

城轨列车虚拟编组安全防护与运行控制技术研究进展

唐涛¹, 罗啸林^{1,2}, 刘宏杰^{2,3}, 张艳兵³

1. 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

2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

3. 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

摘要 城市轨道交通(简称“城轨”)存在高峰期拥挤、平低峰期运力浪费的问题,能够根据客流实时变化动态调整线路运力的虚拟编组技术已逐渐成为轨道交通列车运行控制系统的发展方向和研究热点。介绍了虚拟编组列车的概念和整体研究现状,分析了对实现虚拟编组最重要的列车安全防护和运行控制两项关键技术的研究进展,并指出了仍需解决的关键问题和可能的解决方案。其中,在安全防护方面,现有方法虽普遍采用相对制动距离原则,但暂未对列车单元的时空关系进行分析,无法严格保证列车运行安全性。因此,针对性地提出了基于时空分隔的列车安全防护方法;在列车驾驶控制方面,既有研究大多仅关注站间稳定运行过程,而在城轨中尤为重要的列车进站过程及虚拟编组可能存在的停车不同步问题仍未得到充分关注,因此,指出该问题并提出基于协同控制的列车单元跟踪控制方法。本文可为读者了解城市轨道交通列车虚拟编组技术的发展趋势和投身相关研究提供参考。

关键词 城市轨道交通; 虚拟编组; 列车运行控制; 安全防护; 协同控制

随着网络化规模和客流的不断增长,城市轨道交通客流出行分布规律时空不均衡的特性逐渐凸显出来,既有列车运行组织方式难以实现运力与客流的动态变化相匹配。一方面,在通勤高峰期部分客流量较大的断面运力紧张,出现站内和车内拥

挤、站内外排队严重的现象;另一方面,在客流量较少的时段大部分断面提供的运力过剩,存在列车满载率过低甚至“空驶”的现象,造成车辆、人员、基础设施和能源等资源的闲置和浪费。2022年5月,中共中央办公厅、国务院办公厅出台了《关于推进以

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(2022YJS112);北京市自然科学基金项目(L201004);国家铁路局铁路行业科技创新基地专项课题(KF2021-004);城市轨道交通北京实验室项目

作者简介:唐涛,教授,研究方向为交通智能控制与优化,电子邮箱:ttang@bjtu.edu.cn

引用格式:唐涛,罗啸林,刘宏杰,等.城轨列车虚拟编组安全防护与运行控制技术研究进展[J].科技导报,2023,41(10):31-42;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.10.003

县城为重要载体的城镇化建设的意见》^[1],要求“引导有条件的大城市轨道交通适当向周边县城延伸”,该措施对提高县城与周边大中城市互联互通水平具有重要意义。但随着城市轨道交通网络化规模的不断扩大尤其是向市郊的延伸,列车网络化运行模式将得到推广应用,运力-运量不匹配的问题还将可能进一步加剧。

为缓解平低峰时段的运力过剩问题,目前城市轨道交通运营中通常采用降低列车旅行速度或服务频次的方式,但这会导致乘客旅行时间加长,影响轨道交通的服务质量和客流吸引力。中国城市轨道交通协会发布的《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》^[2]和《中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案》^[3]均提出发展灵活编组以解决上述问题。通过在线动态调整列车编组方式,可实现车辆等资源的高效利用和客流-车流的精确匹配,是实现城市轨道交通节能降碳增效的重要手段和提升城市轨道交通出行占比的重要支撑,能够提供更优质的运输服务,已成为轨道交通新一代列车运行控制技术的发展方向。其中,虚拟编组(virtual coupling, VC)技术^[4]可不依赖车钩间的物理接触和相互作用力实现车辆间的连接,形成的虚拟编组列车既可满足列车编组运行的需要,又可方便地根据客流需求变化进行动态改变编组方式(编组或解编)。虽然具有广阔的发展前景,但尚存在一系列亟待突破的关键难题,虚拟编组相关技术近年来得到了工业界和学术界的广泛关注,成为重要的研究热点和发展方向。

本研究旨在对虚拟编组列车的概念和国内外

研究现状进行介绍,并结合作者团队所参与的示范工程项目情况对实现虚拟编组最重要的列车安全防护和运行控制关键技术的研究进展进行分析。

1 虚拟编组的起源及发展情况

1.1 虚拟编组列车概念及起源

目前业内普遍认为虚拟编组列车的概念最早是由德国不伦瑞克工业大学的Bock等^[5]在1999年针对提升欧洲铁路的吸引力需求提出。彼时,欧洲铁路正面临着客货运输量双双降低的问题,受限于不够灵活、旅程时间过长、运输的准备时间过长及价格过高等问题,不断有用户放弃轨道交通并转而采取道路交通的运输方式。为保证安全性,轨道交通列车运行必须受到闭塞系统和技术的防护,这已形成轨道交通列车调度管理和信号系统的传统。即便是诸如“移动闭塞”或者“基于通信的列车运行控制”技术等当前应用的最先进的方法^[6-9]也遵循了该原则。在闭塞原理的约束下,要增加轨道交通线路容量有2种方式,一是增加单位时间内运行的列车数量,二是增加列车的长度。然而,当列车间距缩短到与列车的制动距离一致时就达到了移动闭塞下的最小值,对应了单位时间内运行列车数量的上限;而为了增大列车长度,将需要更多的时间进行列车编组,但是只有大量的货物需要从共同的起点运输到共同的终点时,长编组方案在经济上才是划算的。因此,最好的解决思路是,在无分歧的长轨道区段上形成长编组列车运行,并在分歧道岔前解编为多个(含2个)小编组列车。

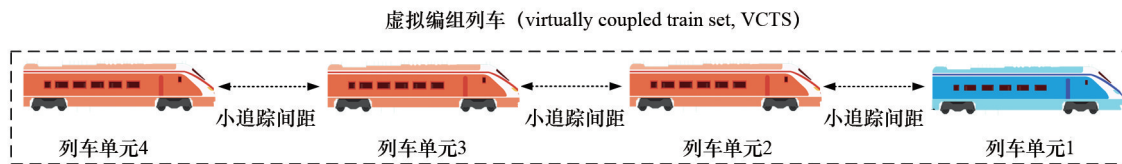


图1 由4个列车单元构成的虚拟编组列车

虚拟编组列车(virtually coupled train set, VCTS)概念能够很好地满足上述需求。如图1所

示,一列虚拟编组列车由2个或多个列车单元(train unit, TU)构成,每个列车单元都有独立的牵

中国也已经将虚拟编组技术作为列车运行控制技术的下一步重要发展方向。例如,《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》^[2]将列车“协同编队”列为建设重点;《中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案》^[3]将采取灵活编组等方式,提高列车的满载率和乘客便捷舒适体验等作为节能降碳增效行动的重点内容;科技部国家重点研发计划综合交通运输与智能交通专项设立了“超大城市轨道交通系统高效运输与安全服务关键技术”项目,对城轨虚拟编组等关键技术进行深入研究;中国城市轨道交通协会设立了新一代网络化智能调度与智能列车运控系统示范工程项目,对虚拟编组等相关技术在北京地铁进行试验验证和示范应用,目前已处于现场试验验证阶段;中国国家铁路集团有限公司、国家铁路局和中国国能集团有限公司等也分别设立了项目对虚拟编组在高速铁路和重载铁路应用中的关键技术进行攻关研究。

由于虚拟编组技术的潜在优势及广阔的应用前景,近年来学术界也对虚拟编组的相关关键技术开展了研究,主要涉及虚拟编组概念和原理可行性分析、调度指挥与列车运行控制方法等方面。例如,Quaglietta 等^[16]针对列车单元间追踪运行时需要大幅缩短间隔距离的需求,研究了安全保护距离余量的动态设置方法,并对正常和降级条件下的场景分别进行了测试,验证了虚拟编组列车缩短间隔距离的可行性。Aoun 等^[17]通过问卷调查,从成本、收益、安全性等多个方面收集了业界专家和相关学者对虚拟编组的意见。其调查结论指出,尽管实现虚拟编组技术存在诸多障碍,但其巨大的潜力仍值得相应的研究投入。针对引入虚拟编组技术后的列车调度指挥问题,文献[18]~[20]均设计了基于虚拟编组技术的列车灵活编组开行方案,说明了虚拟编组技术在列车运行方式和线路运力调整方面的有效性。在虚拟编组相关文献中,大约有 50% 的研究针对列车运行控制方面而开展,主要目的是解决如何实现 VCTS 内列车单元保持小间距安全追踪运行的问题,相关研究又可细分为面向列车安全防护方法的研究、面向列车自动运行控制的研究和面向虚拟编组列车动态编解控制的研究等^[21-27],Xun

等^[28]对轨道交通虚拟编组技术的控制方法做了较广泛的综述。由于列车安全防护方法和运行控制方法是实现虚拟编组列车运行最核心的部分,本文后续部分将重点对这 2 部分的研究进展进行介绍。

2 虚拟编组列车单元间的安全防护方法

2.1 列车安全防护方法的发展历程

目前轨道交通系统中采用的是空间间隔法,其是指同一线路上运行的相邻列车之间保持一定安全距离,从而实现列车安全隔离,避免出现列车追尾或迎面相撞等事故的方法^[29]。列车安全防护通常由列车运行控制系统完成。如图 3 所示,在虚拟编组列车运行时,该系统首先计算出一个能够保证避免列车单元碰撞的安全防护距离,并要求列车单元实际间距必须大于该安全防护距离,否则立即将输出紧急制动使跟随车减速至停车。在此基础上,系统通常计算一个合适的期望间距(大于安全防护距离,并考虑控制系统可能的偏差)作为列车运行控制时的追踪目标,从而使列车在运行控制系统作用下的实际距离在该期望距离的一定范围内波动。

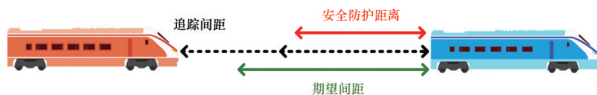


图3 列车单元间的追踪间距、期望间距与安全防护距离的关系示意

目前轨道交通中应用的最先进的列车安全防护方法是移动闭塞法。在这种方法下,对于追踪运行的 2 辆相邻列车,通常假设前行列车可能会瞬时停车,从而要求后行列车将最近一次获得的前行列车的车尾位置作为追踪防护目标,要求两车之间的安全防护距离不小于后行列车实施紧急制动至停车全过程中运行的距离(考虑测量误差等因素,通常还要加上一段保护距离余量),以避免两车发生追尾碰撞。由于追踪运行列车间的安全防护距离仅由后行列车的制动距离决定,因此通常称为绝对制动距离间隔控制方式;考虑到假设前车瞬时停

车,通常也称为“撞硬墙”方式,其基本原理如图4所示。这种方法的原理自1870年代即已提出,并在轨道交通领域沿用至今^[10],城市轨道交通中目前普遍采用的基于通信的列车运行控制系统(communication based train control, CBTC)即采用了这种列车安全防护方法,而中国高速铁路目前普遍采用的中国列车控制系统3级(Chinese train control system-3, CTCS-3)以及欧洲高速铁路采用的欧洲列车控制系统2级(European train control system-2, ETCS-2)均采用了比这种方式还要更前一代的列车安全防护方式(固定闭塞防护方式),仅目前尚处于研究中的最新等级的CTCS-4和ETCS-3列控系统才计划引入移动闭塞系统。但是,“撞硬墙”移动闭塞方式下的列车安全防护距离随列车运行速度的增高而快速增大,这对高速运行的列车运行效率提升非常不利,也难以满足虚拟编组列车对列车单元间保持小间距运行的要求。

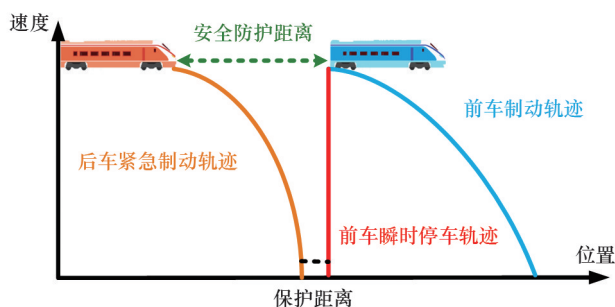


图4 基于绝对制动距离的列车安全防护方法

事实上,如果前行列车的初始速度不为0,那么,在后行列车制动过程中,前行列车的位置实际也在不断变化。因此,在考虑后行列车制动距离的基础上,考虑前行列车可能实施紧急制动后的最小制动停车距离,可将两车之间的安全防护距离设置为两车紧急制动距离的差值(可考虑一定的保护距离余量),这便是相对制动距离列车安全防护方法的基本原理,如图5所示。为最大程度缩短列车最小安全间隔,充分利用前行列车的动态信息、基于相对制动距离分隔原则进行列车安全防护,成为轨道交通列车运行控制系统的重要发展方向,也是实现虚拟编组列车运行的重要基础。为与基于绝对

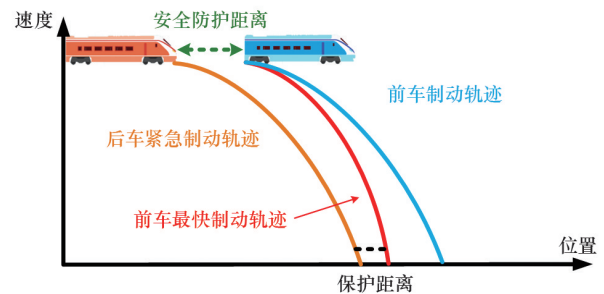


图5 基于相对制动距离的列车安全防护方法

制动距离的“撞硬墙”列车安全防护方法相区分,基于相对制动距离的列车安全防护方法通常也被称为“撞软墙”列车安全防护方法。显然,“撞软墙”列车安全防护方法能够进一步缩短列车安全防护距离。“撞软墙”列车安全防护方法与道路交通领域汽车追踪避撞的思路类似,其提出至少可追溯到1938年^[30],但受限于技术水平不够成熟以及相关需求也不甚强烈,至今尚未得到成熟应用,仅有部分文献对其原理和可行性进行了研究。例如,宁滨^[31]提出将后行列车停车位置不越过紧急制动后的前行列车停车位置作为约束条件的安全防护方法,该方法目前被广泛应用于VCTS的追踪控制相关研究中。但很可惜,这种方法仍无法完全保证两车不发生碰撞^[32],还需要针对虚拟编组列车运行需求研究新的安全防护方法^[33-34]。Xun等^[35]通过分析相邻列车的相对运动状态,提出以两车相对静止的时刻后车位置不超过前车车尾位置为安全约束条件,但其方法仅针对后车紧急制动性能优于前车的情况,无法普适应用于所有情况。Su等^[36]提出使用深度强化学习进行决策的方法,通过训练神经网络得到后车的驾驶策略,意图在避免发生碰撞的前提下缩短两车的距离,但这种方法能否实现安全功能仍有待验证。

2.2 基于时空分隔的列车安全防护方法

基于空间分隔的方法已经无法满足虚拟编组列车单元小间隔追踪时的安全防护需求。其主要原因在于,由于列车异质(如车型不同)或者制动性能不确定等原因,两追踪列车的紧急制动加速度不一致是非常可能存在的情况。然而,基于空间分隔的列车防护方法仅考虑列车制动停车后两车位置

关系的安全性,未对两车制动过程中位置关系的动态变化提出约束,从而在两车制动过程中间距先减小后增大的情况下,存在停车后的位置关系看起来正确,但可能在制动过程中发生碰撞的问题。与前车相比,后车初速度较大、制动加速度也较大时可能会发生该场景,图6(a)~(c)分别为两车制动过

程中的距离-时间曲线(时空轨迹)、两车时距变化曲线和两车速度-位置曲线。从图6(b)可以看出,仅保证停车后两车位置关系安全是无法保证列车制动全过程避撞的,因为两车间距的最小值5.001 m出现在了停车过程当中,而该最小值与仿真时设计的5 m的保护距离余量相一致。

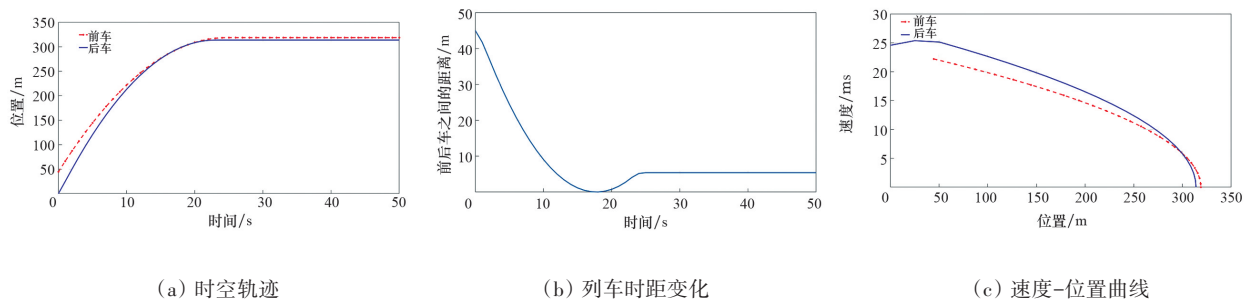


图6 空间分隔方法下无法保证行车安全的示意

针对上述问题,为保证虚拟编组列车中跟随车在实施制动到最终停车全过程中的安全性,在空间分隔理论的基础上引入了时间维度,提出了基于时空分隔的新型列车安全防护方法^[29,33]。这种方法的原理如图7所示,需要根据相邻列车的实时位置、速度、加速度以及紧急制动性能,估算出两车在实施紧急制动后的位置随时间的变化轨迹(时空轨迹),然后根据列车避撞对两车时空轨迹不交叉的要求计算出初始时刻两车需要保持的安全防护距离。其中:(1) 计算过程中可考虑预留一定的保护

距离余量;(2) 计算两车时空轨迹时,对于不确定的参数可按照导向安全侧的方法处理,例如,对于列车紧急制动加速度不确定性对前后车时空轨迹造成的影响,可考虑前车紧急制动时的最快制动轨迹和后车最慢制动轨迹。其具体实施方法可参考文献[33]。这种方法不仅比传统的“撞硬墙”列车安全防护方法更高效,因为其考虑了前车的速度、加速度和制动过程中的位置变化等动态信息,可使两车的安全防护距离更小、从而能进一步缩短两车追踪距离;同时,与既有文献中的“撞软墙”方法相

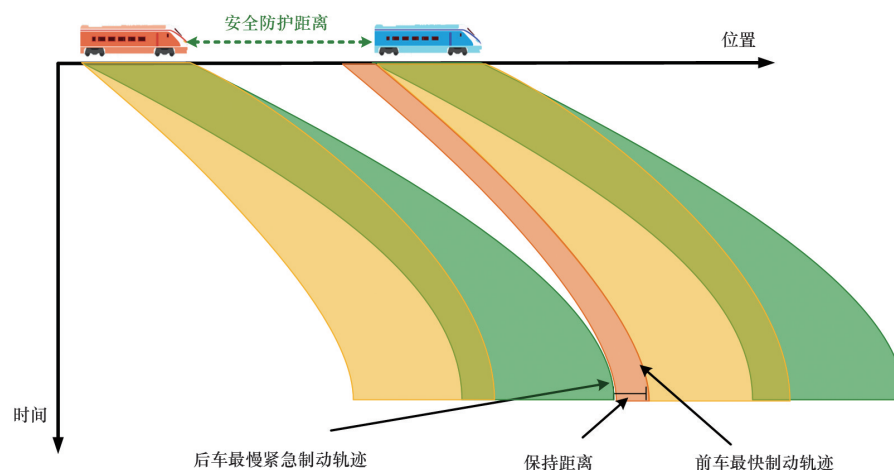


图7 基于时空分隔的安全防护方法

比,这种处理方法能够保证所有场景下列车制动全过程的安全性,因此能够适用于虚拟编组列车单元间的安全防护需要。

3 虚拟编组列车单元追踪控制方法

3.1 既有研究及存在的问题

虚拟编组列车运行控制的一个重要目标是所有列车单元的间距应维持在期望间距附近,同时还需要始终保持大于安全防护距离,如图3所示。如果在一定时期内虚拟编组列车的目标速度固定(例如在虚拟编组列车巡航运行时),则相当于希望所有列车单元保持同速、等间距同步运行。这种情况下,虚拟编组列车与汽车编队具有相似的目标,因此,轨道交通虚拟编组技术的研究在一定程度上能够借鉴道路交通智能网联车辆的编队技术,其经过数十年的研究与发展,目前理论体系已相对成熟。

在上述相关研究中,通常会将稳定性与鲁棒性作为控制系统的关键性能要求,其中,稳定性又可分为局部稳定性、队列稳定性2种^[37-39]。因此,大多数研究中也把稳定性与鲁棒性要求作为虚拟编组列车运行控制系统中列车单元追踪控制的关键目标。为便于理解,图8~图10分别给出了稳定性与鲁棒性的典型特征,其中,局部稳定性可以理解为使列车单元间的追踪间距能够逼近期望间距;鲁棒性可以理解为追踪间距能够维持在期望间距附近的有界的误差范围内;队列稳定性则可以理解为追踪间距与期望间距的差值不会在列车单元间沿着控制信息的传递而逐渐放大,即后续列车单元的差值均不超过其前方车辆的差值。作为对比,图11给出了非队列稳定的VCTS在受到扰动后的典型运行轨迹,不难看出,当构成虚拟编组列车的列车单元数量较多时,不具备队列稳定性的VCTS很容易出现触发安全约束条件等问题。

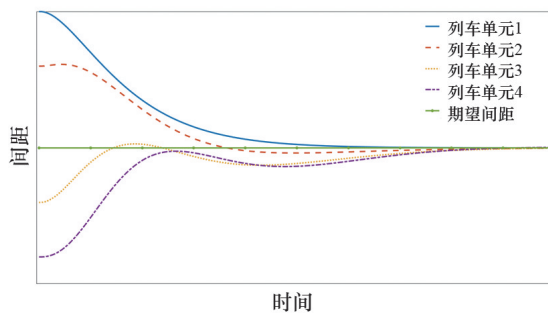


图8 具有局部稳定性的VCTS内列车单元追踪间距

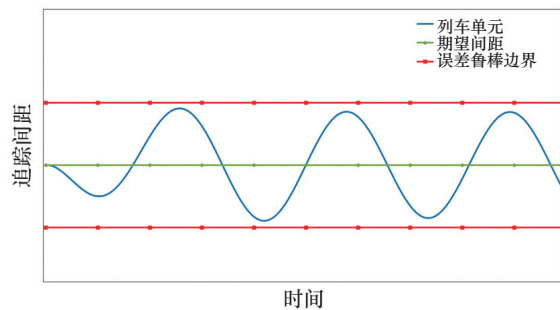


图9 具有鲁棒性的VCTS内列车单元追踪间距

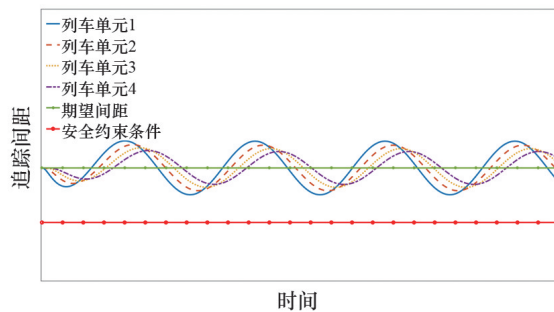


图10 具有队列稳定性的VCTS内列车单元追踪间距

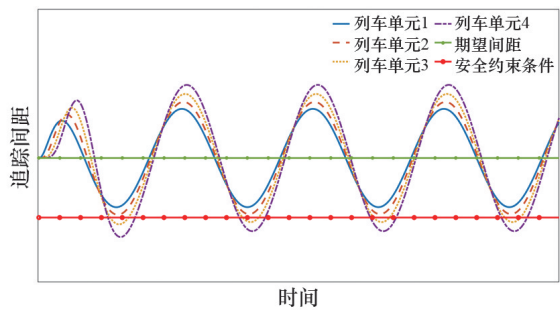


图11 不具有队列稳定性的VCTS内列车单元追踪间距

为了保证列车单元在追踪运行过程中能够严格满足安全约束条件,必须设计合适的控制方法。既有研究中大多采用了模型预测控制(model predictive control, MPC)方法作为VCTS中列车单元的追踪控制方法。MPC方法的优势在于,能够对VCTS未来一段时间内的驾驶策略进行规划并基于动力学模型预测相应的列车运行轨迹,通过比较不同的规划驾驶策略及其可能的控制效果,最终找到一种最优驾驶策略序列,能够使虚拟编组列车单元的运行轨迹最接近期望状态且能够同时满足各种约束条件,据此来对列车的驾驶行为进行控制并在下一个控制周期进行迭代。例如,Felez等^[40]将MPC方法应用于VCTS的列车单元追踪控制中,其中领头车的控制目标是跟踪一条提前规划好的速度曲线,而跟随车的控制目标则是与其前方相邻的列车单元保持固定的间距。Liu等^[41]首先提出了一种基于分布式MPC的方法来保证VCTS的局部稳定性,之后进一步考虑列车运行过程中的未知扰动以及控制响应延迟,又提出了一种基于Tube的鲁棒MPC方法^[42],同时保证了局部与队列稳定性。Luo等^[43]针对VCTS的阻力参数不确定性问题设计了一种自适应MPC方法,通过在线参数辨识方法提升控制精度。上述MPC方法均将领头车的规划运行轨迹作为已知条件,而Chai等^[44]则通过长短期记忆神经网络对前车未来的运行轨迹进行预测,并在此基础上使用MPC方法实现跟随车的追踪运行控制。类似的约束控制方法亦可参考文献[45]中提出的最优控制方法。

但是,当VCTS目标运行速度发生变化时,采用不同类型的期望间距策略会使得VCTS表现出不同的运行特征。其中,文献[40-41,43-44]采用了固定数值的期望间距,因此在VCTS目标速度变化过程中所有列车单元仍然能够保持同步(同速)运行。但在大多数现实条件下,安全防护距离的特征是会随着VCTS速度的增大而增大,所以为保证行车安全,需要列车单元追踪的期望间距也应该符合这种特点,否则,若期望间距仍采用固定数值,则该数值就需要取所有可能情况中的最大值。文献[23-25,42]采用了与速度成正比的期望间距,但在

VCTS目标速度随运行过程而发生变化时,其内部的列车单元无法始终保持同步运行,会出现彼此速度不一致、追踪间距大幅变化的情况。在城市轨道交通中,这种方法带来的最重要的问题是列车单元间进站停车不同步的问题,下面对该问题进行详细说明。

引入虚拟编组列车概念的一个重要诉求是期望其保持与物理编组列车一样的运行管理方式,因此,在城市轨道交通中,一个天然的要求是需要虚拟编组列车的各列车单元能够在站台同步停车(即领头车和跟随车在同一站台停稳的时间一致)并同步开关列车车门和站台屏蔽门。图12给出了一种典型的由两列车单元构成的VCTS采用前文所述控制方法时的进站停车运行曲线。可以看出,在前车按照传统的驾驶策略控制列车进站制动过程中,由于列车间的期望追踪间距与速度成正比,同一时刻后车以比前车更高的速度运行,从而逐渐缩短与前车的追踪间距。但由于两车的相对速度受到安全约束条件(图中体现为后车的紧急制动触发(emergency brake intervention, EBI)速度,该速度与两车的运行状态和间距相关)的限制,后车速度不能过高,因此在前车停车时两车间距尚未缩短至目标距离,后车还需要在前车停车后再运行一段距离(和时间)再停车,导致两车在同一站台的停车时间存在时间差。虚拟编组列车作为一个整体,因此,领头车在到达站台停车以后还需要经过上述时间差的等待,直至全部列车单元均停稳后才能开始站台作业。当上述停站时间差较大时将影响虚拟编组列车在站台的正常作业,并进一步影响虚拟编组技术的可行性。

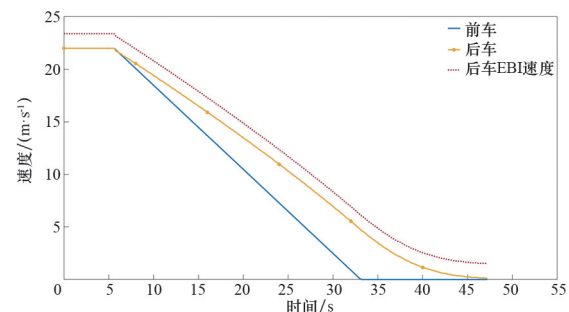


图12 存在停站时间差的VCTS进站停车过程示意

3.2 基于协同控制的VCTS列车单元追踪控制方法

既有的列车追踪控制方法中,虽然车能够根据前车状态调整控制行为并尽最大努力缩短两车间距,但是前车的控制行为调整并不受后车状态制约,因此两车整体上未能达到最优的控制效果,这是虚拟编组列车单元间存在停站时间差的主要原因。唐涛等之前的工作中已经对该问题的现象及原因已经进行了描述^[47],通过理论分析证明出仅调整后车的驾驶策略难以实现同步停车;在实际项目应用中,列车真实运行数据同样表明在前车制定驾驶策略时不考虑后车状态的情况下难以满足虚拟编组列车相应的性能要求;同样的现象在文献[36-37,48]中也有体现。因此,必须在既有控制方法基础上协同控制各列车单元的运行过程才可能解决。

针对上述问题,较为可行的解决办法是引入列车单元协同控制方法,即对所有列车单元的控制行为根据整体状态和驾驶目标进行统一的优化和决策,从而在控制任意列车单元时均充分考虑了本列车单元及其他列车单元的状态与可能的驾驶策略,通过协作地调整每个列车单元的驾驶策略实现虚拟编组列车的整体控制目标。其基本原理如图13所示,在对虚拟编组列车进行协同控制时,将VCTS内的所有列车单元作为一个整体进行控制,以保持较小的追踪间距、提升列车单元在站台停车的同步性等作为目标,协同地制定所有列车单元的驾驶策略。文献[49]中对基于协同控制的列车单元追踪控制方法进行了详细介绍,感兴趣的读者可进一步参考。采用协同思想解决虚拟编组列车运行控制问题具有明显的优势,一方面是因为VCTS虽然是

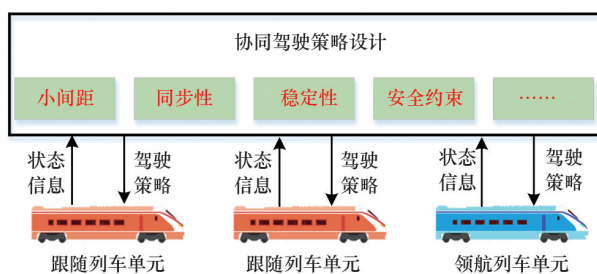


图13 VCTS协同控制方法的原理

虚拟编组的,但在概念上仍然是一列车,因此作为一列车进行控制,可与既有列车运行控制系统对列车进行控制的主要逻辑保持一致;另一方面,协同控制能够统一对所有列车单元的驾驶行为进行优化和决策,可充分提升虚拟编组列车的性能表现。

4 结论

概述了城市轨道交通领域虚拟编组列车的概念及国内外总体研究情况,在此基础上,对虚拟编组列车安全防护和运行控制2项最重要的关键技术的研究进展进行了分析,并针对性地提出了基于时空分隔的列车安全防护方法和基于协同控制的虚拟编组列车运行控制方法。限于篇幅,本研究整体介绍了相关方法的基本原理,详细内容可参考文献[33]、[49]。

虚拟编组列车运行控制相关研究整体仍处于起步阶段,其中最大的难点是如何在保证行车安全的前提下持续缩短列车单元追踪间距(直到达到与物理编组一致的效果)。因此,后续仍有必要对协同控制理论及其在虚拟编组中的应用进行深入研究。此外,虚拟编组列车的动态编解控制技术以及在动态编解条件下的列车智能调度方法均是我们未来的研究方向。

参考文献(References)

- [1] 中国共产党中央委员会, 中华人民共和国国务院. 交通强国建设纲要[A]. 北京: 中国共产党中央委员会, 中华人民共和国国务院, 2019.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J]. 城市轨道交通, 2020(4): 8-23.
- [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] 施仲衡, 丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 1-4, 11.
- [5] Bock U, Varchmin J U. Enhancement of the occupancy of railroads using virtually coupled train formations[C]// World Congress on Railway Research (WCRR). Tokyo. 1999: 1-7.
- [6] Song H F, Schnieder E. Availability and performance

- analysis of train-to-train data communication system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(7): 2786–2795.
- [7] Song H F, Gao S G, Li Y D, et al. Train-centric communication based autonomous train control system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(1): 721–731.
- [8] Neri A, Rispoli F, Salvatori P. A GNSS based solution for supporting virtual block operations in train control systems[C]//2015 International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN). Piscataway: IEEE, 2015, doi: 10.1109/IAIN.2015.7352253.
- [9] Fantechi A, Gnesi S, Gori G. Future train control systems: Challenges for dependability assessment[C]//International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods. Cham: Springer, 2022: 269–285.
- [10] Rail Safety and Standard Board (RSSB). Closer running (reduced headways): preparing a road map to further develop the closer running concept [R]. London: RSSB, 2016.
- [11] Shift2Rail. Annual work plan 2016[R]. Brussels, Belgium: Shift2Rail, , 2016.
- [12] Shift2Rail. CONNECTA[EB/OL]. [2022-12-01]. https://projects.shift2rail.org/s2r_ip1_n.aspx?p=CONNECTA.
- [13] Shift2Rail. X2RAIL1[EB/OL]. [2022-12-01]. https://projects.shift2rail.org/s2r_ip2_n.aspx?p=X2RAIL-1.
- [14] Shift2Rail. MOVINGRAIL[EB/OL]. [2022-12-01]. https://projects.shift2rail.org/s2r_projects.aspx.
- [15] AVP Technology. Virtual coupling technology[EB/OL]. [2022-12-01]. <https://avpt.ru/en/products/product-line-for-freight-trains-electrical-locomotives/virtual-coupling-technology/>.
- [16] Quaglietta E, Spartalis P, Wang M, et al. Modelling and analysis of Virtual Coupling with dynamic safety margin considering risk factors in railway operations[J]. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2022, 22: 100313.
- [17] Aoun J, Quaglietta E, Goverde R M P, et al. A hybrid Delphi-AHP multi-criteria analysis of moving block and virtual coupling railway signalling[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 129: 103250.
- [18] Nold M, Corman F. Dynamic train unit coupling and decoupling at cruising speed: Systematic classification, operational potentials, and research agenda[J]. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2021, 18: 100241.
- [19] 杨安安, 孙继营, 汪波, 等. 基于虚拟编组技术的大小交路列车开行方案优化[J]. *北京交通大学学报*, 2022, 46(4): 9–14.
- [20] 赵兴东, 张蕾, 谢莎婷, 等. 基于虚拟编组技术的首都机场线列车开行方案研究[J]. *现代城市轨道交通*, 2022(4): 59–65.
- [21] 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]. *都市轨道交通*, 2022, 35(1): 126–133.
- [22] Gallo F, Febbraro A D, Giglio D, et al. A mathematical programming model for the management of carriages in virtually coupled trains[C]//2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Piscataway: IEEE, 2020: 1–6.
- [23] Park J, Lee B H, Eun Y. Virtual coupling of railway vehicles: Gap reference for merge and separation, robust control, and position measurement[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(2): 1085–1096.
- [24] Di Meo C, Di Vaio M, Flammini F, et al. ERTMS/ETCS virtual coupling: Proof of concept and numerical analysis [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(6): 2545–2556.
- [25] Zhang Z X, Song H F, Wang H W, et al. Cooperative multi-scenario departure control for virtual coupling trains: A fixed-time approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 8545–8555.
- [26] Wang Q, Chai M, Liu H J, et al. Optimized control of virtual coupling at junctions: A cooperative game-based approach[J]. *Actuators*, 2021, 10(9): 207.
- [27] 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.
- [28] Xun J, Li Y Y, Liu R H, et al. A survey on control methods for virtual coupling in railway operation[J]. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2022, 3: 838–855.
- [29] 唐涛. 铁路区间闭塞[EB/OL]. *中国大百科全书*. [2022-12-01] <https://www.zgbc.com/ecph/words?SiteID=1&ID=118874&SubID=102467>.
- [30] Woodland D. Optimisation of automatic train protection systems[D]. Sheffield: University of Sheffield, 2005.
- [31] 宁滨. 轨道交通系统中的列车运行追踪模型及交通流特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [32] 宋志丹, 徐效宁, 李辉, 等. 面向虚拟编组的列控技术

- 研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(6): 155-159.
- [33] Wang J, Liu H, Tang T, et al. A Space-time interval based protection method for virtual coupling[C]//2022 China Automation Congress (CAC). Beijing: Chinese Association of Automation, 2022: 4906-4911.
- [34] Zhou Q, Zhang C Y, Bao F, et al. The safety braking protection model of virtually coupled train platoon in subway[C]// 2020 10th Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Piscataway: IEEE Press, 2020: 401-406.
- [35] Xun J, Chen M L, Liu Y F, et al. An overspeed protection mechanism for virtual coupling in railway[J]. IEEE Access, 2020, 8: 187400-187410.
- [36] Su S, Liu W T, Zhu Q Y, et al. A cooperative collision-avoidance control methodology for virtual coupling trains [J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 173: 106703.
- [37] Li S E, Zheng Y, Li K Q, et al. Dynamical modeling and distributed control of connected and automated vehicles: Challenges and opportunities[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(3): 46-58.
- [38] Feng S, Zhang Y, Li S E, et al. String stability for vehicular platoon control: Definitions and analysis methods [J]. Annual Reviews in Control, 2019, 47: 81-97.
- [39] Wang Z R, Bian Y G, Shladover S E, et al. A survey on cooperative longitudinal motion control of multiple connected and automated vehicles[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2020, 12(1): 4-24.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Liu Y F, Zhou Y, Su S, et al. Control strategy for stable formation of high-speed virtually coupled trains with disturbances and delays[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 38(5), doi: 10.1111/mice.12873.
- [43] Luo X L, Tang T, Liu H J, et al. An adaptive model predictive control system for virtual coupling in metros[J]. Actuators, 2021, 10(8):178.
- [44] Chai M, Su H X, Liu H J. Long short-term memory-based model predictive control for virtual coupling in railways[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 1-17.
- [45] 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.
- [46] 张小林, 赵磊. 模型预测控制在轨道交通虚拟耦合列控系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 233-237.
- [47] Luo X L, Liu H J, Wang J Y, et al. Arrival time difference in virtually coupled train set: Cause and solution [C]// 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Piscataway: IEEE, 2022: 474-479.
- [48] Luo X L, Liu H J, Zhang L, et al. A model predictive control based inter-station driving strategy for virtual coupling trains in railway system[C]//2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Piscataway: IEEE, 2021: 3927-3932.
- [49] Lang Y H, Liu H J, Luo X L, et al. DQN-based speed curve optimization for virtual coupling[C]//2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Piscataway: IEEE, 2022: 1758-1763.

Research review of the protection and operation technology for virtually coupled train sets in metros

TANG Tao¹, LUO Xiaolin^{1,2}, LIU Hongjie^{2,3}, ZHANG Yanbing³

1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

3. National Engineering Research Center of Rail Transportation Operation and Control System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Metros have the problems of passenger crowding during the peak hours and waste of transport capacity during the non-rush hours. Virtual coupling (VC) is expected to be a good solution to this problem, by which train formation can be dynamically adjusted, thus the line capacity is adjusted. This paper introduces the concept and relevant research of VC, and the existing problems and possible solutions are presented. Train protection and operation control methods are two most important problems among them. For the former, although relative braking distance principle is adopted, the space-time relationship between successive trains is omitted, thus, a space-time-separation-based train protection principle is proposed in this paper; for the latter, most of the existing studies only focus on the cruising control of VC, while the problem of non-synchronous parking that exists in the process of VC arrival at a station is wrongly ignored, which is particularly important in metros, a cooperative-control-based train following method is presented to solve this problem. This paper can provide a reference for readers to understand the development trend of virtual coupling technology in metros and to engage in relevant research.

Keywords Metro; virtual coupling; train operation; train protection; cooperative control ●



(责任编辑 刘志远)