

智能铁路物联网研究综述

谢健骊¹, 张泽鹏¹, 蔺伟², 马君², 欧阳朔³, 屈毅³

(1. 兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 北京 100089; 3. 北京铁路通信信号运维中心, 北京 100038)

摘要: 人工智能 (AI)、大数据、云计算等技术能够在提升铁路物联网 (RIoT) 感知与连接广度和深度的同时为 RIoT 系统中数据的智能化分析和处理提供支撑。首先, 基于智能物联网和 RIoT 的相关理论, 介绍了智能铁路物联网 (SRIoT) 的基本概念和体系架构, 详细阐述了 SRIoT 中的关键技术; 然后, 从铁路建设、安全监控、行车调度等多个角度对智能物联网在铁路行业各领域的应用场景进行综述, 聚焦技术和安全两个层面, 梳理了铁路物联网面临的问题和挑战; 最后, 探讨了具有高价值的潜在研究方向。

关键词: 物联网; 智能铁路; 关键技术; 应用场景; 潜在方向

中图分类号: TP393; U29

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00487

Review of research on smart railway Internet of things

XIE Jianli¹, ZHANG Zepeng¹, LIN Wei², MA Jun², OUYANG Shuo³, QU Yi³

1. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

2. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100089, China

3. Beijing Railway Communication Signal Operation and Maintenance Center, Beijing 100038, China

Abstract: Artificial intelligence (AI), cloud computing, big data, and other technologies can not only improve the perception and connection of the railway Internet of things (RIoT) but also provide support for the intelligent analysis of data in the RIoT system. Firstly, based on the theory of smart Internet of things and RIoT, the basic concept and architecture of smart railway Internet of things (SRIoT) were introduced, and the key technologies in SRIoT in detail were expounded. The application scenarios of smart Internet of things in the railway industry were summarized from the perspectives of railway construction, safety monitoring, traffic scheduling, and so on. Focusing on technology and safety, the problems and challenges faced by the railway Internet of things were sorted out. Finally, potential research directions with high value were explored.

Key words: Internet of things, smart railway, key technology, application scenario, potential direction

0 引言

铁路作为国家交通运输体系的骨干力量, 在国家经济发展、区域协调以及日常出行等方面发挥着不可替代的关键作用。然而, 随着社会的快速发展

和科技的不断进步, 传统的铁路运营模式和技术手段已经难以满足日益增长的运输需求和用户对更高质量服务的期待^[1-3]。为了应对这一挑战, 人工智能 (AI, artificial intelligence) 赋能的铁路物联网 (RIoT, railway Internet of things) 应运而生, 成为推动铁路

收稿日期: 2025-02-17; 修回日期: 2025-03-18

通信作者: 谢健骊, xiejl@mail.lzjtu.cn

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (No. N2024G036)

Foundation Item: The Science and Technology Research and Development Plan Project of China Railway Group Co., Ltd (No. N2024G036)

系统智能化转型的重要力量^[4-5]。RIoT 作为物联网 (IoT, Internet of things) 技术^[6]在铁路运输领域的深度应用, 通过连接铁路系统中的各级设备、基础设施和环境信息, 实现信息的实时采集、传输处理, 使得铁路系统能够更高效、更安全^[7]。而智能铁路作为铁路系统智能化发展的高级阶段, 通过引入 AI、大数据、云计算等先进技术, 实现对铁路系统运行状态的精准感知、智能分析与高效管理^[8]。不仅能够进一步提升现有铁路行业的运输效率、保障运行安全, 更为旅客提供了更加便捷、舒适的出行体验。

智能铁路物联网 (SRioT, smart railway Internet of things) 通过融合智能铁路的智能化处理能力与 RIoT 的连接能力, 实现了铁路系统中信息的全面感知、智能处理与高效利用。不仅是对智能铁路与 RIoT 优势的进一步整合与提升, 更是铁路系统向全面智能化、高效化、安全化发展的重要一步。

本文旨在深入探讨 SRioT 的概念、体系架构、关键技术、应用场景以及目前挑战和未来研究方向, 以期为铁路行业的智能化转型提供有益的参考和借鉴。

1 概念及体系架构

IoT 技术的应用极大地推动了铁路系统的智能化和现代化进程, 促进了 SRioT 的诞生。铁路系统通过部署传感器等设备, 为 IoT 提供丰富的实时数据。而 IoT 利用先进的 AI、大数据、云计算等技术处理和分析这些数据, 为铁路系统提供智能化决策支持。本节详细介绍了 SRioT 的基本概念和体系架构。

1.1 概念

RIoT 即 IoT 在铁路领域的具体实践^[1], 通过构建连接目标对象的泛在感知体系, 实现对人、列车、移动设备、固定设施、运行环境的全面感知、可靠传递和智能处理^[2]。然而, 随着 AI、大数据、5G 甚至 6G 等数字技术不断为铁路行业赋能, RIoT 已从数字化向智能化发展。因此, 新一代 SRioT 应具备以下要素: 深度融合 AI、大数据、云计算、现有 RIoT 等相关技术^[6], 赋能感知、通信、处理和应用, 实现铁路场景下的万物智联^[3], 呈现人车物融合、泛在全面感知、智能化处理和多计算模式协同等新特征, 具备更高灵活性、自组织性、自适应

性和持续演化等特性。

SRioT 关键要素及其之间的关系如图 1 所示。通过 AI、大数据、云计算等技术的综合应用, SRioT 能够实现自适应环境感知、数据处理以及智能分析与决策。其中, 大数据为铁路系统提供了丰富的数据源, 助力精准决策和预测^[7]; 云计算强大的计算和存储能力能够支撑起复杂的数据处理任务, 实现资源的灵活调度和优化配置; 神经网络、机器学习、深度强化学习等 AI 技术可在复杂环境中进行智能学习并做出智能决策, 为铁路智能化发展注入了强大动力^[8]。

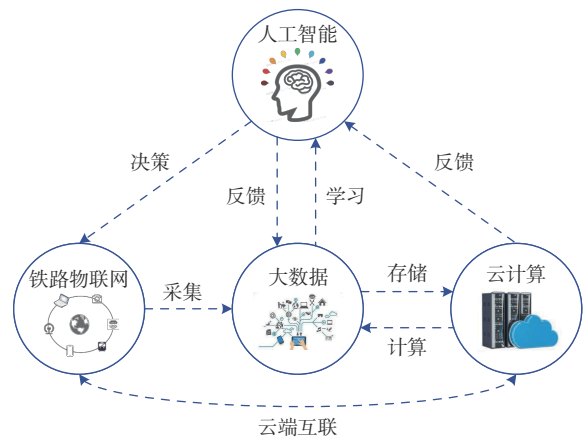


图1 SRioT关键要素及其之间的关系

1.2 体系架构

与国家标准 GB/T 33474 制定的物联网架构类似^[7], SRioT 从下到上可以划分为感知层、网络层和应用层, 最后由公共层负责管理和保障物联网整体性能, 各层相互协作, 共同支撑铁路系统的高效运行。SRioT 的体系架构如图 2 所示。其中, NB-IoT 表示窄带物联网, RFID 表示射频识别。

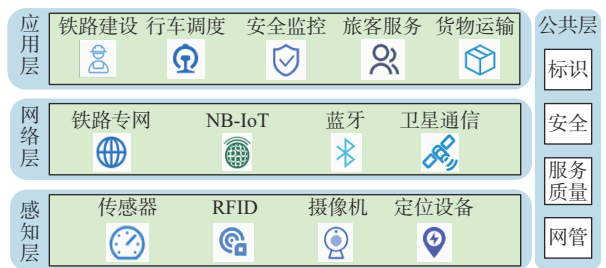


图2 SRioT的体系架构

(1) 感知层犹如 SRioT 的“感官系统”, 负责捕获和采集各种物理世界的信息。通过部署各类传感器、射频识别 (RFID, radio frequency identifica-

tion) 标签、定位设备等,感知铁路系统中的车辆、基础设施、移动设备、运行环境以及人员机构等信息,并转换为可处理的数据。

(2) 网络层犹如 SRIoT 的“神经系统”,负责在感知层与应用层之间传输数据。通过 5G-R、RedCap 等多种通信技术构建起可靠的数据传输通道,管理和优化传输网络以确保数据能够准确、及时、安全地在不同网络节点之间传递。

(3) 应用层犹如 SRIoT 的“决策系统”,负责处理和分析网络层输出的各类数据。通过 AI、大数据、云计算等数字化技术,对输入数据进行智能学习、分析和计算,并根据这些数据执行特定任务,最后将其应用到各个场景,实现精确管理、实时控制和科学决策。

部分研究考虑各层的功能性和组成,有时也将平台层和安全层纳入物联网体系架构中,扮演特定的角色。总之,在任意场景的物联网中,各层相互协作,共同构成了一个高效、智能的信息处理和控制系统。

2 关键技术

参照如图 2 所示的体系架构,本节对 SRIoT 涉及的关键技术进行归类和梳理,形成的 SRIoT 的关键技术框架如图 3 所示,该体系主要包括感知技术、通信技术、数据处理技术及安全技术。

2.1 感知技术

感知技术是 SRIoT 实现数据采集的基础,通过传感器、RFID、全球定位系统等,实时、准确地采集铁路系统中的各种物理信息,通过网络的传输和交互,使铁路系统中的设备、车辆和人员等能够实时共享信息。

(1) 传感器技术

传感器作为铁路系统的“触角”,是 SRIoT 感知层的核心部件,能够敏锐捕捉各类物理量变化,为铁路运行状态监测和安全保障提供关键数据支持^[9]。在铁路领域,依据监测对象与应用场景的差异,运用了多种类型的传感器。考虑青藏铁路格拉段高原多年冻土区气候、地质条件和轨道结构的特殊性,可以采用位移传感器和温度传感器对无缝线路长钢轨纵向位移、横向位移、梁端位移、气温、轨温和梁温等指标进行实时连续观测^[10]。文献[11]提出了一种基于倾角与振动一体化融合检测的铁路边坡监测方法,该方法利用自主研发的双参数光纤布拉格光栅传感器建立了边坡监测系统,为铁路边坡监测提供了新思路。为了更好地提供实时传感特性,文献[12]评估了不同类型的加速度计、压阻传感器和标准压电传感器在铁路垫板中的可行性和潜在适用性。鉴于监测钢轨波纹形变能够更好地帮助实现铁路健康检测^[13],一种特种微结构的光纤振动传感器应运而生,其通过对光纤结构的合理设计和优化,能够准确获得低频范围内的大幅振动信息,并较好地反映出高频扰动。

(2) 识别技术

识别技术涵盖了 RFID、生物识别、图像与视频监控以及条形码和二维条码的应用。利用这些识别技术,能够实现对基础设施、人员及列车等元素的快速识别和追溯,更好地提升铁路的运营效率和服务能力。其中,RFID 技术在车轴计数^[14]、隧道内列车定位^[15]、客流量预测^[16]等领域发挥着巨大的作用。生物识别、图像与视频监控技术借助高清摄像头、智能图像分析算法等,赋予铁路系统“视觉感知”能力,在铁路安防、设备状态监测以及旅客服务等多个领域发挥关键作用^[17-19]。

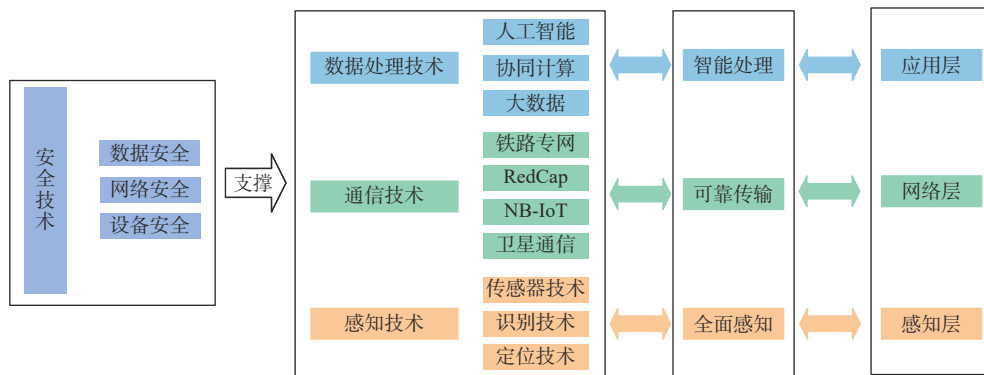


图3 SRIoT 的关键技术框架

(3) 定位技术

通过多种定位技术,如惯性导航系统^[15,20]、全球导航卫星系统^[21],能够实现列车的实时定位与跟踪,为列车调度、运行监控、物流运输等^[22]提供精准的位置信息。

面对复杂多变的铁路运行环境,单一的定位技术通常难以满足高精度和广覆盖的需求。因此,随着IoT技术的持续进步和铁路系统的智能化转型,将多种技术进行融合应用、提升定位的准确性并扩大覆盖范围是目前研究的热点。综合利用卫星导航、轮速传感器、加速度计、应答器等信息的多源融合测速定位技术方案可以满足列车定位精度与安全性的要求^[23]。地图匹配定位虽然可以提高定位精度,但信息传输时延很高,其与北斗导航系统、惯性导航系统相结合的高速列车定位方法可以实现提高定位速度的同时确保定位精度^[24]。利用改进的自适应交互多模算法对卫星接收器、轮轴测速传感器、测速雷达以及单轴陀螺仪4种定位信息进行融合滤波,可以实现对高速列车的高精度组合定位^[25]。

2.2 通信技术

(1) 第二代铁路移动通信系统

第二代铁路移动通信系统(GSM-R, global system for mobile communications-railway)是应用于铁路通信设计的综合专用数字移动通信系统,具有高速通信、抗干扰能力强、组网灵活、可靠性高以及适应铁路沿线复杂环境等特性。

尽管GSM-R技术在铁路通信中发挥着重要作用,但作为一种窄带通信技术,其数据传输速率相对较低,无法满足高清视频监控和列车实时状态监测等大数据量传输的需求^[26]。同时,其频谱利用率较低难以满足铁路运输业务快速增长的需求,影响铁路运输的正常秩序。此外,GSM-R主要侧重于语音通信和简单数据传输业务,对于新兴的大数据量、高实时性业务支持能力不足。

(2) 铁路长期演进技术

传统GSM-R技术数据承载能力有限、频谱利用率低,已无法满足现代铁路对宽带业务的需求。随着列车运行速度提升和宽带业务需求增加,铁路长期演进(LTE-R, long term evolution-railway)技术^[27]以其高速率传输、低时延、多业务融合和网络结构优化的优势,成为满足高速铁路通信需求的理想选择。一方面,通过多输入多输出(MIMO,

multiple input multiple output)技术产生多个并行的独立信道,在不增加带宽的情况下提高数据传输速率;另一方面,正交频分复用技术将宽带信道分成一组正交平坦的子信道,实现信号可以在每个子信道中独立处理,确保最大限度消除干扰,提高频谱效率。

尽管LTE-R技术在铁路通信中展现出诸多优势,但也存在一定局限。特别是在偏远山区和隧道等复杂环境中,LTE-R的覆盖范围受限,信号穿透力较弱。此外,随着用户数量的增加,频谱资源紧张的状况日益凸显,系统容量在多用户并发时容易达到瓶颈。

(3) 第五代铁路通信系统

虽然LTE-R在数据传输速率和频谱效率上相比GSM-R有了很大提升,但在支持超大规模连接、超低时延和高可靠通信等方面仍存在一定局限,无法完全满足未来铁路全方位智能化应用场景的需求。第五代铁路通信系统(5G-R, 5G-railway)充分融合5G技术的三大特性,即增强型移动宽带、超高可靠低时延通信以及海量机器类通信,为铁路运输带来前所未有的变革^[28]。与多输入单输出、单输入单输出相比,5G大规模天线技术可以提供更多自由度的无线信道,以支持更高的数据传输速率^[29],还可以提高频谱效率和能量效率。MIMO联合波束成形更能最大限度地减少干扰,提高移动用户的数据速率。

5G-R不仅支持高清视频监控、列车自动驾驶等关键业务,而且通过采用网络切片和边缘计算技术,可以为不同业务提供定制化服务。作为5G技术在铁路行业的优化定制,5G-R在系统架构、行车安全、信息承载、调度通信等方面进行了创新,确保在各种复杂环境下实现稳定通信,推动铁路通信事业高质量发展。

5G-R技术在铁路领域的应用虽具潜力,但仍受多方面因素限制。例如,5G毫米波信号穿透能力差,网络覆盖半径小,在偏远地区覆盖成本高;频谱资源紧张,抗干扰能力弱,影响系统性能;系统兼容性差,网络安全威胁多,安全机制尚未完善。此外,5G-R系统建设成本高,终端设备成熟度不足,频繁更新换代面临资金与运营的双重压力。这些因素共同制约了5G-R技术在铁路领域的全面推广与应用。

(4) 窄带物联网

窄带物联网 (NB-IoT, narrow band Internet of things) 作为一种基于蜂窝网络的低功耗广域 IoT 通信技术, 以其覆盖范围广、功耗低、支持多设备连接、低时延通信等优点, 广泛应用于铁路行业^[30]。在铁路基础设施监测、环境监测及设备状态监测方面, NB-IoT 技术展现出强大的性能, 有效促进了铁路运输安全性和效率的提升。然而, 在隧道、地下车站等区域, NB-IoT 信号存在衰减或中断的情况。此外, 不同厂商设备之间的兼容性、互操作性以及网络容量和带宽的局限性, 也是 NB-IoT 技术在铁路应用中需要克服的难题^[31]。

(5) 卫星通信技术

卫星通信技术凭借其覆盖范围广、不受地理条件限制的独特优势^[32], 成为 SRIoT 在建站难的复杂地形下实现可靠通信的“生命线”, 在保障铁路通信全域贯通、运输安全方面发挥着不可替代的作用。通过在铁路沿线的车站、信号站、养护工区等关键节点部署卫星通信终端, 能够为远程调度指挥、故障应急抢修以及安全保障决策提供有力支撑^[33]。此外, 卫星通信与地面通信的协同应用, 能够充分发挥两者的优势, 构建更加完善的铁路通信网络。

(6) 5G 轻量化

5G 轻量化 (RedCap, reduced capability) 作为传统 5G 的演进, 旨在满足特定应用场景对成本和效能的双重需求。在 SRIoT 领域, 为确保铁路沿线基础设施的安全监控, 需要大量部署监测节点并实时回传视频数据, 这对通信速率和连接数量提出了较高要求。RedCap^[34]有望通过削减带宽、天线数量及简化调制方式等手段, 降低终端复杂度和功耗, 进一步满足铁路监控对速率和成本的需求。然而如何以最低的现网改造成本发挥 RedCap 的最大优势, 仍需工业界和学术界详细的探讨和研究。

随着铁路智能化的不断发展, 多种通信技术的融合成为必然趋势。GSM-R 作为传统技术, 为铁路通信提供基础保障; LTE-R 则增强了数据传输速率和可靠性; 5G-R 以其超高速率、低时延特性, 为智能调度、高清视频监控等提供强大支持。上述三代铁路专网在 SRIoT 中各有优势, 为铁路现代化发展提供支撑。RedCap 作为 5G 针对 IoT 的优化版本, 将推动 IoT 设备的大规模部署; NB-IoT 适用于

低功耗、广覆盖的 IoT 场景, 与卫星通信结合, 可实现对偏远及复杂地形的全面覆盖。通过采用混合通信架构和智能切换技术, 可以根据通信环境和业务需求自动选择最佳通信方式, 充分发挥不同技术的长处, 确保铁路通信的质量和效率。

2.3 数据处理技术

通过大数据、云计算、边缘计算等技术的综合应用, SRIoT 能够实现数据的高效处理和分析, 显著提升铁路系统的智能化水平。

(1) 大数据技术

数据清洗作为数据挖掘、分析和应用中的关键环节, 对于提高数据质量、优化分析效率、降低决策风险等方面具有重要意义^[35]。数据压缩则在不丢失有用信息的前提下, 缩减数据量以减少存储空间, 进而提高传输、存储和处理效率^[36]。文献[37]探讨了一种在智能铁路管理场景中进行实时数据压缩的新方法, 分析发现深度强化学习不仅可以适应不断变化的数据模式, 还可以在保留重要数据的同时智能地消除冗余信息。

为了从庞大的数据集中发现潜在的规律和模式, 数据挖掘技术利用多种算法为铁路运营提供有价值的参考。应用多项式回归和关联规则可以检查轨道的扭曲与其他几何参数之间的关系, 帮助维护铁路轨道^[38]。文献[39]为了从铁路机车大数据中挖掘出与机车事故故障有关的关联规则, 提出一种优化的 MsEclat 算法。通过对边缘频繁项集的挖掘, 可以进一步简化关联规则构建的故障关系网络, 优化铁路故障预防的决策过程^[40]。为了更好地实现铁路危险品的管理, 可以利用有序多分类 Logistic 回归分析事故原因和事故严重程度, 利用决策树和 C5.0 算法提取和分析耦合规则, 最终实现铁路危险品运输事故原因的挖掘^[41]。

数据分析利用机器学习、深度学习等技术进一步解读规律, 为优化铁路运输、提高安全性和效率提供决策支持。例如, 基于机器学习可以分析轨道质量数据与轨道不平顺之间的非线性映射^[42], 利用深度学习可以实现非法入侵事件的自动检测^[43]以及在无人干预情况下精准识别转向架部件^[44]。

(2) 边缘计算

随着数据量的爆炸性增长和应用场景的多样化, 传统的计算模式已无法满足低时延、高带宽、数据隐私保护等需求。云计算能够高效处理 SRIoT

产生的大规模数据,提供强大的计算和存储资源^[45],支持复杂的数据分析和模型训练,同时实现资源的灵活调度和按需分配。这不仅提高了数据处理和分析的速度与准确性,还降低了本地设备的计算压力和维护成本。然而,云计算一直面临的数据安全和隐私问题^[46]以及铁路系统本身的复杂性和高集成性增加了部署云或搭建云平台的难度。

为了减轻对云计算中心的依赖,保证系统的稳定性和可靠性,边缘计算被广泛提及和研究。边缘计算能够在数据产生的源头附近即时处理和分析数据,降低数据传输的时延,提高实时响应能力^[47],即使在网络不稳定或中断的情况下,也能保证关键业务的连续运行。此外,边缘计算还能有效保护数据隐私,减少数据泄露的风险。例如,文献[5]将通信和计算资源优化过程制定为二级博弈模型,并验证了在基于边缘计算的智能铁路施工系统中频谱效率和平均任务交付时间方面的有效性。

为了更好地满足复杂应用场景的需求,云边端、云边、云边雾等多种协同计算模式应运而生。通过协同工作,既能保证数据处理的实时性和效率,又能充分利用云计算的强大数据处理能力。为了应对铁路情景高动态和资源受限带来的安全挑战,文献[48]设计了一种铁路物联网智能检测中基于云边协作的任务卸载策略。文献[49]提出的一种基于云边交互机制重构自主式高速铁路防灾系统架构,能够满足高速铁路防灾系统需求。

(3) AI 技术

机器学习技术基于数据驱动,通过构建各类算法模型,能够让计算机自动从海量铁路系统数据中学习规律和特征,进而实现对未知情况的预测、分类与决策优化。采用随机森林模型可以预测道碴和路基循环荷载引起的累积永久轨道变形^[50]。基于时间序列分割算法,文献[51]开发了3种不同的机器学习模型预测钢轨断裂的发生,包括逻辑回归、随机森林和梯度提升,对比发现梯度提升在检查和维护钢轨断裂位置时具有更高的性能。文献[52]测试了 k -近邻算法、反向传播人工神经网络、随机森林和粒子群优化的支持向量机4种算法评估铁路桥梁的地震危险性,并据此构建了铁路桥梁快速评估模型。监督学习与无监督学习的结合可以更好地实现轨道组件缺陷检测^[53],一方面使用深度神经网络、卷积神经网络、多元回归、支持向量机、梯度提

升、决策树和随机森林等开发轨道部件缺陷检测模型,另一方面使用 K -means聚类和关联规则分析轨道组件缺陷之间的关系。结合更新过程和粒子群优化的反向传播神经网络在铁路物资需求预测上具有更高的准确性^[54]。

深度学习作为机器学习的进阶技术,凭借其强大的提取信息、智能学习和训练能力,在铁路图像识别、优化调度等领域展现出卓越性能。文献[55]利用深度学习实现了端到端的轨道图像采集、开放集异物检测和常见异物识别。此外,深度学习还可以帮助高速铁路货运站选址决策^[56]、自动探索和优化铁路线形^[57]、钢轨表面伤损精细化分割^[58]以及客流量预测^[59]等。

2.4 安全技术

(1) 设备安全技术

设备安全不仅关系到铁路系统的正常运行和运输效率,更直接影响着乘客的生命财产安全。通过加强设备安全防护,可以及时发现并排除潜在故障,预防事故发生,确保铁路交通的平稳、高效和可靠。设备身份认证是确保只有合法设备才能接入网络的关键,通常采用数字证书、密钥等方式^[60]。考虑不同的用户或系统对铁路设备有不同的访问需求,采用访问控制可以根据角色和权限进行设置^[61]。

(2) 网络安全技术

SRIoT涉及列车运行控制、故障诊断、乘客服务等多个关键环节,这些环节的正常运行高度依赖于网络的安全稳定。一旦网络安全出现问题,可能导致列车运行混乱、故障无法及时发现和处理、乘客信息泄露等严重后果。文献[62]不仅概述了铁路系统面临的当代网络安全挑战,还提出了一种针对铁路的层次化安全框架,包括持续监控、基于AI的威胁检测和加强网络安全与运营安全协议之间的整合。

防火墙^[63]作为一种基本的安全防护手段,能够监控和控制进出网络的流量,通过设置规则可以只允许授权的网络通信通过,阻止未经授权的访问。文献[64]通过跨多个管理域动态扩展和扩展防火墙,实现了更有效的规则优化、过滤和更好的攻击响应。

入侵检测系统^[65]可以检测网络中的入侵行为,包括恶意软件的传播、异常的网络访问模式等。而

入侵防御系统^[66]不仅能够检测，还能在发现入侵行为时自动采取措施进行阻止。在铁路系统^[67]中，两者的结合可以实时监控列车控制系统、信号系统等关键网络区域的网络活动。

网络接入认证系统可以管理和控制网络用户访问，确保网络的安全性和资源的合理使用。为了解决LTE-R通信中身份验证机制的密钥泄露、无法抵抗特权用户攻击以及身份验证时延高等问题，文献[68]提出了一种基于区块链和Secgear的LTE-R接入认证方案，通过引入切换认证阶段和密码更改阶段，为LTE-R接入认证提供了额外的安全属性。文献[69]针对高速铁路无线通信网络切换中存在切换安全性低、中断概率高等问题，设计了一种基于CNN-WaveNet的高铁无线通信越区切换算法。

(3) 数据安全技术

铁路运行过程中产生海量数据，涵盖列车运行参数、旅客信息、货物运输详情以及基础设施状态等核心敏感信息，数据安全技术成为守护这些关键数据资产的坚实堡垒，确保数据全生命周期的保密性、完整性和可用性。

加密技术作为数据保护的关键手段，确保了数据的机密性和完整性。针对外包数据库中的数据泄露以及现有的数据库加密方案安全性低的问题，文献[70]提出了基于可搜索加密机制的数据库加密方案，既实现了数据的安全性，又能满足现实场景中功能性的需求。利用安全套接层和传输层安全协议，也可对客户端与服务器之间传输的数据进行加密，确保数据在网络传输过程中不被窃取或篡改。数据完整性验证方案通过使用哈希算法等技术^[71]，为数据生成唯一的“数字指纹”，用于确保数据在传输和存储过程中不被篡改。

区块链通过其去中心化、分布式账本和加密技术，可以确保数据的可追溯性和防篡改性，进而增强数据的完整性和可信度^[72]。同时，智能合约的应用也进一步提升了数据交易的安全性和透明度^[73]。联邦学习^[74]作为分布式机器学习框架，通过利用广泛分布的异构数据实现跨多个节点的存储和计算资源的负载均衡，在保护隐私的前提下实现数据的共享和分析^[75]。而联邦学习与区块链的结合，实现了数据共享和交易在隐私保护与安全性上的双重飞跃，极大提升了数据安全和隐私保护的整体水平^[67]。上述技术目前仅被广泛讨论于传统蜂窝网络

中，在铁路场景中的应用探讨还很少。未来结合铁路公专融合的网络架构，以较低的成本实现RIoT与上述技术的融合是研究的热点之一。

3 应用场景

SRIoT的主要应用场景如图4所示，本节从铁路建设、安全监控、行车调度、旅客服务、货物运输5个方面总结梳理了智能物联网在铁路场景中的应用。



图4 SRIoT的主要应用场景

3.1 铁路建设

智能化技术的全面应用不仅促进了铁路建设相关产业的发展，也提高了铁路运输效率^[76]。金晶等^[77]针对亚欧大陆政治经济文化的差异性，提出了一种基于反向传播（BP, back propagation）神经网络的铁路建设风险评估算法。文献[78]基于多目标强化学习框架制定了一种新颖的铁路线形优化模型，实现了降低建设成本并规避环境因素的双重目标。深度强化学习框架还可基于历史数据和现有数据的学习训练和对比，实现铁路纵断面的智能化设计^[79]。利用支持向量机和极限学习机对铁路隧道洞身工程的造价进行评估和预测，能够更好辅助铁路建设项目的方案比选和投资控制^[80]。

3.2 安全监控

铁路安全监控体系通过先进的IoT技术，实现了对沿线设备监测、运行环境感知、异物入侵检测及故障诊断的全面整合。这一体系如同一张无形的安全网，全天候守护着铁路系统的每一个环节。利用感知设备和智能分析算法，实时监测轨道^[50-51]、桥梁^[52]、隧道^[81]等关键基础设施的状态，确保各项指标的稳定性和安全性。同时，敏锐捕捉任何可能的异物入侵^[43,55]，及时发出预警，防止意外事故的发生。通过对运行数据的深度挖掘和分析，能够准

确诊断出设备的潜在故障^[40,82-83]，为维修和保养工作提供科学依据。

3.3 行车调度

借助SRIoT的感知、定位和检测等模块，可以实时获取列车的位置、速度、运行状态等信息，结合铁路运输计划和实时路况，实现智能化的列车调度^[84]，优化列车运行图，提高铁路运输效率和准点率。

基于元强化学习的列车控制算法能够为列车控制提供实时通信和计算服务，提高列车运行效率^[85]。多列车运行态势微观推演方法以及基于虚拟编队模式的多列车运行态势宏观实时推演方法，能够实时提供列车运行调整方案和辅助驾驶策略^[86]。集成机器学习和多目标优化的列车碰撞能量管理策略，为了应对列车碰撞系统固有的复杂性对碰撞事件中能量的合理分配挑战，提供了一种高效且创新的方法^[87]。深度强化学习与整数规划模型相结合的列车智能调度调整方法为提升高速铁路系统在突发事件下的应急处置能力和运输组织效率提供了重要支撑^[88]。在恶劣天气和设备设施故障等突发事件造成列车运行晚点时，文献^[89]所提方法能够在不改变列车运行路径的前提下，通过调整高速列车行车顺序和到发时间，智能高效地恢复列车按图运行。

3.4 旅客服务

优质的旅客服务能够确保旅客的安全、舒适和便捷，提升出行体验。通过提供及时准确的信息咨询、合理的票务管理以及周到的站车服务，铁路系统能够建立起良好的旅客信任和忠诚度，进而促进铁路客运量的增长。

为了在客运服务产品设计时更好地满足旅客多样化的出行需求，文献^[90]在高铁企业客票收入不减少的前提下，以旅客的票价成本、旅行时间成本和出发时间偏差成本构成的广义出行成本最小化为目标，构建基于旅客多维出行需求的列车开行方案与票价联合优化模型。基于IoT的票务系统^[91]能够实现无纸化便捷出行，提升旅客进出站效率，整体改善出行体验，增强铁路客运吸引力。组合改进图像检索和基于词袋树的运动恢复结构算法，能够实现高速铁路旅客站内无源定位，提升旅客出行服务质量和运输效能^[92]。考虑列车超车和旅客路径选择行为，通过优化列车服务频率、运行区、停车模式、列车编队和列车顺序，调整出行时空网络的网络拓扑和链路属性（时间和容量），实现最小化系统生命周期成本和旅客总出行时间的目标^[93]。

3.5 货物运输

智能货运管理系统可以合理调配运力资源，优化运输路径，减少货物等待时间和运输成本，提高整体运输效率。不仅能够保障货物的安全，减少货损货差，增强客户信任，还能促进铁路运输与其他交通方式的协同作业^[94]，提升综合交通体系的运行效能，满足经济社会发展的多样化运输需求。

通过赋予每件货物“电子身份”，实现了从货物装车、运输途中到卸车交付全过程的货物运输透明化^[95]。通过构建铁路集装箱混合货物平衡装载布局优化模型，确保集装箱综合利用率最大化^[96]。利用考虑轨距修改的路线决策模型可以实现铁路超限货物运输路线的安全化、经济性^[97]。

AI技术在铁路物联网场景下的应用研究见表1。

表 1 AI技术在铁路物联网场景下的应用研究

AI技术	文献	应用场景	研究内容
机器学习	[80]	铁路建设	隧道洞身工程造价预测
	[42,50-53,82]	安全监控	轨道形态预测、风险评估、缺陷检测、故障诊断
	[85]	行车调度	列车控制
	[16]	旅客服务	客流量预测
深度学习	[56-57,78-79]	铁路建设	货运站选址、铁路线形优化设计、铁路纵断面设计
	[43-44,55,58,81,83]	安全监控	异物入侵检测、部件识别、隧道病害检测、故障诊断
	[84,87-88]	行车调度	列车智能驾驶与调度调整、列车碰撞能量管理
	[59,27]	旅客服务	客流量预测、车地间通信信号辅助预测

4 目前挑战

SRIoT作为现代交通系统的重要组成部分，正逐步展现出在提升铁路运输效率、保障行车安全、优化资源配置等方面的巨大潜力。然而在实际应用过程中，仍然面临着一系列难题和挑战。

4.1 安全问题

铁路沿线环境复杂多变，高温、低温、潮湿、风沙等恶劣自然条件易对设备硬件造成损坏，进而影响其正常运行。此外，设备的大规模部署也增加了管理难度，部分设备因固件版本老旧、漏洞未及时修复而面临安全风险。这些设备一旦遭受破坏、盗窃或恶意访问，不仅会导致数据泄露，还会对铁路安全构成严重威胁。

SRIoT的通信方式多样，但均存在潜在的安全隐患。铁路行业专网、无线通信网络、移动通信网络等通信方式在数据传输过程中，若采用开放的无线信道，则信号易受干扰和窃听。不法分子通过破解无线加密协议，可以窃取铁路运行关键数据，进而对行车安全构成威胁。在网络接入环节，若认证机制不完善，恶意终端可能伪装成合法设备接入网络，肆意篡改或拦截网络数据，破坏网络完整性和可用性。此外，铁路系统还面临着黑客攻击、病毒感染、拒绝服务攻击等多种网络攻击风险。

海量的铁路运行数据在采集、传输、存储和处理过程中也面临多重风险。在数据采集阶段，传感器精度偏差或故障可能产生错误数据，若未经有效校验即进入后续环节，将误导铁路运营决策，影响行车安全。数据传输过程中，网络安全漏洞可能导致数据泄露，涉及旅客信息、货物详情以及设备运行数据等敏感数据一旦泄露，将对个人隐私、企业商业机密乃至国家安全构成重大威胁。在数据存储方面，若防护不足，黑客可能突破防线篡改数据，同时鉴于铁路线路边界延展范围广，大多设备缺乏可靠的数据备份和恢复手段，一旦数据丢失或损坏，将带来巨大损失。

智能票务、列车运行监控、货运管理等应用系统若存在软件漏洞，非法窃听者可以利用这些漏洞获取应用程序的控制权或窃取数据。此外，终端设备可能会感染恶意软件，导致设备功能异常或数据泄露，进而影响整体安全性和稳定性。

总之，SRIoT在设备、通信、数据以及应用系统等方面均面临着多重挑战和技术风险。为了保障RIoT的安全稳定运行，需要不断加强技术研发与应用推广，完善安全防护机制，提高设备的管理水平，以应对日益复杂的安全威胁。

4.2 技术问题

传感器的精度与可靠性直接关系到数据质量的高低，是确保铁路设备状态监测与故障诊断准确性的基石。然而，铁路环境的复杂性和多变性为传感器的工作带来极大挑战。电磁干扰、温度变化等环境因素可能导致传感器测量数据出现偏差，这不仅会影响数据的准确性，还可能误导后续的决策和分析。此外，传感器之间的兼容性问题也是不容忽视的难题。在SRIoT中，可能会部署多种类型、来自不同厂家的传感器，这些传感器在数据格式、通信协议等方面存在差异，给数据的统一采集和分析带来了极大的困难。

除传感器本身的问题以外，数据的传输质量和实时性也面临着诸多挑战。铁路线路往往穿越复杂地形，如山区、隧道等，这些区域的信号覆盖难度大，可能导致设备无法及时、稳定地进行通信，不仅影响数据的实时传输，还可能造成数据的丢失或时延。同时，数据量的不断增加，对网络带宽和传输速率的要求也越来越高。现有的网络基础设施可能无法满足大量高清视频、实时监测数据等的传输需求，特别是在列车运行控制等对实时性要求极高的应用中，网络时延和抖动可能会严重影响控制指令的及时下达和执行。

此外，SRIoT需要处理的数据量巨大且类型多样，包括列车运行状态、设备健康监测、客流信息、环境数据等多个方面，这些数据的高效处理和分析对于提高铁路运营效率和安全性至关重要。现有的数据处理技术可能无法满足大规模数据的实时处理需求，数据分析算法的准确性和效率也有待提高。同时，海量的RIoT数据需要可靠、高效的存储和管理系统。

总之，SRIoT在传感器精度和可靠性、数据传输质量和实时性、数据处理和分析、数据存储和管理等方面都面临着诸多挑战。为了推动SRIoT的发展，需要不断探索新的技术和方法，确保充分发挥SRIoT在铁路运营中的重要作用，提高铁路运营的安全性和效率。

5 未来研究方向

5.1 技术融合

通过不同技术之间的深度协同，将推动铁路系统向更高效、更安全、更智能的方向发展，为铁路行业的数字化转型注入新的活力。

一方面，5G、6G等其他通信技术与SRIoT的融合将进一步深化，凭借5G的高带宽、低时延、大连接特性以及未来6G预期的超强性能，实现铁路系统海量设备超高速、精准同步的数据交互，为列车自动驾驶、远程实时操控等复杂场景提供坚实支撑。同时，IoT与AI、边缘计算的协同将越发紧密，边缘计算把部分数据处理和智能决策能力下沉至靠近数据源或用户的边缘节点，结合AI算法，可实现铁路设备故障的即时诊断、预测性维护，快速响应铁路运营中的突发状况，提升铁路系统的智能化应急处理能力和可靠性。

另一方面，“三算融合”作为一种新型混合计算系统，可以实现量子计算、超级计算、智能计算的算力互补，为SRIoT的发展注入新的活力。量子计算以其独特的并行计算能力和指数级增长的计算速度，在解决复杂问题方面具有显著优势。超级计算则能够处理大规模数据集，提供强大的计算能力。智能计算则通过机器学习和AI算法，实现数据的智能分析和预测。通过优化算法和模型，充分利用3种计算技术的优势，实现更高效的数据分析和决策支持。

5.2 智能化发展

通过AI在感知层、传输层、应用层的全面升级，可以构建一个高度自主、协同、高效的铁路系统，推动铁路系统向更自主、更智能、更高效的方向迈进。

在感知层，借助集成先进的AI算法，可以实现对数据爆炸和有限感知资源之间的有效平衡。在资源或数据集受限的条件下，结合先验知识和规则，可以进一步增强选择性感知能力，使得能够更加精准地识别和处理关键信息，同时降低不必要的资源消耗。在传输层，通过知识使能和数据驱动的方法，能够根据实时网络状况动态选择最佳路由路径，优化调度计划，从而提升通信效率。此外，还能在传输过程中实现数据的高效融合和压缩，减轻无线传输的负担，确保信息的流

畅传递。在应用层，通过本体建模和机器学习等技术，深入理解用户特征，实现数据驱动的AI服务。结合知识和数据驱动的AI方法，全面捕捉并分析用户需求，以便为用户提供更加个性化的服务体验。

5.3 安全防护体系

鉴于SRIoT面临的严峻安全挑战，构建纵深防御、动态协同的安全防护体系刻不容缓。通过整合监控、通信、控制、报警等多个子系统，实现信息的互联互通和集中管理。

采用一系列先进的加密算法和强化的身份认证机制，确保数据在传输和存储过程中的绝对安全，防止泄露与滥用。同时，构建网络监控和防御体系以实时监测网络流量和设备状态，迅速发现并有效应对潜在的网络攻击，确保网络环境安全无虞。并定期对系统和设备进行安全更新，及时修补已知漏洞，不断提升系统的整体安全性，以应对日益复杂的安全挑战。通过采取一系列严密的防范措施，防止设备被盗或遭受恶意破坏，确保铁路设备和基础设施的物理安全。同时，借助大数据和AI技术，实现对安全风险的精准识别和预警，以期在事故发生前及时采取措施，有效避免潜在的安全隐患。

5.4 绿色低碳

随着全球对环境保护意识的增强和“双碳”目标的提出，需要更加注重节能减排和环保技术的应用，以推动铁路系统向更加环保、高效、可持续发展的方向发展。

通过实时监测铁路设施运行状态，及时发现并解决潜在问题，减少能源浪费和碳排放；同时，利用智能调度系统优化列车运行计划，提高运输效率，进一步降低能耗。此外，可以采用太阳能、风能等可再生能源供电，推广低碳环保的列车车辆和配件，并通过智能控制系统优化列车设备能耗，实现节能减排。最近，可编程智能超表面的出现，也可一定程度降低基站的建设成本、增强信号质量并扩大基站的覆盖范围，提高铁路物联网和铁路系统的整体性能。

6 结束语

本文详细介绍了SRIoT的基本概念，研究讨论了SRIoT的体系架构：从感知、通信、数据处理和

安全4个层面重点分析探讨涉及的关键技术; 围绕建设、安全、行车、旅服、货运5个角度讨论SRIoT的应用场景; 进一步地, 以安全和技术为切入点, 阐述了SRIoT目前存在的问题; 最后, 着眼技术融合、智能化发展、安全防护体系和绿色低碳, 探讨了SRIoT的未来研究方向。

参考文献:

- [1] SUN P, SHEN S, WAN Y, et al. A survey of IoT privacy security: architecture, technology, challenges, and trends[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(21):34567-34591.
- [2] WU C, SHENG J, WANG Y, et al. Spectrum situation awareness for future railway IoT: challenges, opportunities and key technologies[J]. *IEEE Network*, 2022, 37(3): 154-161.
- [3] MA Y, MA G, WANG N, et al. OTFS-TSMA for massive Internet of things in high-speed railway[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 21(1): 519-531.
- [4] QIN Y, CAO Z, SUN Y, et al. Research on active safety methodologies for intelligent railway systems[J]. *Engineering*, 2023, 27: 266-279.
- [5] TIAN J, ZHU L, YU F R, et al. Optimizing edge resources in intelligent railway construction: a two-level game approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(6): 7589-7602.
- [6] 于馨博, 张舒航, 张泓亮. 面向低空物联网的云-边协同演进模型与通信范式[J]. *物联网学报*, 2024, 8(3): 76-90.
YU X B, ZHANG S H, ZHANG H L. An edge-cloud collaborative model evolution and communication paradigm in Internet of low-altitude UAV[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2024, 8(3): 76-90.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. 物联网参考体系结构: GB/T 33474-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Internet of things reference architecture: GB/T 33474-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [8] 朱力, 龚泰源, 梁豪, 等. 边缘智能在轨道交通中的应用: 前景与展望[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(4): 1514-1528.
ZHU L, GONG T Y, LIANG H, et al. Application of edge intelligence in rail transit: prospects and future outlook[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(4): 1514-1528.
- [9] SHAIKH M Z, AHMED Z, CHOWDHRY B S, et al. State-of-the-art wayside condition monitoring systems for railway wheels: a comprehensive review[J]. *IEEE Access* 2023, 11:13257-13279.
- [10] 张向民, 高亮, 崔日新, 等. 青藏铁路格拉段无缝线路状态指标试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(5): 25-31+36.
ZHANG X M, GAO L, CUI R X, et al. Experimental research on the state index of CWR in Golmud-Lhasa section of Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(5): 25-31+36.
- [11] XU H, WANG W, LI F, et al. Railway slope monitoring based on dual-parameter FBG sensor[J]. *Photonic Sensors*, 2024, 15(1): 250121-250134.
- [12] SAL S M, CASTILLO M J M, MORENO-NAVARRO F, et al. Smart rail pads for the continuous monitoring of sensed railway tracks: sensors analysis[J]. *Automation in Construction*, 2021, 132: 103950-103962.
- [13] 刘正勇, LIN HTEIN, 刘繁, 等. 特种微结构光纤振动传感器及其铁路监测应用[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(8): 63-70.
LIU Z Y, LIN H, LIU Y, et al. Special microstructured optical fiber based vibration sensor and its application in railway monitoring[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(8): 63-70.
- [14] PANG Z Y, TAM K W, HUANG G L, et al. Wireless train detection based on null-filled UHF RFID reader antenna for communications-based train control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(3):3516-3525.
- [15] 张辰东, 王兆瑞, 金声震, 等. 基于SINS/RFID的隧道列车高精度定位方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2022, 48(4): 632-638.
ZHANG C D, WANG Z R, JIN S Z, et al. High-precision positioning method based on SINS/RFID for trains in tunnel[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 48(4): 632-638.
- [16] ASAD S M, AHMAD J, HUSSAIN S, et al. Mobility prediction-based optimisation and encryption of passenger traffic-flows using machine learning[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2629-2652.
- [17] GONG X, CHEN X, ZHONG Z, et al. Enhanced few-shot learning for intrusion detection in railway video surveillance[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 23(8): 11301-11313.
- [18] HUANG H, ZHAO G, BO Y, et al. Railway intrusion detection based on refined spatial and temporal features for UAV surveillance scene[J]. *Measurement*, 2023, 211: 112602-112621.
- [19] LI C, XIE Z, QIN Y, et al. A multi-scale image and dynamic candidate region-based automatic detection of foreign targets intruding the railway perimeter[J]. *Measurement*, 2021, 185: 109853-109865.
- [20] ZHOU Y, CHEN Q, WANG R, et al. Onboard train localization based on railway track irregularity matching[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-13.
- [21] MIKHAYLOV D, AMATETTI C, POLONELLI T, et al. Toward the future generation of railway localization exploiting RTK and GNSS[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-10.
- [22] MOHAMED E M, FOU DA M M. OTFS-based proactive dynamic UAV positioning for high-speed train coverage[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5:5718-5734.
- [23] 莫志松, 安鸿飞. 新型列控系统列车综合自主定位技术研究[J]. *铁道学报*, 2022, 44(1): 56-64.
MO Z S, AN H F. Research on comprehensive autonomous positioning technology of new train control system[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(1): 56-64.

- [24] YANG H, DONG S Q, XIE C H. High-speed train positioning based on a combination of Beidou navigation, inertial navigation and an electronic map[J]. *Science China Information Sciences*, 2023, 66(7): 172207-172222.
- [25] 王小敏, 雷筱, 张亚东. 基于改进自适应IMM算法的高速列车组合定位[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(3): 817-825.
WANG X M, LEI X, ZHANG Y D. Combined positioning of high-speed train based on improved adaptive IMM algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(3): 817-825.
- [26] CHEN R, LONG W X, MAO G, et al. Development trends of mobile communication systems for railways[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 3131-3141.
- [27] 李翠然, 张泽鹏, 谢健骊. 基于LSTM动态波束赋形的高速列车越区切换算法[J]. *铁道学报*, 2023, 45(10): 78-86.
LI C R, ZHANG Z P, XIE J L. Handover algorithm based on LSTM dynamic beamforming for high-speed train[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(10): 78-86.
- [28] 谢健骊, 李琳, 张泽鹏, 等. RIS辅助D2D通信网络资源分配算法[J]. *西南交通大学学报*, 2025: 1-9.
XIE J L, LI L, ZHANG Z P, et al. Resource allocation algorithm for RIS-assisted D2D communication network[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2025: 1-9.
- [29] 张泽鹏, 李翠然, 吴昊, 等. 基于列车先验信息的RIS-MIMO系统鲁棒波束成形算法[J]. *通信学报*, 2024, 45(5): 29-43.
ZHANG Z P, LI C R, WU H, et al. Robust beamforming algorithm for RIS-MIMO system based on train prior information [J]. *Journal on Communications*, 2024, 45(5): 29-43.
- [30] 李毅, 蔺伟. NB-IoT物联网技术在铁路中的应用研究[J]. *铁道通信信号*, 2019, 55(S1): 29-33.
LI Y, LIN W. Research on application of NB-IoT technology in railway [J]. *Railway Signalling & Communication*, 2019, 55(S1): 29-33.
- [31] ZHAO Y, YU X, CHEN M, et al. Continuous monitoring of train parameters using IoT sensor and edge computing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(14): 15458-15468.
- [32] 张嘉驰, 刘留, 周涛, 等. 智能高速铁路中基于低轨卫星网络的通信关键技术研究[J]. *铁道学报*, 2024, 46(8): 69-77.
ZHANG J C, LIU L, ZHOU T, et al. Research on key communication technologies of intelligent HSR based on LEO satellite networks[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2024, 46(8): 69-77.
- [33] 杜宇, 钟昊, 李明春. 基于高通量卫星的铁路应急指挥通信系统[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(S1): 187-191.
DU Y, ZHONG H, LI M C. Research on railway emergency command communication system based on high-throughput satellite[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(S1): 187-191.
- [34] MUNIER F, XIONG Z, SHREEVASTAV R, et al. Positioning of RedCap devices in 5G networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(8): 110-116.
- [35] 匡俊攀, 赵畅, 杨柳, 等. 一种基于深度学习的异常数据清洗算法[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(2): 507-513.
KUANG J Q, ZHAO C, YANG L, et al. An outlier cleaning algorithm based on deep learning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(2): 507-513.
- [36] NASSRA I, CAPELLA J V. Data compression techniques in IoT-enabled wireless body sensor networks: a systematic literature review and research trends for QoS improvement[J]. *Internet of Things*, 2023, 23: 100806-100829.
- [37] CHEN X, YU Q, DAI S, et al. Deep reinforcement learning for efficient IoT data compression in smart railroad management[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 11(15): 25494-25504.
- [38] ABADI E I Y, SAMENDI M K, YAGHINI M. Analysis of the relationship between geometric parameters of railway track and twist failure by using data mining techniques[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 143: 106862-106883.
- [39] 李鑫, 史天运, 常宝, 等. 基于优化的MsEclat算法的铁路机车事故故障关联规则挖掘[J]. *中国铁道科学*, 2021, 42(4): 155-165.
LI X, SHI T Y, CHANG B, et al. Association rule mining for railway locomotive accident and fault based on optimized MsEclat algorithm[J]. *China Railway Science*, 2021, 42(4): 155-165.
- [40] QIAN K, GAO S, YU L. Marginal frequent itemset mining for fault prevention of railway overhead contact system[J]. *ISA Transactions*, 2022, 126: 276-287.
- [41] FA H, SHUAI B, YANG Z, et al. Mining the accident causes of railway dangerous goods transportation: a logistics-DT-TFP based approach[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2024, 195: 107421-107452.
- [42] PIRES A C, VIANA M C A, SCARAMUSSA L M, et al. Measuring vertical track irregularities from instrumented heavy haul railway vehicle data using machine learning[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 127: 107191-107216.
- [43] ZHANG Z, ZAMAN A, XU J, et al. Artificial intelligence-aided railroad trespassing detection and data analytics: methodology and a case study[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 168: 106594-106615.
- [44] SHAIKH M Z, AHMED Z, BARO E N, et al. Deep learning based identification and tracking of railway bogie parts[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 107: 533-546.
- [45] ALZOUBI Y I, MISHRA A, TOPCU A E. Research trends in deep learning and machine learning for cloud computing security[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2024, 57(5): 132-156.
- [46] 邓桦, 宋甫元, 付玲, 等. 云计算环境下数据安全与隐私保护研究综述[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(4): 1-10.
DENG H, SONG F Y, FU L, et al. A review of data security and privacy preserving in cloud computing environment[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2022, 49(4): 1-10.
- [47] CHANG Z, LIU S, XIONG X, et al. A survey of recent advances in edge-computing-powered artificial intelligence of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(18): 13849-13875.
- [48] GUO Q, XU Z, YUAN J, et al. Cloud-edge collaboration-based task offloading strategy in railway IoT for intelligent detection[J]. *Wireless Networks*, 2024: 1-16.

- [49] 贾利民, 陈熙元, 马小平, 等. 基于云边交互机制的自主式高速铁路防灾系统架构[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(5): 165-176.
JIA L M, CHEN X Y, MA X P, et al. Architecture of autonomous disaster prevention system of high-speed railway based on collaborative cloud and edge mechanism[J]. China Railway Science, 2022, 43(5): 165-176.
- [50] RAMOS A, CORREIA A G, NASROLLAHI K, et al. Machine learning models for predicting permanent deformation in railway tracks[J]. Transportation Geotechnics, 2024: 101289-101307.
- [51] WANG X, LIU X, BIAN Z. A machine learning based methodology for broken rail prediction on freight railroads: a case study in the United States[J]. Construction and Building Materials, 2022, 346: 128353-128376.
- [52] HUANG Y, HE J, ZHU Z. Rapid assessment of seismic risk for railway bridges based on machine learning[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2024, 24(6): 2450056-2450074.
- [53] SRESAKOOLCHAI J, KAEWUNRUEN S. Railway defect detection based on track geometry using supervised and unsupervised machine learning[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(4): 1757-1767.
- [54] 黄自力, 蔡小强, 金荣森, 等. 结合更新过程与粒子群优化的BP神经网络铁路物资预测模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2024.
HUANG Z L, CAI X Q, JIN R S, et al. The railway material prediction model based on BP neural network combined with renewal process and particle swarm optimization[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024.
- [55] SONG X, SONG H, WANG H, et al. Deep learning-based railway foreign object intrusion intelligent perception using attention-aggregated semantic segmentation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024: 1-11.
- [56] 郑倩, 甘蜜, 姚竹, 等. 面向高速铁路货运站选址的深度学习模型研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(6): 36-45.
ZHENG Q, GAN M, YAO Z, et al. Research on deep learning model for location of high-speed railway freight stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 36-45.
- [57] GAO T, LI Z, GAO Y, et al. A deep reinforcement learning approach to mountain railway alignment optimization[J]. Compute-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(1): 73-92.
- [58] 王卫东, 王梦迪, 胡文博, 等. 基于集成深度学习的钢轨表面损伤精细化分割[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(7): 27-32+39.
WANG W D, WANG M D, HU W B, et al. Refinement segmentation of rail surface damage based on integrated deep learning algorithms[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(7): 27-32+39.
- [59] LI B, GUO T, LI R, et al. Self-adaptive predictive passenger flow modeling for large-scale railway systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(16): 14182-14196.
- [60] ZHU W T, LIN J. Generating correlated digital certificates: framework and applications[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016, 11(6): 1117-1127.
- [61] MALANI S, SRINIVAS J, DAS A K, et al. Certificate-based anonymous device access control scheme for IoT environment[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 9762-9773.
- [62] IBADAH N, BENAVENTE P C, PAHL M O. Securing the future of railway systems: a comprehensive cybersecurity strategy for critical on-board and track-side infrastructure[J]. Sensors, 2024, 24(24): 8218-8240.
- [63] ALLAMI A, NICEWARNER T, GOSS K, et al. Oblivious and distributed firewall policies for securing firewalls from malicious attacks[J]. Computers & Security, 2025, 150: 104201-104224.
- [64] BAGHERI S, SHAMELI S A. Dynamic firewall decomposition and composition in the cloud[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 15: 3526-3539.
- [65] 吴昊, 郝佳佳, 卢云龙. 物联网场景下基于蜜分的分布式网络入侵检测系统研究[J]. 通信学报, 2024, 45(1): 106-118.
WU H, HAO J J, LU Y L. Research on distributed network intrusion detection system for IoT based on honeyfarm[J]. Journal on Communications, 2024, 45(1): 106-118.
- [66] LEE C Y, LIN C H, CHANG Z L, et al. Joint resource allocation and intrusion prevention system deployment for edge computing[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2024, 17(5): 2502-2515.
- [67] ALI S, LI Q, YOUSAFZAI A. Blockchain and federated learning-based intrusion detection approaches for edge-enabled industrial IoT networks: a survey[J]. Ad Hoc Networks, 2024, 152: 103320-103350.
- [68] LIU X, WANG J, WANG M, et al. Improved LTE-R access authentication scheme based on blockchain and secgear[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(6): 10537-10550.
- [69] ZHAO R R, LI C R, XIE J L, et al. Handoff algorithm of high speed railway wireless communication based on CNN-WaveNet[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 1-11.
- [70] 孙僊泽, 周福才, 李宇溪, 等. 基于可搜索加密机制的数据库加密方案[J]. 计算机学报, 2021, 44(4): 806-819.
SUN X Z, ZHOU F C, LI Y X, et al. A database encryption scheme based on searchable encryption[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(4): 806-819.
- [71] LI Y, LI Z, YANG B, et al. Algebraic signature-based public data integrity batch verification for cloud-IoT[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2023, 11(3): 3184-3196.
- [72] 梁秀波, 吴俊涵, 赵昱, 等. 区块链数据安全管理和隐私保护技术研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(1): 1-15.
LIANG X B, WU J H, ZHAO Y, et al. Review of blockchain data security management and privacy protection technology research[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2022, 56(1): 1-15.
- [73] XU Y, XU G, LIU Y, et al. A survey of the fusion of traditional data security technology and blockchain[J]. Expert Systems with Applications, 2024: 124151-124168.
- [74] LI H, GE L, TIAN L. Survey: federated learning data security and privacy-preserving in edge-Internet of things[J]. Artificial Intelli-

- gence Review, 2024, 57(5): 130-149.
- [75] 肖雄, 唐卓, 肖斌, 等. 联邦学习的隐私保护与安全防御研究综述[J]. 计算机学报, 2023, 46(5): 1019-1044.
- XIAO X, TANG Z, XIAO B, et al. A survey on privacy and security issues in federated learning[J]. Chinese Journal of Computers, 2023, 46(5): 1019-1044.
- [76] WANG Y, WANG Z, MA T, et al. Research on the realization path of railway intelligent construction based on system engineering[J]. Sustainability, 2022, 14(11): 6945-6963.
- [77] 金晶, 李宗昊, 朱亮, 等. BP神经网络在铁路建设风险评估中的应用[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3): 103-109.
- JIN J, LI Z H, ZHU L, et al. Application of BP neural network in risk evaluation of railway construction[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3): 103-109.
- [78] HE Q, GAO T, GAO Y, et al. A bi-objective deep reinforcement learning approach for low-carbon-emission high-speed railway alignment design[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2023, 147: 104006-104023.
- [79] 缪鹏, 戴炎林, 高鸿剑. 基于深度强化学习的铁路纵断面智能设计模型研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(9): 102-110.
- MIAO K, DAI Y L, GAO H J. Study on deep reinforcement learning model for railway vertical alignment design[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(9): 102-110.
- [80] 刘少非, 侯大山. 基于支持向量机的铁路隧道洞身工程造价预测[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(5): 108-113.
- LIU S F, HOU D S. Construction cost prediction of main tunnel in railway tunnel based on support vector machine[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(5): 108-113.
- [81] ZHANG H, WU Y, CHENG J, et al. A deep learning-based surrogate model for probabilistic analysis of high-speed railway tunnel crown settlement in spatially variable soil considering construction process[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 134: 108752-108771.
- [82] 孙波, 孟庆虎, 何晖. 基于改进混合蛙跳算法优化SVM的道岔故障诊断[J]. 铁道学报, 2024, 46(7): 81-90.
- SUN B, MENG Q H, HE H. Turnout fault diagnosis based on improved shuffled frog leaping algorithm to optimize SVM model[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(7): 81-90.
- [83] 杨勇, 可婷, 胡启正, 等. 基于CNN-LSTM-Attention的ZPW-2000A轨道电路故障诊断方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2025.
- YANG Y, KE T, HU Q Z, et al. Fault diagnosis of ZPW-2000A track circuit based on CNN-LSTM-Attention[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025.
- [84] 徐凯, 涂永超, 徐文轩, 等. 自适应多智能体算法优化深度网络的列车智能驾驶[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10): 2820-2832.
- XU K, TU Y C, XU W X, et al. Intelligent train operation based on adaptive multi-agent algorithm optimization for deep network[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(10): 2820-2832.
- [85] ZHU L, GONG T, WEI S, et al. Collaborative train and edge computing in edge intelligence based train autonomous operation control systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(9): 11991-12004.
- [86] 王荣笙, 袁志明, 闫璐, 等. 高速铁路多列车运行态势推演方法[J]. 自动化学报, 2025.
- WANG R S, YUAN Z M, YAN L, et al. Deductive approach of multi-train operation situation for high-speed railway[J]. Acta Automatica Sinica, 2025.
- [87] ZHENG S, JING L, LIU K, et al. Crash energy management optimization of high-speed trains by machine learning methods[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 270: 109108-109125.
- [88] 吴卫, 阴佳腾, 陈照森, 等. 基于深度强化学习DDDQN的高速列车智能调度调整方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(4): 1298-1308.
- WU W, YIN J T, CHEN Z S, et al. Intelligent rescheduling optimization method of high-speed railway based on deep reinforcement learning DDDQN[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4): 1298-1308.
- [89] 刘辉, 代学武, 崔东亮, 等. 基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1581-1591.
- LIU H, DAI X W, CUI D L, et al. Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1581-1591.
- [90] 孙国锋, 景云, 李和璧, 等. 基于旅客多维出行需求的列车开行方案与票价联合优化方法[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(6): 224-235.
- SUN G F, JING Y, LI H B, et al. Joint optimization method of train line planning and ticket pricing based on multi-dimensional travel demand of passengers[J]. China Railway Science, 2024, 45(6): 224-235.
- [91] ZHAN Y, YUAN F, SHI R, et al. PriTKT: a blockchain-enhanced privacy-preserving electronic ticket system for IoT devices[J]. Sensors, 2024, 24(2): 496-517.
- [92] 戴智丞, 李得伟, 郭佳. 高速铁路旅客站内无源定位框架研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(6): 212-223.
- DAI Z C, LI D W, GUO J. Research on passive in-station positioning framework for passengers of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2024, 45(6): 212-223.
- [93] GAO Y, JIA C, WANG Z, et al. A cost-effective approach for the integrated optimization of line planning and timetabling in an urban rail transit line[J]. Applied Sciences, 2024, 14(14): 2076-3417.
- [94] 段力伟, 杨航, 陈坚. 考虑枢纽延误的集装箱公铁联运多目标路径优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 275-285.
- DUAN L W, YANG H, CHEN J. Multi-objective path optimization of container road-rail intermodal transportation considering hub delays[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(6): 275-285.
- [95] CHEN Y T, SUN E W, CHANG M F, et al. Pragmatic real-time logistics management with traffic IoT infrastructure: big data pre-

dictive analytics of freight travel time for Logistics 4.0[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 238: 108157-108180.

- [96] 张英贵, 姚瓊华, 高全, 等. 铁路集装箱混合货物平衡装载布局优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 214-222. ZHANG Y G, YAO Y H, GAO Q, et al. Optimization model and algorithm of balanced loading layout of railway container mixed goods[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 214-222.

- [97] ZHANG Y, LIU J, AN M, et al. A gauge modification-based railway out-of-gauge freight transportation route decision-making methodology[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 68: 181-195.

[作者简介]



谢健骊(1972-), 男, 博士, 兰州交通大学电子与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为高速铁路智能通信、认知无线电和铁路物联网技术等。



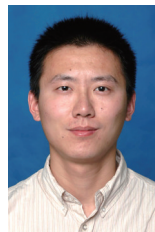
张泽鹏(1998-), 男, 兰州交通大学电子与信息工程学院博士生, 主要研究方向为铁路物联网、智能超表面、轨道交通通信等。



藺伟(1976-), 男, 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所研究员、硕士生导师, 主要研究方向为铁路专用通信、5G-R、调度指挥和列车运行控制通信技术、铁路物联网应用技术等。



马君(1982-), 女, 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所正高级工程师, 主要研究方向为铁路专用移动通信技术、物联网通信技术等。



欧阳朔(1980-), 男, 北京铁路通信信号运维中心正高级工程师, 主要研究方向为铁路无线通信、铁路物联网技术等。



屈毅(1977-), 男, 北京铁路通信信号运维中心正高级工程师, 主要从事铁路无线通信、数据通信、网络安全、物联网、云技术等方面的技术和运维研究工作。