

网络工程技术赋能高速铁路建设低碳管理的研究进展与展望

张 政^{1*}, 彭宇凡², 郑文绪³

¹鲁南高速铁路有限公司, 山东 济南

²济南大学信息科学与工程学院, 山东 济南

³南昌交通学院艺术与体育学院, 江西 南昌

收稿日期: 2026年8月20日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月20日

摘 要

在“双碳”目标、交通强国和数字交通建设持续推进的背景下, 高速铁路工程管理正由传统的质量、进度与成本控制, 向兼顾能源利用效率、资源节约和碳排放约束的全过程低碳管理转变。高速铁路建设具有线路跨度大、工点分散、施工机械和临时用能种类多、材料供应链长以及参建主体复杂等特点, 传统依赖人工填报和阶段汇总的管理方式难以支撑碳数据的实时采集、准确核算与动态优化。本文以高速铁路建设阶段为主要边界, 系统梳理建筑材料生产与运输、施工机械、临时用电、土建结构和废弃物处置等碳排放研究进展, 重点综述物联网、无线传感器网络、5G/5G-R、低功耗广域网、边缘计算、云计算、软件定义网络、BIM、数字孪生和网络安全等网络工程技术在低碳管理中的应用。在此基础上, 横向比较5G/5G-R、NB-IoT、LoRaWAN、Wi-Fi 6/6E以及光纤/工业以太网的成本、功耗、部署难度、可靠性与典型应用边界, 并针对隧道、桥梁和梁场等场景提出组合选型建议。进一步提出由感知层、网络层、边缘计算层、平台层和应用层构成的融合架构, 并从技术、经济和管理三个层面系统分析工程落地挑战, 讨论全寿命周期成本、投资回报、合同能源管理、平台服务化以及跨组织数据治理与激励机制。综述表明, 网络工程能够将分散的能源、材料、设备和工程量数据转化为可计算、可追溯和可决策的碳数据, 但其规模化应用仍取决于通信技术的场景适配、经济可行性与组织协同能力。未来应加强碳数据标准体系、云边端协同、数字孪生与人工智能融合、绿色网络及可信碳数据管理研究, 为高速铁路建设主体开展精细化低碳管理提供技术与管理参考。

关键词

高速铁路建设, 低碳管理, 网络工程, 物联网, 边缘计算, 数字孪生, 网络安全

Research Progress and Prospects of Network Engineering Technologies Empowering Low-Carbon Management in High-Speed Railway Construction

*通讯作者。

文章引用: 张政, 彭宇凡, 郑文绪. 网络工程技术赋能高速铁路建设低碳管理的研究进展与展望[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(9): 1495-1508. DOI: 10.12677/aep.2026.169151

Zheng Zhang^{1*}, Yufan Peng², Wenxu Zheng³¹Lunan High-Speed Railway Co., Ltd., Jinan Shandong²School of Information Science and Engineering, University of Jinan, Jinan Shandong³College of Art and Physical Education, Nanchang Jiaotong Institute, Nanchang Jiangxi

Received: August 20, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 20, 2026

Abstract

Driven by China's "carbon-peaking and carbon-neutrality" goals, the development of a strong transportation system, and the digital transformation of transport infrastructure, high-speed railway construction management is shifting from conventional control of quality, schedule and cost toward process-oriented low-carbon management that takes into account energy efficiency, resource conservation, and carbon emission constraints. High-speed railway projects feature long corridors, dispersed work sites, diverse equipment, large temporary energy demand, long material supply chains and multiple stakeholders, making the traditional management approach relying on manual reporting and stage-by-stage summary insufficient for real-time acquisition, accurate calculation, and dynamic optimization of carbon data. Focusing on the construction stage, this review summarizes carbon emissions from material production and transportation, construction machinery, temporary electricity, civil works and waste treatment, and reviews the applications of the Internet of Things, wireless sensor networks, 5G/5G-R, low-power wide-area networks, edge and cloud computing, software-defined networking, BIM, digital twins and cybersecurity. A dedicated comparative analysis is further conducted for 5G/5G-R, NB-IoT, LoRaWAN, Wi-Fi 6/6E and fiber/industrial Ethernet in terms of cost, power consumption, deployment difficulty, reliability and application boundaries, with scenario-specific recommendations for tunnels, bridges and precast yards. A five-layer architecture comprising perception, networking, edge computing, platform and application layers is proposed. The implementation challenges are then examined from technical, economic and managerial perspectives, including life-cycle cost, return on investment, energy-performance contracting, platform-as-a-service models, cross-organizational data governance and incentive mechanisms. The review indicates that network engineering can transform fragmented energy, material, equipment and quantity data into computable, traceable and actionable carbon information, but large-scale deployment depends on scenario-appropriate communications, economic feasibility and organizational coordination. Future research should strengthen carbon-data standardization, cloud-edge-end collaboration, the integration of digital twins and artificial intelligence, green networking, and trusted carbon-data management, thereby providing technical and managerial guidance for stakeholders to implement refined low-carbon management in high-speed railway construction.

Keywords

High-Speed Railway Construction, Low-Carbon Management, Network Engineering, Internet of Things, Edge Computing, Digital Twin, Cybersecurity

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

高速铁路在提升区域可达性、优化综合交通结构和促进经济社会联系方面发挥着重要作用，但其建

设过程并非“天然低碳”。线路工程通常包含路基、桥梁、隧道、轨道、站房、牵引供电和通信信号等多个专业，钢材、水泥、混凝土等材料生产，大型设备燃油消耗，施工临时用电以及材料长距离运输均会产生显著的直接或间接碳排放。交通基础设施环境评价若只关注车辆或运营阶段，容易低估基础设施和供应链的影响[1]-[3]。高速铁路生命周期研究进一步表明，建设阶段的材料生产和土建结构往往是重要排放来源，而客流密度、电力结构和运输方式替代比例决定了建设排放能否在运营期得到抵消[4]-[12]。

政策层面，《交通强国建设纲要》提出“构建安全、便捷、高效、绿色、经济的现代化综合交通体系”[13]；《2030年前碳达峰行动方案》明确“将绿色低碳理念贯穿于交通基础设施规划、建设、运营和维护全过程，降低全生命周期能耗和碳排放”[14]；《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》要求“推动交通运输绿色低碳转型”，并提出“提升交通运输数字化智能化发展水平”[15]。《绿色交通“十四五”发展规划》[16]、《数字交通“十四五”发展规划》[17]和《减污降碳协同增效实施方案》[18]则作为绿色交通、数字交通与减污降碳协同推进的专项政策依据。在上述政策背景下，高速铁路建设低碳管理不能停留在完工后的碳排放核算，而应形成覆盖“数据感知-网络传输-实时计算-综合分析-管理反馈”的过程控制机制。网络工程涉及网络体系结构、通信协议、无线接入、边缘与云计算、网络管理及安全防护，能够为分散工点的设备、能源、材料和环境数据提供可靠连接，是高铁工程低碳管理由统计化走向实时化和智能化的重要基础。

现有文献分别在高速铁路生命周期评价、铁路物联网、BIM、数字孪生和智能施工等领域形成了较丰富的成果，但直接面向“网络工程技术如何支撑高速铁路建设低碳管理”的综合研究仍相对分散。本文以高速铁路建设阶段为重点，归纳碳排放来源与核算研究，梳理网络工程关键技术及其适用场景，并进一步建立“技术横向比较-场景选型-融合架构-技术/经济/管理挑战-实施路径”的综述框架，以增强技术选型的可操作性和工程实施的现实指导性。

2. 高速铁路建设低碳管理的内涵与综述框架

2.1. 概念界定与核算边界

高速铁路建设低碳管理是指在满足安全、质量、工期和投资目标的前提下，对建设活动中的温室气体排放进行识别、计量、监测、评价和优化，并通过技术与管理措施降低单位工程量或单位功能产出的碳排放。生命周期评价标准通常将研究划分为目标与范围确定、清单分析、影响评价和结果解释等阶段[19][20]；产品碳足迹和温室气体核算标准则强调组织边界、数据质量、排放因子和可追溯性[21][22]。结合铁路工程特点，建设阶段可包括材料生产、材料与设备运输、现场施工、临时设施运行、施工废弃物处理及必要的前期工程。

碳排放核算的基本逻辑是将活动数据与相应排放因子相乘并求和，即设备燃油量、施工用电量、材料用量、运输周转量和废弃物处理量分别与对应排放因子关联。与建筑工程碳排放计算标准[23]相比，高速铁路还具有线性工程距离长、桥隧比变化大、施工组织跨区域和临时供能方式多样等特点，因此需要建立面向路基、桥梁、隧道、轨道、站房和四电工程的分层核算结构。

2.2. 主要排放源与数据对象

从工程活动看，高速铁路建设碳排放主要来源于四类对象：一是钢材、水泥、混凝土、轨道构件和电缆等材料的隐含碳；二是挖掘机、装载机、起重机、运梁车、隧道施工设备等机械燃油或用电；三是拌和站、梁场、项目驻地、通风排水和照明等临时用能；四是原材料、预制构件、土石方和弃渣的运输与处置。国际和中国案例研究普遍指出，钢材和混凝土等材料生产、土建结构及运输是建设阶段的重要影响环节[3][5]-[10]。

这些排放源对应的网络化数据对象包括智能电表读数、油耗与发动机工况、设备定位和工作时长、材料批次与供应商信息、车辆轨迹与载重、BIM 工程量、施工进度、气象环境和区域电力排放因子。低碳管理的核心不只是采集更多数据，而是建立设备身份、时间戳、空间位置、工程构件和碳因子之间的关联，使碳排放能够定位到具体工区、工序、机械和构件。

2.3. 综述资料与分析思路

如表 1 所示，本文以国家政策、国内外标准和公开发表的代表性论文为资料基础，围绕“高速铁路/铁路建设、生命周期评价、碳排放、物联网、5G-R、LPWAN、Wi-Fi 6、边缘计算、BIM、数字孪生、软件定义网络和网络安全”等主题进行归纳。分析遵循四个层次：首先总结高速铁路建设碳排放的来源、核算方法和减排重点；其次梳理网络工程技术解决数据采集、传输、计算和安全问题的研究进展，并从成本、功耗、部署难度、可靠性和场景适配性等维度进行横向比较；再次提出面向典型工点的融合架构与应用模式；最后从技术、经济和管理三个层面分析规模化实施障碍，并提出投资评价、商业模式和组织协同建议。

Table 1. Main review dimensions of low-carbon management for high-speed railway construction
表 1. 高速铁路建设低碳管理的主要综述维度

研究维度	主要对象	关键数据	网络工程支撑	代表文献
材料与结构	钢材、水泥、混凝土、轨道及四电材料	材料用量、供应商、运输距离、排放因子	RFID/二维码、供应链数据接口、BIM 关联	[3] [5]-[10]
机械与临时用能	施工机械、拌和站、梁场、通风排水	油耗、电量、工况、怠速、负荷曲线	传感器、5G/LPWAN、边缘计算	[24]-[32]
运输与施工组织	材料车辆、构件配送、土石方调配	轨迹、载重、里程、等待时间	北斗定位、无线网络、调度算法	[6] [11] [29]-[33]
数字化管理	构件、工序、进度、成本与碳排放	BIM 工程量、实时状态、碳指标	云平台、数字孪生、人工智能	[34]-[39]
数据安全	设备身份、碳台账、管理平台	访问日志、签名、权限、审计记录	分区分域、加密、等级保护、工业安全	[40]-[42]

3. 高速铁路建设低碳管理研究进展

3.1. 建筑材料与土建结构碳排放

高速铁路基础设施的前期碳排放具有明显的“材料锁定”特征。加州高速铁路研究表明，材料生产在基础设施建设温室气体排放中占主导，材料运输也具有不可忽视的贡献[3]。中国高速铁路生命周期评价显示，钢材、水泥、混凝土、路基和轨道系统的环境影响与线路结构形式密切相关[5]-[7]。京津城际相关研究从碳、水、土地和材料足迹等角度说明，单纯统计现场燃油和用电无法覆盖供应链排放[6] [7]。法国 Tours-Bordeaux 线路的研究进一步指出，钢轨、路基和大型土建结构是多类环境影响的重要贡献者[8]。

因此，低碳管理应前移至设计和采购阶段。设计阶段需要比较桥隧比、结构形式、材料强度等级、预制化方案和耐久性；采购阶段应记录供应商工艺、产品碳足迹、运输距离和再生材料比例；施工阶段则应把材料批次与 BIM 构件进行绑定。网络系统可以通过二维码、RFID 和数据接口形成“供应商 - 运输车辆 - 现场仓库 - 工程构件”的追踪链，为材料隐含碳的分配、核验和后续审计提供依据。

3.2. 施工机械、临时设施与现场能源

施工机械碳排放具有设备类型多、负荷波动大和空间分散的特点。传统台班定额适合预算估算，但

难以反映机械怠速、空载、低效率作业和维护状态。通过车载终端采集发动机转速、燃油流量、作业时长和位置,可构建设备实际能耗基线;通过智能电表和分项计量,可识别拌和站、梁场、隧道通风排水、施工照明和项目驻地的高能耗时段。实时数据还可用于判断施工组织变更是否真正带来减排,而不是仅将排放从现场转移至供应链或电力系统。

在隧道施工等场景中,安全约束高于单纯节能目标,因此低碳控制必须与人员定位、环境监测和设备状态联动。例如风机功率可根据作业人数、机械位置和污染物浓度动态调整,但系统必须设置安全下限和本地失联保护。边缘计算能够在工区就近处理高频数据和执行异常预警,减少所有原始数据持续上传带来的带宽和云端能耗压力[26] [27]。

3.3. 运输组织与供应链管理

高速铁路线路长,梁片、钢筋、水泥、砂石料和施工设备运输频繁。运输碳排放不仅取决于里程,还受装载率、空驶率、道路条件、排队等待和供应计划影响。生命周期研究已将材料运输视为建设阶段的重要组成部分[3] [6] [8]。基于北斗定位、车辆载重和材料需求计划的网络化调度,可以减少重复配送、车辆空驶和工点等待。对于土石方工程,还可结合地形、施工进度和弃渣场容量优化调配路径。

供应链低碳管理需要统一材料编码和接口规则。若供应商、施工单位和建设单位使用不同的数据格式,材料数量、批次和碳因子难以自动匹配。因而,低碳平台应把碳数据要求写入采购合同和数据交付标准,并设置数据完整性、时间有效性和第三方核验机制。

3.4. 生命周期评价、碳成本与综合决策

高速铁路是否具有净减排效益,需要在生命周期和运输系统层面评价。加州、中国和瑞典案例表明,基础设施建设会形成较大初始排放,但运营期的客流、清洁电力比例以及对航空和公路出行的替代能够改变长期结果[2] [4]-[6] [10] [11]。京沪高铁研究指出,基础设施建设、车辆制造、运行用电、交通方式替代和新增需求应在统一边界内分析[10]。生命周期成本研究则尝试把碳排放货币化,与建设、运维和拆除成本共同纳入决策[9] [12]。

对于建设单位,生命周期评价的直接价值在于识别高碳环节和方案差异,而不是追求一个脱离管理场景的总量数字。更具操作性的指标包括单位延米隧道碳排放、单位桥梁混凝土碳排放、单位土石方碳排放和单位完成产值碳排放,并与质量、进度、成本和安全指标共同展示。

4. 网络工程技术赋能低碳管理的研究进展

4.1. 物联网与无线传感器网络

物联网通过传感器、嵌入式终端、网络协议和平台服务连接物理对象,是碳数据自动获取的基础。通用物联网研究已形成从感知、网络、服务到应用的技术体系[24];铁路物联网综述则覆盖基础设施监测、预测性维护、资产管理、视频监控、运输组织和能源效率等方向[29] [30]。在施工低碳管理中,智能电表、油耗传感器、RFID、环境传感器、北斗终端和设备控制器可分别采集能源、材料、位置和工况信息。

物联网部署需根据数据速率、覆盖距离、功耗和可靠性选择通信技术。视频和三维扫描适合光纤、Wi-Fi 或 5G,高频机械工况可采用 5G 或工业以太网,低速电表和环境数据可采用 NB-IoT、LoRa 等低功耗广域网络[25]。不同协议之间需通过边缘网关完成转换,避免形成新的设备信息孤岛。

4.2. 5G/5G-R 与复杂施工环境通信

高速铁路场景对无线通信的高速移动、连续覆盖、可靠切换和安全性提出了特殊要求[31]。5G 关键技

术能够为宽带视频、海量传感器接入、低时延控制和移动边缘计算提供支撑[32]。建设阶段虽然不同于列车高速移动,但施工线路同样存在山区、隧道、桥梁和偏远工区,网络覆盖条件复杂。可采用公网 5G、专网、光纤回传、无线中继和低功耗广域网组合部署,并通过本地缓存和断点续传保证弱覆盖区域的数据完整性。

面向未来,6G 铁路研究强调通信、感知、计算、缓存、人工智能和安全的一体化[33]。这些能力可扩展至建设期无人机巡检、高精度定位、数字孪生同步和应急通信,但现阶段工程应用应优先选择成熟、可维护和成本可控的技术,避免为追求概念先进而增加系统复杂度。

4.3. 边缘计算、云计算与云边端协同

边缘计算将计算和存储能力部署在数据源附近,可降低时延、减少回传流量,并提高网络中断时的业务连续性[26] [27]。在高铁工区,边缘网关可完成数据去噪、重复值过滤、协议转换、分钟级能耗聚合和异常判断;项目级云平台则负责跨工区汇总、长期存储、碳因子管理、报表生成和模型训练。

合理的云边端协同还应考虑计算本身的能源消耗。对于低碳管理而言,将全部视频和传感器原始数据长期上传并不一定合理。系统可依据业务优先级实施分层采样:安全控制数据保持高频和低时延,碳核算数据采用稳定时间粒度,普通视频只在事件触发时上传片段。

4.4. BIM、数字孪生与碳数据空间关联

BIM 能够表达构件几何、工程量、材料和进度信息,是碳排放从项目总量下沉至工程构件的重要载体。BIM 与生命周期评价融合研究指出,模型信息粒度、材料数据库匹配和不同阶段数据连续性是应用关键[34]。铁路基础设施 BIM 实践已用于协同设计、碰撞检查、施工组织和工程量管理[37] [39]。

数字孪生在 BIM 基础上进一步引入实时感知和双向数据流,使虚拟模型能够反映实体工程状态[35] [36]。在低碳场景中,桥墩、梁片、隧道区段或临时设施可关联材料隐含碳、机械台班、用电量和进度状态,管理者可从三维模型定位高碳工序,并比较不同施工方案。需要注意的是,没有稳定数据接口和持续更新机制的三维模型只是静态可视化,不能等同于数字孪生。

4.5. 软件定义网络与网络资源优化

高速铁路建设网络往往同时承载安全监控、生产控制、视频、办公和低碳数据。软件定义网络通过控制与转发分离,实现网络策略集中管理和可编程配置[28]。建设单位可根据业务重要性设置不同的带宽、时延和访问策略,在链路拥塞或故障时优先保障安全监测和关键设备数据,同时对普通碳统计任务实施延迟容忍传输。

SDN 还可用于跨工区网络可视化、流量审计和能耗优化,但其控制器可靠性和安全性必须得到保障。对于规模较小的项目,不必强制部署复杂 SDN 平台,可通过 VLAN、虚拟专网、链路质量监测和统一运维平台实现相近的管理目标。

4.6. 网络安全与可信碳数据

碳数据与设备、工程量、供应商和成本信息相关,具有管理敏感性。若设备身份被伪造、计量数据被篡改或平台账户被盗用,不仅会影响碳核算,还可能波及施工生产。系统应依据网络安全等级保护要求[40],对办公网、视频网、物联网和生产控制网实施分区分域,建立身份认证、最小权限、通信加密、日志审计、漏洞管理和备份恢复机制。工业控制相关设备还可参考 IEC 62443 系列标准的安全控制要求[42]。

可信碳数据不等于简单使用区块链。首先应保证计量装置准确、设备身份唯一、时间同步可靠、数据接口受控和人工修改留痕;在此基础上,才可对关键材料碳足迹和碳报告采用数字签名、时间戳或分

布式存证。

4.7. 关键通信技术横向比较与典型场景选型

高速铁路建设通信网络不存在能够同时满足低成本、低功耗、广覆盖、高带宽和超高可靠性的单一技术。如表 2 所示，5G/5G-R 强调移动性、带宽与低时延，LPWAN 强调广覆盖和低功耗，Wi-Fi 6/6E 强调局部高容量与部署灵活性，光纤/工业以太网则在固定场景中具有高带宽和高可靠性优势[25] [31] [32] [43]。因此，选型应由业务优先级、数据速率、供电条件、移动性、回传资源和安全等级共同决定，而不宜仅以峰值速率或单点建设成本作为判断依据。

Table 2. Comparative analysis of key communication technologies and scenario selection suggestions for high-speed railway construction

表 2. 关键通信技术横向比较及高速铁路建设场景选型建议

通信技术	成本	终端功耗	部署难度	可靠性与覆盖特点	典型业务	高铁建设场景建议
5G/5G-R	较高	中 - 高	中 - 高	移动性与连续覆盖能力强；专网可获得较高确定性	高清视频、机械工况、移动终端、低时延业务	隧道：视频/人员定位/机械协同；桥梁：移动设备与无人机；梁场：室外移动设备主覆盖
NB-IoT (LPWAN)	低 - 中	低	低(依赖运营商覆盖)	广覆盖、深覆盖，速率较低；运营商网络可维护性较好	智能电表、环境传感、状态量、低频计量	隧道/桥梁：低频环境与能耗监测；梁场：表计和分散传感器
LoRaWAN (LPWAN)	较低	很低	低 - 中(需自建网关)	远距离、低速率；免许可频段易受干扰，确定性弱于授权频谱	温湿度、资产标签、低频环境量、偏远工点采集	桥梁与偏远工点：低频监测；梁场：资产和环境感知；不建议单独承载安全关键控制
Wi-Fi 6/6E	中	中	低 - 中	局部高容量、部署灵活；覆盖半径和漫游质量受 AP 密度与现场遮挡影响	高清视频、移动终端、局部数据回传、边缘设备接入	梁场/项目部/仓储：优先；隧道：局部热点或分段覆盖；长距离桥梁不宜仅依赖 Wi-Fi
光纤/工业以太网	一次性投入较高	低 - 中	高	固定链路带宽高、抗干扰和可靠性强，维护边界清晰	骨干回传、控制室、固定设备、边缘服务器互联	隧道和梁场：优先作为骨干；桥梁固定节点：条件允许时用于高可靠回传；移动业务需与无线网络组合

注：表中“高/中/低”为相对工程等级，实际成本与可靠性受公网/专网模式、回传条件、站点密度、运维责任和现场电磁环境影响；Wi-Fi 6/6E 依据 IEEE 802.11ax 高效率 WLAN 能力进行归纳[43]。

从场景组合看，隧道宜采用“光纤骨干 + 5G/工业 Wi-Fi 高带宽接入 + LPWAN 低频传感 + 边缘节点本地失联保护”的多层方案；桥梁及长线露天工点宜以 5G 承担移动设备和视频业务、以 LPWAN 承担低功耗监测，并在固定关键节点配置光纤回传；梁场和预制场空间相对集中、供电条件较好，适合“光纤骨干 + Wi-Fi 6/6E 局部高容量覆盖”，5G 用于室外移动机械和跨区域连续覆盖，LPWAN 用于表计与低频传感。对于山区弱覆盖工点，应预留多链路备份和本地缓存机制，避免单一无线制式失效导致数据链路中断。

5. 网络工程与低碳管理的融合架构及典型场景

5.1. 五层融合架构

如图 1 所示，结合高速铁路建设特点，可构建感知层、网络层、边缘计算层、平台层和应用层五层

架构。感知层负责采集电量、油耗、位置、材料和环境数据；网络层提供有线与无线接入；边缘计算层完成协议转换、数据清洗、缓存和现场预警；平台层维护碳因子库、数据库、BIM 和数字孪生模型；应用层面向建设、施工、监理和供应商提供碳看板、异常预警、方案比选和报告服务。该架构形成从状态上报到管理控制的闭环，而不是单向的数据汇总系统。

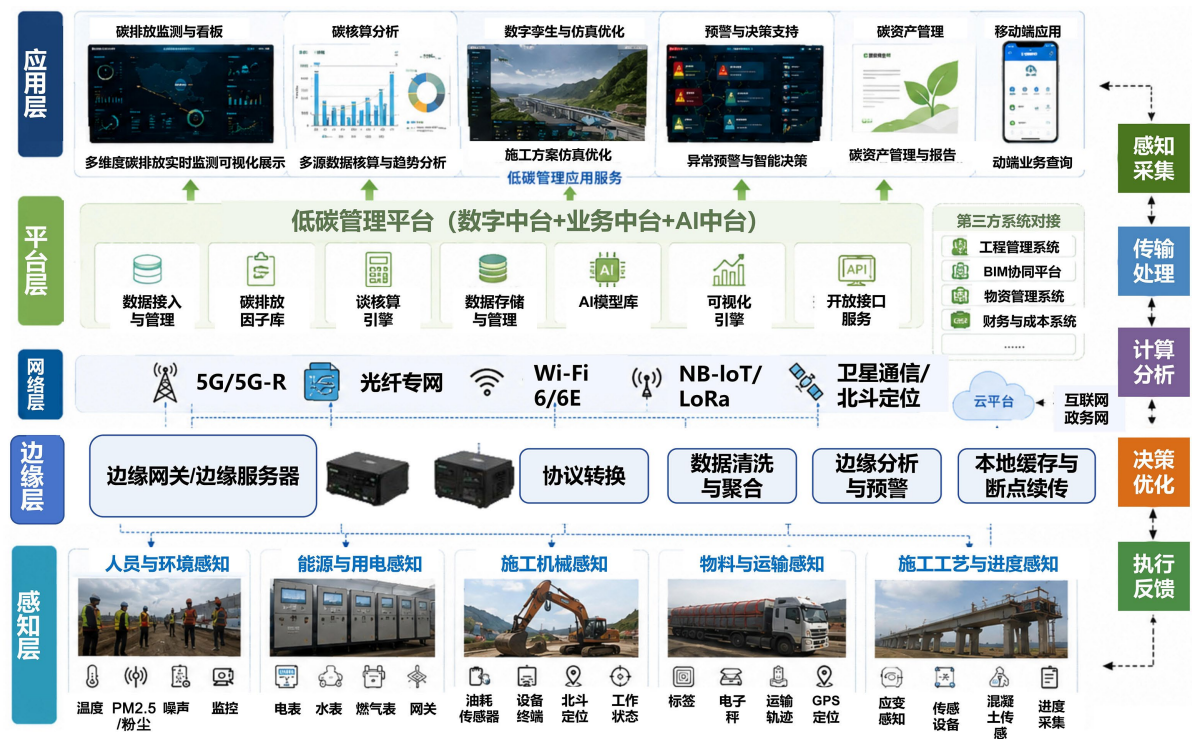


Figure 1. Network architecture for low-carbon management of high-speed railway construction
图 1. 高速铁路建设低碳管理网络架构

5.2. 施工机械能耗监测与怠速治理

在挖掘机、装载机、起重机、运梁车等设备上部署车载终端，采集位置、发动机转速、油耗、工作时长和怠速时长。边缘节点根据设备型号和任务建立合理能耗区间，当出现长时间怠速、异常油耗或设备低负荷运行时及时提示。长期数据可用于设备选型、操作人员培训、维护计划和租赁结算，实现从台班估算向实际工况管理转变。

5.3. 材料碳追踪与运输调度

为钢材、水泥、混凝土、轨道构件和电缆建立统一电子编码，记录供应商、生产地点、数量、排放因子和运输方式。材料到场后通过扫码或 RFID 完成验收，并与 BIM 构件和施工部位绑定。车辆定位、载重和工点需求数据共同进入调度模型，以降低空驶、重复配送和现场等待。

5.4. 隧道、梁场与临时用电管理

隧道通风排水、梁场蒸汽养护、拌和站生产和临时驻地均适合实施分项计量。平台可将用电曲线与施工进度、班次和设备状态叠加，识别非生产时段异常负荷和峰值需求。具备分布式光伏或储能条件的场站，可进一步根据负荷预测和电价优化能源使用，但应避免将可再生能源发电量与节能量重复计算。

5.5. 碳核算、预警与多目标决策

如表 3 所示，平台按照材料、能源、运输和废弃物等类别自动汇总活动数据，并调用相应排放因子。除总量外，还应形成单位工程量指标和预算基线偏差。当某工区单位进度碳排放明显高于同类工区或历史水平时，系统应提示其可能原因，如设备怠速、运输距离增加、临时用电异常或材料方案变化。最终决策应同时考虑安全、质量、工期、成本与碳排放，避免片面降碳造成其他目标恶化。

Table 3. Typical application scenarios and network requirements
表 3. 典型应用场景及网络要求

应用场景	采集对象	推荐网络	边缘处理	管理输出
机械能耗	油耗、转速、怠速、位置	5G/NB-IoT/车载网	异常工况识别	设备能耗排名与预警
材料碳追踪	批次、数量、供应商、里程	RFID/二维码/移动网络	到场校验、离线缓存	构件级材料碳台账
隧道用能	电量、风机、水泵、环境参数	工业以太网/5G/光纤	安全阈值与联动控制	分项能耗和优化建议
车辆调度	轨迹、载重、需求计划	北斗 + 4G/5G	路线和任务匹配	空驶率与运输碳排放
综合碳管理	工程量、进度、成本、碳因子	项目专网/云平台	数据清洗与指标计算	碳看板、报告和方案比选

6. 高速铁路低碳数字化实施的多维挑战与应对机制

6.1. 技术层面：数据、网络、互操作与安全约束

技术层面的首要问题是“数据可用”与“网络可达”同时不足。不同参建单位在设备编码、材料分类、工程量口径、时间粒度和接口协议方面存在差异，导致能源、材料、进度和设备数据难以直接映射到统一碳核算模型；电力和材料排放因子又具有区域性、时变性和供应商差异，进一步增加核算不确定性。其次，山区、隧道和临时工点存在遮挡、供电困难、链路中断和站点迁移，高带宽业务与低功耗传感业务对网络的要求并不一致，因此需要采用光纤、5G/Wi-Fi 和 LPWAN 分层组网，并利用边缘缓存、断点续传和业务优先级保障关键数据连续性。再次，既有进度、质量、安全、物资和设备系统往往接口封闭，新增低碳平台若不能复用既有数据，容易形成新的信息孤岛。最后，物联网终端弱口令、固件更新困难、设备身份伪造、数据篡改以及办公网与生产网边界不清等问题会同时影响碳核算可信度和施工生产安全，应依据等级保护与工业控制安全要求实施分区分域、身份认证、最小权限、通信加密、审计和备份恢复[40] [42]。

6.2. 经济层面：成本结构、投资回报与商业模式

低碳数字化系统的经济性应按全寿命周期而非单一设备采购价评估。初始资本性支出(CAPEX)主要包括传感器、智能表计、边缘网关、通信站点或专网、服务器/云资源、软件平台、BIM 接口和安全改造；运营性支出(OPEX)则包括流量与云服务费、设备校准、软件维护、网络运维、数据治理和人员培训。收益端除燃油、电力和材料直接节约外，还应计入减少设备怠速、降低人工抄表与报表成本、减少返工和等待、提升供应链协同效率以及形成可核验碳数据所产生的管理价值。可采用全寿命周期成本(LCC)、总拥有成本(TCO)、投资回收期 and 净现值(NPV)进行组合评价[9] [12] [44]。其中，NPV 可表示为 $NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^n [(B_t - C_t)/(1 + r)^t]$ ， I_0 为初始投资， B_t 和 C_t 分别为第 t 期可货币化收益与运营成本， r 为折现率。对于难以直接货币化的安全、合规和数据资产价值，可采用多指标决策法作为补充。

商业模式方面，可根据建设单位数字化能力、项目周期和收益可计量程度选择不同机制。《2030 年前碳达峰行动方案》提出“积极推行合同能源管理”[14]，为节能改造与收益分享提供了政策依据。如表

4 所示,对于高铁建设项目,可形成自建自营、运营商/云服务商联合建设、平台订阅服务以及合同能源管理/节能收益分享等模式。关键不在于简单外包技术,而在于明确数据权属、服务等级、节能量核定方法、收益分配、退出机制与网络安全责任。

Table 4. Potential business models and applicable conditions for low-carbon digitalization in high-speed railway construction
表 4. 高速铁路建设低碳数字化的潜在商业模式及适用条件

模式	主要投资/运营主体	收益或付费机制	优势	适用条件与主要风险
自建自营	建设单位	内部节能降耗、效率提升与数据资产沉淀	控制力强,数据边界清晰	适合项目群规模大、数字化团队成熟的建设单位;前期投入和持续运维压力较大
联合建设	建设单位 + 运营商/云服务商	网络/云服务费 + 联合运维	可复用成熟网络与运维体系,降低建设门槛	适合跨区域工点;需明确 SLA、数据出域和安全责任
平台订阅 (SaaS)	平台服务商	按项目、账号、设备或数据量订阅	初始投入低、上线快、便于标准化复制	适合中小项目和试点;需关注数据迁移、供应商锁定和长期订阅成本
合同能源管理/收益分享	节能服务商 + 建设单位	按核定节能量或净收益比例分享	将部分初始投资转移给服务商,强化效果导向	适合能耗基线清晰的梁场、拌和站、临电等场景;核心风险是基线设定与节能量核定争议

6.3. 管理层面：跨组织数据共享、激励机制与变革管理

管理层面的核心矛盾在于“数据跨组织流动”与“责任、收益和风险仍按组织边界分割”。高速铁路建设涉及建设单位、施工单位、监理单位、设计单位、材料与设备供应商、通信运营商和平台服务商,若缺乏统一的数据治理机制,同一碳指标可能因口径、责任边界和商业敏感性不同而无法共享。可由建设单位牵头建立跨组织数据共享联盟或数据治理委员会,明确数据目录、所有权/使用权、接口标准、质量责任、共享范围、保密等级和争议处理机制,并将数据交付要求写入招标文件、合同和 BIM 交付标准。该思路与《交通强国建设纲要》中“鼓励交通行业各类创新主体建立创新联盟”的政策导向相一致[13]。

激励机制应避免只考核“总碳排放量”,因为不同工区工程量和地质条件差异明显。更可行的做法是将单位工程量碳强度、能耗基线偏差、数据完整率、异常闭环率和低碳方案采纳率纳入综合绩效,并通过供应商评分、绿色采购加分、节能收益分享和项目考核形成正向激励。对于因新增传感器、平台填报和流程变化产生的变革阻力,可采用“小场景试点 - 共创规则 - 培训与岗位支持 - 双轨过渡 - 规模推广”的路径,先在油耗、临电、梁场等收益可观测场景证明价值,再逐步将低碳要求嵌入施工组织和日常管理。

6.4. 技术 - 经济 - 管理挑战的联动关系

三类挑战并非相互独立。技术方案过度追求高带宽和全量采集会抬高 CAPEX 与 OPEX,削弱投资回报;为压缩成本而采用低可靠网络又可能降低数据完整性,进一步影响绩效考核和节能量核定;组织间缺乏数据共享规则时,即使网络 and 平台已经建成,也难以形成跨工序、跨供应链的碳追踪。因此,技术选型应与投资评价、数据治理和合同机制同步设计,形成“业务价值 - 通信需求 - 数据标准 - 成本收益 - 责任机制”五项联动的实施逻辑。

6.5. 面向建设单位的实施原则

建设单位宜坚持“先基线、后平台;先高价值场景、后全线推广;先规则、后共享;先安全边界、后跨域互联”的原则。项目立项阶段应同时完成业务场景清单、通信选型、碳核算边界、LCC/NPV 测算和

数据责任矩阵；试点阶段优先验证节能量、数据质量与运维成本；推广阶段再将接口、指标和安全要求固化为企业标准。通过阶段性决策门槛，可降低一次性大投入和技术锁定风险，并使低碳数字化由“信息化附加项”转变为工程管理能力的一部分。

7. 未来研究方向与鲁南高铁建设应用建议

7.1. 从静态核算转向近实时动态碳管理

未来应将小时级或日级能源数据、动态电力排放因子、工程进度和设备状态结合，形成近实时碳排放曲线。其重点不是追求毫秒级计算，而是在管理决策周期内及时发现异常和评估措施效果。进一步可根据表 3 的通信技术差异，对高频安全控制数据、低频碳核算数据和视频数据采用不同的采样、缓存与回传策略，以降低网络与计算资源消耗。

7.2. 数字孪生与人工智能协同

数字孪生可提供工程对象、空间位置和状态信息，人工智能可用于能耗预测、异常检测、运输调度和方案优化[35]-[38]。未来研究应加强模型可解释性和工程约束表达，确保算法建议满足安全规范、施工逻辑和现场资源条件。

7.3. 绿色网络与计算基础设施

低碳管理系统自身也消耗能源。可通过边缘侧数据聚合、传感器自适应采样、服务器资源弹性调度和低功耗终端降低数字基础设施能耗，并建立“系统带来的减排量”与“系统自身能耗”之间的净效益评价。

7.4. 可信供应链与构件级碳数据

材料碳足迹将逐步从通用数据库平均值转向供应商特定数据。建设单位可要求主要材料提供环境产品声明或可核验碳数据，并利用统一编码和数字签名实现批次级追踪。构件级碳台账还可在工程移交后服务于维护、更换和资产管理。

7.5. 面向鲁南高速铁路有限公司的分阶段实施路径

结合建设单位管理需求，可按照“试点 - 集成 - 推广”三阶段推进。第一阶段选择施工机械油耗、隧道临时用电或梁场能源管理等数据基础较好且收益易观察的场景，建立能耗/碳排基线、通信组合和预警规则，并同步开展 TCO 与 NPV 测算；第二阶段打通物资、设备、进度和 BIM 数据，形成项目级碳台账和跨组织数据治理机制；第三阶段将低碳指标纳入供应商评价、施工方案比选和企业项目群管理，并根据项目规模选择自建、联合建设、平台订阅或收益分享等运营模式。网络工程专业人员可重点承担现场网络规划、终端接入、协议转换、边缘网关部署、数据库接口和安全防护等任务。

8. 结论

高速铁路建设低碳管理的难点不只是缺少碳排放公式，而是工程数据分散、采集不连续、通信环境差异大、系统难互通以及管理反馈不及时。生命周期研究已经明确材料生产、土建结构、运输、机械燃油和临时用能是建设阶段的重要排放来源。网络工程技术通过物联网感知、5G/LPWAN/Wi-Fi 等分层接入、边缘计算、云平台、BIM 与数字孪生以及网络安全，可把这些活动转化为可定位、可核算、可预警和可优化的碳数据。通信技术比较表明，隧道、桥梁、梁场等场景应采用多制式组合而非单一网络方案，以在带宽、功耗、可靠性和成本之间取得平衡。

规模化实施还取决于技术、经济和管理三个层面的协同：技术层面需要统一数据标准、提高网络韧性和保障可信安全；经济层面需要以 LCC、TCO、NPV 和投资回收期等方法评估全寿命周期价值，并选择与项目特征匹配的商业模式；管理层面需要由建设单位牵头形成跨组织数据治理、激励约束和变革管理机制。对于高速铁路建设主体，宜从高能耗、数据条件成熟、收益可观测的工区和设备开展小规模试点，再逐步形成覆盖材料供应、运输、现场施工和工程移交的全过程碳数据网络，使网络工程技术真正转化为绿色建造的持续管理能力。

参考文献

- [1] Chester, M.V. and Horvath, A. (2009) Environmental Assessment of Passenger Transportation Should Include Infrastructure and Supply Chains. *Environmental Research Letters*, **4**, Article 024008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024008>
- [2] Chester, M. and Horvath, A. (2010) Life-Cycle Assessment of High-Speed Rail: The Case of California. *Environmental Research Letters*, **5**, Article 014003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014003>
- [3] Chang, B. and Kendall, A. (2011) Life Cycle Greenhouse Gas Assessment of Infrastructure Construction for California's High-Speed Rail System. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **16**, 429-434. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.004>
- [4] Åkerman, J. (2011) The Role of High-Speed Rail in Mitigating Climate Change—The Swedish Case Europabanan from a Life Cycle Perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **16**, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.12.004>
- [5] Yue, Y., Wang, T., Liang, S., Yang, J., Hou, P., Qu, S., et al. (2015) Life Cycle Assessment of High Speed Rail in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **41**, 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.005>
- [6] Cheng, S.H., Lin, J.Y., Xu, W.T., Yang, D., Liu, J. and Li, H. (2020) Carbon, Water, Land and Material Footprints of China's High-Speed Railway Construction. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **82**, Article 102314. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102314>
- [7] Lin, J., Cheng, S., Li, H., Yang, D. and Lin, T. (2020) Environmental Footprints of High-Speed Railway Construction in China: A Case Study of the Beijing-Tianjin Line. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**, Article 105. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010105>
- [8] de Bortoli, A., Bouhaya, L. and Feraille, A. (2020) A Life Cycle Model for High-Speed Rail Infrastructure: Environmental Inventories and Assessment of the Tours-Bordeaux Railway in France. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, **25**, 814-830. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01727-2>
- [9] Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J. and Peng, J. (2020) Life Cycle Cost, Energy and Carbon Assessments of Beijing-Shanghai High-Speed Railway. *Sustainability*, **12**, Article 206. <https://doi.org/10.3390/su12010206>
- [10] Chen, P., Lu, Y., Wan, Y. and Zhang, A. (2021) Assessing Carbon Dioxide Emissions of High-Speed Rail: The Case of Beijing-Shanghai Corridor. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **97**, Article 102949. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102949>
- [11] Wang, Y., Zhou, S. and Ou, X. (2021) Development and Application of a Life Cycle Energy Consumption and CO₂ Emissions Analysis Model for High-Speed Railway Transport in China. *Advances in Climate Change Research*, **12**, 270-280. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.02.001>
- [12] Wang, X., Liu, J., Long, F., Lu, P., Ren, Y. and Chen, J. (2023) Life-Cycle Cost Model of High-Speed Railway Considering Carbon Emissions. *Journal of Infrastructure Systems*, **29**, Article ID: 05023006.
- [13] 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. 2019-09-19. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zcyjs/202006/t20200623_3307512.html, 2026-08-14.
- [14] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. 2021-10-26. <https://app.www.gov.cn/govdata/gov/202110/26/477466/article.html>, 2026-08-14.
- [15] 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知[EB/OL]. 2022-01-18. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html, 2026-08-14.
- [16] 交通运输部关于印发《绿色交通“十四五”发展规划》的通知[EB/OL]. 2022-01-21. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637584.html, 2026-08-14.
- [17] 交通运输部关于印发《数字交通“十四五”发展规划》的通知[EB/OL]. 2021-12-22. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202112/t20211222_3632469.html, 2026-08-14.

- [18] 关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知[EB/OL]. 2022-06-17.
https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk03/202206/t20220617_985879.html, 2026-08-14.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 24040-2008 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 24044-2008 环境管理 生命周期评价 要求与指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] International Organization for Standardization (2018) ISO 14064-1:2018 Greenhouse Gases-Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals. International Organization for Standardization.
- [22] International Organization for Standardization (2018) ISO 14067:2018 Greenhouse Gases-Carbon Footprint of Products-Requirements and Guidelines for Quantification. International Organization for Standardization.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [24] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. and Ayyash, M. (2015) Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **17**, 2347-2376.
<https://doi.org/10.1109/comst.2015.2444095>
- [25] Raza, U., Kulkarni, P. and Sooriyabandara, M. (2017) Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **19**, 855-873. <https://doi.org/10.1109/comst.2017.2652320>
- [26] Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y. and Xu, L. (2016) Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, **3**, 637-646. <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2579198>
- [27] Satyanarayanan, M. (2017) The Emergence of Edge Computing. *Computer*, **50**, 30-39. <https://doi.org/10.1109/mc.2017.9>
- [28] Kreutz, D., Ramos, F.M.V., Esteves Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S. and Uhlig, S. (2015) Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey. *Proceedings of the IEEE*, **103**, 14-76.
<https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2371999>
- [29] Fraga-Lamas, P., Fernández-Caramés, T. and Castedo, L. (2017) Towards the Internet of Smart Trains: A Review on Industrial IOT-Connected Railways. *Sensors*, **17**, Article 1457. <https://doi.org/10.3390/s17061457>
- [30] Singh, P., Elmi, Z., Krishna Meriga, V., Pasha, J. and Dulebenets, M.A. (2022) Internet of Things for Sustainable Railway Transportation: Past, Present, and Future. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, **4**, Article 100065.
<https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100065>
- [31] Ai, B., Briso-Rodriguez, C., Cheng, X., Kurner, T., Zhong, Z., Guan, K., et al. (2014) Challenges toward Wireless Communications for High-Speed Railway. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **15**, 2143-2158.
<https://doi.org/10.1109/tits.2014.2310771>
- [32] Ai, B., Molisch, A.F., Rupp, M. and Zhong, Z. (2020) 5G Key Technologies for Smart Railways. *Proceedings of the IEEE*, **108**, 856-893. <https://doi.org/10.1109/jproc.2020.2988595>
- [33] Ai, B., Lu, Y., Fang, Y., Niyato, D., He, R., Chen, W., et al. (2025) 6G-Enabled Smart Railways. *Proceedings of the IEEE*, **113**, 1192-1235. <https://doi.org/10.1109/jproc.2026.3656058>
- [34] Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. and García-Martínez, A. (2017) Critical Review of Bim-Based LCA Method to Buildings. *Energy and Buildings*, **136**, 110-120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>
- [35] Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S. and Rezgui, Y. (2020) Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. *Automation in Construction*, **114**, Article 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>
- [36] Opoku, D.J., Perera, S., Osei-Kyei, R. and Rashidi, M. (2021) Digital Twin Application in the Construction Industry: A Literature Review. *Journal of Building Engineering*, **40**, Article 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102726>
- [37] Ehrbar, H. (2016) Building Information Modelling—A New Tool for the Successful Implementation of Major Projects of German Railways. *Geomechanics and Tunneling*, **9**, 659-673. <https://doi.org/10.1002/geot.201600053>
- [38] Pan, Y. and Zhang, L. (2021) Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends. *Automation in Construction*, **122**, Article 103517.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- [39] Shin, M., Kim, H. and Liao, J. (2024) Performance Measurement and Analysis of Building Information Modeling (BIM) Applications in the Railway Infrastructure Construction Phase. *Applied Sciences*, **14**, Article 502.
<https://doi.org/10.3390/app14020502>
- [40] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 22239-2019 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

-
- [41] International Organization for Standardization (2018) ISO 19650-1:2018 Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling-Information Management Using Building Information Modelling-Part 1: Concepts and Principles. International Organization for Standardization.
 - [42] International Electrotechnical Commission (2013) IEC 62443-3-3:2013 Industrial Communication Networks-Network and System Security-Part 3-3: System Security Requirements and Security Levels. International Electrotechnical Commission.
 - [43] IEEE (2021) IEEE Std 802.11ax-2021: IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications-Amendment 1: Enhancements for High-Efficiency WLAN. IEEE.
 - [44] International Organization for Standardization (2017) ISO 15686-5:2017 Buildings and Constructed Assets-Service Life Planning-Part 5: Life-Cycle Costing. International Organization for Standardization.