

Research on the Impact of High-speed Rail Autonomous Driving on Dispatching and Command

Yongbing Chen

Dispatching Office of China Railway Beijing Group Co., Ltd, Beijing, 100038, China

Abstract

With the rapid advancement of emerging technologies such as artificial intelligence, 5G communications, and the Internet of Things, high-speed rail autonomous driving technology is undergoing a profound transformation from single train control to integrated "vehicle-ground-cloud" coordination, revolutionizing traditional dispatching systems. This paper systematically explores how autonomous driving technology enhances dispatching efficiency across different development stages, analyzes the restructuring of safety frameworks from static redundancy to dynamic adaptability through a "human-machine-environment" coupling perspective, and investigates emerging risks and countermeasures arising from technological convergence. The research demonstrates that autonomous driving technology not only significantly improves dispatching efficiency and precision but also drives the intelligent transformation of safety assurance systems, providing technical support for innovative high-speed rail transportation models.

Keywords

High-speed rail autonomous driving; dispatching command; efficiency improvement; safety assurance; intelligent coordination

高铁自动驾驶对调度指挥的影响探究

陈永兵

中国铁路北京局集团有限公司调度所, 中国·北京 100038

摘要

随着人工智能、5G通信、物联网等新兴技术的快速发展, 高铁自动驾驶技术正经历从单一列车控制向"车-地-云"一体化协同的深刻变革, 这对传统调度指挥系统产生了革命性影响。本文系统探讨了高铁自动驾驶技术在不同发展阶段对调度指挥效率的提升路径, 从"人-机-环"耦合视角深入分析安全体系从静态冗余到动态自适应的重构过程, 并探究技术融合带来的新型风险及应对策略。研究表明, 自动驾驶技术不仅显著提升了调度指挥的效率和精度, 还推动了安全保障体系的智能化转型, 为高铁运输组织模式的创新提供了技术支撑。

关键词

高铁自动驾驶; 调度指挥; 效率提升; 安全保障; 智能协同

1 引言

高铁作为国家战略性基础设施和现代化交通运输的重要组成部分, 其调度指挥系统是保障列车安全、高效运行的"神经中枢"。传统调度指挥模式以"人工决策+固定计划"为核心, 在面对高密度运输、复杂路网、突发应急等场景时逐渐显现出响应滞后、协调困难等瓶颈问题。近年来, 高铁自动驾驶技术的突破性发展为调度指挥系统升级提供了全新路径。从CTCS-3级系统的半自动化控制到CTCS-4级的完全自动驾驶, 技术演进不断重塑着调度指挥的逻辑架构和运行模式。早期研究多聚焦于单一技术对调度效率的局部影响, 而随着5G通信、数字孪生、人工智能等前沿技术的深度融合, 调度指挥正向"主动预测"、"分布式协同"的智

能化方向转型, 效率提升呈现乘数效应, 安全风险也呈现出系统性、耦合性等新特征。本文旨在深入分析高铁自动驾驶技术对调度指挥系统的全方位影响, 从技术架构、效率提升、安全保障等多个维度展开探讨, 为高铁智能化发展提供理论支撑和实践指导。

2 高铁自动驾驶技术演进与发展阶段

高铁自动驾驶技术是集环境感知、智能决策、精准控制、车地协同于一体的复杂技术体系, 其发展可分为两个主要阶段: 独立自动驾驶阶段和融合自动驾驶阶段。

2.1 独立自动驾驶阶段 (CTCS-3+ 级)

此阶段以列车自主控制为核心, 特征体现为: 第一是有限感知能力, 车载传感器 (包括雷达、摄像头等) 主要监测列车自身状态与近距线路环境, 感知范围限于列车周边5-10公里范围内, 主要依赖地面轨道电路提供的固定闭塞信息, 对远端线路状态和环境变化的感知能力有限。第二是

【作者简介】陈永兵 (1985-), 男, 中国河南南阳人, 工程师, 从事高铁调度指挥技术研究与应用研究。

半自主决策机制，列车能够实现自动加减速、定点停车等基本操作，但整体运行计划仍由调度员静态编制，列车在运行过程中对计划调整的能力有限，主要作为执行终端存在。第三是车地通信依赖性强：采用 LTE-R 技术进行车地通信，通信延迟约 500ms，列车间的信息交互需要经过调度中心中转，导致协同响应存在明显滞后，难以实现高效的列车群协同控制。

在此阶段，调度指挥仍然以“中心主导”为核心模式，自动驾驶系统主要作为执行终端，其效率提升主要体现在减少人工操作误差和标准化控制方面，对整体调度指挥体系的变革作用相对有限。

2.2 融合自动驾驶阶段（CTCS-4 级及以上）

随着 5G、数字孪生、人工智能等技术的深度融合，高铁自动驾驶进入“车-地-云”协同的新阶段，形成了“感知-决策-执行-优化”的完整闭环体系。

首先，在感知层上，多模态融合与全域覆盖。通过车载传感器（激光雷达、毫米波雷达、高清摄像头）与无人机巡检、地面固定监测设备的有机结合，借助 5G-MEC 边缘计算技术实现 100ms 内的多源数据融合处理，感知范围从局部扩展至全线路网，实现了对运行环境的全方位、实时感知。

其次，在决策层上，数字孪生与分布式协同。调度中心构建全要素数字孪生平台，实时映射物理世界的状态变化。列车通过车-车直接通信（V2V）技术实现自主协同决策，能够根据实时情况自主调整追踪间隔、运行时分，实现运行图的智能化动态调整。

第三，在执行层上，精准控制与动态反馈。自动驾驶系统（ATO）与列车控制系统（CTCS-4）深度耦合，实现了毫米级精度的牵引及制动控制，确保运行计划的无偏差执行。同时，系统能够将实时状态信息及时反馈至调度中心，形成闭环控制。

第四，在优化层上，预测性调度与资源适配。基于历史运行数据与实时客流预测模型，系统能够提前 4-6 小时生成动态运行图，并自动触发列车重联/解编、停站方案调整等调度指令，实现资源的最优配置。

3 高铁自动驾驶对调度指挥效率的多维影响

调度指挥效率的核心指标包括线路通行能力、资源配置精度、协同作业水平等。自动驾驶技术的应用实现了效率从“边际提升”到“范式革新”的跨越式发展。

3.1 线路通行能力的突破性提升

传统调度模式下的最小追踪间隔通常为 3-5 分钟（CTCS-3 级系统）。自动驾驶技术通过以下路径实现了通行能力的显著提升。第一，在精准定位与速度控制方面，采用北斗卫星定位系统（厘米级精度）结合轮径补偿算法，实现了实时速度控制误差 $\leq 0.5\text{km/h}$ 的高精度控制，使安全制

动距离能够精确计算，从而将列车追踪间隔压缩至 2 分钟以内。第二，在车-车直接通信（V2V）技术方面。融合阶段的 V2V 技术使列车间能够直接共享位置与速度数据，通信响应延迟从 500ms 大幅降低至 100ms 以内，显著提升了列车群的协同效率。第三，在动态间隔调整机制方面，数字孪生系统能够根据实时天气条件（如降雨、雾霾等）自动调整安全间隔参数。例如，在降雨量 $\geq 20\text{mm/h}$ 时，系统会自动将安全间隔延长 10%，有效减少了 15%-20% 的运力损失。

综合数据显示，融合自动驾驶技术后，高铁线路的理论通过能力可提升 30% 以上，同时显著降低了外部环境变化对运行秩序的影响，实现了运输能力的稳定发挥。

3.2 资源配置的精准化与动态化优化

传统调度模式依赖固定的运行图，难以实时适配客流变化和突发情况。自动驾驶技术通过“数据驱动+智能决策”实现了资源配置的精准化和动态化。首先，动态编组调度，系统支持无人化重联/解编操作，调度中心能够根据实时客流数据（如 12306 购票数据、车站监控视频分析）自动触发编组调整指令，实现运能与需求的精准匹配。其次，停站方案自适应优化，基于历史客流分布规律与实时上车数据，系统能够动态调整各站停站时间（如大站延长 20 秒、小站缩短 10 秒）或临时增加/取消停站，提高运行效率。第三，检修资源协同调度。数字孪生系统能够模拟不同检修天窗时段对运营的影响，结合设备状态预测（如轨道磨损程度、接触网寿命评估），动态优化天窗时间分配，实现运营与维护的最优平衡。

3.3 应急处置的智能化与快速响应

传统模式下处置突发故障或极端天气的响应周期通常长达 5-10 分钟。自动驾驶技术通过构建“感知-决策-执行”闭环体系显著提升了应急处置效率。多传感器融合监测列车关键部件状态，通过振动分析、温度趋势预测等算法能够提前 8-12 小时预警潜在故障，为调度调整预留充足时间。系统实时接入气象雷达数据，能够自动调整速度曲线（如暴雨天气下限速至 80%），同时优化后续列车间隔，确保安全运行。当列车发生非致命故障时，自动驾驶系统可控制列车以低速行驶至最近车站，同时通过 V2V 通信通知后续列车减速避让，相比人工指挥，疏散时间可缩短 40%。

4 高铁自动驾驶对调度指挥安全的深度影响

安全是高铁调度指挥的核心前提和生命线。自动驾驶技术的演进促使安全保障体系从传统的“静态冗余”向“动态自适应”的智能化方向重构。

4.1 传统调度安全保障的局限性分析

传统调度安全保障模式主要依赖“人工监控+固定冗余”机制，存在以下明显局限。自动化与智能化水平较低，信号系统之间联动性弱，人为操作失误风险较高。根据国际铁路联盟（UIC）的统计数据，约 60% 的传统铁路事故源

于人为操作失误。静态安全阈值设置,安全间隔、限速标准等参数多为固定值,无法根据实时风险状况进行动态调整。例如,在局部暴雨等特殊情况下,既可能因过度冗余造成运力浪费,也可能因冗余不足引发安全风险。应急响应机制滞后,事故发生后需要经过多个环节的层层上报和决策,响应周期较长,难以实现快速有效的应急处置。

4.2 自动驾驶技术对安全保障的强化效应

自动驾驶技术通过构建多重安全防线,显著提升了安全保障水平。消除人为操作误差,标准化的自动控制完全避免了司机因疲劳、判断失误等造成的人为错误。中国铁道科学研究院的测试数据显示,在复杂场景下,自动驾驶系统的操作准确率可达99.9%。多重冗余设计,采用“硬件+软件+通信”三重冗余设计(如车载计算机配置3套独立单元、通信系统同时接入5G与LTE-R网络),任何单点故障都能够实现自动切换,确保系统持续可靠运行。应急响应速度显著提升,系统能够在0.5秒内触发紧急制动指令(人工操作通常需要3-5秒),结合V2V通信技术实现“一列车制动,多列车同步减速”的协同响应。全生命周期安全追溯,利用区块链技术记录所有调度指令、列车状态等关键信息,确保数据不可篡改且可追溯,大幅缩短事故排查时间,提高安全管理的精细化水平。

4.3 技术融合带来的新型安全风险识别

自动驾驶技术在提升效率和安全性的同时,也带来了需要重点关注的新型风险。系统复杂性导致的故障风险,高度集成的多子系统架构中,任何一个环节的故障都可能导致列车与调度中心失联,需要建立更加完善的故障诊断和容错机制。数据安全与网络攻击风险,海量数据的传输和处理高度依赖网络通信,一旦遭受恶意攻击、数据篡改或信息泄露,可能导致列车失控等严重后果。极端环境下的感知与决策风险,AI算法主要依赖历史数据训练,在面对罕见场景(如极端寒潮、异常异物侵限)时可能出现决策偏差,需要建立更加鲁棒的决策模型。软件系统漏洞风险,庞大的软件规模可能存在未知漏洞,软件更新错误或版本不兼容也可能影响系统安全,需要建立严格的软件质量保证体系。

5 调度指挥模式的转型与人员角色变化

自动驾驶技术的广泛应用不仅改变了技术架构,也深刻影响了调度指挥的组织模式和人员角色定位。

5.1 调度指挥组织模式的转型

从集中控制到分布式协同,传统调度模式以调度中心集中控制为核心,而自动驾驶技术支持下的调度指挥更多体现为“中心统筹+列车自主”的分布式协同模式。从计划主导到实时优化,调度工作从传统的静态计划编制转向实时运行优化,更加注重对突发情况的快速响应和动态调整。从经

验驱动到数据驱动,决策依据从依赖调度员个人经验转向基于大数据分析的科学决策,提高了决策的客观性和准确性。

5.2 调度人员角色的重新定位

从操作执行者到监督协调者,调度员的工作重点从具体的操作执行转向对系统运行状态的监督和异常情况的协调处理。从计划制定者到策略规划者,更多精力投入到长期运行策略的制定和优化,而非日常的计划调整。从故障处置者到风险管理者,工作重心从故障发生后的应急处置转向事前的风险识别和预防。

6 未来发展趋势与挑战

6.1 技术发展趋势

人工智能深度应用,机器学习算法将在运行图优化、故障预测等方面发挥更大作用,实现更加智能化的调度决策。数字孪生技术完善,构建更加精细的全要素数字孪生模型,实现物理世界与虚拟世界的实时同步和交互。边缘计算普及,在列车和沿线部署更多边缘计算节点,降低通信延迟,提高系统响应速度。

6.2 面临的主要挑战

技术标准统一,不同厂商、不同线路的技术标准需要进一步统一,确保系统的兼容性和互操作性。网络安全保障,随着系统联网程度的提高,网络安全防护面临更大挑战,需要建立更加完善的安全防护体系。人员技能转型,调度人员需要适应新技术环境,掌握新的技能,这对人员培训提出了更高要求。

7 结语

高铁自动驾驶技术的持续演进深刻重塑了调度指挥系统的理论框架和实践模式。从独立阶段的“效率边际提升”到融合阶段的“范式革新”,调度指挥效率在通行能力、资源配置、应急响应等多个维度实现了质的飞跃。安全保障体系也从传统的“静态冗余”转向“动态自适应”的智能化模式,在有效消除传统人为操作风险的同时,也面临着系统协同复杂性、算法决策可靠性等新型挑战。未来,随着人工智能、数字孪生、5G通信等技术的进一步成熟和融合应用,高铁调度指挥将朝着“全域智能协同”的方向持续发展,为构建安全、高效、智能的现代化高铁运输体系提供核心支撑,为交通强国建设贡献重要力量。

参考文献

- [1] 江明.高速铁路自动驾驶系统安全风险分析及发展方向[J]. 中国铁路, 2020(12): 11-16.
- [2] 刘文龙.高铁自动驾驶系统存在的问题及发展方向[J]. 科技视界, 2020(27): 19-20.
- [3] 王同军.智能高速铁路技术创新与实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2023.