

高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望

宁滨¹ 董海荣¹ 郑伟² 荀径¹ 高士根¹
王洪伟² 孟令云³ 李滉东⁴

摘要 高速铁路运行控制系统是高速铁路的大脑和神经系统,对列车的安全和高效运行至关重要.随着我国高铁里程数和客运量的快速增加,现有的控制手段和调度方法在快速、有效解决列车运行过程中出现的突发事件(比如电力故障、突发地震、山体滑坡、异物侵限等)方面尚有一定差距.目前列车运行控制与调度采用分层架构,突发情况下主要依赖调度员和司机的人工经验进行应急处置,列车晚点时间较长,旅客满意度不高.因此,如何针对高速列车运行过程中可能出现的突发事件,提升其应急处置能力,成为保障高铁安全高效运营的一大难题.本文围绕高铁运行控制与动态调度一体化这一前沿研究热点,对现有运行控制和动态调度的发展现状进行梳理,在此基础上给出一体化的基本架构,明确其基本内涵,最后提出了未来的主要研究方向.

关键词 高速铁路,运行控制,动态调度,控制调度一体化,突发事件

引用格式 宁滨,董海荣,郑伟,荀径,高士根,王洪伟,孟令云,李滉东.高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望.自动化学报,2019,45(12):2208-2217

DOI 10.16383/j.aas.2019.y000004

Integration of Train Control and Online Rescheduling for High-speed Railways: Challenges and Future

NING Bin¹ DONG Hai-Rong¹ ZHENG Wei² XUN Jing¹ GAO Shi-Gen¹
WANG Hong-Wei² MENG Ling-Yun³ LI Yi-Dong⁴

Abstract As the brain and nervous system of high-speed railways, the high-speed train control system is critical to the safe and efficient operation of trains. With the expanding of the high-speed railway network in China, the existing train control and rescheduling methods are challenged by the increasing emergencies (such as power failure, sudden earthquake, landslide, foreign matter invasion, etc.) during the train operation. The existing control and rescheduling system adopting a layered structure, relies on the experience of dispatchers and drivers, and is hard to satisfy the requirements of train delay and passenger satisfaction. Therefore, how to improve the emergency handling ability is a severe problem to ensure the safe and efficient operation of high-speed railway during train operation. This paper focuses on the integration of train control and online rescheduling of high-speed railway. We conduct the state-of-the-art of existing train control and online rescheduling, and proposed the fundamental architecture, basic intension, and main research directions in this field.

Key words High-speed railway, train operation control, online rescheduling, integration of train control and rescheduling, emergency

Citation Ning Bin, Dong Hai-Rong, Zheng Wei, Xun Jing, Gao Shi-Gen, Wang Hong-Wei, Meng Ling-Yun, Li Yi-Dong. Integration of train control and online rescheduling for high-speed railways: challenges and future. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(12): 2208-2217

收稿日期 2019-05-10 录用日期 2019-09-20

Manuscript received May 10, 2019; accepted September 20, 2019

国家自然科学基金(61790573)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61790573)

本文责任编辑 吕宜生

Recommended by Associate Editor LV Yi-Sheng

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. 北京交通大学国家轨道交通交通安全评估研究中心 北京 100044 3. 北京交通大学交通运输学院 北京 100044 4. 北京交通大学计算机与信息技术学院 北京 100044

1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 2. National Research Center of Railway Safety Assessment, Beijing Jiaotong

作为综合交通运输体系和经济大动脉的骨干,高速铁路以其运输能力大、快速正点、全天候和环境友好等特点,近年来得到了蓬勃发展.截止2019年底我国高速铁路运营里程将达到3.5万公里,目前已建成世界上最大且唯一的高速铁路运营网络.随着路网规模和覆盖范围不断扩大、运行环境复杂、交路不断延伸、开行列车数量不断增加,造成高铁

University, Beijing 100044 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 4. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044

运行的突发事件日益增多, 主要由基础设施(如轨道线路、电力系统、信号地面设备等)故障、列车故障、自然灾害(风、雨、雪、地震等)、异物侵限、客流异动等导致。突发事件造成的非正常停车和大范围列车延误, 会造成乘客滞留、被困等, 甚至影响高铁铁路网的正常运营, 带来巨大的经济损失和社会影响。2016年, 受寒潮影响, 广州站近10万旅客滞留十几个小时, 如图1(a)所示。新建高铁兰新线, 穿越大风地区总长度达500多公里, 风区内大风频繁、强劲, 对铁路列车运行安全及运输畅通构成严重威胁。2016年11月30日, 京沪高速铁路供电设备故障, 导致北京南站多趟高速列车晚点运行, 部分列车停运, 如图1(b)所示。2018年8月, 某高速列车于京沪线万庄站附近受6级大风刮起的彩钢板撞击, 其上方接触网多处脱落, 导致部分列车乃至次日仍然停运, 近6000名乘客滞留车站。由此可见, 随着高铁的快速发展以及客流快速增长, 在保障运行安全的前提下, 不断提升运营效率和应对突发事件能力是我国高铁可持续发展的重大需求。



(a) 寒潮致使乘客大面积滞留 (b) 供电故障导致大范围延误
(a) A large-scale of travelers stranded by the cold wave (b) Extensive delays caused by power failure

图1 突发事件对乘车出行造成巨大影响

Fig. 1 Strong influences on train travel caused by emergencies

作为高铁系统的“大脑和神经中枢”, 列车运行控制系统(简称运控系统)控制列车运行速度、追踪间隔和进路方向, 全天候不间断运行, 具有分布广泛、环境随机和自身参数离散等特点, 是确保列车安全运行和高效运营的重要保障和核心装备。2002年提出的中国列车运行控制系统(Chinese train control system, CTCS), 经过近20年的建设发展, 面向高速铁路的列车运行控制系统技术规范体系已逐渐成熟^[1-6]。目前, 我国高速铁路沿用了普速铁路运行控制和调度的在列车正常运行过程中, 调度员根据运行图, 通过分散自律调度集中系统(Centralized traffic control system, CTC)下达运行计划和发布调度命令, 控制和监督列车, 保证列车按计划准点运行; 运控系统根据调度命令、前方列车状态及轨道线路状况, 生成列车运行轨迹, 司机按照该轨迹控制列车速度, 人工驾驶列车并反馈

确认信号, 实现列车在站间的安全平稳运行。突发事件发生时, 高铁应急处置过程需要多个部门相互协调, 调度员和司机互相沟通, 制定应急决策。但在苛刻的通信环境、恶劣天气、设备故障等情况下, “通信欠通畅、感知欠精准”的现象十分常见。调度员只对网络中的部分区域运行状况有宏观了解, 难以实时掌控系统全局运行状态, 及时形成精准的应急调度策略。在执行调度命令过程中, 司机往往根据驾驶经验对当前的运行状况进行判断, 由于经验和能力水平存在差异, 造成对列车的控制效果不均衡。因此, 将列车运行控制与调度协同优化, 使两者在突发事件的应急处置中紧密耦合, 生成列车运行控制与调度一体化策略, 是实现高铁应急能力本质提升面临的重要挑战。

在高铁网络化、智能化、数字化发展趋势下, 运控系统必然从传统的基于固定闭塞、人工驾驶和人工调度等控制方式向集移动闭塞、自动驾驶和智能调度为一体的综合自动化方向发展。城市轨道交通目前均采用基于移动闭塞的运控系统对列车运行间隔进行控制, 而高速铁路目前仍采用固定闭塞或准移动闭塞, 人工凭经验实施调度。随着大数据、人工智能和5G通信等新一代信息技术兴起, 在安全运行的前提下利用人、车、路、网资源, 对高铁路网跨时空全局运行状态进行综合感知, 实现动态拓扑结构下多列车在线智能优化调度和实时精准控制, 打破既有高铁运营中运行控制和调度的分层架构, 实现运行控制与调度一体化, 如图2所示。

近年来, 世界范围内对“未来先进轨道交通系统”等铁路发展前景的探索也在不断进行。欧盟于2012年提出面向智能化的2050欧洲铁路系统发展蓝图, 以提升网络运营的可靠性、弹性和服务水平。日本于2018年提出“Move up 2027”发展规划, 提出自动驾驶、人工智能和大数据深度融合以达到高效运营的目标。德国于2015年在其铁路4.0发展规

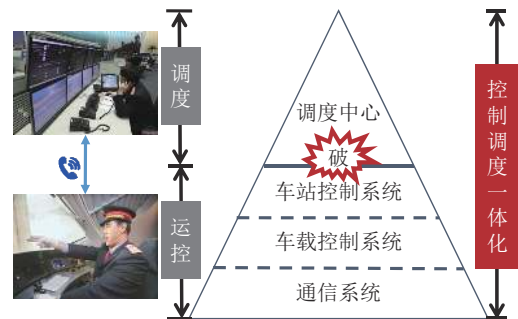


图2 高铁运行控制与动态调度

Fig. 2 Train control and online rescheduling for high-speed railways

划中,也将实现智能化机车和提高线路使用效率作为主要发展方向^[7-8]。由此可见,运控系统自动化与智能化必将成为高铁未来发展面临的重大挑战,但高铁运行控制与调度一体化的研究工作还处于起步阶段^[9]。

针对这一问题,国内的研究机构主要集中在北京交通大学、中国铁道科学研究院集团有限公司等交通院校以及铁路相关部门。国家自然科学基金委2018年启动了“高速铁路运行控制与动态调度一体化基础理论与关键技术”重大项目,北京交通大学、东北大学、中南大学、浙江大学、铁科院等研究小组率先开展了相关研究工作。国外的研究机构也是集中在铁路相关的高校及高科技公司,如荷兰代尔夫特大学、德国西门子公司等。

随着我国“人工智能”和“交通强国”国家战略的相继提出,国务院在2019年9月印发的《交通强国建设纲要》中明确指出我国高铁发展重要目标就是要通过智能化的技术升级实现“交通装备先进适用、完备可控”,“提升主要通道旅客运输能力”,对高铁运行控制与动态调度的相关基础理论,测试验证与工程应用等提出了更高的要求^[10],因此,研究高速铁路运行控制与动态调度一体化对提升自主创新能力、推进行业技术进步和掌握关键技术等均具有重要意义。

1 研究现状

1.1 列车运行控制

运控系统是一个具有外部环境复杂多变、内部运行机理复杂、系统运行状态强动态变化等特点的复杂系统,其关键问题之一是如何根据动静参数和列车动力学模型实时建立运行轨迹模型对列车运行速度进行控制,以确保列车安全运行。自上个世纪60年代起国内外专家学者对列车运行控制方法展开研究^[11-13]。1968年伦敦维多利亚线,以及1969年美国费城林登沃尔德线的运控系统均采用结构简单易于实现的PID控制列车运行速度。近年来,结合高效、准时、舒适和节能等指标,列车运行轨迹建模过程中的动态参数和模型约束的复杂性大幅度提高,给运行轨迹精确建模带来挑战,从而影响复杂环境下列车运行的舒适性、停车精确性等关键运行性能。运控系统的另一关键问题是如何以列车追踪间隔优化为核心建立列车协同控制方法,从而有效提升高铁运营效率。面对级联不确定和信息交互时滞的复杂运行环境,成网条件下同线列车之间、邻线列车之间、线路与线路之间的运行耦合性

强带来了时空资源的多源约束,亟需解决协同控制闭环系统的稳定性和收敛速度理论研究。针对列车运行控制的研究从控制对象上分为单列车运行控制和多列车协同控制^[14-18]。

1.1.1 单列车运行控制

列车运行轨迹模型不仅与列车牵引、制动性能有关,还与列车运行的线路参数和闭塞模式有关。Howlett^[14]给出了列车运行动态能耗模型,并将线路根据坡度和限速划分为一系列固定区段,利用解析方法解决了五种工况模式下的列车运行轨迹节能优化问题。Shangguan等^[19]以能耗和出行时间为指标建立了满足安全要求、乘客舒适度和动态性能等约束条件的多目标运行轨迹优化模型,并提出了一种基于混合进化算法求解方法。Tuytens等^[20]提出了一种基于遗传算法和经验的单列车运行轨迹优化方法,仿真了六种单模式策略和一种多模式策略,分析表明多模式控制策略能够解决全局能耗问题,而动态制动再生能量的利用率与总能耗的降低并没有必然的关系。

针对列车运行过程中的动态特性,Chou等^[21]分析了列车运行过程中离线、在线、人工和电气记录的经验数据,建立了列车动力学模型并在实际运行场景中验证了模型的有效性。Song等^[22]考虑到高速列车车辆间的非线性耦合作用力,提出了一种多质点单位移列车时域动态模型。

高速列车运行环境复杂,影响列车运行的外部运行条件和内部干扰因素演变机理复杂,难以精确建模,造成了列车动态模型参数以及外部运行条件的不确定性。2000年,Khmelnitsky^[15]针对运行条件的不确定性和速度限制是任意函数的问题,基于最优化的数学模型利用极大值原理提出了一种牵引制动策略。Faieghi等^[23]考虑列车运行参数的不确定性,利用李雅普诺夫稳定性-对消原则建立了列车直接自适应鲁棒、反步鲁棒自适应控制器。Zhuan等^[16]和Bai等^[24]考虑车钩力的动态特性,分别利用最优控制方法和多智能体控制理论提出了分布式控制律以保障了列车运行过程中车钩力始终保持在安全范围。针对时变系统参数的问题,Mao等^[25]研究具有自适应律的自适应故障补偿方法,实现了有界扰动下的位置跟踪。Dong等^[26-27]基于自适应模糊控制和差分优化模糊控制,融合列车运行时感知数据优化列车动力学模型并提升运行轨迹建模的精确性。

1.1.2 多车协同控制

以准时、舒适度或能耗等指标,多列车运行轨迹优化基于列车牵引制动特性、追踪距离和线路条件等生成单车运行轨迹,以实现多车协同高效运行。

针对多列车运行过程中的节能优化问题, Gu 等^[28]和 Yan^[29]针对多列车协同节能优化问题, 研究了多列车运行轨迹优化方法. Zhou 等^[30]考虑在电力供应紧张和时间容量限制条件下的多列车轨迹优化问题, 通过建立时间 - 空间 - 速度三维离散网络模型和拉格朗日松弛将有约束优化问题转化为无约束优化问题, 并利用京沪高铁实际运营数据仿真表明了该算法的有效性和高效性. 以最小化各列车总能耗和运行时间为目标, Yang 等^[31]提出了一种路网列车协同模型, 仿真表明模型可满足安全追踪间隔、车辆限速、舒适性和停站时间等约束.

为实现高密度安全追踪间隔控制, Carvajal-Carreo 等^[32]提出了 CBTC 系统多列车追踪运行模糊跟踪控制算法. Dong 等^[17-18]建立了低信息传输量的前行-跟踪和邻接-通信模式的多列车协同拓扑结构, 构建了基于列车运行关键特征信息的多车协同特征模型和关键指标预测模型. Li^[33]等研究了高速列车在输入饱和和约束下的自适应协同运行控制方法. Bai 等^[24]建立了状态依赖通信拓扑结构下的多列车分布式协同控制算法, 不仅保证了同辆列车不同车厢间车钩力始终处于安全范围内, 同时避免了相邻列车追踪间隔过近触发紧急制动. Li 等^[34]利用人工势能函数, 借鉴多智能体一致性控制框架, 提出了一种多列车防撞协同运行控制算法. Baek 等^[35]提出了一种新型的基于移动授权的列车分离控制算法, 使运控系统允许列车使用基于地面应答器的移动授权, 从而由车载控制系统保障超速防护. Pan 等^[36]建立了一种新的速度差控制律, 仿真表明通过控制后列车运行状态可以实现列车追踪间隔的动态调整. Takagi^[37]提出了一种多列车以最小安全距离追踪运行的同步牵引或制动控制方法. Ding 等^[38]基于列车运行规则与司机驾驶习惯提出了一种多列车协同控制方法, 以保证相邻列车安全运行. Zhao 等^[39]构建了一种基于主动通信的多列车追踪间隔模型, 并将其与动态调度模型相结合, 以提高列车运行通过能力和安全性. Xun 等^[40]考虑列车控制器输出饱和、通信延迟和带宽受限等约束条件, 提出了一种多列车自触发模型预测协同控制方法.

综上所述, 在单列车运行控制方面, 现阶段国内外的研究主要集中在传统控制理论和优化方法, 忽略了突发事件下列车运行控制对实时性、精确性、可靠性等方面的需求, 也没有考虑突发事件对列车运行控制参数造成的影响; 在多车协同控制方面, 正常状态及突发事件情况下列车协同的非线性解耦方法与抗扰优化控制尚待系统性研究, 并且针

对多列车运行轨迹优化的研究主要局限于节能指标, 对于如何将列车运行控制与列车调度相结合进行综合优化尚不明确, 亟需进一步深入分析研究.

1.2 列车调度

自 Szpigel^[41]于 1973 年首次采用运筹学方法生成列车运行计划以来, 国内外学者针对列车运行调整展开了大量深入的研究, 针对列车实际运行过程中受各种因素影响而偏离既定运行图的挑战, 实时动态地对各类行车资源进行有效调整, 尽快恢复列车的有序运行^[42]. Codreau 等^[43]、Hansen^[44]从调整措施、模型建立、目标函数、求解算法等方面在不同年代的列车调度研究进行了综述. 列车运行调整根据影响列车运行因素的持续时间和影响范围可分为两类^[45]: 1) 弱扰动 (Disturbances) 下的列车运行调整模型与算法, 2) 强干扰 (Disruptions) 下的列车运行调整模型与算法. 其中, 弱扰动是指较短时间 (持续时间小于 5 分钟) 且影响范围较小的事件, 该类扰动一般可根据列车运行图的冗余时间和缓冲时间进行细微调整即可恢复正常运行; 而强干扰是指在持续时间较长且影响范围较大的事件, 如区间运能大幅降低或完全失效, 需采取车次取消、中途折返、备车启用、顺序变更等多种调度措施以最大限度地维持列车运行, 从而降低对乘客出行的影响.

1.2.1 弱扰动下的列车调度

在弱扰动下, 因偏离既定运行图的程度相对较小, 列车调度采取的措施一般包括到发时刻调整、列车顺序调整和列车路径调整. Törnquist 和 Persson^[46]构建了基于宏观模型的混合整数规划模型, 此模型假设列车的站间运行时分固定且列车运行间隔时间固定, 运用四种启发式策略来调整列车运行顺序和运行路径从而最小化列车延误. 在此基础上, Törnquist^[47]进一步提出启发式贪婪算法, 制定了一系列的深度优先搜索和分支策略来提升算法的求解效率. Schöbel^[48]考虑了有换乘衔接的延误管理问题, 在列车调度的决策中加入换乘衔接是否保持以最小化乘客总延误. 在此基础上, Dollevoet 等^[49]将乘客路径变更与列车运行调整问题相结合, 乘客根据换乘衔接是否保持对出行路径进行重新规划. Hou^[50]等考虑客流异动场景下, 以列车总延误和能耗、车站滞留旅客人数为指标, 优化列车时刻表.

基于宏观的列车运行调整模型可以在短时间内求解大规模问题, 可是由于没有考虑路网的实际细节, 求解的结果难以保证实际运营需求, 需基于微观模型进行仿真验证^[51]. 基于微观模型的列车运行调整基于轨道区段锁闭时间理论, 若锁闭时间有重

叠则需对列车运行计划进行调整, 锁闭时间无重叠的列车运行计划即为可行的. Corman 等^[52] 的研究结果表明与现行的基本调度规则相比基于微观模型的列车调度可有效减小列车延误.

D'Ariano 等^[53] 将列车到发时刻调整与运行顺序调整进行分布优化, 基于微观模型建立了混合整数规划模型, 并设计相应分枝定界算法对模型进行求解. 在此基础上, Corman 等^[54] 考虑变更列车在车站使用的接发车进路及股道以最小化最大的列车延误为目标, 基于微观模型建立混合整数规划模型对列车运行调整问题进行研究. Meng 和 Zhou^[55] 将铁路网抽象为点-区段的微观结构, 构建累积流变量模型用于解决实时的列车路径与时刻表同步优化问题, 以延误时间最小为目标, 在时空网络中运用基于时间的最短路径法快速解决对偶子问题, 进一步运用拉格朗日松弛法得到较优下界解.

近年来, 列车运行调整计划优化编制问题相关研究呈现出一些新的研究趋势, 为了更有效地减小铁路网络的延误, 列车运行调整与列车运行控制紧密结合的趋势愈发明显. Mazzarello 等^[56] 提出包括列车运行调整和轨迹生成模块的交通管理系统架构, 综合考虑列车实际的位置与速度、设备状态等, 预测潜在的冲突并进行冲突疏解, 优化列车运行以减小列车的中途停车次数及乘客的旅行时间. Luan 等^[57-58] 提出通过优化列车加减速度来实现对列车运行计划的调整优化, 构建了以延误时间最短为目标的列车控制与调度一体化数学模型, 通过近似方法将混合整数非线性规划问题转化为混合整数线性规划问题, 实现问题的快速求解, 并基于此对能耗和计算再生能源利用率进行了研究.

1.2.2 强干扰下的列车调度

强干扰下列车运行秩序紊乱, 系统性能大幅下降, 列车调度一般分为三个阶段, 即初始阶段、稳定运营阶段和恢复阶段^[59]. 在强干扰发生时, 立即进入初始阶段, 此时列车运行大幅偏离既定运行图, 甚至中断运营, 调度员根据干扰原因和应急处置规章迅速制定强干扰下维持列车最大限度运行的方案, 并对列车进行实时调整以进入稳定运营阶段. 在强干扰原因排除后, 系统进入恢复阶段, 尽快恢复按图行车. Jespersen-Groth 等^[60] 指出在强干扰情况下, 需要同时对列车运行计划、车底运用计划和乘务计划进行调整, 分别对这三个方面的研究成果进行综述, 并在此基础上将哥本哈根的铁路运营公司 DSB S-tog 和荷兰铁路运营公司 NS 的中断管理措施进行对比. Ghaemi 等^[61] 从强干扰下的调度过程 (即初始、稳定运营、恢复阶段) 来对已有研究

进行综述, 并分析和总结各阶段存在的挑战及需解决的核心问题, 并以荷兰铁路为例采用微观模型对调度过程进行详细阐述.

Louwerse 等^[62] 针对区间单向或双向中断的强干扰提出基于事件-活动网络的整数规划模型, 以生成稳定运营阶段的列车运行计划和车次取消计划, 通过最小化列车延迟和取消车次来减小对乘客出行的影响. Acuna-Agost 等^[63] 也研究了恢复阶段的运行调整问题, 通过估计每个事件发生的概率, 有效缩减解空间, 从而可在短时间内实现问题求解, 以尽量减少既定运行图与调整计划之间的差异.

上述文献仅针对强干扰下的某个阶段进行列车调整, 而针对处置全过程的研究是目前的新趋势. Zhan 等^[64] 针对高速铁路某区段的双向中断建立基于事件-活动网络的混合整数规划模型并提出两阶段的优化方法实现列车停靠车站、开行顺序、车次取消的决策, 从而最小化列车总延误及取消车次. Zhu 等^[65] 针对区段双向中断导致的强干扰, 通过将乘客分配与列车调度有机结合, 对列车的停站方式、运行顺序、到发时刻、车次取消、中途折返等进行优化以最小化乘客的总延误时间.

针对强干扰下的列车调度研究大多基于宏观模型且没有考虑运控系统的具体特征. 然而在强干扰下, 运控系统为保障列车运行安全会大幅干预列车运行, 如线路中断或列车故障极有可能导致信号系统降级, 列车中途折返或组织反向运行时需信号系统开放相应进路等. 因此, 强干扰下的列车运行调整需与列车运行控制有效结合, 在保证列车调整计划的可行的前提下提升线路的运输能力. Xu 等^[66] 对强干扰下的列车运行调整和控制进行了初步的探索, 针对线路临时限速通过拓展替代图模型来描述准移动闭塞信号制式下列车运行的制约机制, 并使用商业求解器和两阶段法来加速求解效率, 有效降低了列车的总延误时间.

综上所述, 针对高速铁路系统状态演化的研究并未系统地考虑不同突发事件给高速铁路系统所带来的微观影响, 特别是突发情况下, 高速铁路系统的状态演化机理和列车延误传播机理; 针对高速铁路旅客客流与运力资源的研究大多是弱化或者分割了二者之间相互影响的动态关系, 特别是在复杂路网条件下, 由于时空粒度分布的不同, 构建网络客流的实时分布及运力资源的匹配模型具有极大的挑战性; 针对高速铁路调度模型的研究仅考虑到某一区段间线路的运行调整, 难以满足我国高速铁路成网条件下的调度需求, 难以构建高铁调度系统的全局架构模型. 因此, 如何在确保安全的前提下进一

步提升运营与管理效率, 高铁运行控制与动态调度一体化必将成为下一代高铁运控系统亟需解决的核心问题.

2 高铁运行控制与动态调度一体化

2.1 一体化架构

高铁运行控制与动态调度一体化是指运用先进的感知、传输、控制方法和技术, 提升列车运行控制和调度智能化水平, 深度融合列车运行控制和调度, 实现路网整体运行效率全局最优, 全面提升及时应对突发事件能力. 高铁运行控制与动态调度一体化通过打破既有高铁运营中运行控制和动态调度的“分层”模式, 增强对高铁运行环境的全面深度感知, 在安全运营的前提下利用全局人、车、路、网等资源, 全面提升高铁系统的运行效率. 如图 3 所示, 以京沪线为例, 在北京、上海铁路局之间实现高铁运行控制与动态调度一体化.

2.2 重点研究方向

控制调度一体化重点包含以下三方面:

1) 高铁运行状态的全局多层域、快速、精准智能感知. 高铁运行控制与动态调度一体化要求感知具备全面、实时、精准等特征, 在实现智能感知的过程中遇到以下三个难题: a) 跨层域感知协同难. 高铁系统庞大、因素众多, 列车运行控制与调度涉及系统内列车状态信息 (如速度、位置、列车车型、牵引制动特性等)、基础设施状态和约束条件 (线路、桥梁、隧道、供电等系统)、运控系统的状态 (车载设

备、地面设备等), 现有系统信息实现了对部分信息的采集, 但对列车运行相关的信息采集依然不全面, 系统高效运营缺乏有效感知数据支撑. b) 高精度实时融合与传输难. 高速列车内部运行机理复杂, 外部环境复杂多变, 系统运行状态强动态变化, 使得传统测量结果不稳定且噪声大, 导致信息感知失准, 信息感知不精确. 在极端条件下 (如严寒), 外部环境超出了设备正常的工作范围, 系统可能收到设备的失准或错误信息. 设备故障导致突发事件下, 系统采集和传输信息也可能出现误差. 对采集的数据未经有效融合, 不能全面利用车、线、网不同层域间的信息, 层级间难以协同, 极大影响高铁应对突发事件的处置能力. c) 突发事件的智能识别难. 突发事件下的应急处置能力一部分取决于对应急条件的快速、准确识别, 但目前对高铁系统由于感知信息不全, 运行环境感知和突发事件场景识别主要依靠人工确认, 识别方法受限, 导致识别时虚警率、误警率、漏警率高. 基于数据的应急场景的识别研究尚处于初级阶段, 从理论到实践还没有得到有效解决. 部分信息采集、传输都不具备实时性, 系统中信息采集系统数据没有综合利用, 难以支撑高铁突发事件下的高速列车的协同运行控制和智能动态调度.

2) 高铁运行控制与动态调度一体化建模. 高铁运行控制与动态调度一体化要求建模具备实时、精确、全局优化等特征, 带来三个研究难点. 具体为: a) 系统多模态状态描述难. 高铁系统组成复杂, 与列车运行相关的子系统繁多, 突发事件下, 列车运行将受影响, 影响范围内列车偏离计划轨迹运行的量化形态复杂, 动车组、运控系统、基础设施等系统

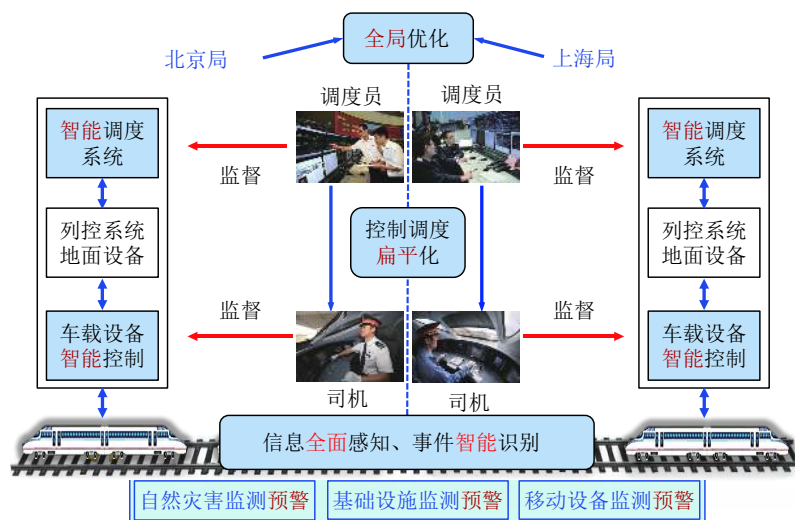


图 3 运行控制与动态调度一体化示意图

Fig. 3 Integration of train control and online rescheduling

的模式、层次和粒度不同, 现有系统只掌握了列车运行相关的部分系统宏观信息, 并没有对系统状态实时的描述. b) 全时空机理复杂刻画难. 在突发事件下, 列车运行相关的系统众多, 特点各异, 且各系统间的耦合机理复杂, 难以建立精确的模型描述系统的状态演化机理. 高铁路网复杂, 干扰因素多, 车车、车线、线线间列车运行耦合性强, 突发事件下列车流在路网中的传播特性、列车与固定设施之间、列车与列车之间交互作用机理复杂, 难以刻画在连续或离散时空上的晚点和某些应急情况产生、传播、吸收的过程, 难以设计量化分析模型, 对晚点和某些应急情况的影响范围给出准确的判断. c) 跨层次的协同难. 现有的调度过程繁琐, 尤其是在车辆段和枢纽站的列车调度过程, 系统运行环境复杂、干扰因素多, 对系统内多列车的动态调度模型本身就是个 NP 问题. 突发事件下, 列车运行控制参数辨识难、约束复杂、加之列车间运行耦合性强, 对一定范围列车运行的精确建模困难. 传统的运行控制与动态调度分层, 层间弱耦合, 对列车运行的影响刻画相对独立. 对复杂的高铁运行控制与调度的跨层次协同机理的研究和建模更加困难.

3) 复杂环境下高铁协同运行控制、智能动态调度及其一体化. 高铁运行控制与动态调度一体化要求控制与调度具备智(智能)、协(协同)、稳(稳定)等特征, 即要求列车运行控制平稳、动态调度智能、运行控制与动态调度协同, 突发事件下, 突破该挑战面临的三个难点为: a) 列车运行优化控制难. 高铁运行环境复杂, 在突发条件下, 列车的运行控制参数时变、非线性强, 难以精确刻画列车运行状态, 建立精准的运行特性数学模型难. 目前, 突发事件下高铁的列车控制依然采用人工方式, 司机对环境信息、列车性能的掌控差异性大, 对突发事件的处置和反应能力不同, 导致列车运行的稳定性、均一性差, 高铁系统列车运行密度大、间隔小、列车间运行耦合性强, 列车的控制效果不好对高铁系统的高效准点运行有很大影响. b) 动态调度智能化难. 高铁运行过程中的随机时变干扰强, 当前的人工调度方式难以实时、准确的捕捉干扰信息, 调度系统与其他系统的信息交互不充分, 导致动态调度的实时性差, 给调度决策的生成带来了很大困难. 在突发事件下, 调度员的任务繁重, 人工的调度只能采用简单的调度指令(如扣车)保证列车实现安全运行, 调度员对系统的精确状态和运行演化机理不清, 无法实现系统的高效运行. c) 高铁运行控制与动态调度实现一体化难. 突发事件下系统的应急处置能力与列车运行控制和调度同时相关, 两者共同决定了

列车的到发时刻、路径的占用、运行控制等, 即决定了系统内列车的运行态势和系统状态的演化过程, 现有系统中, 运行控制和调度均采用人工方式, 通信手段单一、信息传递不及时, 无法实现两者的协同机制, 导致应急处置能力受限.

3 结束语

随着我国高速铁路规模不断扩大和新一代信息技术发展, 打破传统的列车运行控制与动态调度之间的信息壁垒, 实现高铁运行控制与动态调度一体化是未来铁路系统智能化发展的必然趋势. 本文根据国内外列车运行控制和调度的发展现状, 提出了高铁运行控制与动态调度一体化的定义和基本内涵, 给出了下一步重点研究方向. 我们相信, 在这一领域的关键理论方法与技术突破, 将对保障我国高铁运行效率和应急处置能力具有重大的战略意义和带动作用, 可为我国高速列车实现智能化、信息化运营提供全新的技术储备, 对我国新一代智能高速铁路的研发提供理论基础, 将为中国高铁抢占新的技术制高点提供重要支撑.

References

- 1 Ning Bin, Tang Tao, Li Kai-Cheng, Dong Hai-Rong. High-speed train operation control system. Beijing: Science Press, 2012. (宁滨, 唐涛, 李开成, 董海荣. 高速列车运行控制系统. 北京: 科学出版社, 2012.)
- 2 He Hua-Wu. Innovation and development of high-speed railway in China. *Chinese Railways*, 2010, **12**: 5-8 (何华武. 中国高速铁路创新与发展. 中国铁路, 2010, **12**: 5-8)
- 3 Wang Xi-Shi. Intelligent Railway Transportation System ITS-R. Beijing: Science Press, 2004. (汪希时. 智能铁路运输系统 ITS-R. 北京: 中国铁道出版社, 2004.)
- 4 Wang Tong-Jun. Overall framework and development prospect of intelligent railway. *Railway computer application*, 2018, **27**(7): 1-8 (王同军. 智能铁路总体架构与发展展望. 铁路计算机应用, 2018, **27**(7): 1-8)
- 5 Liu Chao-Ying, Mo Zhi-Song. Beijing-tianjin Intercity High-speed Railway Signal System Integration. Beijing: Science Press, 2010. (刘朝英, 莫志松. 京津城际高速铁路信号系统集成. 北京: 中国铁道出版社, 2010.)
- 6 Railway Electrical Section. Overall Technical Plan of CTCS-3 train Control System. Beijing: China Railway Press, 2008. (铁路部电务段. CTCS-3 级列控系统总体技术方案. 北京: 中国铁道出版社, 2008.)
- 7 Xiao Dai-Ning, Liu Hong-Yan. Foreign high-speed railway train operation control system. *Railway Standard Design*, 2008, **4**: 128-130 (肖代宁, 刘红燕. 国外高速铁路列车运行控制系统. 铁道标准设计, 2008, **4**: 128-130)
- 8 Chai Tian-You. Development directions of automation science and technology. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(11): 1923-1930

- (柴天佑. 自动化科学与技术发展方向, 自动化学报, 2018, **44**(11): 1923–1930)
- 9 Ning B, Tang T, Gao Z Y, Yan F, Wang F Y, Zeng D D. Intelligent railway systems in China. *IEEE Intelligent Systems*, 2006, **21**(5): 80–83
 - 10 Zhou Dong-Hua, Ji Hong-Quan, He Xiao. Fault diagnosis techniques for the information control system of high-speed trains. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(7): 1153–1164
(周东华, 纪洪泉, 何潇. 高速列车信息控制系统的故障诊断技术. 自动化学报, 2018, **44**(7): 1153–1164)
 - 11 Yang C H, Yang C, Peng T, Yang X Y. A fault-injection strategy for traction drive control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, **64**(7): 5719–5727
 - 12 Tang Tao, Huang Liang-Ji. A survey of control algorithm for automatic train operation. *Journal of the China Railway Society*, 2003, **25**(2): 98–102
(唐涛, 黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述. 铁道学报, 2003, **25**(2): 98–102)
 - 13 Xin Bin, Chen Jie, Peng Zhi-Hong. Intelligent optimized control: overview and prospect. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1831–1848
(辛斌, 陈杰, 彭志红. 智能优化控制: 概述与展望. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1831–1848)
 - 14 Howlett. A new look at the rate of change of energy consumption with respect to journey time on an optimal train journey. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2016, **94**: 387–408
 - 15 Khmelnitsky E. On an optimal control problem of train operation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 200, **45**(7): 1257–1266
 - 16 Zhuan X, Xia X H. Optimal scheduling and control of heavy haul trains equipped with electronically controlled pneumatic braking systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, **15**(6): 1159–1166
 - 17 Dong H R, Gao S G, Ning B. Cooperative control synthesis and stability analysis of multiple trains under moving signaling systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(10): 2730–2738
 - 18 Gao S G, Dong H R, Ning B. Cooperative prescribed performance tracking control for multiple high-speed trains in moving block signaling system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, **20**(7): 2740–2749
 - 19 Shangguan W, Yan X H, Cai B G, Wang J. Multiobjective optimization for train speed trajectory in CTCS high-speed railway with hybrid evolutionary algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(4): 2215–2225
 - 20 Tuytens D, Fei H Y, Mezmaiz M, Jalwan J. Simulation-based genetic algorithm towards an energy-efficient railway traffic control. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, **2**(27): 343–347
 - 21 Chou M, Xia X, Kayser C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems. *Control Engineering Practice*, 2007, **15**(4): 501–509
 - 22 Song Q, Song Y D, Tang T, Ning B. Computationally inexpensive tracking control of high-speed trains with traction/braking saturation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(4): 1116–1125
 - 23 Faieghe M, Jalali A. Robust adaptive cruise control of high speed trains. *ISA Transactions*, 2014, **53**(2): 533–541
 - 24 Bai W, Lin Z, Dong H, et al. Distributed cooperative cruise control of multiple high-speed trains under a state-dependent information transmission topology. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019. DOI: 10.1109/TITS.2019.2893583
 - 25 Mao Z H, Tao G, Jiang B, Yan X G. Adaptive actuator compensation of position tracking for high-speed trains with disturbances. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, **67**(7): 5706–5717
 - 26 Dong H R, Ning B, Cai B G, Hou Z S. Automatic train control system development and simulation for high-speed railways. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2010, **10**(2): 6–18
 - 27 Dong H R, Zhu H N, Li Y D, Lv Y S, Gao S G, Zhang Q, Ning B. Parallel intelligent systems for integrated high-speed railway operation control and dynamic scheduling. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, **48**(12): 3381–3389
 - 28 Gu Q, Tang T, Cao F, Karimi H R, Song Y D. Peak power demand and energy consumption reduction strategies for trains under moving block signalling system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.
 - 29 Yan X H, Cai B G, Ning B, Shanggan W. Online distributed cooperative model predictive control of energy-saving trajectory planning for multiple high-speed train movements. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, **69**: 60–78
 - 30 Zhou L, Tong L, Chen J, Tang J J. Joint optimization of high-speed train timetables and speed profiles: a unified modeling approach using space-time-speed grid networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, **97**(6): 157–181
 - 31 Yang L X, Li K P, Gao Z Y, Li X. Optimizing trains movement on a railway network. *Omega*, 2012, **40**(5): 619–633
 - 32 Carvajal-Carreo W, Cucala A, Fernández-Cardador A. Fuzzy train tracking algorithm for the energy efficient operation of CBTC equipped metro lines. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, **53**: 19–31
 - 33 Li S K, Yang L X, Gao Z Y. Adaptive coordinated control of multiple high-speed trains with input saturation. *Nonlinear Dynamics*, 2016, **83**(4): 2157–2169
 - 34 Li S K, Yang L X, Gao Z Y. Coordinated cruise control for high-speed train movements based on a multi-agent model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, **56**: 281–292
 - 35 Baek J, Lee C. The simulation of train separation control algorithm by movement authority using beacon. In: Proceedings of the 4th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007.
 - 36 Pan D, Zheng Y P. Dynamic control of high-speed train following operation. *Promet-traffic and Transportation*, 2014, **26**(4): 291–297
 - 37 Takagi R. Synchronisation control of trains on the railway track controlled by the moving block signalling system. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2012, **2**(3): 130–138
 - 38 Ding Y, Bai Y, Liu F, et al. Simulation algorithm for energy-efficient train control under moving block system. In: Proceedings of the 2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering, 2009.
 - 39 Zhao Y B, Ioannou P. Positive train control with dynamic headway based on an active communication system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(6): 3095–3103
 - 40 Xun J, Yin Y, Liu R H, Liu F. Cooperative control of high-speed trains for headway regulation: a self-triggered model predictive control based approach. *Transportation Research Part C*, 2019, **102**: 106–120
 - 41 Szpigel B. Optimal train scheduling on a single track railway op-

- erational research. *Operations Research*, 1972, **72**: 343–352
- 42 Zhao Peng. High Speed Railway Operation Organization. Beijing: Science Press, 2009.
(赵鹏. 高速铁路运营组织. 北京: 中国铁道出版社, 2009.)
- 43 Cordeau J, Toth P, Vigo D. A survey of optimization models for train. *Transportation Science*, 1998, **32**(4): 380–404
- 44 Hansen I. Railway network timetabling and dynamic traffic management. *International Journal of Civil Engineering*, 2010, **8**(1): 19–32
- 45 Cacchiani V, Huisman D, Kidd M, Kroon L, Toth P, Veelenturf L, Wagenaar J. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, **63**: 15–37
- 46 Törnquist J, Persson J. N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances. *Transportation Research Part B*, 2007, **41**(3): 342–362
- 47 Törnquist J. Design of an effective algorithm for fast response to the rescheduling of railway traffic during disturbances. *Transportation Research Part C*, 2012, **20**: 62–78
- 48 Schöbel A. Integer programming approaches for solving the delay management problem. *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, 4359, **4359**: 145–170
- 49 Dollevoet T, Huisman D, Schmidt M, Schöbel A. Delay management with rerouting of passengers. *Transportation Science*, 2012, **46**: 74–89
- 50 Hou Z P, Dong H R, Gao S G, Nicholson G, Chen L, Roberts C. Energy-saving metro train timetable rescheduling model considering ATO profiles and dynamic passenger flow. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019
- 51 Schlechte T, Borndorfer R, Erol B. Micro-macro transformation of railway networks. *Journal of Rail Transport planning and Management*, 2011, **1**: 38–48
- 52 Corman F, D'Ariano A, Pranzo M. Effectiveness of dynamic re-ordering and rerouting of trains in a complicated and densely occupied station area. *Transportation Planning and Technology*, 2011, **34**(4): 341–362
- 53 D'Ariano A, Pacciarelli D, Pranzo M. A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network. *European Journal of Operational Research*, 2007, **183**(2): 643–657
- 54 Corman F, D'Ariano A, Pacciarelli D, Pranzo M. A tabu search algorithm for rerouting trains during rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, **44**(1): 175–192
- 55 Meng L Y, Zhou X S. Simultaneous train rerouting and rescheduling on an N-track network: a model reformulation with network-based cumulative flow variables. *Transportation Research Part B*, 2014, **67**: 208–234
- 56 Mazzarello M, Ottaviani E. A traffic management system for real-time traffic optimisation in railways. *Transportation Research Part B*, 2007, **41**: 246–274
- 57 Luan X J, Wang Y H, De Schutter B, Meng L Y, Lodewijks G, Corman F. Integration of real-time traffic management and train control for rail networks – Part 1: Optimization problems and solution approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, **115**: 41–71
- 58 Luan X J, Wang Y H, De Schutter B, Meng L Y, Lodewijks G, Corman F. Integration of real-time traffic management and train control for rail networks – Part 2: Extensions towards energy-efficient train operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, **115**: 72–94
- 59 Ghaemi N, Zilko A A, Yan F, Cats O, Kurowick D, Goverde R M P. Impact of railway disruption predictions and rescheduling on passenger delays. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 2018, **8**(2): 103–122
- 60 Jespersen-Groth J, Potthoff D, Clausen J, Huisman D, Kroon L, Maróti G, Nielsen M N. Disruption management in passenger railway transportation. *Robust and Qnline Large-scale Optimization*, 2009: 399–421
- 61 Ghaemi N, Goverde R M P. Review of railway disruption management practice and Literature. In: Proceedings of the 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis, Narashimo, Japan: Rail Tokyo, 2015. 037-1–037-16
- 62 Louwerse I, Huisman D. Adjusting a railway timetable in case of partial or complete blockades. *European Journal of Operational Research*, 2014, **235**(3): 583–593
- 63 Acuna-Agost R, Michelon P, Feillet D, Gueye S. SAPI: Statistical analysis of propagation of incidents. A new approach for rescheduling trains after disruptions. *European Journal of Operational Research*, 2011, **215**(1): 227–243
- 64 Zhan S G, Kroon L G, Veelenturf L P, Wagenaar J C. Real-time high-speed train rescheduling in case of a complete blockage. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, **78**: 182–201
- 65 Zhu Y Q, Rob M. Goverde R M P. Railway timetable rescheduling with flexible stopping and flexible short-turning during disruptions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, **123**(1): 149–181
- 66 Xu P J, Corman F, Peng Q Y, Luan X J. A train rescheduling model integrating speed management during disruptions of high-speed traffic under a quasi-moving block system. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, **104**: 638–666



宁滨 (1959–2019) 原中国工程院院士, 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授. 主要研究方向为列车运行控制系统与数字化, 网络化信号系统.

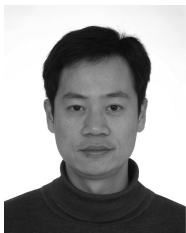
(NING Bin Former academician of Academy of Engineering of China, professor at the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. His research interest covers train control system, digital and networked signal system for rail transit.)



董海荣 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授, 轨道交通运行控制系统国家工程研究中心副主任. 主要研究方向为列车运行智能控制与优化, 调度控制一体化. 本文通信作者.

E-mail: hrdong@bjtu.edu.cn

(DONG Hai-Rong Professor at the State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, deputy director of National Engineering Research Center of Rail Transportation and Control System, Beijing Jiaotong University. Her research interest covers intelligent control and optimization of train operation, integration of scheduling and control. Corresponding author of this paper.)



郑伟 北京交通大学国家轨道交通
安全评估研究中心教授, 副主任。
主要研究方向为高铁信号系统安全设计,
测试及评估理论方法。

E-mail: wzheng1@bjtu.edu.cn

(**ZHENG Wei** Professor and deputy
director at National Research

Center of Railway Safety Assessment, Beijing Jiaotong University. His research interest covers the safety design, test and assessment of the signaling system of the high-speed railway.)



荀径 北京交通大学轨道交通控制与安全
国家重点实验室副教授。主要研究方向为
先进的列车控制方法, 铁路运输优化问题
和强化学习。

E-mail: jxun@bjtu.edu.cn

(**XUN Jing** Associate professor at
the State Key Laboratory of Rail

Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. His research interest covers advanced train control methods, optimization problem in rail transport and reinforcement learning.)



高士根 北京交通大学轨道交通控制与安全
国家重点实验室副教授。主要研究方向为
列车智能控制和多车协同优化。E-mail:
sggao@bjtu.edu.cn

(**GAO Shi-Gen** Associate professor
at the State Key Laboratory of Rail

Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University. His research interest covers intelligent train control and cooperative optimization of multiple trains.)



王洪伟 北京交通大学国家轨道交通
安全评估研究中心副教授。主要研究
方向为基于通信的列车运行控制系统
的车-地通信技术和地铁系统中的
协作调度方法。

E-mail: hwwang@bjtu.edu.cn

(**WANG Hong-Wei** Associate pro-

fessor at National Research Center of Railway Safety Assessment, Beijing Jiaotong University. His research interest covers train-ground communication technology in communication base train-ground communication systems and cooperative scheduling approaches in subway systems.)



孟令云 北京交通大学交通运输学
院副教授, 副院长。主要研究方向为
列车运行调度和网络容量评估。

E-mail: lym@bjtu.edu.cn

(**MENG Ling-Yun** Associate pro-

fessor and vice-dean at the School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University. His research interest covers train scheduling and network capacity assessment.)



李滢东 北京交通大学计算机与信息
技术学院教授, 副院长。主要研究
方向为大数据分析与安全, 智能交通
信息技术, 先进计算。

E-mail: ydli@bjtu.edu.cn

(**LI Yi-Dong** Professor and vice-

dean at the School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University. His research interest covers big data analysis and security, intelligent transportation system, and advanced computing.)