

文章编号: 1005-0523(2025)05-0058-13



中国高铁运营组织综合管理实践创新与发展趋势

曲思源

(中国铁路上海局集团有限公司运输部, 上海 200071)

摘要: 高铁的发展离不开科学的运营组织和管理。与日本、德国、法国等发达国家相比, 中国高铁运营线路长, 沿线地区客流特征和需求在运行速度、旅行时间、运输价格、服务质量等方面均存在较大差异, 其运营组织和管理独具特色, 并具有世界一流的技术水平和发展水准。文章通过分析中国高铁运营管理特色及复杂特征, 结合我国铁路运输的主要矛盾, 按照问题导向和需求牵引的原则, 提出针对中国高铁运营组织的技术方案; 分析了长三角高铁运营组织管理创新实践方面的特色案例, 包括以市场需求为导向优化运输供给、繁忙干线运营综合解决方法等创新突破亮点; 并结合长三角高铁运营发展提出了中国高铁运营组织与管理发展的趋势。

关键词: 高铁; 运营组织; 综合管理; 实践创新

中图分类号: U225.4

文献标志码: A

本文引用格式: 曲思源. 中国高铁运营组织综合管理实践创新与发展趋势[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 58-70.

Innovations and Development Trends in China's High-Speed Railway Transportation Organization

Qu Siyuan

(Transportation Department, China Railway Shanghai Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: The development of high-speed rail cannot be separated from scientific transportation organization and management. Compared with developed countries such as Japan, Germany and France, China's high-speed rail has a longer operating line, and the passenger flow characteristics and demands along the line vary greatly in terms of running speed, travel time, transportation price and service quality. Its transportation organization and management have unique features and world-class technical and development levels. By analyzing the characteristics and complex features of China's high-speed rail operation management, and in combination with the main contradictions of China's railway transportation, according to the problem-oriented and demand-driven principles, technical solutions and practices for China's high-speed rail transportation organization are proposed. Analyzing the characteristic cases of innovation and practice in the transportation organization and management of the Yangtze River Delta high-speed rail, including the highlights of innovative breakthroughs such as optimizing transportation supply based on market demand and comprehensive solutions for the operation of busy trunk lines. Based on the operational development of high-speed railway in the Yangtze River Delta region, this paper outlines the trends in the development of China's high-speed rail operational organization and management.

Key words: high-speed railway; operation organization; integrated management; practice innovation

收稿日期: 2024-07-29

Citation format: QU S Y. Innovations and development trends in China's high-speed railway transportation organization[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(5): 58–70.

高速铁路(简称:高铁)已经成为中国的一张国家名片,在国民经济中的地位非常重要,并在综合交通运输体系中发挥着骨干作用。中国高铁在学习借鉴世界高铁建设经验的基础上,适应自身国情和路情,选择了一个综合的、取各家之长的发展模式^[1]。高铁的发展离不开科学的运营组织和管理^[2]。

高铁起源于日本,发展于欧洲,兴盛于中国;世界高铁看中国,中国高铁看长三角^[3-6]。2008年京津城际铁路的开通标志着中国正式迈入高铁时代。中国已成为世界上高铁运营里程最长、在建规模最大、列车运行数量最多、商业运营速度最高、技术体系最全、运营场景和管理经验最丰富的国家^[2]。中国高铁具有自主知识产权的核心技术和装备,通过数据赋能、数智发展,形成了完整的高铁技术体系^[7-9],并在学习借鉴世界高铁运营管理经验的基础上,结合自身国情和路情,形成了独特的综合管理发展模式^[10]。然而,随着高铁网络的不断扩展和运输规模的持续增大,中国高铁面临着运输环境复杂等方面的挑战,需要不断强化运营组织方面的优化工作。

国外高铁基础理论研究较多,数据积累丰富、线路通过能力的利用相对宽裕,运营与运维的矛盾尚不突出。中国高铁无论在运输网络、技术装备、运输服务还是在运营组织上都与国外高铁有着显著的差异,中国高铁运营组织特色明显,长三角高铁运营组织与管理具有示范性。

1 中国高铁的运营环境复杂特征和运营组织难度

1.1 全世界规模最大的高铁运营网络

中国高铁点多、线长、面广,是世界上规模最大的高铁运营网络。截至2024年底,中国高铁运营里程达4.8万 km。占世界高铁总里程的70%以上,“八纵八横”高铁网已经建成85%。运营网络通达水平世界最高,从林海雪原到江南水乡,从大漠戈壁到东海之滨,中国高铁四通八达,已覆盖了全国97%的50万人口以上的城市^[11-12]。目前,中国高铁已经实现1 000 km跨区域大城市间4 h左右到达、当日往返,2 000 km跨区域大城市间8 h左右到达、

当日到达,或组织夜间夕发朝至的动卧列车。“轨道上的长三角”不断加速,已是全国铁路最密集的区域之一。以上海、南京和杭州核心城市为中心,到其他主要城市4~5 min就有一趟车,真正实现了公交化运行。

1.2 运营环境复杂

复杂的运营环境主要包括高寒、大风、热带气候条件;复杂的地质环境如大面积湿陷性黄土、冻土和沙漠区等。中国高铁列车开行频率高、密度大,在准时性和可靠性的高标准下,列车运行计划编制的一体化、调度指挥的灵活性、列车运行调整以及应急处置响应快速性要求极高。同时,中国高铁速度等级较为齐全,不同动车组编组、不同速度等级、不同距离及大规模跨线运行等突出特点,对列车调度指挥、设施设备的可靠性和稳定性、客流集疏运安全等提出了更高的要求。中国高铁在客流特征上大体呈现出区域间客流量不均衡、旅客出行需求层次多、平均运距长、客流波动大等特点的复杂运营环境^[13]。

1.3 客运供需的矛盾日益突出

近年来,高铁客流大幅增长,全国铁路动车组列车的旅客发送量已占铁路旅客总发送量的40%以上。特别是高铁客流集中分布在经济发达、人流稠密的地区,如京沪、京广、沪宁和沪杭等线路客流增长迅速,客流量巨大并具有动态性,运输能力紧张问题凸显。京沪高铁、沪杭(沪昆高铁沪杭段)高铁等繁忙干线上客运需求旺盛,存在多种速度、多种型号动车组列车共线运行和区段通过能力饱和的高铁运输组织的难点。面对京沪高铁、沪昆高铁等繁忙干线运输能力饱和日益凸显等现实需求,压缩高铁列车追踪间隔时间已成为提升繁忙区段通过能力、提高列车密度、破解运能瓶颈的重要突破口。

1.4 列车运行图编制效率与调整的智能化水平亟须同步提升

现行列车运行图编制系统在早期提高运行图铺画效率方面发挥了关键作用。但列车运行图编制系统不应仅作为运行图铺画的工具,还应发挥计算机在运算能力方面的优势,为编图人员提供辅助

决策功能;尤其是在目前高铁成网运行条件下,运营方案复杂多变,完全靠人工开展运行图编制的各种决策往往顾此失彼。应充分利用先进信息技术、模型与算法,重点解决列车运行图编制过程中的跨线列车协调、运行线调整等长期存在的关键难题,提升列车运行图编制与调整的智能化水平。

2 中国高铁运营组织优化技术和解决方案

为了使高铁运营组织更加适应客运市场发展的变化规律,满足长距离、多层次、多样性的出行需求,中国高铁在运营组织与管理方面需要大量的创新和突破,以客流深度分析、资源配置优化、综合计划编制、科学调度水平提升等阶段,基本完成从“以运输生产为中心、运输能力是关键”向“以旅客为中心、以市场为导向、以服务为宗旨”的理念转变^[1]。

2.1 初步探索铁路旅客画像及大数据分析挖掘

铁路高峰期年旅客发送量超36.8亿人次,覆盖旅客群体超10亿人,铁路旅客画像能够支撑为不同旅客群体设计并提供差异化的客运产品和服务,以提升铁路收益。铁路旅客画像是利用客运大数据平台中的旅客实名制数据、售票退改签交易数据、铁路12306注册数据、访问发起的物理数据等,对其进行数据整合、关联与统计,从而得到旅客画像(基本属性、出行属性、统计属性)标签,并随旅客行为的变化以及铁路运营策略的变化,不断调整和丰富画像标签^[14]。中国高铁在旅客画像方面进行了初步探索。

2.2 摸索售票组织策略和静态运价调控方法

1) 售票组织策略。在坚持确保列车的整体效益、保证始发站长途车票效益和充分挖掘中间站短途车票效益的基础上,近年来,铁路部门不断研究优化票额组织策略,以解决客流波动幅度较大时票额组织分配与实际需求不匹配的问题,使其能够更灵活地适应复杂的客流变化。主要策略包括:票额预分、票额共用、区段限售、票额通售、席位复用、席位超售等。售票组织策略根据预售期不同时间段的客流预测结果,按照售票组织原则,综合运用各项售票组织策略对列车票额进行调整;这些策略在不同时期、不同售票阶段发挥了较好地作用^[15]。

2) 静态运价控制方法。按照国家对铁路票价的管制和铁路的价格制定原则,考虑铁路的社会责任和旅客接受度,铁路客运收益管理体系的运价控

制可以分为静态策略和动态策略。2018年,中国铁路总公司发布《铁路客运价格管理办法》,进一步规范和加强铁路客运价格管理,建立健全了铁路客运价格管理机制和制度,为铁路实施“一车一价”的静态运价控制奠定了政策基础。2020年,京沪、成渝等干线高铁实施价格浮动调整策略,并推出计次票、定期票等新产品。2021年,厦深线和南广线也实施“一车一价”的差异化定价策略,并相应推出计次票、定期票产品。这些静态运价控制策略的实施产生了广泛的社会反响,但因路网规模庞大、列车数量多、市场环境变化快、内部经营调整灵活度不足,静态运价控制需面向不同客流时段、旅客列车产品和旅客群体开展系统性研究,最终形成静态运价控制策略^[16]。

2.3 遵循客流分析的列车开行方案设计理念得到具体应用

列车开行方案优化设计是以客流需求为基础,结合动车组配属情况、线路运力资源情况、既有运行图列车实际开行效果等,对列车开行径路、编组、停站方案、车底交路等进行优化与调整设计。列车开行方案优化设计受诸多因素的影响,如路网连通条件、客流密度、运输能力、动车组配属与运用、政府需求。目前已实现利用信息系统大量采集历史客流动态、客运市场发展状况以及社会、经济、行业等信息数据,加强数据分析,科学研判预测客流变化趋势,科学编制列车开行方案。在设计优化列车开行方案过程中,还注重列车开行频率与编组设计优化关键:列车开行频率与编组设计(客流分布状态、列车等级、列车车型、编组辆数、预期客座率、停站方案的设计)、停站方案设计(客流分布特征、服务频率下限、停站均衡性)。随着高速铁路运营里程规模的不断扩大,提高旅客列车开行方案的设计与优化需要考虑更多因素,需要在满足客流需求的前提下创造有利条件,以减少换乘次数和旅客在途旅行时间;同时还要合理地使用动车组,均衡运用线路能力,使客流分配均匀。旅客列车开行方案质量的好坏,直接决定铁路旅客运营组织工作的经济效益和社会效益。为此,中国高铁构建了基于大数据多元动态客流需求辨识与预测技术、建立“流-车-效”迭代适配的旅客列车开行方案优化技术、通过科学安排列车开行方案,统筹安排直达与途停列车、本线与跨线列车、长途与短途列车,适应不同距

离、不同区段的出行需求^[17]。

2.4 构建全方位的高铁运营产品谱系

中国高铁统筹安排不同速度等级列车,兼顾不同时效性的出行需求;统筹安排长途和短途列车,兼顾不同距离出行需求;统筹安排本线与跨线列车,增加路网节点通达性;统筹安排白天与夜间列车,满足不同高铁运输产品设计(适应市场、种类丰富、差异化的铁路运输产品谱系,满足旅客多样化需求)时段的出行需要;适应旅客出行习惯,夜间开行“夕发朝至”动车组卧铺列车,与白天高铁列车形成优势互补的产品供给格局^[17]。

2.5 系统掌握并持续提高高铁成网运输组织技术能力

中国高铁面向世界高铁发展前沿,在运输组织方面综合考虑我国高铁技术发展现状、我国特有国情和路情,坚持问题导向和目标导向相结合,坚持“源于需求、服务需求、高于需求”的原则,系统掌握并持续提高高铁成网运输组织技术能力,集中力量推进运输服务技术创新,全面掌握复杂路网条件下高铁长距离运营管理成套技术,在沪杭高铁实现了3 min 列车追踪间隔运行,最大程度地提升运输供给能力。通过统筹同通道多条线路运力资源,优化通道运输结构;统筹枢纽不同客站分工,优化地区客运系统布局。

2.6 列车运行图编制优化技术不断取得突破

列车运行图编制是一项涉及因素多、耦合性强的复杂工作。列车运行图编制的任务目标、规则约束和策略方法体系共同构成铁路列车运行图编制体系。中国铁路部门已成功研发具有完全知识产权、自主可控的新一代列车运行图编制系统,创新提出基于空间搜索的“百万级”图元快速搜索技术,实现超大规模图面海量图元毫秒级刷新与元素捕捉。现阶段的列车运行图编制系统已完全实现按照区段编制详图的要求,并较好实现了分界点交接时刻约束下的区段运行图编制,创新构建了多群体协同并发控制与操作冲突处理计算机编图技术;创新群体协同列车运行图编制系统主副本交互技术;创新面向列车运行图智能编制全链条大数据中台技术。同时,考虑旅客不同时段出行需求,适应平时和高峰客流规律,实行“一季一图”、春暑运图、采用8辆短编组、16辆长编组、17辆超长编组列车灵活调整运力,最大程度便利旅客出行。

2.7 创新列车运行调整技术

创新列车运行计划智能调整技术;创新调度命令和列车进路安全智能卡控技术;创新行车调度综合仿真实训技术;应急处置全流程管理技术;应急处置可视化;高效化应急演练;智能化辅助决策。同时,构建“一日一图”日计划调整技术。“一日一图”日计划调整主要包括列车增开或停运、车组分解、动态编组,并统筹同通道多条线路运力资源,优化通道运输结构。通过精准实施“一日一图”,提高运输效率和旅客满意度。

3 长三角高铁运输组织优化的创新与特色实践

3.1 对客流规律的摸索及分析

1) 高铁客流受复杂要素共同影响。高铁客流的形成和发展是内外各种因素共同作用的结果,并在时间、空间分布上呈现波动性。系统内部因素主要有运输计划、服务质量、客运票价等;系统外部因素包括市场环境、节假日制度、旅客出行行为特征等因素。在复杂因素综合作用下,高铁客流在不同时期维度的视角下呈现一定的波动规律。高铁客运量在季、月、周、日及一日内各个时段之间都会出现起伏变化,为满足客流波动需求,列车开行方案以及列车运行图应具有弹性适应能力,并采取相应的组织方法^[18]。

2) 客流周规律属性。高铁客流时空分布在一周内呈现“周五~下个周一4天各不相同,周二~周四3天基本相似”的变化规律。其中,客流较高的周五~下个周一合称周末,是为“4”;客流较低的周二~周四合称日常,是为“3”。高铁“4+3”周规律旅客列车运行图系是以市场需求为导向,以增加经营收入、减少运营成本、提高经营效益为目标,统筹优化运力资源配置,采取图定运力设计及临时运力优化相结合的方式,动态调整开行方案,配合售票策略优化,扩大客流饱满阶段客运能力有效供给,减少客流不足阶段客运能力供给,推进铁路客运工作由内部生产型向市场导向型的转型发展,不断提高市场竞争能力和经营效益的旅客列车运行图管理制度。

3) 运输高峰期的规律性属性。铁路每年都会面临“春运、五一、暑运、十一”等节假日运输高峰期;节假日新增学生流、务工流、旅游流、探亲流等,旅客发送人数显著增长,铁路则会增开临客以满足

广大旅客出行需求,继而相应的运输组织模式也会发生变化。运输高峰期具有周期性和规律性特征,在一个年度周期内,国家法定节假日基本固定,决定了高峰期运输期限相对固定,每一阶段的运输高峰期都具有一定生命周期,短则5天、长则60天;规律性体现在高峰期运输时,普速列车“满编”运行、部分高铁列车重联运行,启动高峰运行线、增开临客列车等基本措施。针对高铁周末及日常的运输特点,抓住铁路客运组织的关键环节,从客流市场调查、基本图编制、快速精准开车、票额策略管理、运力优化与资源保障等方面入手,提出实现客运专线“4+3”周规律旅客列车运行图管理的措施手段和方法途径,促进铁路客运服务水平持续提升。

3.2 高铁价格和票额精细化管理

1) 调整高铁票价。为进一步提升高铁运营品质、满足旅客不同出行需求,长三角高铁价格多次进行调整。主要原因在于:部分线路客流培育时间较长,客流需求提升,市场竞争较为充分,调整浮动票价机制更有利于平衡客流需求,提升效益水平。从2019年7月27日起,长三角沪宁城际和宁杭高铁部分高铁线路票价上调。从2023年6月份起,沪宁城际和宁杭城际列车执行浮动票价体系,二等座执行票价上限上涨18.9%~22.2%。2024年6月15日起,对沪昆高铁沪杭段、沪昆高铁杭长段、杭深铁路杭甬段上运行的时速300 km及以上动车组列车公布票价进行优化调整,并根据市场状况,区分季节、日期、时段、席别等因素,建立灵活定价机制,实行有升有降、差异化的折扣浮动策略。

2) 实施高铁票额精细化管理,推出新型票制产品。通过安排售票组织策略、精确裂解可全程接续短途票额、延长票额全程共用和放开售票时间、票额智能预分等手段,实现票额分配“一车一策、一日一策”;预售期内,实时监控列车各区间余票数量和售票速度,建立智能预警反馈机制,及时进行票额调整,充分释放铁路票价调整的红利,推动运输服务优化。为满足旅客差异化出行需求,上海局结合管内客流出行特点,推动客票服务创新升级,在沪苏通铁路、徐连高铁、宁杭高铁、京港高铁合黄段和杭昌高铁黄昌段5条线路加大客运产品供给,满足沿线商务差旅、通勤旅客等群体的便捷出行需求。同时以“梯次折扣+灵活选择”为卖点,推出新型票制产品;并以“高频出行更优惠、适需选择更便利”的产品特性,进一步降低广大旅客出行成本。上海

局在5条线路原有定期票计次票产品的基础上,新推出10种定期票产品,以精准匹配不同人群通勤出行需求;又新推出10次/90日计次票产品,为商务差旅、短期项目制工作等人群提供灵活出行方案。持新型票制产品的旅客出行不限定具体车次,产品票价在各区间动车组列车执行票价的基础上享有6.2~9折优惠。

3.3 创新列车开行方案和优化编制列车运行图

1) 列车开行方案由点到点发展到区域调整的拓展。依托高铁运输前基于预测客流所制定的列车开行方案,难以与具有实时动态性、时变性的客流需求相适应。2024年6月15日长三角超级环线高铁全程运行8 h 9 min,单向行驶里程超过1 200 km,将上海、苏州、无锡、常州、南京、合肥和杭州等7个万亿GDP城市连接起来。交通设施一体化是长三角区域一体化发展的重要基础,是促进要素流动和人员往来的重要保障。长三角超级高铁环线的开通,使得点到点之间优化开行方案向区域优化方向转变,运力资源得到区域配置和优化^[18]。

2) 全程一次性铺画列车运行线。为了适应客流波动,上海局按照“基本图筑底、分号图补峰;线条一次铺画、实际按需开行、灵活调整编组”的原则,实现旅客列车运力供给的对应波动。围绕客流集中体现出客运产品和列车运行线的匹配,在一张运行图中完整体现出“4+1+1+1”(周一至周四、周五、周六、周日)运营方案。运行线铺画及开行方面,在基本运行图中铺画日常线、周末线等多种开行规律列车运行线,同时铺画少量高峰线视需开行;在客流分号运行图中铺画较多临客运行线在客流高峰期视需开行;遇基本图、分号图中运行线仍无法满足时段性、方向性客流需求时,可临时铺画图外临客运行线。编组安排及调整方面,基本图中合理安排“短编、重联、长编”三种编组形式列车,并设计部分编组规律变化列车,日常则视需灵活调整实际编组。

3) 适应客流波动的运力动态调整策略。基于大数据的多元动态客流需求辨识与预测技术。适应客流波动的运力动态调整指在旅客列车基本运行图基础上,按照“一日一图”的工作理念,根据平日、周末、高峰时期等不同时间段的列车开行规律,科学制定列车开行方案,精准投放运力。针对高铁客流平峰和高峰不同时期的客流波动规律,运力动态调整的流程与策略各有侧重。针对平峰时期客

流短时期内波动性大的特征,动态调整平日、周末线,灵活应对周末大客流。高峰时期运力动态调整以科学应对节假日复杂多变的客流市场,为旅客出行提供更多选择和更大的便利。在假期内,采取优化送修时间、提前组织二级修、跨所网络修等统筹检修措施,以及调整配属结构、优化交路组合、压缩检备、启用热备等运用手段,实现“打足”运用里程、“用足”检修能力、“给足”高峰用车三者的系统最优,确保动车组列车假期上线率在90%以上。如图1所示。

4) 率先发展“一日一图”列车运行调整方式。“一日一图”即为动态安排列车运行计划,根据客流需要灵活调度,一天一调整。上海局调度所率先设立高铁计划员岗位专门从事“一日一图”的调整工作。特别是当出现气象灾害等特殊情况,高铁计划调度员可迅速调整列车交路,并结合实际情况进行严格复审复核以确保动车组安全、平稳、有序运行。例如,为确保2025年为期5 d的清明小长假运输,长三角客流呈现全线火热势头,上海局管内踏青、祭祖扫墓等客流交织叠加,旅客出行需求旺盛,累计发送旅客1 800.4万人次,日均发送旅客360.1万人次,同比增长9.2%,其中4月4日发送旅客419万人次,创单日客发量历史新高。为从容应对大客流,上海局紧紧围绕市场需求,充分挖掘车辆资源潜力,优化运营组织,及时调整列车开行方案,实行高峰运行

图,按照“一日一图”动态调配运输能力,加大对重点地区、重点时段和热门方向的运力投放;加大前往北京、南昌、广州、武汉、郑州、西安等直通方向,以及往返上海、杭州、南京、合肥、温州、安庆、徐州、盐城等管内热门方向的运力补充。

3.4 通过复杂运营组织优化技术综合解决繁忙干线运输畅通难题

1) 京沪高铁列车运行图结构优化。2017年9月21日,京沪高铁实现了世界上350 km/h的轮轨第一运营最高速度^[1]。根据高速动车组列车运行速度多样性、跨线列车多车站接入特征和列车停站方案多样性要求,通过对线路通过能力评估分析,提出增加时速350 km动车组列车对数方案^[1]。该方案分为3个阶段:平稳投放阶段,有计划增加时速350 km动车组列车开行数量,列车上线15~35对;快速布局阶段,时速350 km动车组列车上线36~100对;全面换代阶段,时速350 km动车组列车上线143~195对,控制跨线列车开行比例和确定各区段跨线车数量,调整跨线车开行和衔接方案,优化列车停站方案。目前,京沪高铁350 km/h动车组列车对数达到33对。

2) 沪杭高铁3 min间隔时间实现体系的完整构建。沪杭高铁实现3 min列车运行间隔是一项复杂的系统工程,是铁路运营组织精髓的整体体现,是铁路运营组织与管理的经典案例,也是技术和管理

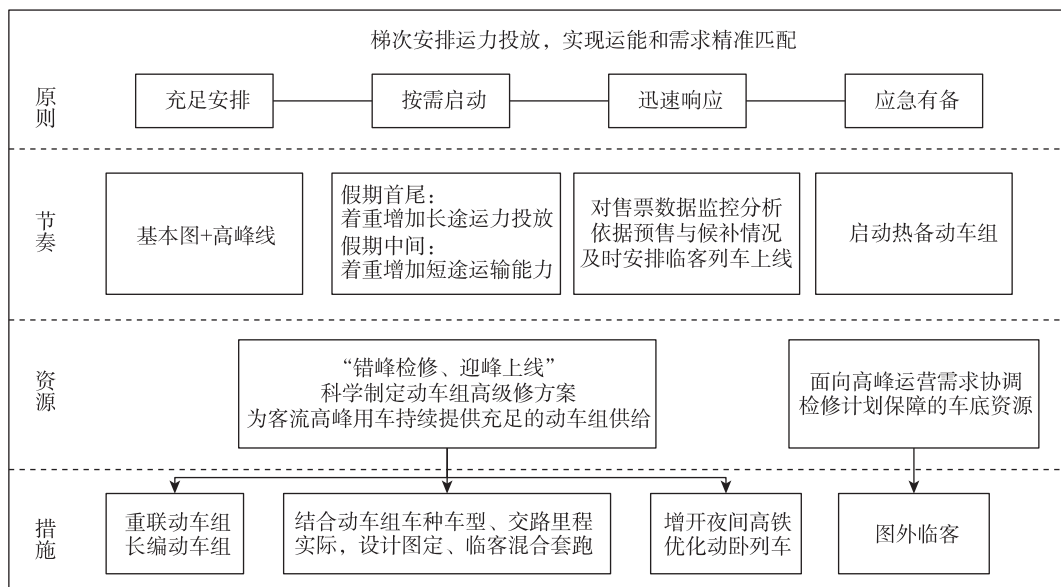


图1 节假日高峰期“梯次投放”运力动态调整策略

Fig. 1 The dynamic adjustment strategy of “echelon delivery” capacity during the peak holiday period

相互融合的综合体。通过8年的时间,上海局运输部先后完成了4个国铁集团和6个上海局重点课题,总体分4步走(即理论分析,单组分析,扩大规模开行,实践反复论证)。通过8年的攻关奋战,构建中国高铁特色的沪杭高铁实现3 min列车追踪运行间隔时间,完整的运营组织与管理体系(包括技术方案、管理方法、运行图质量指标,和弹性分析方法、通过能力优化利用以及应急保障方案、运营组织能力等方面)和技术保障方案,深入探索研究了高铁列车间隔时间组织体系。2017年正式开始研究京沪高铁列车3 min间隔时间,其中中间站有关的5个间隔时间在沪杭高铁上已经做过类似分析。但区间、到达和出发3个间隔时间研究需要技术突破。通过系统梳理出这3种间隔时间的影响因素,形成了一套理论体系。面对从高铁大局向高铁强局的转变需要,上海局具有超前意识,作为示范线,通过2列追踪开行、多列开行以及扩大规模开行的动车组列车试验,将京沪高铁3 min追踪运行的理论成果在沪杭高铁投入应用,并在实践中进一步将理论体系完善并有所创新。为2024年4月发布实施的《复兴号CR400电动车组总体技术条件》中明确3 min追踪列车间隔时间提供了参考。同时,补充高铁160对以上运行的应急预案,组成完整的具有中国特色的沪杭高铁3 min间隔时间运营组织体系,实现了列车扩大规模开行。

3) 开发列车运行图编制整体效能评价。列车运行图综合评价系统基于运输整体效能,丰富和完

善列车运行图评价方法和手段,采用多种数理统计方法,融合客货运、列车运行图、车机运用等多源数据,遴选反映整体运输效率与能力的多维综合性指标。以反映运输能力、运营效益、服务质量的相关数据为基础,构建了多维度的列车运行图评价指标体系。结合运行图编制结果、实际客流以及动车组运用计划,计算得到各阶段各维度评估指标,进行结果展示和评估分析,最终实现多源数据的融合分析,运行图指标在专业部门间的数据共享。如图2所示,上海局编制的列车运行图三维评价开创了列车运行图编制整体效能评价的先河。

4 中国高铁运营组织与管理的发展趋势

4.1 构建高铁运营大数据平台

高铁运营大数据平台主要服务于铁路开展客运产品设计、营销和运营,在平台数据建模的基础上,利用智能分析工具或自研分析平台,便捷、高效、直观地呈现平台所有维度的指标数据和关系。

1) 建立分析指标体系。结合高铁业务场景和特点,围绕能力利用、成本效益、策略运用三方面,建立分析指标体系。能力利用主要包括旅客列车区段供给能力、车站服务能力、列车服务能力、发送量、客座率、利用率等指标;成本效益主要包括旅客列车开行成本、车站服务成本、列车服务成本、运营综合成本、分项收入、收入率、利润、盈亏平衡点等指标;策略运用主要包括售票组织策略、价格调整策略、站车服务策略等指标。体系中既要明确指标

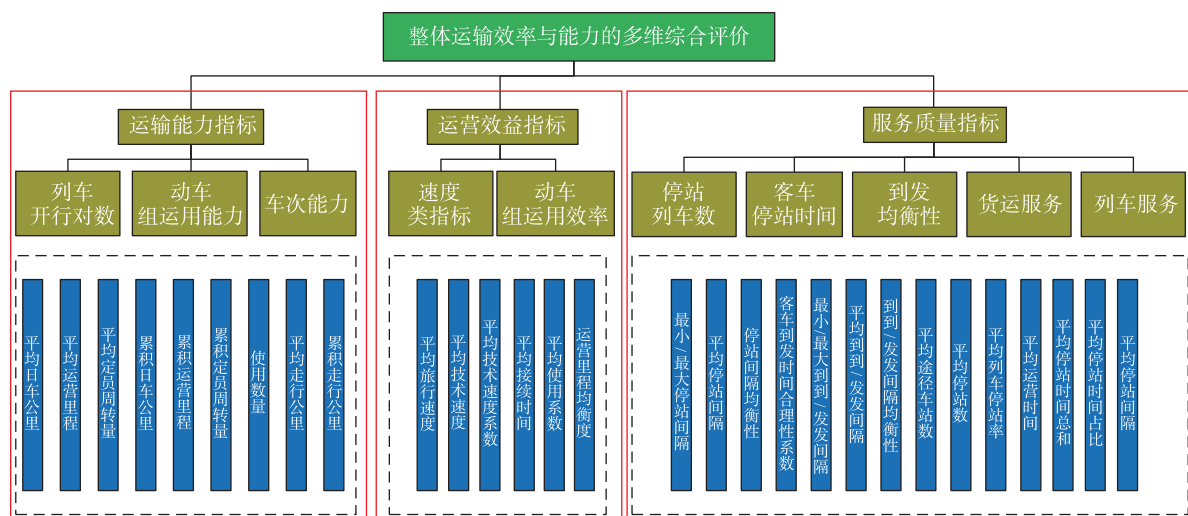


图2 列车运行图三维评价指标体系

Fig. 2 Three-dimensional evaluation index system of train timetable

值的计算方法,也要明确指标的计算维度,还要根据业务发展不断丰富指标。

2) 构建数据分析系统。在大数据平台的数据采集管理基础上,数据可视化主要是指将数据指标作为图形元素构成数据图像,同时将数据的各个属性值以多维数据形式表示,从不同的维度观察数据,从而实现对数据更深入的观察和分析,包含多维可视化、层次可视化和地图可视化。多维可视化主要指柱形图、条形图、分布图、折线图、散点图、饼图、雷达图等;层次可视化主要以树的形式表达数据集,用于探索数据的层次关系;地图可视化主要是探索业务数据集内空间(特别是地理方面)的关系,将相关的指标值在可无极放缩的地图上作为图形元素显示。

4.2 优化控制售票策略

4.2.1 全方位深入研究售票策略

1) 面向市场的定价策略。以成本加成定价法为基础,考虑线路建设成本、线路维修成本、列车采购成本、列车运维成本、列车运行过程中的其他各项运营成本等,结合线路所在区域经济发展规模、人口规模、商业企业结构以及政府支持政策等,研究线路客流增长潜力,综合形成线路“一日一车”不同席别的票价。

2) 面向时段的价格调整策略。高铁客流存在典型的波峰波谷特征,春运、暑运、小长假是客流高峰期,在日常还存在典型的周规律,在列车运价确定后,需要分时段对客运价格进行浮动调整。一是按照列车开行时段以及席位利用情况,客流不足的时段、利用率不高的席别和区段下浮票价,客流饱满的时段、利用率偏高的席别和区段执行原价;二是按照旅客购票的时段,对提前购买的车票给予一定的折扣,临近开车前购买的车票恢复原价,提升铁路运价市场竞争力,促进旅客提前做好出行计划,便于铁路提前安排运力^[15]。

3) 面向产品的价格调整策略。构建旅客列车产品画像,包括列车始发终到站所在经济区域、标杆车特征、旅行速度、停站模式等基础标签,客流形态、客流分布区段、分席别能力利用率等运营标签,通道内分担率、客流吸引度等统计标签。依据旅客列车产品画像特征,对旅客列车进行分组研究,研究不同产品的价格调整策略,一方面进行特征相似旅客列车的运价比价分析,另一方面进行线路上本线、跨线旅客列车的运价比价分析,按照经济效益

驱动和社会效益驱动,进行分档价格调整策略设计。

4.2.2 推进动态票价和存量控制。

1) 制定适用于我国铁路客运的票价和席位管理服务规则。对动态票价和席位存量控制可能出现的问题,首先需要制定一套适用于我国铁路客运的票价和席位管理服务规则,作为建立动态票价和席位存量控制模型的基本依据,其整体需要考虑的因素主要有:充分参考我国相关法律法规,避免制定可能引起群体或职业等社会歧视的动态票价策略;结合业务经验和对历史数据的统计分析,对起讫点(OD)、列车或线路设定可动态变化的价格等级数量,OD、列车或线路只可在给定的价格等级中进行动态调整;考虑铁路的社会效益,设定不同票种席别下OD、列车或线路的最低票价和最高票价,以及旅客可接受的票价更新频率;结合业务经验和对历史数据的统计分析,设定一套席位存量管理相关的业务规则,主要包括区间价值嵌套规则、余票存量判断规则、退票改签规则、共用复用通售规则等^[15]。

2) 需要对旅客的购票行为列车售票情况和竞争者价格进行深入的统计分析和挖掘。在构建动态票价和席位存量控制模型前,首先需要对旅客的购票行为,列车售票情况和竞争者价格进行深入的统计分析和挖掘,分析不同因素对旅客购票选择的影响。可从列车产品特征、旅客自身属性、竞争者角度建立铁路客运的动态票价和席位存量控制模型。在列车产品特征方面,研究分列车开点、到点、旅行时长、售票渠道、运行区域、季节等因素的动态票价模型;在旅客自身属性方面,研究分年龄、特殊群体、收入、忠诚度等因素的动态票价模型;在竞争者方面,针对存在竞争的铁路OD、列车或线路,研究竞争环境下铁路客运的动态票价模型;可参考航空收益管理中预订分块控制、竞标价格控制、虚拟嵌套控制等席位存量控制策略,建立适用于我国铁路客运的席位存量控制模型;研究动态票价和席位存量控制模型的最优求解策略,从算法和工程角度,对模型最优解进行优化和调整。

4.3 实现对高铁客运产品画像分析

高铁客运产品画像需要利用客运大数据平台中的列车基础数据、路网基础数据、旅客售票退改签交易数据以及列车起讫点所在城市相关经济发展数据等,进行数据整合、关联与统计,得到每一列

车的画像标签,并随开行方案的调整以及运行图的变化,不断调整和丰富画像标签。

1) 基本属性标签。指铁路旅客列车的基本属性数据,包括但不限于列车的字头、车次号、始发站、终到站、经由线路、沿途停靠车站数量、始发时间、终到时间、编组数量、旅行速度、列车运行区域经济特征、标杆车特征、停站模式等,这些属性是基本稳定的,但也会随着调图的变化而变化。

2) 运营属性标签。指基于基本属性标签,结合旅客购票交易数据进行统计所得到的画像标签,包括但不限于列车各站发送量占比、分席别能力利用率水平、客流形态、客流分布区段关系、区段客流密度水平、票价水平等。这些标签不是一天的运营数据统计,而是基于一段时间,如一季度、一年或者一个图期,进行统计的特征结果数据。

3) 模型属性标签。指基于列车的基本属性和运营属性标签,根据业务需求进行建模及统计分析,得到旅客列车的其他属性标签,包括但不限于车次运行通道内的分担率、客流吸引度、客流潜力指数等标签。

4.4 列车开行方案设计与优化

4.4.1 按照高铁运营时段进行列车开行方案设计与优化

1) 预售期内列车开行方案动态调整阶段。在车票开始预售,旅客的需求会得到明确,尤其是距离发车时间越近,需求越明确,可以根据铁路12306余票查询大数据挖掘了解旅客需求,根据票库剩余情况掌握运力不足或剩余方向;可以通过候补数据更进一步地了解旅客真实出行需求,设计列车开行方案动态调整模型,优化不同需求特性、不同日期(如工作日、周末、节假日)的运力安排。对于需求不足的时段和区间,可以选择动车组重联改单组,甚至直接停开部分车次,降低运营成本;对于需求旺盛的时段和区间,可以选择动车组单组改重联,或者直接加开图定临时旅客列车,特殊情况下,还可以各专业协同作业,临时加开需求旺盛方向的列车,抓住市场需求,提高运营收益。

2) 预售期外列车开行方案优化阶段。车票预售之前,旅客的需求虽然还不是很明确,但铁路分析评估时间也相对充裕,可以发挥客流预测系统的能力,对即将进入预售期的客流需求进行波动规律和总量预测,据此对即将进入预售期的不同日期进行运力安排,由列车开行方案模型进行优化。同时

需要对优化方案的列车进行效益监测,确保列车经营保持在盈亏平衡点之上,保障旅客列车运营效益。

3) 列车运营入网迭代优化阶段。以年度、季度列车开行方案为优化目标,或新线入网运营列车开行方案设计为目标,根据经验和客流预测数据在原有列车开行方案的基础上,分析原有列车开行方案的不足,可一次性加入几十甚至几百列待评价、待评估能否满足铁路运行技术要求的新列车,或由系统自动设计加入新列车,再由设计优化模型进行优选,找出一组运营效率最高、经济效益最好的列车开行方案组合。经过反复迭代,由系统自动寻找符合运营技术条件的优化列车开行方案,可以利用模型进行多方案比较,为管理决策部门提供支持性数据。

4.4.2 构建列车开行方案优化系统

列车开行方案优化系统应具有列车开行方案生成、列车开行方案图形显示、人机交互调整优化、方案总体评价等功能。在生成优化方案的过程中,实时显示方案的带流信息、客流乘车方案及对应客流量、本线区段客流密度变化等辅助信息,以提供决策参考。系统应该具备的主要功能有:能够根据不同基础数据、客流数据、运力资源数据快速生成可行的列车开行方案,并能高效地以人机交互决策、计算机智能优化、模型优化以及其他优化软件等多种方式协同或者单独进行优化操作;能够正确反映方案所有相关的信息,包括基础数据、客流数据、运力资源等,如方案、方案线、方案管理区段、方案线周期、方案对应文件信息以及方案的有效期时间段等数据之间的关系,并对各类数据进行统一管理;能够提供方案图形化编辑,能够按起讫点显示方案是否跨线、是否分周期、是否分时段等;系统能够实时提供方案优化决策的相关辅助信息,如增加列车时,方案总体指标的变化,各方案线列车带流情况的变化,各方案线列车技术指标的变化,客流乘车方案的变化以及线路的区段客流密度变化等情况^[15]。

4.5 继续深化提高高铁运营组织能力

4.5.1 深化“一日一图”开车方案优化

从围绕开车“一日一图”机制,拓展至开车、调票、调价等全链条市场化动态调整机制,以市场化的高质量有效供给来满足现有需求,实现增运增收。坚持高峰期极限用车理念,挖掘运能供给潜

力;以枢纽新增车站为重点,平衡站场能力,调整开车结构;探索“一日一价”调价,持续优化沪杭高铁等线路调价车次,争取杭深等既有线路公布票价调整,扩大浮动票价线路实施范围;加大周末节假日运营自主调价,扩大淡旺季票价弹性,达到削峰填谷、增运增收目的;完善“一日一策略”调票,系统梳理售票策略“调、控、放”措施,固化经验做法,形成淡旺季、高峰周末日常不同策略,既提升效益又兼顾安全。

4.5.2 继续提高京沪高铁运营质量

面对京沪高铁运营质量的进一步提升,需要继续深化设计列车开行方案,密切与旅客需求的衔接;压缩列车追踪间隔时间,提高服务频率,增加长编组列车数量,提高线路通过能力;同时要处理好路网分流与汇流之间的变量关系。在实施“每日一图”的情况下,建立客流分析与运行图编制一体化机制,保证列车运行图方案与客流匹配,构建包含客流数据处理、客流分析、开行方案制订、运行图编制、审核等一体化机制;另外,还要考虑到高铁枢纽站能力保障,特别是客流高峰期给京沪高铁沿线车站运营组织带来的难题,需要进一步优化软硬件设施设备等措施提升旅客在决策、到达、乘车、售后和交易便利性上的感知,进一步提升服务品质。

4.5.3 科学合理安排沪宁通道能力利用优化

1) 沪宁通道高速铁路功能定位分析研究。考虑沪宁通道内沪宁沿江高速铁路、沪宁城际铁路、京沪高速铁路的运营主体,明确其服务目标;根据线路走向和停站方案,分析各条高速铁路的服务对象;构建里程、时间及广义费用的评价模型,审视各条高速铁路的吸引人群;根据各条高速铁路的衔接方向和辐射范围,厘清主要承担客流的来源和去向;基于运行速度、发车间隔等技术标准,剖析运能运量适应度;根据各条线路途经城市和区域的经济状况,探究在产业市场方面的联动发展作用;依据相关规划文件,进一步明确沪宁通道内各条线路在区域路网及全国路网中的分工。

2) 分析研究沪宁通道线路间连接与能力利用情况。基于枢纽内线路及车站布局,梳理各个车站之间的联络线以及不同车站不同车场之间相互连通关系;基于使用功能、连接线路性质、疏解形式,对沪宁通道内高速铁路的联络线进行分类;分析沪宁通道内各条线路连通的方向及车站,研究各节点在枢纽内的连通效果,衡量多通路线路在均衡区域干

线能力方面所发挥的作用;统计各条联络线的列车运行情况,基于跨线列车运营需求以及跨线/始发列车的比例,分析联络线的运营状况和利用情况。

3) 沪宁通道运营需求分析研究。从区域经济水平、旅客出行目的、出行方向等方面分析沪宁通道的旅客结构属性,从出行次数、出行时间等方面分析旅客出行特征;分析各条线路上客流空间特征以及时间周期、时间粒度等时序特征;分析枢纽客站内换乘旅客的淡季/旺季、高峰/平峰等集散特征以及均衡程度;基于日均发送客流量、旅客周转量、客座率等指标,统计分析沪宁通道内各条线路的整体客流规模以及客流在各条线路上的分布情况。

4) 基于沪宁通道客流特征的列车运行径路与开行交路优化方法研究。分析中长途列车、区域列车和特殊客运产品列车对不同径路特征的需求,考虑客运需求、列车运营里程、列车运行时间、沿途线路车站能力、动车组修程修制等影响因素,构建网络化条件下沪宁通道直通列车的径路寻优模型;考虑联络线、疏解线、动走线以及转场可行性,统计整理管内经沪宁通道运行的本线/跨线列车运行径路;基于不同运用场景,评估不同交路在里程、时间、列车速度匹配、对能力的影响等方面的合理性;构建管内列车径路搜索模型,形成合理路径集并筛选最优径路。

5) 沪宁通道客站分工与开行方案协调优化方法研究。以方便旅客出行、合理利用枢纽资源、方便枢纽行车组织为导向,确定客运站的分工原则;考虑枢纽的场站股道运用,提出按衔接线路方向划分、按办理列车作业性质划分、按办理旅客列车种类划分等多种形式组合的客运站分工优化方法;考虑车站能力及线路能力的耦合度和协调性,构建分工方案的评价指标体系和评价模型,识别点线能力的薄弱环节及运营组织瓶颈;考虑列车运行图稳定性及通过能力,研究沪宁通道的列车运行图协调优化方法。

4.5.4 确保沪昆通道350 km/h达速运行优化实现

1) 研究沪昆高铁达速后运输能力需求。沪昆高铁是国家高铁主通道沪昆高速通道的主干组成。沪昆高铁全线开通以来,杭长段曾长期采用300 km/h运营速度。如实现350 km/h达速运营后,与既往运营速度相比,杭州至长沙最快运达时间从现状215 min缩短至182 min,时间节省约33 min,节时效果明显。沪昆高铁达速运营,能够显著提升

沪昆通道运输时效性,进一步拉近区域时空距离,增进区域交流协作,满足旅客高质量运输需要。沪昆高铁达速运行后,研究既有运输能力计算方法及其适应性,对沪昆达速后运输能力的影响因素进行分析,为后续运输能力计算研究提供依据。

2) 研究上海枢纽内多客站功能合理分工及能力优化。对上海枢纽上海虹桥站、上海南站、上海松江站等主要客运站点场站规模、作业能力进行分析,针对运输能力利用不均衡等问题,分析枢纽内客流出行需求、能力运用等影响因素,研究客流出行需求与配套设施协调运用、能力适应等角度,提出枢纽内客站功能合理分工。以枢纽内多客站能力利用均衡性为目标,梳理出枢纽内多客站能力运用方案,并建立枢纽内多客站能力优化方案评价指标体系和评价模型,通过对比不同方案的评价指标值,得出枢纽内多客站能力优化方案,提高枢纽内客运站的运能运量匹配度,提升枢纽整体能力利用率。

3) 研究沪昆高铁达速运输能力计算与利用理论。考虑标杆车开行数量及大站列车开行方案对运能影响,从咽喉通过能力、到发线通过能力、车站能力利用分析、节点服务频率分析、车站接发列车数、列车到发间隔分析等角度分析车站通过能力;从列车速度等级、跨线列车比例、停站方案等角度分析区段通过能力。分析建立沪昆高铁达速后运能量化模型,计算沪昆高铁达速后运输能力的变化,为制定合理的开行计划提供理论支持。同时,研究不同影响因素对能力提升的影响程度及规律,综合因素对能力提升的影响程度及规律,能力提升的措施与途径及综合运用研究。

4) 研究沪昆达速后区域路网协调优化。基于杭衢高铁开通和沪昆高铁达速的背景,研究沪昆高铁与衔接的京沪、沪杭、杭甬、杭昌和沪苏湖等高铁线路之间的协同关系。考虑旅客需求和市场需求的变化趋势,基于运输能力与需求匹配度,从线路和区域网络角度研究沪昆高铁达速后列车开行方案优化技术,基于开行效益效率及能力利用提出列车开行优化策略,在此基础上优化沪昆高铁列车开行方案,提高整个区域路网的运输效率,释放繁忙通道运输能力。

5) 模拟编制仿真沪昆高铁达速运行图。一是考虑成网条件下的列车运行图编制方法及模型研究。从列车运行图初始方案铺画、列车运行图调

整、列车运行图冲突检定等方面,研究基于成网条件下的列车运行图编制技术,从客流分析、列车开行方案制定、列车运行线铺画、动车组交路、大型枢纽车站到发线运用等方面,研究成网条件下列车运行图编制模型及算法。二是运行图模拟编制。基于优化开行方案对沪昆高铁及衔接线路运行图进行模拟编制,可以对多方案编制多张运行图,充分考虑线路通过能力、列车运行各种技术间隔标准、到发线占用等约束进行运行图编制仿真,确保编制结果的可行性。在编制完成后,对多方案编制结果进行评价分析,选取最优结果作为沪昆高铁达速后正式列车运行图编制的决策依据。

4.6 提高智能编制列车运行图水平

随着人工智能理论的发展和应用,面对中国庞大的路网结构和衔接关系,以及复杂的运营组织模式和客货列车开行需求,应重点针对高铁动车组全线(方向)运行的新特点、新常态,从中国跨线列车占比较大、客流时空需求差异突出的实际情况出发,研究满足全线(方向)与区段同步编制详图、运行图频繁调整(“一日一图”)与多线路协同编制需求的编图方法与系统实现技术。可采用分布式对等网络技术,全方位覆盖全路集中、路局协同、个人离线等实际编图场景,实现全路运行图基础数据和编图技术参数统一管理,打通上下游系统间的数据壁垒,全面提升中国列车运行图编制信息化、自动化水平。

4.7 构建智能调度架构下的新型多专业协同管理体系

4.7.1 智能调度核心能力内涵分析

智能调度系统的标志性指标:智能感知、智能决策、智能防控(控制)、智能分析(保障)。智能感知核心构成能力包括:对市场需求的感知能力,对特定运输单元(专运、重点物资运输、重点列车)状态的感知能力,对运输环境的感知能力,对运载机具状态的感知能力,对全局或运输趋势的感知能力(列车流的自动预测);智能决策核心构成能力包括:工作计划智能编制的能力,基于影响因素消解或目标优化的智能调整能力,对决策结果的验证或仿真的能力,作业指令智能下达的能力(计划的自动编制和调整)。

智能调度领域包含智能综合调度、智能行车调度2个方向。其中,智能综合调度主要包括运输态势感知、计划一体化协同、智能计划调整、智能

应急调度等创新内容;智能行车调度主要包括列车运行计划自动调整、进路和命令卡控、智能一体化调度、行车调度综合仿真等创新内容。智能分析核心构成能力包括决策结果与实际执行情况对比分析的能力,运输产品供给与旅客需求适应情况分析能力等。

4.7.2 打造运营综合计划协同管理平台

智能综合调度系统采用“平台+应用”构建模式,通过路网数字建模、资源统一描述、信息动态采集、格式化调度命令管理等应用,为调度指挥精细化提供了能力支持,并在辅助决策、安全卡控、感知预警、模拟仿真、应急处置等方面为调度指挥进行智能化赋能。可以面向运营生产全过程的智能综合调度指挥系统构建理念,以运营综合计划体系为基础,通过客运生产作业全过程的数字贯通、专业协同和流程互控,充分发挥云原生、大数据等专用智能技术优势,通过打造运营综合计划协同管理平台,突破传统系统的专业割裂、分工种作业的现状,实现多专业、多岗位的同平台、共作业,为高铁运营生产和调度指挥系统融合提供一体化解决方案。

同时,考虑到高铁调度指挥系统是一个由相互联系、相互影响的多单元组成的完全系统,该系统组成元素多,元素之间存在强烈的耦合关系,并具有明显的动态性和实时性特征,就需要高铁跨区域协同调度指挥技术,主要包括:高铁网络内部的区域协同调度指挥,主要涉及不同调度所和铁路局之间在多个专业的协同调度;高铁与既有干线铁路调度系统的协同,保证跨线列车之间的衔接、跨线区域运能的保持和两个系统之间的完整、准确和快速切换;高铁与市域铁路(快轨)、城市轨道交通之间的有效协同,带动区域交通网络整体发展,加快区域城乡交通运输一体化进程。还应从技术层面研发以行车调度为核心,运用多专业协同的一体化、智能化调度指挥系统、从多专业的角度研究线路、列车资源的耦合关系与优化配置方法,结合调度指挥与列车运行控制一体化模式,运用先进的感知传输、控制方法和技术,实现从人工调度和人工驾驶向智能调度、自动驾驶的转变,进而深度融合调度指挥和驾驶控制,实现路网整体运行效率全局最优,全面提升应对突发事件的能力。

5 结束语

中国高铁以“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念为导向,通过不断实现智能感知、智能决策、智能操控、智能评价四大智能化能力,并由此延伸出安全化、智能化、多元化等一系列要求。我们相信,通过不断地研究和实践,中国高铁运营组织将能够更好地满足旅客的需求,为实现“交通强国,铁路先行”的发展战略提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 曲思源. 高速铁路运营综合管理体系的构建与实施:以长三角为例[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2019, 18(2): 36-51.
QU S Y. Establishment and practice of high-speed railway operation system in Yangtze River Delta[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2019, 18(2): 36-51.
- [2] 曲思源, 施俊泉, 徐瑞华. 京沪高铁开行时速350 km动车组列车通过能力评估分析[J]. 中国铁路, 2022(2): 36-46.
QU S Y, SHI J Q, XU R H. Assessment and analysis of carrying capacity of 350 km/h EMUs operating on Beijing-Shanghai HSR[J]. China Railway, 2022(2): 36-46.
- [3] 叶玉玲, 朱资岳, 汪龙洋, 等. 基于出行链的铁路车站开通初期客流预测研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(1): 78-86.
YE Y L, ZHU Z Y, WANG L Y, et al. Research on passenger flow forecast of railway stations at the initial stage of operation based on intercity trip chain[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(1): 78-86.
- [4] 叶玉玲, 韩明初, 陈俊晶. 基于出行链的城际旅客出行方式选择行为[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1234-1240.
YE Y L, HAN M C, CHEN J J. Intercity passenger travel mode choice behavior based on trip chain[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(9): 1234-1240.
- [5] 叶玉玲, 王艺诗. 沪杭运输通道内旅客出行方式选择行为研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 13-17.
YE Y L, WANG Y S. Research on travel mode choice behavior in Shanghai-Hangzhou transport corridor[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 13-17.
- [6] 徐玉萍, 唐青, 付来美, 等. 高速铁路建设对长三角经济区城市化发展的影响研究[J]. 华东交通大学学报,

- 2017, 34(6): 124-132.
- XU Y P, TANG Q, FU L M, et al. Research on influence of high-speed railway construction on urbanization development in Yangtze River Delta economic zone[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(6): 124-132.
- [7] 范士娟, 何姗, 徐玉萍, 等. 高速铁路对江西省虹吸效应的影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(1): 67-72.
- FAN S J, HE S, XU Y P, et al. Analysis of the influence of high speed railway on the siphon effect in Jiangxi Province[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 67-72.
- [8] 王绍博, 郭建科, 邓昭, 等. 可达性视角下高铁对于长三角地区“融城化、同城化、一体化”的空间影响[J]. 地理科学, 2024, 44(4): 640-650.
- WANG S B, GUO J K, DENG Z, et al. Spatial impact of high-speed railway on “melt city, urban integration, integration” in the Yangtze River Delta from the perspective of accessibility[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(4): 640-650.
- [9] 严思齐, 吴群. 铁路网络联系对城市土地绿色利用效率的影响研究: 以长三角地区为例[J]. 中国土地科学, 2024, 38(4): 65-77.
- YAN S Q, WU Q. Impact of railway network connections on urban land green use efficiency: a case study of the Yangtze River Delta Region[J]. China Land Science, 2024, 38(4): 65-77.
- [10] 徐玉萍, 洪振文. 高铁开通对城市创新的影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(3): 91-98.
- XU Y P, HONG Z W. Impacts of high-speed railway opening on city innovation[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 91-98.
- [11] 张诚, 刘敏, 严利鑫. 高速铁路对我国区域经济影响的研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(2): 64-71.
- ZHANG C, LIU M, YAN L X. Impact of high-speed rail on regional economy in China[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(2): 64-71.
- [12] 支洋. 高速铁路线路设备大修周期管理技术研究[J]. 中国铁路, 2024(9): 136-143.
- ZHI Y. Research on overhaul cycle management technology for HSR line equipment[J]. China Railway, 2024(9): 136-143.
- [13] 徐玉萍, 苏方轶. 高铁开通对浙江省城乡居民收入差距的影响[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(3): 116-126.
- XU Y P, SU F Y. Impact of the opening of high-speed railway on the income gap between urban and rural residents in Zhejiang Province[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(3): 116-126.
- [14] 李砾, 王先帅, 徐国胜. 长三角高速铁路列控设备维护管理探索与实践[J]. 铁道通信信号, 2024, 60(12): 111-118.
- LI L, WANG X S, XU G S. Exploration and practice of maintenance management of high-speed railway train control equipment in Yangtze River Delta area[J]. Railway Signalling & Communication, 2024, 60(12): 111-118.
- [15] 单杏花, 汪健雄, 李士达, 等. 中国铁路客票数字化管理与服务技术[J]. 铁路技术创新, 2025(3): 50-59.
- SHAN X H, WANG J X, LI S D, et al. Digital management and service of China railway passenger ticketing system[J]. Railway Technology Innovation, 2025(3): 50-59.
- [16] 曲思源, 荣剑, 徐瑞华. 京沪通道型高速铁路列车运行图结构分析[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 55-61.
- QU S Y, RONG J, XU R H. Analysis of train operation diagram structure of Beijing-Shanghai corridor-type high-speed railway[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 55-61.
- [17] 吴华. 列车运行图综合评价方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(9): 49-55.
- WU H. Research on comprehensive evaluation method of train working diagrams[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(9): 49-55.
- [18] 蒋辉, 李博, 贺俊源. 基于人工智能的列车运行图智能编制技术体系框架研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(1): 1-9.
- JIANG H, LI B, HE J Y. Research on the framework of intelligent train working diagram compilation technology system based on artificial intelligence[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(1): 1-9.



通信作者: 曲思源(1972—), 男, 正高级工程师, 博士, 博士生导师, 研究方向为铁路运营组织、货运组织与物流管理、安全管控等。E-mail:syqu0453@163.com。

(责任编辑: 姜红贵)