文章编号：1003-1421(2026)06-0001-12
引用格式：吴卓霖，陶思宇，彭其渊. 铁路列车调度指挥系统风险分析研究综述[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：1-12.
WU Zhuolin，TAO Siyu，PENG Qiyuan. Review of Risk Analysis Research on Railway Train Dispatching and Command System[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：1-12.

铁路列车调度指挥系统风险分析研究综述

吴卓霖[1, 2, 3]，陶思宇[1, 2, 3]，彭其渊[1, 2, 3]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都 611756；2.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都 611756；3.西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都 611756)

摘 要：铁路运输系统中的调度指挥系统是确保铁路网络顺畅运行的核心环节，其关键任务在于协调、管理和监督列车的活动，以实现列车运行的安全和高效。然而，由于铁路列车调度工作的复杂性和管理难度，事故发生的概率可能会因此而上升。铁路事故往往是多重安全风险因素叠加影响的结果，通常具有不可预见性和突然性，一旦发生，可能造成极为严重的影响。鉴于此，对铁路列车调度指挥系统进行深入的风险分析研究显得极为关键，这不仅有助于降低事故发生的风险，也是提升铁路运输系统安全管理水平的重要措施。现有研究在单一风险因子分析上较为成熟，但多因素耦合效应、动态场景适应性及跨学科整合仍存在不足。系统梳理了铁路列车调度指挥系统风险分析的研究进展，从风险独特性分析、智能化调度带来的新风险以及风险分析模型与方法3个方面总结了国内外成果。最后，对国内外研究现状进行了评述，并进一步展望了铁路列车调度指挥系统风险分析研究的研究趋势，可为铁路列车调度指挥系统风险分析研究提供一定参考。

关键词：铁路；调度指挥；危险源；风险评估；智能化调度
中图分类号：U298 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250217002

Review of Risk Analysis Research on Railway Train Dispatching and Command System

WU Zhuolin[1, 2, 3]，TAO Siyu[1, 2, 3]，PENG Qiyuan[1, 2, 3]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Transportation Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: The dispatching and command system in the railway transportation system is the core link to ensure the smooth operation of the railway network, and its key task is to coordinate, manage, and supervise train activities to achieve the safety and efficiency of train operation. However, due to the complexity and management difficulty of railway train dispatching work, the probability of accidents may increase as a result. Railway accidents are often the result of the superimposed influence of multiple safety risk factors, usually featuring unpredictability and suddenness. Once they occur, they

收稿日期：2025-02-17
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502)；广西创新驱动发展专项资金项目(AA21077011-2)

may cause extremely serious impacts. In view of this, conducting in-depth risk analysis research on the railway train dispatching and command system is extremely crucial. This not only helps to reduce the risk of accidents but also is an important measure to enhance the safety management level of the railway transportation system. The existing research is relatively mature in the analysis of a single risk factor, but there are still deficiencies in multi-factor coupling effects, adaptability to dynamic scenarios, and interdisciplinary integration. This paper systematically reviewed the research progress of risk analysis on the railway train dispatching and command system and summarized the Chinese and international achievements from three aspects: risk uniqueness analysis, new risks brought by intelligent dispatching, and risk analysis models and methods. Finally, the Chinese and international research status was reviewed, and the research trends of risk analysis research on the railway train dispatching and command system were further prospected, which can provide certain references for the risk analysis research on the railway train dispatching and command system.

Keywords: Railway; Dispatching and Command; Hazard Source; Risk Assessment; Intelligent Dispatching

调度是铁路运输的关键环节，列车调度为核心岗位，通过管理列车运行保障安全与效率。列车调度指挥系统风险分析的实质在于辨识和评估设备、人员、环境等潜在风险因素，以确定危险源。国外自20世纪80年代起逐步成熟，采用先进技术进行危险源辨识与风险评估；国内自21世纪初深入研究系统结构、功能及系统工程方法，聚焦系统分析、风险管理、可靠性评价等。风险分析的意义在于将事后补救转为事前预防，提高系统安全性与可靠性。当前多数文献集中于设备故障、人为失误等单一风险因子的静态分析，对多因素动态耦合机制的系统性研究匮乏；智能化调度技术的引入虽提升效率，但与既有风险因素的交互作用尚未充分探讨。这一研究空白导致风险评估模型在复杂场景下存在片面性与滞后性，难以支撑主动安全防控。为此，系统梳理国内外研究进展，填补多因素耦合效应分析的学术空白，探索动态环境下风险演化的新特征。

1　铁路列车调度指挥系统风险分析概述

铁路列车调度指挥系统是确保列车安全、高效运行的关键组成部分。在铁路列车调度指挥中，存在多种潜在的危险源，这些危险源可能导致事故、延误或其他运营问题。铁路列车调度指挥系统风险分析，是指识别和评估可能导致事故或安全问题的各种潜在风险因素的过程。这一过程的目的是全面识别列车行车系统中潜在的风险因素，并通过采取有效的控制措施和安全管理手段，降低事故发生的风险。铁路列车调度指挥系统风险分析研究有助于保障人员安全、保护财产、提高系统可靠性，对于确保铁路列车调度指挥系统的安全运营及保障乘客和员工的安全至关重要。列车调度指挥系统风险分析研究的关键在于危险源的辨识以及风险评估，危险源辨识方法的选取直接影响到铁路列车调度指挥系统的安全管理水平和运行效率，是确保铁路运输安全的关键环节之一。风险评估是铁路列车调度指挥系统安全管理的核心环节，对于保障铁路运输安全、优化资源配置、促进系统改进和提升应急能力等具有不可替代的重要作用。这一过程需依托系统化的风险管理框架，铁路列车调度指挥系统风险管理体系如图1所示，涵盖风险识别、评估、监控与应对全流程[1]。

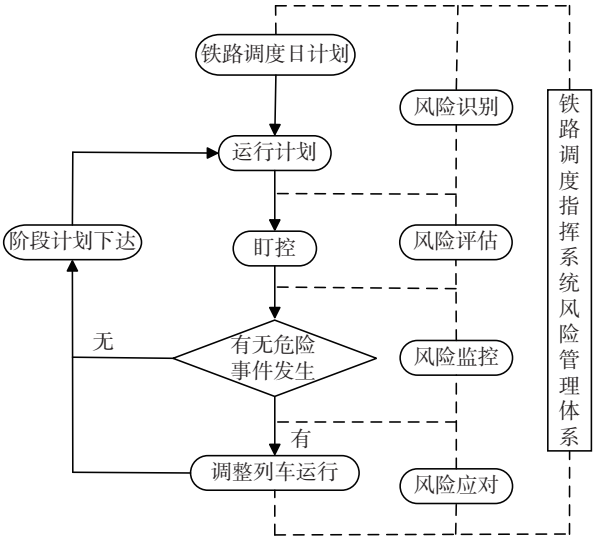

图1　铁路列车调度指挥系统风险管理体系

Fig.1　Risk management system of railway train dispatching and command system

2　铁路列车调度指挥系统风险分析研究现状

铁路领域的风险研究覆盖列车运行[2]、线路维护[3]、车站管理[4]、信号控制[5]等全环节，通过多维度分析构建了铁路运输安全的全局性风险管理框架。其研究既关注传统风险，也聚焦系统性挑战，为铁路运输安全的整体把控提供了理论支撑。相比之下，铁路列车调度指挥方向的风险研究则聚焦于系统的核心功能与动态特性，基于2021—2025年国内外核心期刊的计量分析，“智能化调度风险”“多因素耦合评估”“动态风险预警”等关键词频次显著上升，当前研究热点多集中于智能化调度风险、多因素耦合风险评估以及动态风险防控3方面，故将从风险独特性分析、智能化调度带来的新风险以及风险分析模型与方法3个方面展开详细论述。

2.1　风险独特性分析

铁路列车调度指挥系统的风险独特性主要体现在动态演化性、多因素耦合性和人机协同脆弱性等方面。

动态演化性表现为实时传播性和非线性耦合两大特征：实时传播性指的是风险沿调度指令链实时扩散，而非线性耦合指风险因素非线性交互引发风险级联放大效应；徐培娟[6]指出，高速铁路行车调度指挥系统的运行风险随列车运行状态和调度指令调整实时变化，如临时限速和股道占用冲突等动态因素显著影响系统稳定性。宁滨等[7]探讨了高速铁路运行控制与动态调度一体化的发展现状和未来趋势，强调了动态调度在应对运行中断和调整中的重要性。王荣笙等[8]的研究进一步表明，智能调度算法能够有效应对列车运行中的动态变化，提升系统的适应性和可靠性。闫璐等[9]通过双目标优化模型，动态调整列车运行计划，以应对初始延误和区间限速等情况。研究表明，动态调整能够有效减少延误传播，提升系统的整体运行效率。韩忻辰等[10]提出了一种基于Q-learning的动态调度方法，能够根据实时数据动态调整列车运行计划。该方法通过强化学习算法，实时优化调度决策，以应对列车运行中的动态变化。

铁路列车调度指挥系统作为多工种协同作业的复杂系统，其风险因素具有显著的耦合性。风险在对列车调度系统产生冲击时，被干扰的设备或子系统往往会在与其他设备和子系统进行信息、能量传输时，将风险因素进行传播，因此在铁路列车调度指挥系统中，危险源的多样性和复杂性要求不仅要识别单个风险因素，还要深入分析风险因素之间的相互作用和耦合效应。这种耦合作用可能导致风险的放大或减弱，从而影响整个系统的风险状况。俞名扬等[11]构建了基于N-K模型的地铁运营安全风险耦合模型，对不同耦合方式下的风险耦合值进行了度量，最后得到了单因素、双因素、多因素风险耦合概率和不同耦合方式的风险耦合值。于秀珍等[12]对高速铁路行车调度系统安全风险进行了深入研究，将其划分为人为风险、设备风险及环境风险3大类别。在此基础上，构建了高速铁路行车调度系统风险指标体系，对各项风险指标进行了量化评估，确定了各指标的权重，并进一步构建了风险耦合模型，以全面分析风险因素之间的相互作用及其对系统安全的影响。秦伟杰[13]对高速铁路行车调度系统的风险特性进行了研究，建立了高速铁路行车调度系统风险形成及演化模型，提出了高速铁路行车调度系统的风险主要取决于设备及环境风险事件与调度人员人为失误耦合形成的风险事件链这一观点。刘斐然[14]将风险按照风险来源和事故处理所需工种进行了分类，采用N-K模型定量分析风险之间的耦合机理。李胜男等[15]以事故发生的组织性前提、物质性前提、触发条件这3类风险源为建模基础，构建N-K模型找寻各风险因素相互耦合的规律，建立系统动力学仿真模型对各风险因素的动态耦合机理进行模拟仿真，对3类风险源中各风险因素耦合的危险程度进行了量化。这些研究为铁路列车调度指挥系统风险评估提供了多维度的视角和方法，但在模型的普适性和数据依赖性方面仍存在一定的局限性，需要进一步地验证和优化。铁路列车调度指挥系统风险耦合机理如图2所示。

统计2015—2024年10个城市的100起事故，数据来源于国家铁路局铁路安全情况公告、各铁路局集团公司事故和故障统计、安全分析报告等。统计分析表明，铁路列车调度指挥系统事故的主要风险因素分为人员因素、机器设备因素、环境因素和管理因素。造成铁路列车调度指挥系统事故的主要风险因素是人员安全意识薄弱、信号设备故障、雷

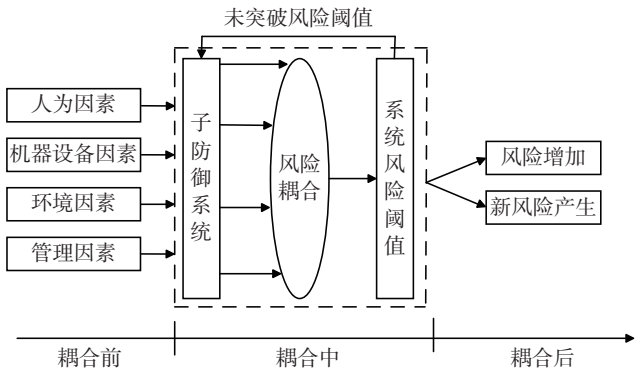

图2　铁路列车调度指挥系统风险耦合机理

Fig.2　Risk coupling mechanism of railway train dispatching and command system

电和培训与监督缺失。铁路列车调度指挥系统事故风险耦合类型如图3所示，铁路列车调度指挥系统事故风险因素如表1所示。

铁路列车调度指挥系统的人机协同脆弱性也受到广泛关注。邓念[16]研究指出，信息交互不畅与决策支持不足降低了调度效率，并提出了通过优化组织结构与引入信息熵理论来提升人机协同效率的方法。魏新平[17]进一步分析了人为失误产生的机制，利用人因可靠性理论计算人员可靠度，明确了系统工作的薄弱环节。温宏儒[18]的研究则聚焦于非正常情况下的调度指挥工作，构建了安全管理流程图并提出了有价值的管理建议。张涛等[19]分析了行车调度员与智能调度集中系统之间的人机协同机制存在的不足，提出了相应的优化对策，以期通过优化人机协同机制，提升智能调度集中系统的运用效果和行车调度员的工作效率，降低因人机协同脆弱性带来的潜在风险。

表1　铁路列车调度指挥系统事故风险因素

Tab.1　Accident risk factors of railway train dispatching and command system

因素类型	风险因素
人员因素	安全意识薄弱、专业技能不足、超负荷作业、沟通不畅
机器设备因素	信号设备故障、通信设备故障、电力设备故障、调度软件故障
环境因素	雷电、大雨、暴雪、强风
管理因素	培训与监督缺失、维护管理不足、制度缺陷、跨部门协调失效

2.2　智能化调度带来的作业安全与信息安全新风险

智能化调度技术在显著提升列车调度系统效率与灵活性的同时，也引入了新的作业安全风险，主要包括人为操作失误和信息安全风险两大类，这些

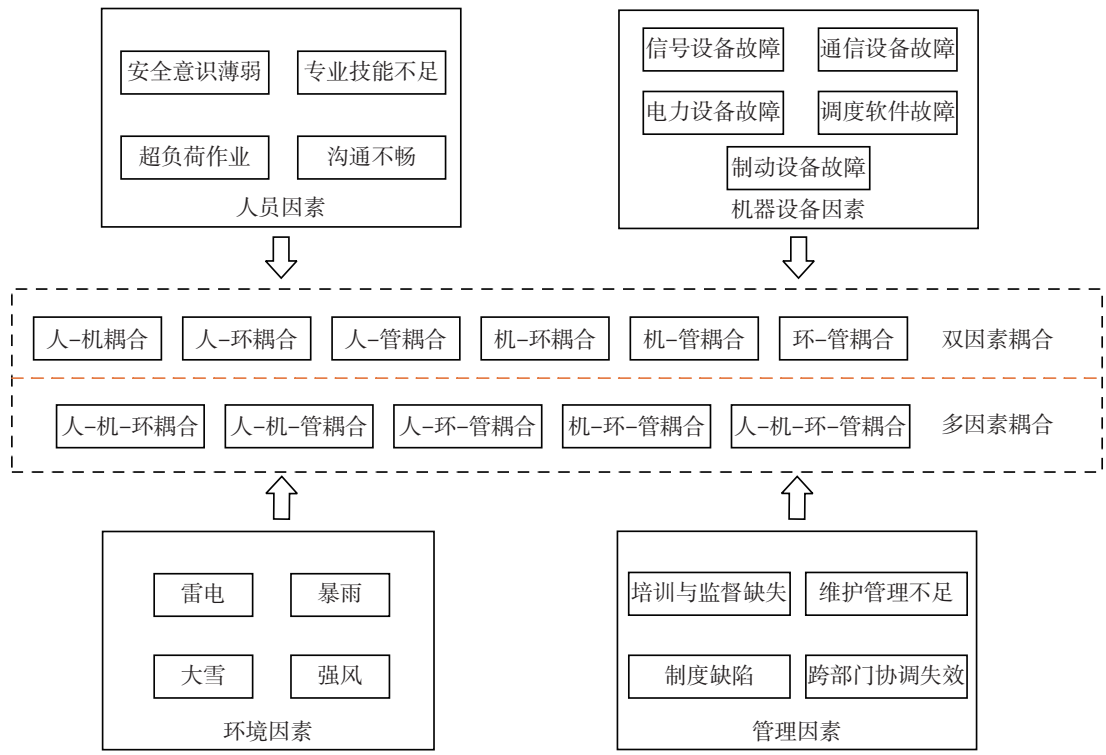

图3　铁路列车调度指挥系统事故风险耦合类型

Fig.3　Coupling types of accident risks in railway train dispatching and command system

风险普遍具有隐蔽性强与传播速度快的双重特征[20]。

人为操作失误风险是威胁系统稳定性的关键因素之一。操作人员在与智能化调度系统交互过程中，可能因流程不熟悉、疏忽或认知偏差，出现错误指令输入或对系统反馈信息的误解。这类失误的隐蔽性导致其在初期难以被有效识别，往往在造成显著影响后才被察觉；而其快速的传播特性则意味着局部失误可能迅速扩散至调度系统的多个环节，放大系统性风险[6, 10]。具体表现为错误指令输入引发列车运行计划偏差，以及对反馈信息的理解错误致使操作人员无法及时采取恰当的应对措施。针对人为操作失误，现有研究强调完善人为干预机制是核心策略之一[21]。该机制一方面着力于提升操作人员能力，通过系统的理论课程与模拟操作演练，强化其对系统的操作熟练度、功能理解深度及风险辨识能力，旨在从源头上减少因知识或技能不足引发的失误；另一方面则注重构建监督与反馈机制，通过建立实时操作监控体系及时发现并纠正潜在错误，并设立畅通的反馈渠道鼓励操作人员报告操作难点、系统问题及改进建议，形成闭环管理。此外，从人机接口安全设计角度进行优化被视为降低人为失误率的根本性途径[20–21]，通过设计直观易用的图形用户界面(GUI)、嵌入智能操作提示、实施指令输入的自动校验等功能，可以有效降低操作人员的认知负荷，减少误操作发生概率，并提升其对系统反馈信息的理解准确性。

技术性风险则主要表现为算法失效与数据质量不足[8, 22]。算法失效本质源于算法鲁棒性缺陷，可能由设计漏洞、训练不充分或对复杂运行环境适应性不足等因素引发，导致其核心的任务分配与路径规划功能异常，进而诱发列车运行混乱。数据质量不足则反映了数据治理机制的缺失[21, 23]，例如存在完整性校验缺陷等，具体表现为数据准确性、完整性或及时性不足。数据不准确会引发决策偏差，数据不完整导致关键信息缺失，而数据不及时则造成系统响应能力下降，三者均严重影响调度决策的有效性。针对技术性风险，现有研究提出了多层次的应对策略。在算法层面，通过优化算法结构、精细调校参数以及持续更新训练数据，可以提升算法的准确性、稳定性与环境适应性，例如采用深度学习模型以增强其对复杂多变环境的适应能力[8]。在数据层面，强化数据治理是关键[20–21]，需要规范数据从采集、清洗、存储到更新的全生命周期管理，实施数据完整性实时校验与定期清洗机制以保障数据的可靠性和时效性，并通过构建结构化的数据治理框架来系统性地提升数据质量，从而降低因数据问题引发的决策偏差风险。同时，引入如动态贝叶斯网络等先进建模技术，利用实时数据动态更新概率分布，能够增强模型对算法失效等问题的鲁棒性[22]，提升系统在不确定性环境下的适应能力。

总体而言，现有研究为理解智能化调度技术带来的新型安全风险提供了初步的理论框架[20]，并在人为干预机制优化、人机接口安全设计改进、算法优化与更新、数据治理强化以及动态建模技术应用等方面提出了一系列应对策略[8, 21]，这些策略在一定程度上指导了实践改进。然而，必须认识到，在面对现实世界中动态变化和多因素高度耦合的复杂运行场景时，现有研究的应对能力仍显不足，需要更深入地探索综合性更强、适应性更优的风险管控方案[6, 10]。

2.3　风险分析模型与方法

危险源辨识是风险评估的基础，危险源辨识作为风险评估的逻辑起点，为整个风险分析过程奠定了基础。在铁路列车调度指挥系统危险源辨识方法方面，当前研究主要选取的方法包括但不限于故障树分析(FTA)、事件树分析(ETA)、预先危险性分析法、层次分析法(AHP)。胡刘星[24]通过 FTA 来识别可能导致列车调度子系统可靠性问题的各种原因，并结合 IDAC 和 SRK 等方法来辨识失效模式，为铁路列车调度指挥系统的危险源辨识研究提供了一种系统化的方法。张艳潮[25]对高速铁路运营过程中可能发生的列车脱轨、列车冲突以及列车火灾等典型风险事件进行了事故树定性分析，确定了导致顶事件发生的途径，并进行了结构重要度分析。针对高速铁路系统中存在的主要风险因素，通过事故树等方法对其进行了预先危险性分析。现有研究多集中于单一风险因素的分析，缺乏对多因素耦合效应的深入探讨，难以全面反映实际运行中的复杂风险情景。此外，传统方法在动态变化环境下的适应性不足，智能化技术引入后的新风险类型及与既有风险因素的交互作用尚未得到充分研究。

铁路列车调度指挥系统作为铁路运输的核心环节，其风险分析模型与方法的研究对提升系统安全性和可靠性具有重要意义。现有研究从不同维度探索了多种评估模型和方法，包括传统分析方法、数据驱动方法以及动态分析方法。这些方法通过整合定量与定性指标，结合先进的数学工具和理论框架，为铁路列车调度系统的风险管理提供了多元化的解决方案，风险分析模型与方法对比如表2所示。

（1）传统的风险分析方法。传统的风险分析方法主要依赖于历史数据和专家经验，通过构建指标体系进行权重分配和综合评价。冯运卿等[26]基于熵权法和灰色关联分析，构建了铁路安全综合评价指标体系，揭示了“人为因素”在铁路事故中的主导作用，并通过灰色关联度的变化曲线展示了我国铁路安全发展的阶段性特征。类似地，吴海涛等[27]采用解释结构模型和网络层次分析法，针对非正常条件下高铁列车调度指挥中的人因失误进行了系统分析，指出人因失误的概率显著增加，强调了传统方法在复杂场景中的局限性。李凯等[28]运用故障树分析方法，深入研究了高速铁路列车调度子系统的可靠性特征，并揭示了故障发生的因果关联。刘敬辉等[29]运用风险定量评估方法，通过故障树分析法探究了风险事件发生的成因及其频率，同时借助事件树分析法评估风险事件发生后可能引发的后果，进而确定了风险事件的风险等级。贾程皓[30]使用了故障树分析方法来识别高速铁路行车调度系统的风险，并通过故障树模型向贝叶斯网络的转化来进行更深入的风险分析。胡刘星[24]通过故障树分析来识别可能导致列车调度子系统可靠性问题的各种原因，并完成失效模式辨识，为铁路列车调度指挥系统的危险源辨识研究提供了一种系统化的方法。Alhossein 等[31]聚焦于高速铁路列车调度指挥的培训

表2　风险分析模型与方法对比

Tab.2　Comparison of risk analysis models and methods

评估类型	方法	主要技术/理论	优点	局限性	适用安全类型	应用场景	代表研究
传统分析方法	熵权法+灰色关联分析	历史数据统计、专家经验、指标权重分配	稳定性高，适合长期趋势预测	适应性弱，难以应对动态变化和突发事件	作业安全	铁路安全综合评价	冯运卿等[26]
	解释结构模型+网络层次分析法	系统分解与层级关系建模	揭示人因失误的复杂因果关系	对复杂场景的局限性明显	作业安全	非正常条件下高速铁路调度人因分析	吴海涛等[20, 27]
	FTA	因果逻辑建模(自上而下)	清晰展示故障因果链，可靠性分析	静态分析，无法处理不确定性	作业安全	高速铁路调度子系统失效模式辨识	胡刘星[24]、李凯等[28]、刘敬辉等[29]、贾程皓[30]
	仿真建模	基于历史数据与预设规则的仿真技术	稳定性高，可复现复杂场景，适合人员培训与系统验证	依赖预设规则，难以应对动态变化；需大量历史数据支持	作业安全	高铁调度员培训系统	Alhossein 等[31]
	集中调度系统设计	人工经验与规则驱动的集中控制(CTC)	逻辑清晰，系统可靠性强，易于与既有设备兼容	灵活性低，依赖人工干预；难以适应突发事件的快速响应	作业安全	铁路调度指挥系统	Xu[32]
	人因可靠性分析	AHP、专家判断法	AHP、专家判断法	依赖专家主观经验，缺乏动态更新能力；难以量化复杂交互风险	作业安全	高铁调度员人为失误风险识别	Ren 等[33]
数据驱动方法	贝叶斯网络模型	概率推理+图论	处理不确定性，支持多因素动态关系分析	依赖数据质量和先验概率设定	作业安全/信息安全	人因失误概率量化、事故致因分析	吴海涛[20]、张开冉等[22]、雷斌等[34]
	云模型+组合赋权法	G1法+CRITIC法+博弈论	主客观权重融合，量化评估可靠性	模型参数敏感性高	作业安全	高铁行车调度系统可靠性评估	孙延浩[35]、刘珊珊[36]
	D-S证据理论	多源信息融合	整合专家知识的不确定性	计算复杂度高	作业安全/信息安全	贝叶斯网络参数初始化	吴海涛[20]
动态评估方法	直觉三角模糊TOPSIS	模糊集理论+多属性决策	实时风险排序，适应非正常条件	依赖专家主观判断	作业安全	高铁调度人因失误风险动态排序	吴海涛等[27]
	改进贝叶斯网络	多源信息合成+贝叶斯推理	动态更新概率，支持实时风险评估	模型复杂，计算成本高	作业安全/信息安全	列车临时限速场景风险量化	吴海涛[20]
	动态贝叶斯网络	动态贝叶斯网络、实时数据流处理	动态贝叶斯网络、实时数据流处理	模型构建复杂，计算成本高；需持续的数据输入与算法优化	信息安全	调度操作中的实时风险预警	刘珊珊[35]

系统仿真，通过构建基于历史数据和预设规则的仿真模型，研究开发了一个用于调度员培训的虚拟环境。Xu[32]针对邯黄线(小康庄—黄骅港)的实际需求，设计并实现了一种分散自律调度集中系统(FZy-CTC)，基于传统调度逻辑和人工经验，整合了列车运行监控、指令发布和资源分配功能。Ren等[33]系统研究了高铁调度员人为失误的风险识别方法，通过AHP和专家判断法，构建人为失误风险指标体系，涵盖工作负荷、操作规范、心理状态等关键因素。研究结合案例分析量化了不同失误类型的发生概率，提出了针对性的风险控制策略。尽管传统方法在稳定性分析和长期趋势预测中表现良好，但其对动态变化环境的适应性较弱，且难以应对不确定性较高的突发事件。

（2）数据驱动方法。随着大数据技术的发展，数据驱动方法逐渐成为铁路列车调度系统风险评估的重要工具。孙延浩[35]提出了一种基于云模型和组合赋权法的高速铁路行车调度系统可靠性评估方法，通过G1法和CRITIC法分别计算主客观权重，并结合博弈论思想获取设备的组合权重，最终实现系统可靠性的量化评估。刘珊珊[36]进一步扩展了云模型的应用，提出了基于云模型的风险评估方法，用于分析高铁列车调度系统中的不安全事件。该方法结合系统论和风险管理理论，通过MATLAB仿真验证了其在实际案例中的有效性。吴海涛[20]依据高速铁路调度指挥的认知行为模型来区分不同的调度任务，并为每种任务建立一个贝叶斯网络模型来分析可能的人为失误。接着，运用D-S证据理论来整合来自不同专家的信息，从而确定贝叶斯网络中各节点的初始和条件概率。最终，通过贝叶斯推理方法计算出成功似然指数(SLI)，并采用成功似然指数法(SLIM)将这些指数转化为具体的人因失误概率值。张开冉等[22]分析了非正常情况下影响高铁行车调度作业人员可靠性的关键因素，识别出行为形成因子(PSF)，如工作负荷、操作规程、工作环境等。基于这些因素，建立了贝叶斯网络模型，考虑了各因子之间的相互关系。雷斌等[34]运用贝叶斯网络预测地铁运营事故严重程度。收集国内事故数据并分类处理，采用树型朴素贝叶斯算法模拟训练，确定致因因素重要性排序。利用K2算法进行贝叶斯网络结构学习，确定节点因果关系，并使用贝叶斯估计法计算概率分布。Xu[32]设计并实现了一个集成化的列车调度指挥系统(TDCS)运维平台。平台通过实时数据采集与统计分析，支持调度设备状态监控、故障报警和运维任务管理。数据驱动方法的优势在于能够处理复杂的多维数据并捕捉潜在的风险模式，但其对数据质量和模型选择的依赖性较强，可能影响评估结果的准确性。

（3）动态评估方法。动态评估方法旨在应对铁路列车调度系统中不断变化的风险因素，特别是在非正常条件下的实时风险监测与预警。动态评估方法通过引入实时数据和智能算法，显著提升了风险识别和响应的效率。吴海涛等[27]提出了一种基于直觉三角模糊TOPSIS的高速铁路列车调度指挥人因失误风险排序模型，通过量化人因失误概率、探测度、重要度和事故严酷度，实现了对风险的动态排序。此外，吴海涛[20]还开发了一种改进的人因失误概率量化方法，利用贝叶斯网络和证据理论合成多源信息，成功应用于列车临时限速场景的风险评估。刘珊珊[36]探讨了实时风险评估方法在调度操作中的应用。通过动态贝叶斯网络和实时数据流处理技术，构建了一个能够动态更新风险概率的评估模型。模型可实时分析列车运行状态、设备故障信号及环境变化数据，生成风险预警并支持调度决策优化。动态评估方法通过引入实时数据和智能算法，显著提升了风险识别和响应的效率，但在模型复杂性和计算成本方面仍面临挑战。

相关模型及表达形式具体如下。

（1）故障树。故障树是一种用于系统可靠性分析和风险评估的图形工具，从待分析的事故或故障入手，逐层分解其发生原因，直至无法进一步分解为止。通过逻辑门符号将特定事故与各层原因(即风险因素)连接起来，形成直观呈现因果关系的逻辑树图形，即事故树。它适用于物理设备故障链分析，若用于信息系统安全，需调整结构。故障树分析流程示意图如图4所示。

在故障树中，顶事件表示系统最不希望发生的事故，底事件(基本事件)表示导致事故的最基本原因，中间事件则介于两者之间，由底事件或下层中间事件通过逻辑门组合而成。顶事件概率由底事件

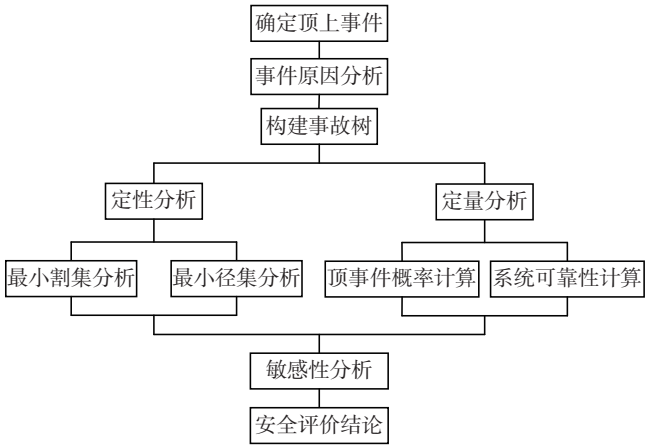

图4　故障树分析流程示意图

Fig.4　Schematic diagram of fault tree analysis flow

概率及故障树结构逐层计算得到：每个中间事件的概率取决于其下层输入事件的概率和逻辑门类型，最终顶事件概率即为根节点的计算结果。首先计算顶事件概率，对于或门，可表示为

$$P(T) = P(M1) + P(M2) - P(M1) \cdot P(M2) \tag{1}$$

式中：$P(T)$为顶事件发生的概率；$P(M1)$和$P(M2)$为中间事件$M1$和$M2$发生的概率。

对于与门，可表示为

$$P(T) = P(M1) \cdot P(M2) \tag{2}$$

其次计算中间事件概率，对于或门，可表示为

$$P(M1) = P(X1) + P(X2) - P(X1) \cdot P(X2) \tag{3}$$

式中：$P(X1)$和$P(X2)$表示基本事件$X1$和$X2$发生的概率。

对于与门，可表示为

$$P(M2) = P(X3) \cdot P(X4) \tag{4}$$

式中：$P(X3)$和$P(X4)$表示基本事件$X3$和$X4$发生的概率。

（2）贝叶斯网络。贝叶斯网络是一种有向无环图概率模型，用于表示变量间的条件依赖关系，其核心是将联合概率分布分解为各节点条件概率的乘积。

$$P\left(X_i|P_a\left(X_i\right)\right) = \prod_{i=1}^{n} P\left(X_i|P_a\left(X_i\right)\right) \tag{5}$$

式中：X_i为第i个变量；$P_a\left(X_i\right)$为所有的父节点(即直接影响的变量)；$P\left(X_i|P_a\left(X_i\right)\right)$为在给定其父节点条件下的条件概率。

（3）蒙特卡罗模拟。通过随机采样估计复杂系统的期望值，用于估计函数在概率分布下的期望值。

$$E\left[f(X)\right] \approx \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} f\left(x_i\right) \tag{6}$$

式中：x_i为分布的第i个随机样本；N为生成的随机样本的总数；$f(x_i)$为对第i个样本应用函数后的结果。

3　评述与展望

3.1　国内研究现状评述与展望

国内研究聚焦于危险源的分类、辨识方法及风险评估模型的建立与优化。随着信息技术进步，大数据、人工智能等新技术被应用于危险源辨识，提升了识别准确性和效率。研究者采用多种方法识别和评估风险，如通过N-K模型定量分析风险耦合机理，计算风险发生概率及耦合风险值，为风险管理提供科学依据。在风险管理实践中，强调采取合理安全管理措施，及时识别和评估调度指挥作业中的风险因素，制定有效风险控制策略，以提高铁路列车调度指挥系统安全性和可靠性。风险监控也是关键环节，研究者利用复杂网络理论分析调度指挥系统拓扑结构，借助系统熵值概念描述系统稳定性和演化规律，实现系统运行状态的实时监控，及时发现潜在不稳定因素并采取预防措施。在风险应对方面，研究者关注如何有效应对已识别风险，通过建立安全风险预警决策框架，模拟和评估不同风险情景下的应对策略，确保风险发生时能迅速有效响应。技术应用方面，新一代铁路列车调度指挥系统体系结构研究探索面向服务的体系结构(SOA)在CTC和TDCS中的应用，以提高系统灵活性和扩展性，适应铁路运输发展需求。此外，研究者构建风险数据库，集中管理和分析风险信息，为风险评估和决策提供支持，系统跟踪风险因素，评估风险控制措施效果，为未来风险管理提供数据支持。尽管国内研究在列车调度指挥系统风险分析与评估领域取得显著进展，但仍存在一些关键局限性。

（1）现有研究多集中于单一风险因素的分析，缺乏对多因素耦合效应的深入探讨。例如，多数文献仅关注设备故障或人为操作失误对系统风险的影响，而忽视了外部环境与内部因素之间的交互作用[37-38]。这种局限性可能导致风险评估结果的片面性，难以全面反映实际运行中的复杂风险

情景。

（2）研究方法的适用性和通用性存在一定不足。虽然人工智能和大数据技术被广泛应用于风险评估，但其模型的可解释性和普适性尚未得到充分验证。特别是在小样本数据场景下，现有模型的表现往往不够稳定，限制了其在特定场景中的推广[27，34]。此外，部分研究过于依赖历史数据，而对未来可能出现的新型风险缺乏前瞻性预测能力[20，23]。

（3）跨学科研究的整合度较低，未能充分发挥多学科协同的优势。例如，心理学和社会学视角在分析人为因素导致的风险时具有重要意义，但目前相关研究较为匮乏[4，16]。这种学科交叉不足的问题可能导致风险分析的理论深度和实践指导性受到一定限制。

基于现有研究空白，未来研究应在以下几个方向展开探索。

（1）加强对多因素耦合效应的研究，开发能够同时考虑多种风险来源及其相互作用的综合评估模型。这需要引入复杂系统理论和网络科学方法，以更好地模拟列车调度指挥系统的动态运行特性[39]。

（2）注重提升评估模型的可解释性和鲁棒性。一方面，可通过结合因果推断方法提高模型的透明度，使其更适合决策支持；另一方面，应开发适用于小样本数据的机器学习算法，以增强模型在不同场景下的适应能力。

（3）探索基于情景模拟和仿真技术的前瞻性风险预测方法，有助于提前识别潜在风险并制定应对策略。

（4）推动跨学科合作，整合心理学、社会学、计算机科学等多学科视角，深化对人为因素和组织行为的研究。例如，可以通过实验研究和实地调研，揭示调度员心理状态与决策行为之间的关系，从而为优化调度流程提供依据。

（5）加强国际合作，借鉴国外先进经验和技术，也有助于弥补国内研究的不足，进一步完善列车调度指挥系统风险管理体系。

3.2　国外研究现状评述与展望

国外在铁路列车调度指挥系统风险分析与评估领域的研究呈现出多元化的发展趋势，核心成果主要体现在3个方面。

（1）通过引入复杂网络模型和动态仿真技术，研究者能够精准刻画系统中各元素的关联关系，并模拟列车在不同情况下的运行轨迹和调度操作，从而提前发现潜在的冲突点和风险源[40]，如Leitner[41]提出的基于事故场景的铁路系统风险评估通用模型，通过故障树分析和事件树分析技术构建了5类主要事故的因果分析框架，创新地将三维风险管理模型应用于斯洛伐克铁路网络，实现了从系统设计到运营维护的全周期风险评估；Corman等[42]针对荷兰多区域铁路网络开发了分布式调度优化框架，通过分层协调机制和替代图模型动态处理轨道堵塞等严重扰动，成功避免了列车运行锁死风险并减少延误传播。

（2）结合大数据分析和机器学习算法，开发了高效的异常检测工具，显著提高了风险评估的精确度和实时性，如基于深度学习的卷积神经网络(CNN)算法能够自动提取列车运行速度数据中的特征，及时发出风险预警[43]。

（3）跨学科整合方法被广泛应用，特别是将风险管理理论与运筹学优化模型相结合，为解决多目标决策问题提供了新思路[44–45]，如在制定列车开行计划时，综合运用风险管理理论和运筹学优化模型，实现运输效率和安全性的平衡；在人员能力评估领域，进一步融合工程心理学与统计学方法，减少了主观因素对考核结果的影响[46]。

尽管上述研究取得了显著进展，但现有文献仍存在一些明显的局限性。①多数研究集中在单一国家或地区的案例分析上，缺乏全球范围内调度系统风险特征的比较研究，这可能导致结论的普适性不足[41–42，45]。②关于调度系统中新兴技术(如人工智能和物联网)应用的长期风险评估研究相对匮乏，尤其是在技术集成过程中可能出现的不确定性问题尚未得到深入探讨[43]。

基于上述研究空白，提出以下未来研究方向以进一步完善铁路列车调度指挥系统风险分析与评估的理论与实践体系。首先，应加强对跨国、跨区域调度系统风险特征的比较研究，通过建立统一的数据采集和分析框架，探索不同环境下风险模式的共性与差异。其次，随着人工智能和物联网技术的快速发展，未来研究应重点关注这些

技术在调度系统中的长期风险效应，特别是技术集成过程中的不确定性和潜在安全隐患。此外，开展多学科交叉研究，将社会经济学、环境科学等领域的方法论引入风险评估体系，以更全面地捕捉外部因素对列车调度系统的影响。最后，应注重开发更具适应性的动态风险评估模型，如将机器学习运用到铁路列车调度指挥系统风险评估中，使其能够根据实时数据快速调整评估结果，从而更好地应对突发事件和复杂场景下的调度需求。这些研究方向的推进不仅有助于填补现有知识空白，还将为铁路列车调度系统的安全性提升提供更为坚实的理论和技术支撑。

参考文献：

[1] 王道奇. 高速铁路调度指挥系统风险管理研究[J]. 铁道运输与经济，2018，40(6)：69-73.
WANG Daoqi. A Study on the Risk Management of High Speed Railway's Dispatcher Control System[J]. Railway Transport and Economy，2018，40(6)：69-73.

[2] 张　帆，步　兵，赵骏逸. 列车运行控制系统信息安全风险评估方法[J]. 中国安全科学学报，2020，30(S1)：172-178.
ZHANG Fan，BU Bing，ZHAO Junyi. Risk Assessment Method for Information Safety of Train Operation Control System[J]. China Safety Science Journal，2020，30(S1)：172-178.

[3] 杜彦良，张玉芝，赵维刚. 高速铁路线路工程安全监测系统构建[J]. 土木工程学报，2012，45(S2)：59-63.
DU Yanliang，ZHANG Yuzhi，ZHAO Weigang. Construction of the High Speed Railway Line Engineering Safety Monitoring System[J]. China Civil Engineering Journal，2012，45(S2)：59-63.

[4] 苗长俊. 基于多层次模糊综合评价的铁路车站安全运营管理分析[J]. 铁道运输与经济，2019，41(1)：90-95.
MIAO Changjun. An Analysis on the Safe Operation Management Evaluation of the Railway Station Based on the Multi-Level Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(1)：90-95.

[5] 牛　儒，唐　涛. 安全论证方法及其在铁路信号开发安全保障中的应用[J]. 铁道学报，2014，36(4)：54-59.
NIU Ru，TANG Tao. Application of Safety Argument in Safety Assurance System for Railway Signalling Development[J]. Journal of the China Railway Society，2014，36(4)：54-59.

[6] 徐培娟. 高速铁路行车调度系统运行风险分析及调整优化方法[D]. 成都：西南交通大学，2017.

[7] 宁　滨，董海荣，郑　伟，等. 高速铁路运行控制与动态调度一体化的现状与展望[J]. 自动化学报，2019，45(12)：2208-2217.
NING Bin，DONG Hairong，ZHENG Wei，et al. Integration of Train Control and Online Rescheduling for High Speed Railways：Challenges and Future[J]. Acta Automatica Sinica，2019，45(12)：2208-2217.

[8] 王荣笙，张　琦，张　涛，等. 基于蒙特卡罗树搜索-强化学习的列车运行智能调整方法[J]. 中国铁道科学，2022，43(5)：146-156.
WANG Rongsheng，ZHANG Qi，ZHANG Tao，et al. Intelligent Adjustment Approach for Train Operation Based on Monte Carlo Tree Search-Reinforcement Learning[J]. China Railway Science，2022，43(5)：146-156.

[9] 闫　璐，张　琦，丁舒忻，等. 基于双目标优化的高速铁路列车运行调整[J]. 中国铁道科学，2022，43(2)：161-171.
YAN Lu，ZHANG Qi，DING Shuxin，et al. High Speed Railway Train Operation Adjustment Based on Bi-Objective Optimization[J]. China Railway Science，2022，43(2)：161-171.

[10] 韩忻辰，俞胜平，袁志明，等. 基于Q-Learning的高速铁路列车动态调度方法[J]. 控制理论与应用，2021，38(10)：1511-1521.
HAN Xinchen，YU Shengping，YUAN Zhiming，et al. High Speed Railway Dynamic Scheduling Based on Q-Learning Method[J]. Control Theory & Applications，2021，38(10)：1511-1521.

[11] 俞名扬，朱　琳，刘志钢. 基于N-K模型的地铁运营安全风险因素耦合分析[J]. 物流科技，2022，45(17)：1-4，9.
YU Mingyang，ZHU Lin，LIU Zhigang. Coupling Analysis of Subway Operation Safety Risk Factors Based on N-K Model[J]. Logistics Sci-Tech，2022，45(17)：1-4，9.

[12] 于秀珍，牟瑞芳，杨　锐. 高速铁路行车调度系统安全风险耦合研究[J]. 铁道运输与经济，2019，41(10)：71-75，87.
YU Xiuzhen，MOU Ruifang，YANG Rui. A Study on Safety Risk Coupling of High Speed Railway Traffic Control System[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(10)：

71-75，87.

[13] 秦伟杰. 高速铁路行车调度系统安全风险分析[D]. 成都：西南交通大学，2016.

[14] 刘斐然. 高速铁路调度指挥风险耦合分析[J]. 综合运输，2022，44(1)：70-76.
LIU Feiran. Coupling Risk Analysis of High Speed Railway Dispatching[J]. China Transportation Review，2022，44(1)：70-76.

[15] 李胜男，闫海峰，吴鹏飞，等. 基于N-K模型的铁路运营事故风险耦合性分析[J]. 现代城市轨道交通，2023(11)：103-109.
LI Shengnan，YAN Haifeng，WU Pengfei，et al. A Risk Coupling Analysis of Railway Operation Accident Based on the N-K Model[J]. Modern Urban Transit，2023(11)：103-109.

[16] 邓　念. 高速铁路调度指挥系统组织结构协同理论与方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2018.

[17] 魏新平. 铁路列车调度系统可靠性研究[D]. 成都：西南交通大学，2010.

[18] 温宏儒. 非正常情况下既有铁路列车调度系统可靠性研究[D]. 成都：西南交通大学，2016.

[19] 张　涛，王振东，赵宏涛，等. 智能调度区段行调业务人机协同机制分析及优化对策研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(6)：27-33.
ZHANG Tao，WANG Zhendong，ZHAO Hongtao，et al. Analysis and Optimization Measures for the Human-Machine Collaborative Mechanism in Intelligent Railway Operations Scheduling Sections[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(6)：27-33.

[20] 吴海涛. 非正常条件下高铁列车调度指挥人因可靠性研究[D]. 成都：西南交通大学，2014.

[21] 田　雷，保鲁昆，高　磊，等. 高速铁路列车调度员日常作业人因安全风险因素研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(1)：116-123.
TIAN Lei，BAO Lukun，GAO Lei，et al. Human Safety Risk Factors in Daily Operation of High Speed Train Dispatchers[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(1)：116-123.

[22] 张开冉，王若成，邱谦谦. 基于贝叶斯网络的非正常情况下高铁行车调度人因可靠性分析[J]. 安全与环境学报，2015，15(5)：161-165.
ZHANG Kairan，WANG Ruocheng，QIU Qianqian. Human Reliability Analysis Based on the Bayesian Network Model under the Abnormal Circumstances in the Case of High Speed Rail Dispatching[J]. Journal of Safety and Environment，2015，15(5)：161-165.

[23] 任　璐. 高速铁路行车调度风险预警系统设计[D]. 成都：西南交通大学，2016.

[24] 胡刘星. 融合多生理信号的高铁调度指挥人员可靠性研究[D]. 北京：北京交通大学，2023.

[25] 张艳潮. 高速铁路运营安全风险分析与评估[D]. 大连：大连交通大学，2017.

[26] 冯运卿，李雪梅，李学伟. 基于熵权法与灰色关联分析的铁路安全综合评价[J]. 安全与环境学报，2014，14(2)：73-79.
FENG Yunqing，LI Xuemei，LI Xuewei. Comprehensive Evaluation Method for the Railway Safety Based on the Entropy Method and the Grey Relation Analysis[J]. Journal of Safety and Environment，2014，14(2)：73-79.

[27] 吴海涛，罗　霞. 基于直觉三角模糊TOPSIS的高铁列车调度指挥人因失误风险排序[J]. 中国安全生产科学技术，2014，10(4)：139-144.
WU Haitao，LUO Xia. Risk Prioritization Model of Human Error for High Speed Railway Dispatchers Based on Intuitionistic Triangular Fuzzy TOPSIS[J]. Journal of Safety Science and Technology，2014，10(4)：139-144.

[28] 李　凯，王明起，汪　颖，等. 基于故障树分析的高速铁路列车调度子系统可靠性的探讨[J]. 交通与运输(学术版)，2013(1)：136-138.
LI Kai，WANG Mingqi，WANG Ying，et al. The Discussion about the Stability of the High Speed Railway Train Scheduling Subsystem in Fault Tree Analysis[J]. Traffic & Transportation，2013(1)：136-138.

[29] 刘敬辉，戴贤春，郭　湛，等. 铁路系统基于风险的定量安全评估方法[J]. 中国铁道科学，2009，30(5)：123-128.
LIU Jinghui，DAI Xianchun，GUO Zhan，et al. Quantitative Safety Assessment Method Based on Risk in Railway System[J]. China Railway Science，2009，30(5)：123-128.

[30] 贾程皓. 基于风险管理理论的高铁行调系统风险识别与分析研究[D]. 北京：北京交通大学，2016.

[31] ALHOSSEIN M，PENG Q Y. Simulate a Training System for Train Dispatching Command in High Speed Railway[J].

DEStech Transactions on Engineering and Technology Research，2017：85-87.

[32] XU W. Design and Implementation of FZy-CTC Dispatching Command Release System for Han Huang Line of Beijing Railway Bureau[C]//IEEE. 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics，and Informatics(SOLI). Piscataway：IEEE，2016：261-266.

[33] REN Y M，SUN Y H，DING S X，et al. Research on Risk Identification of Human Errors of Train Dispatchers in High Speed Railway[C]//SPIE. Proceedings of SPIE：Seventh International Conference on Traffic Engineering and Transportation System(ICTETS 2023). Bellingham：SPIE，2024：147.

[34] 雷　斌，田伯轩，李佳晨，等. 贝叶斯网络在地铁运营事故严重程度预测中的应用研究[J]. 安全与环境学报，2024，24(7)：2751-2758.
LEI Bin，TIAN BoXuan，LI Jiachen，et al. Research on Subway Operation Accident Severity Warning Based on Bayesian Network[J]. Journal of Safety and Environment，2024，24(7)：2751-2758.

[35] 孙延浩. 高速铁路行车调度系统可靠性评估方法研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2020.

[36] 刘珊珊. 基于云模型的高速铁路行车调度系统不安全事件风险评估研究[D]. 成都：西南交通大学，2018.

[37] 蔡　金，高自友. 铁路安全预警系统的研究和实现[J]. 中国安全科学学报，2003，13(3)：18-21.
CAI Jin，GAO Ziyou. Study and Realization of Safety Pre-Warning System for Railway Department[J]. China Safety Science Journal，2003，13(3)：18-21.

[38] 祁晓飞. 高铁调度指挥系统安全性分析研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2016.

[39] 张凌翔. 城市轨道交通运营风险分析与评价研究[D]. 南京：东南大学，2018.

[40] LIU Y，SONG Y W，ZHAO D W，et al. Application of Real-Time Risk Assessment Method in Dispatching Operation[J]. Advanced Materials Research，2013，860-863：2095-2100.

[41] LEITNER B. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis[J]. Procedia Engineering，2017，187：150-159.

[42] CORMAN F，D'ARIANO A，PACCIARELLI D，et al. Dispatching and Coordination in Multi-Area Railway Traffic Management[J]. Computers & Operations Research，2014，44：146-160.

[43] ALAWAD H，KAEWUNRUEN S，AN M. A Deep Learning Approach towards Railway Safety Risk Assessment[J]. IEEE Access，2020，8：102811-102832.

[44] LUO W，KONG H，SU H. Design and Application of Traffic Administrative Law Enforcement Command and Dispatching System Base on Big Data[C]//IEEE. Proceedings of 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference(ITOEC 2018). Piscataway：IEEE，2018：1587-1591.

[45] MELONI C，PRANZO M，SAMÀ M. Risk of Delay Evaluation in Real-Time Train Scheduling with Uncertain Dwell Times[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2021，152：102366.

[46] URSAROVA A，MUSSALIYEVA R，MUSSABAYEV B，et al. Multi-Criteria Evaluation of Professional Qualities of Railway Dispatching Personnel Using Computer Simulations[J]. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu，2022(2)：141-147.

(责任编辑　刘宁馨)