

文章编号: 1003-1421(2024)10-0073-09 中图分类号: U294.1 文献标识码: A

DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2024.10.09

引用格式: 宋宗莹, 丁辉, 王兴中, 等. 基于列车群组运行的重载铁路运输组织研究综述[J]. 铁路运输与经济, 2024, 46(10): 73-81, 97.
SONG Zongying, DING Hui, WANG Xingzhong, et al. Review of Heavy Haul Railway Transportation Organization Based on Group Train Operation[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(10): 73-81, 97.

基于列车群组运行的重载铁路运输组织研究综述

宋宗莹¹, 丁辉², 王兴中¹, 王文斌¹, 倪少权³, 陈钉均³

(1. 中国神华能源股份有限公司, 北京 100011; 2. 国能包神铁路集团 调度指挥中心, 内蒙古 包头 014000; 3. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031)

摘要: 列车群组运行模式为重载铁路通过加大行车密度解决运能紧张问题提供了新途径。该模式可突破车站接发车、集解编运输组织模式、快捷货运三大瓶颈, 实现运输效能、运输组织灵活性及快捷货运时效性的提升。在分析虚拟编组技术的发展历程及技术特征、重载铁路群组运输控制和运输组织研究现状的基础上, 从重载铁路群组列车控制理论与方法、列车群组运行条件下运输组织模式适应性、列车群组运行条件下运输组织方法3个方面, 系统总结了既有研究存在的问题, 提出了该模式从理论走向应用需要进一步研究的关键问题, 包括适应复杂运营条件的重载铁路列车群组运行协同控制方法、列车群组运行下高效运输组织模式、列车群组计划与运行图编制智能化理论与技术、列车群组运行智能调整优化理论与技术研究等。

关键词: 重载铁路; 群组运行; 群组控制; 群组计划; 群组运行图

Review of Heavy Haul Railway Transportation Organization Based on Group Train Operation

SONG Zongying¹, DING Hui², WANG Xingzhong¹, WANG Wenbin¹, NI Shaoquan³, CHEN Dingjun³

(1. China Shenhua Energy Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2. Dispatching and Command Center, Guoneng Baoshen Railway Group, Baotou 014000, Inner Mongolia, China; 3. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Group train operation mode offers a new approach to alleviating the capacity pressure of heavy haul railways by increasing traffic density. This mode can overcome three major bottlenecks: train reception and departure at the station, transportation organization mode of train collection, disassembly, and marshalling operation, and express freight transportation, thereby enhancing transportation efficiency, transportation organization flexibility, and timeliness of express freight transportation. Based on the analysis of the development and technical characteristics of virtual marshalling technology, as well as the current research status of transportation control and transportation organization for heavy haul railways based on group trains, this paper identified existing issues from three aspects: the control theory and methods for group trains of heavy haul

收稿日期: 2024-05-30

通信作者: 陈钉均(1982—), 男, 四川南充人, 西南交通大学交通运输与物流学院教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172321, 52102391); 中国神华能源股份有限公司科技项目(GJNY-22-7/2300-K1220053); 四川省科技创新人才项目(2024JDRC0020)

railways, the adaptability of transportation organization modes under group train operation conditions, and methods of transportation organization under group train operation conditions. It proposed key issues that need to be further studied from theory to application of this model, including collaborative control strategy for group train operation of heavy haul railways adapted to complex operation conditions, efficient transportation organization mode under group train operation, intelligent theories and technologies for group train planning and train working diagram compilation, intelligent adjustment and optimization theories and technologies for group train operation.

Keywords: Heavy Haul Railway; Group Train Operation; Group Train Control; Group Train Plan; Group Train Working Diagram

0 引言

重载铁路是铁路货运的重要组成部分,对于煤炭、矿石等大宗货物具有运能大、成本低、效率高等优势,在中国、美国、加拿大、南非、澳大利亚、巴西等大宗货物运输需求高的国家得到了广泛研究和应用。我国先后建成大秦(韩家岭—柳村南)、朔黄(朔州—黄骅港口)、瓦日(瓦塘—日照南)、浩吉(浩勒报吉南—吉安)等一系列标志性重载铁路工程,大秦铁路和朔黄铁路已实现2万吨重载列车常态化开行,年运量分别突破4.5亿t和3.6亿t,在国家经济发展和现代化建设中发挥了重要作用。

随着国民经济水平的不断提高,重载铁路运量不断攀升,运能紧张情况日益加剧,扩大运输能力、提高运量、提升效率是当前我国重载铁路运输发展的迫切需求。基于多年运营经验,重载铁路主要采取增大列车轴重(多拉)、提高列车速度(快跑)和加大行车密度(加密)3种手段扩大运输能力。其中,随着列车牵引质量和速度的提升,列车纵向冲动、网压波动、机车安全和列车平稳操作等安全隐患激增,且大编组列车在站技术作业时间长,受到发线长度、线路坡度等制约,对基础设施要求和影响较大。随着无线通信和先进控制技术的快速发展,虚拟连挂和群组运行技术成为可能,是提高重载铁路运输能力更有效的途径。

虚拟连挂技术源于Bock在1999年提出的列车运行模式,一个列车单元由一辆或几辆车组成,其核心在于列车单元之间不通过传统的车钩进行物理连接,而是相互保持一定的距离独立追踪运行。国外对虚拟编组技术的研究起步较早。欧盟Shift2Rail计划自2015年起滚动支持MovingRail^[1],CONNECTA^[2]和X2RAIL^[3]等系列项目,针对虚拟

编组的概念及经济与技术可行性、虚拟编组列车的车辆制造和列车运行控制系统开展持续研究。在虚拟编组技术的验证方面,西班牙CAF公司在2018年使用2列有轨电车测试了虚拟编组列控系统的原型^[4];俄罗斯AVP科技公司将虚拟编组列控系统在俄罗斯东部货运铁路上进行了实验^[5]。我国对虚拟编组技术的研究与应用起步稍晚,但发展迅速。中国城市轨道交通协会2020年发布《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》^[6],将列车协同编队列为建设重点,并设立“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,研究虚拟编组等相关技术,在北京地铁11号线和19号线进行试验验证和示范应用^[7]。然而在虚拟编组模式下,每个列车单元都装备独立的动力和控制系统,并且所有单元列车都由首个列车控制^[8-9],对地面无线网络覆盖要求高,单元列车虚拟连挂和分解不灵活,难以在我国重载铁路应用。

重载列车群组运行控制系统是采用基于车-地无线通信和车-车通信进行信息传输,并对多辆智能单元列车组成的列车群采用速度和距离二维控制模式进行协同控制的列车运行控制系统。2022年,中国国能集团有限公司立项十大重大科技专项“重载列车群组运行控制系统技术研究与应用”项目^[10],由中国神华能源股份有限公司、北京全路通信信号研究设计院集团有限公司、西南交通大学、中南大学等单位共同实施。该项目通过智能单元列车间自协同安全控制,构造出沿运行路径串行排列、动态间隔的列车群组,通过集群控制方法,对整群多列进行控制,形成小编组、高密度、大运能的灵活机动运行方法。重载列车群组运行控制系统包括地面设备和车载设备,应遵循故障-安全原则,满足群组编组、群组运行、群组解编、群组列车群

间按固定闭塞或移动闭塞运行,最高允许速度不超过 80 km/h,内燃、电力机车的运用要求以及不同机车类型混合编组运行、群组列车、非群组列车混合运行,群组内万吨组合列车最小发车间隔 5 min 等技术要求。

相较于传统运输组织模式,重载铁路列车群组运行模式下行车间隔进一步缩短,列车群组追踪运行及车站技术作业过程复杂,面临车流特征、运行控制、供电能力、天窗设置、车站技术作业等众多影响因素制约,对列车运行安全控制、列车运行计划编制、行车调度调整等方面都提出了新的要求,确保重载列车群组运行安全控制,建立群组运行下重载铁路高效运输组织方法迫在眉睫。

1 列车群组运行模式下运输组织的复杂性特征

(1) 群组运行模式下列车运行控制面临安全挑战。群组运行模式下群组列车之间、群组内单元列车之间需要实时互连和信息共享。对于列车运行控制系统,重载铁路目前采用的固定闭塞模式难以支持更短的列车跟踪间隔,确保动态环境中的列车安全运行。如何尽可能减少对已有基础设施和装备进行改造或升级,实现资源利用效益最大化,降低运营成本的同时保障列车群组运行安全是首先需要解决的问题。

(2) 群组运行模式下重载铁路列车群组计划与运行图编制难度大。重载铁路列车群组计划决定了列车组群/解群站点、顺序、规模,是提升运输效率、降低运输成本、保障重载运输安全的关键环节。群组计划不仅需考虑车流特征(流量、流向、流时、流速)、群组技术作业、线网车流接续时间等要求,还需要考虑列车群组容量、间隔时间标准、供电能力、车站线网条件等因素,且多元群组混行条件下单元列车与群组列车、群组列车与群组列车间的运行线相互作用,群组计划、列车运行图、车站作业计划、机车周转图之间的耦合性更强,群组运行模式下重载铁路列车群组计划与运行图编制方法亟需研究。

(3) 群组运行模式下重载铁路列车运行计划调整智能化水平要求高。相较于传统运行组织模式下

列车运行调整主要依赖于调度员人工经验,群组运行模式下重载铁路列车运行计划一旦受到干扰,不仅影响群组内单元列车和群组列车,还直接关系到群组计划、群组运行计划、车站到发线运用、机车周转等相关计划的调整,调度人员难以在如此复杂影响因素下做出合理决策,群组运行模式下重载铁路列车运行计划调整智能化水平要求极高。

2 重载铁路列车群组控制研究现状

国内外已开展了重载列车纵向动力学模型、重载列车智能驾驶、智能制动等方面的研究。李斌等^[11]引入黏着系数,讨论其不同工况下对动力学模型性能的影响;Spiryagin等^[12]使用协同仿真,组合多体仿真和牵引电力系统仿真两个软件建立重载列车模型。周发扬^[13]针对传统同步制动的不足提出了一种智能制动方法以缓解重载列车的纵向冲动;Zhang等^[14]对空电联合制动的重载列车进行考虑安全、速率和节能3个指标的优化,并构建长距离预测控制模型;王禹^[15]提出一种专家监督的SAC强化学习智能驾驶控制策略,提升了控制器的效率与稳定性;汤辉玥^[16]依托列车的纵向多质点模型,利用强化学习算法研究重载列车最优驾驶问题。

对于传统的列车控制系统,无论站间闭塞、固定闭塞、准移动闭塞还是移动闭塞,都不考虑前车运行速度。若需要进一步提高运能、提升运输效率,必须通过提高列车运行控制智能化水平、降低列车追踪间距的方式才能实现,国内外学者对列车追踪运行速度控制和运行控制策略优化进行了深入研究,为重载列车群组运行控制提供了重要参考。SONG等^[17-18]深入研究列车运行自动控制系统(ATCS),指出当前的列车控制系统以车地通信为基础,存在接口和子系统繁多的问题,通过列车到站间隔和线路通行能力的对比分析,论证了ATCS的优势;林俊亭等^[19]基于虚拟编组列车动力学方程搭建多车追踪模型,研究基于扩张状态观测器的触发模型预测控制方法;刘宏杰等^[20]构建虚拟编组列车参考曲线生成问题的数学优化模型;罗啸林等^[21]研究基于分布式鲁棒模型预测控制(RMPC)的虚拟编组列车追踪控制方法;高士根^[22]通过深入分析多列车耦合的复杂动力学特性,提出单值学习的神经自

适应控制律,提高线路的利用率,但没有考虑列车组内部的耦合行为; Bai 等^[23]利用多智能体一致性技术设计相应的分布式控制器,确保列车组运行更加平稳,但其跟踪时间很长,响应速度慢; Yang 等^[24]提出有限时间分布式控制算法,使队列在有限时间内收敛一致并证明了算法的稳定; Polyakov^[25]提出了固定时间 Lyapunov 稳定理论,可获得不依赖于初始条件的确定收敛时间以及全局有限时间稳定性。但上述方法由于控制模型准确性较为欠缺以及计算量较大而难以实际应用于重载列车控制。

在列车运行控制策略优化方面,传统列车一般采用集中式控制和固定闭塞,运行追踪间隔大、线路利用率低。Takagi^[26]采用移动闭塞列控同步控制的策略研究列车最小追踪间隔; Lin 等^[27]提出基于分布式协同控制的列车追踪间隔动态调节方法,但未考虑干扰等不确定因素,实际追踪间隔可能会偏离期望值从而对列车运行造成一定的影响; Zhao 等^[28]基于虚拟耦合车车通信增加了列车追踪间隔控制环路,实现追踪间隔安全预警和动态调整。上述方法大多数没有考虑长大重载列车的动力学响应特性,所设计的控制方法难以在重载铁路直接应用。因此通过构建重载列车群组间动态追踪模型,分析多列重载列车在轨道网络中相互作用和动态追踪行为,在多质点动力学特性的基础上,开展多列重载列车之间相互影响和协同运行研究,探究重载列车群组间动态追踪技术意义重大。

3 重载铁路车流组织研究现状

国内外学者主要关注了车流径路优化和动态车流组织2方面问题,提出应用离散时空网络方法建

立单目标或多目标数学模型,并设计拉格朗日松弛算法、模拟退火算法、灰狼优化算法等求解。在动态车流组织方面,韩雪松等^[29-30]针对重载运输装车端车流组织问题,考虑年目标运量、机车数量等约束条件,提出了基于装车域车流组合优化的战略方案; 付建军^[31]和王雅群^[32]研究了重空列协同运输组织优化方法,构建了基于离散时空网络方法的动态空重车流组织优化模型,提出了动态需求下路网空重车的车流径路协同优化策略。在车流径路优化方面,既有文献主要研究铁路网车流分配与径路优化的组合优化问题。田亚明、Murali 等^[33-34]考虑车流的运输时间、运输费用、树状径路、车流组织模式等因素,建立单目标或多目标数学模型,主要分为弧-路模型和点-弧模型两大类。在求解方法方面,对于规模较小的路网优先采用高效的优化软件直接进行求解,但为了更好地应用到路网规模较大的实际问题中,学者们采用拉格朗日松弛、Bender 分解等精确算法或设计问题导向的启发式算法^[35-37]。现有车流组织优化的研究对重载铁路重空车流一体化分配的研究相对较少,较少考虑路网车流组织与编组计划、点线能力协调优化,且未对群组车流在路网层面走行径路和技术站内部的运输组织过程进行协同优化,难以实现群组列车的车流组织与路网运力资源精确匹配。重载铁路车流组织代表性成果如表1所示。

4 重载铁路列车运输计划研究现状

针对重载铁路列车运输计划,国内外学者主要基于货运计划、列车编组计划等基本运输计划,考虑列车运行成本、货物在途时间、车流接续等因

表1 重载铁路车流组织代表性成果
Tab.1 Representative achievements on flow organization of heavy haul railways

作者	研究问题	建模目标	模型结构	求解方法	研究对象	算例规模
韩雪松 ^[29]	重载运输的装车域列流组织	组合列车总组合时间及走行时间之和最小	非线性整数规划模型	启发式算法	大秦线	大同枢纽及周边装车支线与大同枢纽连接的分界站
田亚明 ^[33]	铁路车流分配过程中的不可行流问题	确定和计算车流分配过程中产生的不可行流	点-弧模型和弧-路模型	Lingo 求解器	自构建算例	由10个站点和11条弧段组成的路网
温旭红 ^[35]	铁路网车流分配与树状径路综合问题	广义车流走行最小	混合整数规划模型	拉格朗日松弛算法	我国某局部地区铁路支点网络	41个车站、110条有向路段
LIN ^[36]	货物列车编组计划	最小化货物总延误	双层规划模型	模拟退火算法	中国铁路系统	

素,对货物列车运行图优化模型及算法进行研究。在运行图优化模型方面,Zhou等^[38]构建单线铁路列车运行图基于时空网络的整数规划模型,开发带有下界定界技术的分支定界算法求解模型;江峰等^[39]通过时空网络构建了一个处理大规模货物列车运行图问题的整数规划模型,采用启发式算法解决该问题;Jamili等^[40]构建基于周期性事件调度(PESP)的优化模型,以单线铁路不同种类列车延误最小为目标编制列车运行图。在运行图求解算法方面,国内外学者设计分支定界法^[38]、启发式算法^[39]、模拟退火算法和粒子群优化算法^[40]等混合启发式算法求解货物列车运行图规划模型。还有部分学者研究动态货物列车运行图编制问题,倪少权等^[41]在基本列车运行图的基础上,构建市场导向动态货物列车运行线挑选模型,并运用模拟退火算法求解。既有研究主要针对铁路列车运行图优化问题,缺少对列车群组运行模式下重载列车运行图优化的研究。有必要考虑重载群组列车运行特征及在站技术作业过程,构建群组运行模式下重载列车运行图编制原理与方法,以实现货运需求与运能的动态匹配及运输效能的提升。

虚拟编组/灵活编组模式下运输计划优化方面,国内外主要围绕列车编组方案设计、虚拟编组列车运行图编制、灵活编组模式下的运行图编制开展理论研究。Chen等^[42]构建了重载成组列车编组、停站方案的混合整数规划模型,以解决重载铁路成组列车运营调度问题;Ning等^[43]考虑列车区间内虚拟耦合过程,利用博弈论优化铁路枢纽站虚拟编组列车编组顺序及数量,以提高铁路运输能力;灵活编组模式下,Pan等^[44]考虑客货运需求、耦合/解耦过程、车站技术作业内容等因素,以运输成本、旅行时间等为目标,构建虚拟编组/灵活编组模式列车运行图优化模型;Tai等^[45]构建了灵活编组模式下基于网络流的列车运行计划与动车组运用计划协同编制模型,以动态匹配运输能力和客运需求,降低运行能耗。总的来看,既有研究主要从运输能力、运输成本和时间角度,探讨了虚拟编组/灵活编组模式下列车编组方案与运行图编制方法,但能够直接应用于重载铁路的研究很少,难以适应列车群组运行模式下重载铁路列车运行图智能编制需求。

5 重载铁路列车运行调整研究现状

在重载铁路列车运行调整研究方面,国内外学者围绕提升运营效率、降低运营成本及确保运行安全等核心目标,通过调整列车编组计划、优化到发线分配、动态调度空车与机车车辆构建高效的运行调整模型,为重载铁路的智能化运营提供了有力支持。Aleksandr等^[46]为减少列车在车站和区间的运行调整次数,以降低运营成本,对列车编组计划进行了调整;Bohlin等^[47]在考虑列车调度、列车到发时间及时性要求和轨道能力的约束下,对货物列车进行编组场内到发线分配进行求解,并用纳维亚站场历史数据进行了测试;Upadhyay等^[48]在满足铁路服务质量的前提下,提出了铁路货运专线下的空车分配和列车动态调度问题下的整数规划模型,对机车车辆和列车调度决策进行调整;陈雍君等^[49]以大秦线为例,构建重载铁路运行调整模型,并研究了重载铁路的调整策略问题;王迎春^[50]从各调度台的业务需求分析入手,从总体结构上阐述了朔黄铁路综合调度系统的设计方案;陈雍君等^[49]针对复杂路网建立最小化列车旅行时间为目标函数的列车运行调整模型,并用重载铁路的实际算例证明该方法的有效性和高效性。李荣娜^[51]分别构建普通调整模型、列车合并调整模型及加开列车调整模型,并设计粒子群算法对模型进行求解。

6 现有研究评述

综上,传统列车控制系统和运行特性方面,无论站间闭塞、固定闭塞、准移动闭塞还是移动闭塞,主要集中在单列车的控制技术及车辆本身性能特性研究。货物列车运输计划编制与调整问题方面,既有研究主要关注常规编组、灵活编组、虚拟编组模式。因此,虚拟编组/灵活编组模式与重载运输组织的结合尚处于起步阶段,在现有研究的基础上考虑相关技术特性,探究列车群组运行下重载路网如何开展高效运输组织以充分发挥路网整体效能,迫在眉睫。

(1) 重载铁路群组列车控制理论与方法不足。重载列车通常具有极大的牵引重量,这导致列车的惯性增大,启动、制动和调速过程变得更加缓慢和

复杂,且重载列车编组较长,列车纵向冲动增大,车钩受力情况复杂,这就要求列车运行控制系统需要具备更强的牵引和制动控制策略,考虑重载列车在多种复杂线路条件下的安全运行,实现列车之间更精确的速度匹配和间隔控制。既有研究主要关注单列车在理想状态和绝对制动距离下的运行特性、控制理论方法及策略问题,在列车运行特性方面,主要考虑车辆本身性能和运动状态建立模型,缺乏处理系统中未知时变参数以及外部复杂环境中不确定干扰的能力,难以精准描述重载列车群组跟随特性。在列车运行控制方面,主要考虑基于车辆指标最优情况下的控制理论,未考虑长大重载列车的动力学响应特性与不同线路、工况及运行环境状态约束等因素,难以满足重载铁路列车群组运行控制需求。

(2) 重载铁路群组列车运输组织模式适应性研究匮乏。既有常规信号条件下不同技术标准的重载铁路以实现运输能力最大化为目标的运输组织模式,即2万吨级线路主要按一定比例同时开行2万吨和万吨列车,万吨级线路主要开行万吨列车或按一定比例同时开行万吨和5 000吨列车;机车主要按肩回制交路运用,车辆按固定车底循环运转;路网中各条线路主要开行本线列车,不同线路间的列车通过在衔接技术站办理组合/分解作业以实现跨线运行;列车编组计划、列车运行图、机车周转计划等运输计划主要依靠人的经验分步骤编制和手动调整。在群组运行模式下需要协调货物运输的需求(车流)、列车的编组和开行(列流)、列车群组的协同运作(群流)以及线路和车站的通过能力,运行计划调整难度大,由于群组运行涉及多列列车的协同作业,一旦出现诸如天气变化、设备故障、临时施工等意外情况,对原有的运行计划进行调整就变得极为复杂。这种调整不仅要考虑单列车的运行状况,还要兼顾群组中其他列车的位置、速度和作业进度,任何一个环节的失误都可能引发连锁反应,影响整个运输系统的正常运转。在重载铁路群组列车运行中,机车的调配、维护和使用需要综合考虑多方面因素,包括不同机车的性能特点、运行里程、维修周期等。而且,群组内列车的运行节奏和任务分配不同,使得机车的运用规划变得更加繁

琐。以往靠人的经验手动调整运输计划的模式将很难适用,亟需开展重载铁路群组列车运输组织模式适应性研究。

(3) 群组运行模式下重载列车运输组织方法欠缺。在重载铁路列车群组运行的情境下,对运输组织的多个方面提出了新的条件和要求。对于车流组织,需要更精确地预测和匹配群组内各列车的货运需求,实现货物的高效整合与分配;考虑群组列车之间的协同关系,优化车流的路径选择和组合,以减少运输成本和时间。在列车运行图编制方面,要充分考虑群组列车的协同出发和到达时间,合理安排列车在车站的停靠和会让,确保整个群组运行的连贯性和高效性;为不同速度和载重的群组列车规划专属的运行径路。对于列车运行调整,要求能够实时监测群组内各列车的运行状态,快速响应并做出调整决策,保障群组列车整体的运行秩序和准点率;在调整过程中,要兼顾群组内列车之间的相互影响,确保调整方案不会对其他列车造成过大干扰。既有研究主要关注常规编组、灵活编组、虚拟编组模式下货物列车运输组织问题。在车流组织方面,主要考虑点线能力协调与车流合理接续,优化列车编组计划,但缺乏考虑群组列车运行特征及技术站内部的运输组织过程,难以实现路网层面群组列车的车流组织与路网运力资源精确匹配。在货物列车运行图编制方面,尚未构建群组运行模式下重载列车运行图编制原则、原理、方法,难以实现货运需求与运能的动态匹配及运输效能提升。在重载铁路列车运行调整方面,主要以列车时刻表调整为主,较少涉及时刻表与车站到发线、机车运用等一体化调整模型与算法,调整方法的整体性和协调性欠缺,容易引发连锁反应影响整个运输系统。

7 研究展望

列车群组运行是提高重载铁路运输能力更有效的途径。如何对重载列车群组进行协同控制并确保安全,列车群组运行下重载路网如何开展高效运输组织以充分发挥路网整体效能,使列车群组运行控制系统研究成果落地并产生经济效益,是重载铁路列车群组运行控制系统发展与推广应用亟需解决的科学难题。

(1) 适应复杂运营条件的重载铁路列车群组运行协同控制方法研究。列车群组运行下,一个列车群组可由多个单元列车通过虚拟编组构成,群组内列车间和群组间通过生成和跟踪速度曲线进行协同控制。重载铁路在列车群组运行下的列车跟随特性、列车控制技术以及安全隐患和安全保障要求与在传统固定闭塞和移动闭塞系统下有显著不同,亟需根据列车群组运行控制系统的基本工作原理,理清不同长大坡道、牵引质量、闭塞制式等复杂运行条件下列车群组内和群组间的跟随运行特性,通过实地数据采集和模拟实验,分析不同条件下的运行特性。找出列车在不同条件下的运行规律,例如列车之间的跟随距离、速度变化趋势、制动响应时间等。基于此提出适应复杂运营条件的列车群组内和群组间自适应稳定协同控制理论与方法,研究集信息感知、数据融合、风险评估与预警、协同控制为一体的列车群组运行全过程全环节在线安全保障机制与技术。

(2) 重载铁路列车群组运行下高效运输组织模式研究。我国重载铁路线路条件复杂,列车重量大,机车操纵难度高且应急处置难。既有的重载铁路运输组织模式仅考虑在常规信号常规编组条件下的运输组织,其适应性明显不足。相较于既有运输组织模式,重载铁路列车群组运行下面临不同长大坡道、牵引质量、闭塞制式等复杂运行条件下重载列车群组安全稳定运行需求,需要解决组群/解群形式(车站组群/解群、区间组群/解群及车站/区间组群/解群)、组群规模、时间间隔标准、机车运用、车站技术作业、调度策略等新问题,因此,亟需研究重载铁路列车群组运行下高效的运输组织模式。结合现有重载铁路线路的坡度、曲线半径、轨道质量等线路条件信息,以及不同时间段、不同货物种类的运输需求数据,运用数据分析方法对这些数据进行处理和挖掘。根据分析结果,综合考虑线路能力、运输需求的波动性等因素,确定在不同条件下最合适的组群/解群形式、组群规模等。比如在长大坡道较多的路段选择较小规模的群组,在运输需求高峰期适当增大群组规模等。

(3) 重载铁路列车群组计划与运行图编制智能化理论与技术研究。相较于传统重载铁路列车编组

计划、列车运行图、机车周转计划等运输计划主要依靠人的经验分步骤编制和手动调整,列车群组运行对重载铁路列车群组计划、运行图、机车周转图等精细化编制提出了新的更高要求。需要剖析列车运行线、停站方案、组群/解群过程与能力的关系,研究重载铁路列车群组计划与运行图协调的关键要素及机制,针对单双线、多元群组列车混行等典型场景下群组列车运行图特点,研究重载铁路列车群组计划与运行图一体化编制优化模型与智能求解算法,进一步考虑运输能力、机车运用对列车群组计划与列车运行图编制的影响,研究基于“车流-列流-群流-能力”精确匹配的重载铁路列车群组计划、运行图与机车周转图协同编制优化方法,解决列车群组运行下重载铁路列车群组计划、运行图和机车周转图协同编制难题。

(4) 重载铁路列车群组运行智能调整优化理论与技术研究。群组运行条件下重载铁路列车群组计划、列车运行计划、机车周转计划、车站作业计划关联紧密,行车一旦遇到突发事件(如自然灾害、设备设施故障、行车事故、人因等)影响,可能导致全网的行车秩序混乱,严重影响重载铁路的运输效率,传统依靠人工经验的调度方法完全不可行。所以要考虑列车群组停运/加开/变规模、变更到发时刻、变更列车顺序等运力资源调配策略,研究复杂干扰场景下重载铁路列车群组运行计划与车站到发线运用调整综合优化方法、群组运行计划与机车周转计划调整综合优化方法解决列车群组计划、列车群组运行计划和机车周转计划等一体化智能调整问题。

参考文献:

- [1] Shift2Rail. MOVINGRAIL[EB/OL]. (2018-01-12)[2024-5-21]. https://projects.shift2rail.org/s2r_ip2_n.aspx?p=MOVINGRAIL.
- [2] Shift2Rail. CONNECTA[EB/OL]. (2016-01-09)[2024-5-21]. https://projects.shift2rail.org/s2r_ip1_n.aspx?p=CONNECTA.
- [3] Shift2Rail. X2RAIL1[EB/OL]. (2016-01-09)[2024-5-21]. https://projects.shift2rail.org/s2r_ip2_n.aspx?p=X2RAIL-1.
- [4] Vimeo. Virtual Coupling on Vimeo[EB/OL]. (2018-09-24)[2024-5-21]. <https://vimeo.com/291454771>.
- [5] AVP Technology. Virtual Coupling Technology[EB/OL].

- (2022-07-04) [2024-5-21]. <https://avpt.ru/en/products/product-line-for-freight-trains-electrical-locomotives/virtual-coupling-technology/>.
- [6] 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.
- [7] 北京日报. 首列智慧地铁列车将驶上北京11号线, 乘客等待时间减少40%. [EB/OL]. (2021-10-11) [2024-5-21]. <https://wap.bjd.com.cn/news/2021/10/11/192572.shtml>.
- [8] BOCK U, VARCHMIN J U. Enhancement of the Occupancy of Railroads Using “Virtually Coupled Train Formations” [C]//World Congress on Railway Research. Tokyo, 1999: 19-23.
- [9] BOCK U, BIKKER G. Design and Development of a Future Freight Train Concept: “Virtually Coupled Train Formations” [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2000, 33(9): 395-400.
- [10] 国家能源集团. 国家能源集团“重载列车群组运行控制系统技术研究与应”项目正式启动[EB/OL]. (2023-03-10) [2024-05-21]. <https://www.ceic.com/gjnyjtw/chnjtyw/202303/75cbe8bb51664ae08a0c8e6816745581.shtml>.
- [11] 李斌, 杨忠良, 罗世辉, 等. 考虑轮轨黏着变化的货运列车纵向动力学仿真[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(6): 1059-1065.
- LI Bin, YANG Zhongliang, LUO Shihui, et al. Simulation for Longitudinal Dynamics of Freight Train Considering Variation of Adhesion[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(6): 1059-1065.
- [12] SPIRYAGIN M, PERSSON I, WU Q, et al. A Co-simulation Approach for Heavy Haul Long Distance Locomotive-Track Simulation Studies[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 57(9): 1363-1380.
- [13] 周发扬. 重载组合列车智能化制动控制技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [14] 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.
- [15] 王禹. 基于强化学习的重载列车运行优化研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [16] 汤辉玥. 面向不确定性系统的列车自动驾驶算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [17] 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.
- [18] SONG H F, LI L L, LI Y, et al. Functional Safety and Performance Analysis of Autonomous Route Management for Autonomous Train Control System[J]. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, 2024(3402435): 1-14.
- [19] 林俊亭, 倪铭君. 基于扩张状态观测器的虚拟编组触发模型预测控制[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(4): 134-146.
- LIN Juntong, NI Mingjun. Trigger Model Predictive Control Based on Extended State Observers for Virtual Coupling[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(4): 134-146.
- [20] 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.
- LIU Hongjie, LANG Yinghui, ZHANG Lei, et al. A Cooperative Control Based Reference Curve Generating Method for Virtually Coupled Train Sets[J]. Science and Technology Review, 2023, 41(10): 62-72.
- [21] 罗啸林, 唐涛, 林炳跃, 等. 一种缩短虚拟编组列车追踪间距的鲁棒模型预测控制方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 68-76.
- LUO Xiaolin, TANG Tao, LIN Bingyue, et al. A Robust Model Predictive Control Approach for Reducing Following Distance between Virtually Coupled Unit Train[J]. Journal of The China Railway Society, 2023, 45(8): 68-76.
- [22] 高士根. 多列车协同运行的若干控制问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [23] BAI W Q, LIN Z L, DONG H R, 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.
- [24] YANG Y Z, YANG H Y, LIU F, et al. Optimal Control of Distributed Multiagent Systems with Finite-Time Group Flocking[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2020, 35(9): 1416-1432.
- [25] POLYAKOV A. Nonlinear Feedback Design for Fixed-Time Stabilization of Linear Control Systems[J]. IEEE Transactions

- on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106–2110.
- [26] TAKAGI R. Synchronisation Control of Trains on the Railway Track Controlled by the Moving Block Signalling System[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2012, 2(3): 68–76.
- [27] LIN P, TIAN Y, GUI G, et al. Cooperative Control for Multiple Train Systems: Self-Adjusting Zones, Collision Avoidance and Constraints[J]. Automatica, 2022, 144(6): 1057–1063.
- [28] ZHAO Y, IOANNOU P. Positive Train Control with Dynamic Headway Based on an Active Communication System[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(6): 3095–3103.
- [29] 韩雪松, 赵 军, 彭其渊. 重载运输战略装车域车流组合方案优化[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(6): 1057–63.
- HAN Xuesong, ZHAO Jun, PENG Qiyuan. Optimization of Railcar Flow Combination Scheme for Strategic Loading Domain Based on Heavy Haul Transportation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(6): 1057–63.
- [30] 韩雪松, 赵 军, 彭其渊. 多组合站条件下重载运输战略装车域列流组合方案优化[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 1–6.
- HAN Xuesong, ZHAO Jun, PENG Qiyuan. Optimization of Train Flow Combination Scheme for Strategic Heavy Haul Loading Domain at Multi-Combination Stations[J]. Journal of The China Railway Society, 2012, 34(8): 1–6.
- [31] 付建军. 考虑能耗因素的煤运重载铁路重空列协同组织优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [32] 王雅群. 重载铁路空重车流组织优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [33] 田亚明, 林柏梁, 纪丽君. 基于多商品流和虚拟弧的铁路车流分配点-弧、弧-路模型研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 7–12.
- TIAN Yaming, LIN Boliang, JI Lijun. Railway Car Flow Distribution Node-Arc and Arc-Path Models Based on Multi commodity and Virtual Arc[J]. Journal of The China Railway Society, 2011, 33(4): 7–12.
- [34] MURALI P, ORDONEZ F, DESSOUKY M M. Modeling Strategies for Effectively Routing Freight Trains through Complex Networks[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 70(6): 197–213.
- [35] 温旭红. 铁路车流分配的树状径路优化模型及算法[J]. 铁道学报, 2017, 39(03): 1–6.
- WEN Xuhong. An Optimization Model and Algorithm for Wagon-flow Assignment and Tree-form Routing[J]. Journal of The China Railway Society, 2017, 39(03): 1–6.
- [36] LIN B L, WANG Z M, JI L J, et al. Optimizing the Freight Train Connection Service Network of a Large-Scale Rail System[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(5): 649–667.
- [37] 薛 锋, 刘泳博, 户佐安, 等. 基于动态罚函数的铁路车流分配与径路优化模型[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(5): 941–8, 59.
- XUE Feng, LIU Yongbo, HU Zuoan, et al. Railcar Traffic Distribution and Route Optimization Model Based on Dynamic Penalty Function[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(5): 941–8, 59.
- [38] ZHOU X, ZHONG M. Single-Track Train Timetabling with Guaranteed Optimality: Branch-and-bound Algorithms with Enhanced Lower Bounds[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(3): 320–41.
- [39] 江 峰, 倪少权. 大规模货物列车运行图优化编制的一种拉格朗日松弛启发式算法[J]. 铁道学报, 2020, 42(3): 21–31.
- JIANG Feng, NI Shaoquan. A Large-scale Freight Train Diagram Optimization Heuristic Algorithm Based on Lagrangian Relaxation[J]. Journal of The China Railway Society, 2020, 42(3): 21–31.
- [40] JAMILI A, SHAFIA M A, SADIJADI S J, et al. Solving a Periodic Single-Track Train Timetabling Problem by An Efficient Hybrid Algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(4): 793–800.
- [41] 倪少权, 张 杰, 吕苗苗, 等. 市场导向动态列车运行图协同编制理论及系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [42] CHEN W, ZHUO Q, ZHANG L. Modeling and Heuristically Solving Group Train Operation Scheduling for Heavy-Haul Railway Transportation[J]. Mathematics, 2023, 11(11): 2489.
- [43] NING Z, OU D X, XIE C, et al. Optimal Convoy Composition for Virtual Coupling Trains At Junctions: A Coalition Formation Game Approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 154.
- [44] PAN H C, YANG L X, LIANG Z. Demand-oriented Integration Optimization of Train Timetabling and Rolling Stock

(下转第97页)

- Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 95: 267–281.
- [83] CHENG Q, WANG C X. Container Liner Shipping Network Design with Shipper's Dual Preference[J]. Computers & Operations Research, 2021, 128: 105187.
- [84] DUAN L W, TAVASSZY L A, REZAEI J. Freight Service Network Design with Heterogeneous Preferences for Transport Time and Reliability[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2019, 124: 1–12.
- [85] ZHANG Y M, LI X L, VAN HASSEL E, et al. Synchronodal Transport Planning Considering Heterogeneous and Vague Preferences of Shippers[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 164: 102827.
- [86] WANG S A, LIU Z Y, BELL M G H. Profit-Based Maritime Container Assignment Models for Liner Shipping Networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 72: 59–76.
- (责任编辑 魏 然)

(上接第81页)

- Circulation Planning With Flexible Train Compositions: A Column-Generation-Based Approach[J]. European Journal of Operational Research, 2023, 305(1): 184–206.
- [45] TAI G X, HUANG Y N, LI C C, et al. An Optimization Method of Train Scheduling for Urban Rapid Rail Transit Based on Flexible Train Composition Mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 195–203.
- [46] ALEKSANDR B, OKSANA M. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work[J]. Transportation Research Procedia, 2021, 54: 559–567.
- [47] BOHLIN M, GESTRELIUS S, DAHMS F, et al. Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation[J]. Transportation Science, 2016, 50(3): 823–840.
- [48] UPADHYAY A, BOLIA N B. An Optimization Based Decision Support System for Integrated Planning and Scheduling on Dedicated Freight Corridors[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(24): 7416–7435.
- [49] 陈雍君, 周磊山. 基于序优化方法的列车运行调整算法研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 1–8.
- CHEN Yongjun, ZHOU Leishan. Study on Train Operation Adjustment Algorithm Based on Ordinal Optimization[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3): 1–8.
- [50] 王迎春. 朔黄铁路综合调度系统的分析与设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [51] 李荣娜. 朔黄重载铁路列车运行调整的模型与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- (责任编辑 金 晶)