滕英元. 机器人编队协同控制方法综述[J]. 机电信息, 2019(32): 28-30.
- [18] 王飏, 李博, 高敏, 等. 无人船的协同控制策略综述[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(2): 3-5.
- [19] Okutake T, Uchida N, Yamamoto N. A collaborative safety flight control system for multiple drones[C]//2016 10th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS). Piscataway: IEEE, 2016: 371-375.
- [20] Bai W Q, Lin Z L, Dong H R. Coordinated control in the presence of actuator saturation for multiple high-speed trains in the moving block signaling system mode[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(8): 8054-8064.
- [21] Li S K, Yang L X, Gao Z Y. 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.
- [22] Huang Z C, Wu Q, Ma J, et al. An APF and MPC combined collaborative driving controller using vehicular communication technologies[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2016, 89: 232-242.
- [23] Ran D C, Chen X Q, Misra A K. Finite time coordinated formation control for spacecraft formation flying under directed communication topology[J]. Acta Astronautica, 2017, 136: 125-136.
- [24] Wang B Y, Han Y, Wang S Y, et al. A review of intelligent connected vehicle cooperative driving development[J]. Mathematics, 2022, 10(19): 3635.
- [25] Zhu M, Wen Y Q. Design and analysis of collaborative unmanned surface-aerial vehicle cruise systems[J]. Journal of Advanced Transportation, 2019, 2019: 1-10.
- [26] Doran H D, Reif M, Oehler M, et al. Conceptual design of human-drone communication in collaborative environments[C]//2020 50th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W). Piscataway: IEEE, 2020: 118-121.
- [27] Gualtieri L, Rauch E, Vidoni R. Emerging research

- fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021, 67: 101998
- [28] Giri P. Collaborative geographic area surveillance by system of drones[C]//2022 23rd IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM). Piscataway: IEEE, 2022: 340-342.
- [29] Sun T Y, Sun W, Wu J J. Cooperative search of UAV formation guided by probability graph[C]//Pan J S, Meng Z, Li J, et al. *Advances in intelligent information hiding and multimedia Signal Processing*. Singapore: Springer, 2022: 33-41.
- [30] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: An introduction[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1998, 9(5): 1054.
- [31] Abdul Hamid N, Mohd Nawi N, Ghazali R, et al. Accelerating Learning performance of back propagation algorithm by using adaptive gain together with adaptive momentum and adaptive learning rate on classification problems[C]//Kim T V H, Adeli H, Robles R J, et al. *International Conference on Ubiquitous Computing and Multimedia Applications*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 559-570.

A cooperative control based reference curve generating method for virtually coupled train sets

LIU Hongjie^{1,2}, LANG Yinghui¹, ZHANG Lei^{1,3}, TANG Tao⁴

1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
2. National Engineering Research Center of Rail Transportation Operation and Control System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
3. Department of Research Institute, Traffic Control Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China
4. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Virtual Coupling has been a hot research topic in railways in recent years. The proposed control methods in the existing literature for virtually coupled train sets (VCTS) mainly try to operate train units with the constraint of maintaining a small gap distance, but pay insufficient attention to the needs in the entering station process, which affects the work of VCTS in a station and is thus one of the most important part of VCTS in urban rail transits. To fill this gap, this paper firstly proposes an unsynchronized stopping problem between the train units in a VCTS when entering a station, defines the concept and the calculation method of stopping time difference between the train units. Then, inspired by the multi-agent cooperative control methods in related fields, a cooperative control-based reference curve generating method for VCTS is proposed. Followed by it, a mathematical optimization model to generate the reference curves for the train units in a VCTS is formulated, and a reinforcement learning DQN (deep Q network) based algorithm is designed to solve this problem. Optimized reference curves for each train units are generated automatically, considering the global objects and all constraints of VCTS. Finally, based on the real data of trains and lines from Beijing Metro Line 11, numerical simulation experiments are conducted. Experimental results prove the effectiveness of the proposed method which outperforms a commonly used control method of VCTS in the literature.

Keywords urban rail transit; virtually coupled train sets; cooperative control; reference curve; reinforcement learning ●



(责任编辑 刘志远)