**引文格式**:丁雨淋,苏有斌,张卫华,等.自主式智慧重载铁路空间智能:概念内涵、技术挑战与应用展望[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2469-2484.DOI:10.13203/j.whugis20260385

**Citation**:DING Yulin,SU Youbin,ZHANG Weihua,et al.Spatial Intelligence for Autonomous Intelligent Heavy-Haul Railways:Concepts,Technical Challenges,and Application Prospects[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(11):2469-2484.DOI:10.13203/j.whugis20260385

# 自主式智慧重载铁路空间智能:概念内涵、技术挑战与应用展望

丁雨淋[1] 苏有斌[1,2] 张卫华[1] 朱 庆[1]

1 西南交通大学地球科学与工程学院,四川 成都,611756

2 国能朔黄铁路发展有限责任公司,北京,100007

**摘 要**:自主式智慧重载是重载铁路实现安全可靠、高效集约和绿色低碳的重要发展方向,空间智能是支撑其感知、决策与执行闭环的关键基础。探讨自主式智慧重载及其空间智能的概念内涵、提出面向任务范围、环境适应能力与人机分工的自主化能力分析框架,构建空间智能共性参考架构;围绕物理等效数字孪生、多模态空间推理和多专业协同空间智能体,梳理研究进展与关键技术挑战,分析其在产运销一体化运输组织、重载列车群组运行、基础设施少人、无人智能运维及交能融合中的应用机制。重载铁路自主化的关键在于贯通多尺度对象表征、跨专业过程推演与工程约束下的协同行动。空间信息领域需加强与铁路工程、人工智能和自动控制的交叉融合,通过数据、模型与知识协同,将空间信息服务由状态表达拓展至认知推理、决策支持和执行反馈,为重载铁路自主运行提供空间智能支撑。

**关键词**:重载铁路;空间智能;数字孪生;多模态空间推理;空间智能体

**中图分类号**:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-26

**DOI**:10.13203/j.whugis20260385 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2469-16

# Spatial Intelligence for Autonomous Intelligent Heavy-Haul Railways: Concepts, Technical Challenges, and Application Prospects

*DING Yulin*[1] *SU Youbin*[1,2] *ZHANG Weihua*[1] *ZHU Qing*[1]

1 Faculty of Geoscience and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

2 China Energy Shuohuang Railway Development Co. Ltd., Beijing 100007, China

**Abstract**: Autonomous intelligent heavy-haul railways provide an important direction for safe, efficient and low-carbon operation with reduced human intervention. Spatial intelligence provides a foundation for closing the loop among perception, decision-making and execution. This paper clarifies the concepts of autonomous intelligent heavy-haul railways and their spatial intelligence, proposes an autonomy analysis framework based on task scope, environmental adaptability and human-system responsibilities, and develops a common reference architecture. It reviews the research progress and key challenges in physically equivalent digital twins, multimodal spatial reasoning and multidisciplinary collaborative spatial agents, and examines the applications in integrated logistics organization, coordinated train-group operation, autonomous infrastructure maintenance and transportation-energy coordination. The analysis identifies the integration of multiscale object representations, multidisciplinary process simulation and coordinated action under engineering constraints as a central requirement for railway autonomy. Geomatics should strengthen its integration with railway engineering, artificial intelligence and automatic control. By combining data, models and knowledge, spatial information services can extend from state representation to cognitive reasoning,

**基金项目**:国家自然科学基金(42371436)。

**第一作者**:丁雨淋,博士,教授,主要研究方向为数字孪生。dingyulin@swjtu.edu.cn

decision support and execution feedback, providing a spatial-intelligence foundation for the autonomous operation of complex engineering systems.

**Key words**: heavy-haul railway; spatial intelligence; digital twin; multimodal spatial reasoning; spatial agent

重载铁路是保障能源资源运输和大宗商品供应链稳定的重要基础设施,其发展需要统筹安全、效率、能耗与成本。在大轴重、长编组和高密度运行条件下,列车纵向动力响应、轮轨相互作用与基础设施服役状态相互影响,复杂环境扰动进一步增加运行维护和安全保障难度[1]。运输能力提升、风险主动防控与节能降碳涉及装备、设施及运输组织的协同,亟需技术创新由单项性能改进拓展至运输系统整体效能优化。

人工智能、先进感知、高可靠通信与智能控制等技术发展为重载铁路系统协同与自主运行提供支撑。国际重载运输协会发布了《重载铁路2030愿景》,将未来重载铁路展望为数字化驱动与大宗商品供应链深度融合的精益生产系统,提出智慧重载铁路的自主运行、网络协同、预测性维护和能源效率提升等发展方向[2]。要实现上述目标,系统需依据任务要求与运行条件,持续获取环境状态、推演行动后果、协调任务执行,形成“感知-决策-执行”自主闭环。

自主式智慧重载的发展需要明确自主能力的内涵、边界及其实现条件;自主性不是单项装备自动化的简单叠加,而是面向大轴重、长编组、高密度运输条件下“车-线-站-网-地”耦合系统的任务闭环能力。列车动力响应与基础设施服役状态相互影响,运输组织、检修作业、能源供给和行车安全又受到时空资源与运行条件的共同制约。因此,系统需要在明确的安全边界内关联多源状态、推演跨对象影响、协调跨专业任务,并依据执行反馈调整方案。鉴于不同业务在任务闭环范围、环境复杂程度和人工接管需求上存在差异,有必要建立自主化能力分级与共性参考架构:前者刻画自主化水平及其演进,后者说明感知、建模推演、诊断评估、决策规划与运行反馈等能力如何衔接,为分析共性技术与具体业务任务的支撑关系提供系统框架。

空间智能为上述能力形成提供基准统一的时空组织与认知推理基础[3]。重载铁路沿廊道连续延伸,移动装备、基础设施与沿线环境跨尺度分布,对象位置、网络拓扑及动态交互共同影响系统响应和任务执行。例如,长编组列车各车辆所处坡段、载荷与制动状态共同影响纵向受力;局部设施异常可能通过结构联系与运行关系影响区段通行和检修组织;列车移动负荷与新能源、储能之间的能量交换受到供电拓扑和运行时序约束。这些问题要求在统一时空参照下,将对象位置、空间结构及动态状态与专业作用过程关联,形成可用于状态解释、行动推演和协同决策的依据。高精度定位、多源观测与场景建模已为空间信息参与铁路运行管理提供了基础,进一步支撑自主运行,还需要将空间表征、专业计算与任务执行贯通起来。一方面,多尺度对象及其状态变化需要与作用机理建立可校准、可验证的联系;另一方面,推理形成的方案需要落实到具有明确对象、位置、时序和工程约束的行动。因此,空间信息作用需由对象定位与状态表达,进一步拓展至过程预测、任务规划和执行校核。地理空间基础模型研究已将多模态地理信息对齐与空间推理列为重要问题,为上述学科交叉提供了方法参考[4]。

本文面向重载铁路自主化发展需求,阐述自主式智慧重载的概念内涵与能力特征,提出自主化能力分级及空间智能共性参考架构;围绕物理等效数字孪生、多模态空间推理和多专业协同空间智能体,梳理研究进展与关键技术挑战;结合产运销一体化运输组织、重载列车群组自主运行、基础设施智能运维及“网源储车云”交能融合等典型场景,分析空间智能支撑业务自主闭环的应用路径。本文重点讨论多尺度空间关系如何约束专业过程推演与跨业务任务执行,建立自主化能力、共性功能、关键技术与典型场景之间的关联,为测绘地理信息与铁路工程、人工智能及自动控制的交叉融合提供参考。

## 1 自主式智慧重载铁路内涵与能力演进

自主式智慧重载铁路的发展涉及运输组织、装备运行、设施运维与安全保障等业务协同,其能力提升体现为系统独立完成任务、适应环境变化及协调关联业务的能力增强。本文从任务闭环与人机分工出发,界定自主式智慧重载铁路内涵,分析自主化能力的演进特征,进而构建支撑

不同业务自主运行的空间智能共性参考架构。

### 1.1　自主式智慧重载铁路内涵

本文将自主式智慧重载铁路界定为：以数字化重载铁路为基础，通过自主感知、自主决策与自主执行的闭环协同，支撑安全可靠、高效集约、绿色低碳运行及全生命周期优化的重载铁路发展范式。其融合先进感知、人工智能、数字孪生、现代通信与智能控制等技术，构建机车车辆、基础设施、作业装备与业务系统互联互通的信息物理系统，促进运输组织、装备运行、设施运维、安全保障、节能环保与经营管理的协同优化，如图 1 所示。




图 1　自主式智慧重载铁路系统概念示意图

Fig. 1　Conceptual Framework of Autonomous Intelligent Heavy-Haul Railway System

“自主式”强调系统在明确的任务目标、运行条件和安全约束下，能够依据自身状态与环境变化，主动获取信息、形成行动方案并组织实施，通过执行反馈调整任务安排和运行策略。其能力内涵包括以下 3 个方面：

1）自主感知。面向运输与作业任务，协同组织车载、地面及空天观测资源，获取列车运行、设施服役、装备健康与环境变化等信息。在统一时空基准下，识别对象及其状态，表达移动装备、基础设施与环境之间的空间关系，形成持续更新的运行场景。依据任务需求、环境变化和观测不确定性，调整观测对象、范围与频率，为状态精准研判和任务科学决策提供依据。

2）自主决策。综合实时状态、历史数据、作用机理与领域知识，分析对象之间的相互作用，预测状态变化及备选行动的后果。在安全约束下统筹运输效率、能源消耗、运维成本与资源利用，形成运输组织、列车操控、巡检维护及应急处置等任务方案，确定行动优先次序与资源配置，并依据条件变化和执行结果开展跨设备、跨专业的协同调整。

3）自主执行。将任务方案转化为控制与作业指令，依托列车控制、作业装备及业务执行系统，协调不同主体的空间占用、实施时序与任务衔接。持续监测任务进展和执行偏差，在既定权限内调整控制与作业过程，并将实际结果反馈至

感知和决策环节。当运行条件超出自主能力边界时,按照预定机制实施安全降级、任务中止或人工接管。

上述能力通过状态、方案与执行结果的持续反馈构成自主闭环,并通过运行数据积累和效能评价,支撑设计、制造与建设、运行维护及退役处置等阶段的优化。自主化水平应结合具体任务与运行条件,依据系统独立完成任务、适应环境变化、协调关联业务及处置异常的能力综合判定。

### 1.2 自主式智慧重载铁路的能力分级与演进特征

自主式智慧重载铁路的能力分级需明确系统承担何种任务、能够自主调整哪些内容,以及何种情况下需人工介入。通信领域自动驾驶网络分级体现了由任务自动化、单领域自治向跨领域协同演进思路,为复杂系统自主化提供参考[5]。结合重载铁路多专业耦合与严格安全约束,本文以系统独立完成任务闭环能力为主线,从任务闭环范围、环境适应能力及人机分工3个方面,提出*L*0~*L*5自主化能力分级参考框架(表1)。

**表1 重载铁路自主化能力分级与主要特征**

Table 1 Autonomy Levels and Main Characteristics

| 维度 | *L*0人工作业 | *L*1辅助作业 | *L*2部分自动 | *L*3条件自主 | *L*4高度自主 | *L*5完全自主 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 感知 | 人工主导 | 人工主导 | 人机协同 | 系统主导 | 系统主导 | 系统主导 |
| 决策 | 人工主导 | 人工主导 | 局部主导 | 人机协同 | 系统主导 | 系统主导 |
| 执行 | 人工操作 | 人机协同 | 单元自动 | 条件自主 | 系统主导 | 系统主导 |
| 闭环范围 | 人工组织 | 特定任务 | 特定单元 | 特定业务 | 多业务协同 | 全系统 |
| 适应能力 | 人工应对 | 人工应对 | 预设响应 | 条件适应 | 业务适应 | 系统适应 |
| 人员职责 | 全程作业 | 主导操作 | 监控干预 | 按需接管 | 目标管理 | 系统治理 |

各等级均以明确的任务范围、运行条件和安全约束为前提。业务覆盖范围是分级的一个维度,还需结合任务调整、异常处置及人工干预需求,判断系统自主化水平。以线路巡检及其关联业务为例,各等级的主要特征说明如下:

1) *L*0人工作业。系统具备信息记录与辅助监控能力,状态研判、任务决策和作业执行主要由人员完成。例如,人员沿线检查设备设施,识别病害、判断状态并提出处置建议,巡检范围、检查方法与后续维护均由人员确定。

2) *L*1辅助作业。系统自动完成信息采集、异常提示或操作辅助等子任务,整体任务仍由人员组织,关键判断与处置决策依赖人工。例如,在线监测与图像识别系统提供设备状态和疑似病害信息,由人员确认异常、安排复核并确定处置措施。该等级的能力增量主要体现为重复性子任务的自动处理。

3) *L*2部分自动。在预先规定的任务与运行条件下,系统对特定设备或作业单元形成闭环,能够依据状态反馈调整控制量,人员负责过程监督、任务衔接及超出预设条件的异常处置。例如,巡检装备按照既定路线完成定位、运动控制和数据采集,并按预设规则避障或停车;巡检任务的重新组织及后续处置仍由人员完成。

4) *L*3条件自主。在限定业务与运行条件内,系统能够依据任务目标和环境变化,自主组织子任务、调整行动方案与执行策略;达到预定人工介入条件时,实施安全处置并请求接管。例如,系统根据疑似病害位置、已有观测和检查要求,自主确定复核部位、补充检测方式及巡检路径,依据复核结果继续调整任务,形成限定业务内的动态闭环。

5) *L*4高度自主。面向多个关联业务,系统能够预测状态变化及其跨专业影响,自主协调任务、资源和执行过程,处理规定范围内的异常并组织任务恢复,人员主要负责目标约束设定、运行监督和例外干预。例如,系统根据线路病害及其劣化预测结果,联合调整检查任务、维修天窗、检修资源和列车运行安排,并依据处置效果持续修正,形成运输与运维协同的任务闭环。

6) *L*5完全自主。在明确的系统边界与运行条件内,各核心业务及其衔接环节均具备自主闭环能力,系统能够围绕给定目标组织业务流程、协调资源、处置异常并恢复运行,人员主要承担系统治理与监督职责。该等级代表本文提出的远景目标。例如,在设定的铁路-港口运输系统中,根据运输需求、装卸能力、设施装备状态及环境变化,自主协调计划编制、运行组织、维护安排、能源调配与异常恢复,实现全过程协同优化。

相邻等级的差异体现为任务组织方式与自主能力的变化。*L*2→*L*3的关键在于从既定方案内的控制调节拓展至业务任务方案的自主组织

与调整；$L3\rightarrow L4$的关键在于跨专业影响预测、多业务协同及规定条件内的异常自主处置；$L4\rightarrow L5$则进一步要求各核心业务闭环的自主衔接，降低对人工常态协调的依赖。同一铁路的不同业务可处于不同等级，其整体水平应依据核心业务覆盖、闭环衔接和异常处置能力综合分析。

### 1.3　自主式重载铁路系统空间智能共性参考架构

不同自主化阶段对应不同的任务范围与人机分工，但其实现均需要掌握对象状态、分析相互作用、预测行动后果并协调任务执行。重载铁路的运行与作业受到线路拓扑、设施分布、装备位置、资源占用和任务时序等共同约束，需要在统一时空框架下关联物理对象与业务过程，为不同专业提供一致的状态依据和协同条件。

本文将自主式重载铁路空间智能界定为：面向运输与作业任务，在统一时空参照和工程约束下，主动组织观测与场景更新，结合空间关系、作用机理和领域知识开展状态理解、过程预测与行动规划，并通过执行反馈持续调整的综合能力。据此，围绕“感知-决策-执行”闭环，构建由系统感知与表征、系统建模与推演、系统诊断与评估、系统决策与规划、系统运行与反馈组成的共性参考架构，如图 2 所示。各模块以任务目标、运行条件和安全约束为共同依据，通过时空基准、对象标识与语义描述组织数据、模型和知识，实现状态共享与功能协同。

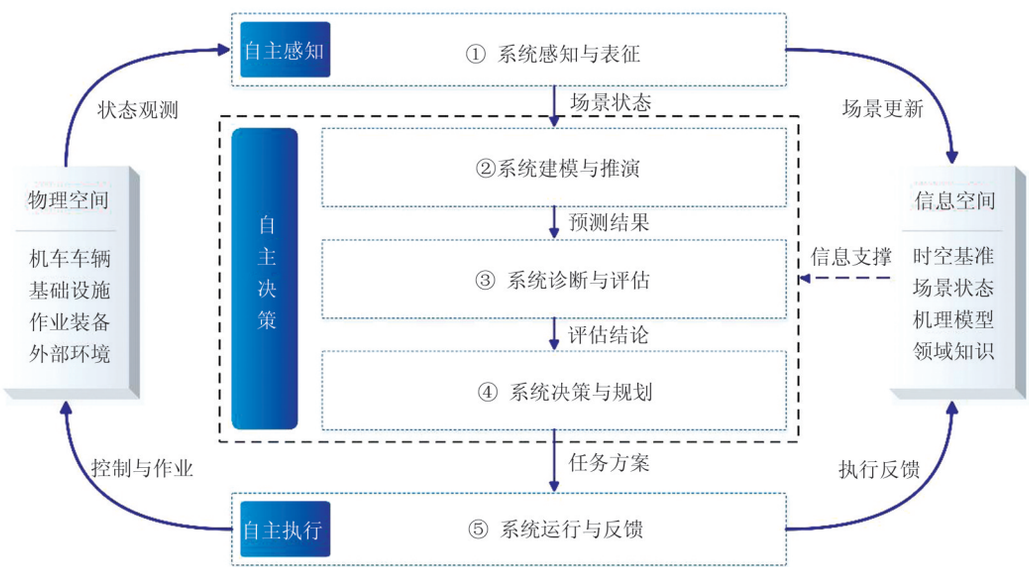



图 2　自主式重载铁路系统空间智能共性参考架构

Fig. 2　Common Reference Architecture for Spatial Intelligence in Autonomous Heavy-Haul Systems

1）系统感知与表征。形成多源观测获取、对象状态识别与运行场景表达能力。面向机车车辆、作业装备、基础设施及沿线环境，组织对象的几何形态、语义属性、空间关系和动态状态，表达线路与设备的连接关系、设施与部件的组成关系，以及移动装备与基础设施的相对位置和运行关系。通过对象同一性关联与时空关系约束，保持廊道、区段、设施和部件等不同尺度表达的一致性。依据任务要求与信息需求调整感知安排，输出具有明确对象标识、状态时刻及质量信息的场景状态。

2）系统建模与推演。形成作用过程描述、状态变化预测与行动后果分析能力。依据场景表征提供的对象结构、空间关系和当前状态，组织列车动力学、设施响应与退化、运输组织及能源供需等专业模型，描述物理作用、业务联系与运行约束。根据任务范围和预测时段，衔接系统整体行为与关键区段、设施和部件的局部响应，推演给定初始状态、外部条件和候选行动下的系统变化，输出预测状态、过程响应、影响范围及相应不确定性，为状态研判和方案决策提供依据。

3）系统诊断与评估。形成异常辨识、原因分析、风险判断与效能评价能力。诊断综合观测证据与模型响应，识别功能异常、性能劣化和结构损伤，分析可能原因及关联影响；评估依据工程要求与评价准则，判断当前或预测状态的安全性、可靠性及运行效能。结合异常位置、作用范围和对象关系，分析其对列车运行、设施服役与作业任务的影响，检验候选方案的约束满足程度，并依据执行结果评价目标达成情况，输出诊断结论、风险水平及方案评价结果。

4）系统决策与规划。形成行动策略选择、任

务分解与资源协调能力。面向运输组织、列车操控、设施运维、应急处置和能源管理,依据场景状态、推演结果与评估结论,确定行动优先次序,明确执行对象、作业位置、实施时间、任务顺序及资源配置。将线路连通、区间占用、列车间隔、维修天窗、装备能力与供能条件纳入约束,通过候选方案生成、推演和评价的迭代,形成具有明确执行条件的任务方案与控制策略;信息不足时,提出补充观测或进一步计算的需求。

5)系统运行与反馈。形成任务实施、执行协调与反馈调整能力。依托列车控制、装备控制及业务执行系统落实任务方案,协调各主体的空间占用、运行间隔、执行时序与任务衔接。将实际运行状态、资源消耗和作业结果与预测状态及任务要求比较,在既定权限内调整执行过程;偏差超出允许范围时,反馈至决策与规划模块重新评估方案。执行记录与实际效果持续用于场景更新、模型校正、风险重评和任务重规划,超出自主能力边界时按预定机制实施安全处置。

上述模块通过观测更新、方案推演、评价约束与执行反馈构成自主闭环。其中,建模与推演贯穿状态认知、方案比较和执行校核,诊断与评估持续约束决策及执行,决策与规划也可反向提出观测和模型更新需求。不同自主化等级体现为各模块的任务覆盖范围、自主组织能力和人工介入条件的差异。

物理等效数字孪生、多模态空间推理和多专业协同空间智能体是实现上述功能的三类共性技术。数字孪生提供场景状态、机理模型与虚实验证环境,空间推理支撑证据理解、过程分析和策略判断,空间智能体组织模型调用、任务规划与协同执行。三者交叉支撑5个模块,共同推动空间信息由状态表达向认知推理与自主行动拓展。

## 2 自主式智慧重载空间智能关键技术挑战

面向物理世界的自主任务,空间智能需要贯通环境理解、过程预测与行动交互,并依据实际反馈持续校正判断[6]。前述参考架构明确了自主式智慧重载的共性功能,其实现仍需解决多尺度对象与物理过程的一致表征、多模态证据与专业知识的协同推理,以及工程约束下的任务组织与执行等问题。本文围绕物理等效数字孪生、多模态空间推理和多专业协同空间智能体三类关键技术,分析研究基础、主要挑战与发展方向。其中,数字孪生提供场景状态、机理模型与验证环境,空间推理形成状态解释、后果预测与策略依据,空间智能体组织任务规划、协同行动与执行反馈。三者通过状态共享、模型交互和任务衔接,共同支撑自主闭环,如图3所示。




图3 自主式智慧重载空间智能关键技术及协同关系

Fig. 3 Key Technologies and Their Interactions for Autonomous Spatial Intelligence

### 2.1 重载铁路系统物理等效数字孪生

数字孪生通过物理对象信息、观测数据与数字模型的持续交互,支撑状态分析、过程预测和决策优化[7-9]。面向重载铁路自主运行,数字孪生需进一步提供可用于行动后果推演与方案验证的数字环境[10-11]。“物理等效”指的是针对给定任务、工况和时空尺度,在明确的误差范围内,保持数字模型与实际系统关键状态及行为响应的一致性,为后续推理和决策提供可验证的物理依据。

重载铁路是由“车-线-站-网-地”构成的耦合系统,涵盖机车车辆与作业装备、线路与站场设施、运输路网及沿线地理地质环境,并涉及牵引供电、通信信号等专业系统。各类对象通过列车

纵向作用、轮轨与弓网相互作用、结构荷载传递及环境扰动形成联系,同时受到运输组织和作业时序约束。在长编组、大轴重条件下,列车动力响应与基础设施服役状态相互影响,要求数字孪生贯通几何结构、物理状态与行为机理,统一表达对象形态与空间关系、运行与服役状态,以及作用过程和演变规律。

实景三维建模为铁路数字孪生提供了空间基础,相关研究已提出从几何表达向实体、过程及机理建模拓展的技术路径[12]。摄影测量、激光扫描和多源数据融合支撑廊道地形与设施几何重建[13],建筑信息模型与地理信息系统融合连接工程结构信息和外部地理环境[14]。数字孪生铁路的数据-模型-知识集成表达研究,进一步在统一时空框架下组织多尺度对象及其关联关系[15];知识引导的高速铁路分层场景生成探索了领域知识与场景建模的结合[16];重载运行钢轨表面损伤预测通过数字孪生联系运行条件与设施状态变化[17]。这些研究分别从信息组织、场景构建和过程预测等方面,推动铁路数字孪生由几何表达向过程推演拓展。

面向智慧重载铁路的自主任务,关键挑战在于建立观测状态、模型参数与系统响应之间可校准、可验证的联系,在线概率更新与多保真数字孪生研究为观测融合、模型修正及不确定性分析提供了方法基础[18-19]。几何与属性信息需要进一步关联载荷、边界条件和作用过程,才能支持行动后果分析;列车瞬态动力响应、设施累积劣化及环境变化具有不同的时空尺度,增加了模型耦合、状态传递与动态更新难度;隐蔽病害、复合故障及低频高后果事件的观测不足,又限制了模型校准和极端工况验证。因此,模型可信性需要从空间结构合理性、物理响应一致性和跨工况适用性等方面综合评价。

针对上述问题,需要加强跨尺度机理模型耦合与观测驱动更新,并探索结构语法与物理约束协同的生成式数字孪生建模。利用结构语法表达工程对象的组成、连接及空间配置规则,结合载荷、边界条件、接触关系与演变规律,约束场景生成与过程推演。通过实测数据校准模型参数、更新对象状态,在此基础上设置不同编组、线路条件、装备状态及环境扰动,生成相应运行场景并计算系统响应。结合独立观测或试验验证,评估关键响应误差与模型适用范围,为空间推理模型训练、行动后果分析及智能体任务验证提供支撑。

### 2.2　重载铁路系统多模态空间推理

多模态空间推理是在统一时空参照下,综合观测数据、空间模型与领域知识,对对象关系、状态变化及行动影响进行分析判断的过程。物理等效数字孪生为其提供场景状态和专业模型,多模态大模型为跨模态信息理解与知识组织提供实现途径,在线概率更新与多保真数字孪生研究为观测融合、模型修正及不确定性分析提供了方法基础[20-21]。面向重载铁路,其核心任务是将多源证据置于具体运行情境中,解释状态变化、分析行动后果并形成候选策略,为自主决策提供依据。

重载铁路的推理需求具有鲜明的空间关联与多专业耦合特征。长编组列车牵引制动策略需要结合全列车沿线分布、线路坡度与曲线、车辆受力和制动状态,分析操纵方式对纵向冲动、运行时间及能耗的影响;运输与维修协同需要联系设施状态、列车运行计划、区间占用和维修天窗,判断维修需求及其对运输能力的影响[22]。因此,空间推理需要贯通局部观测、对象相互作用与业务过程,形成跨对象、跨专业的判断依据。

经验规则、知识图谱、深度学习与仿真计算分别提供规则判别、关系组织、特征学习和过程计算能力,物理信息学习进一步促进观测数据与机理约束融合[23-26]。多模态模型研究从空间关系理解、时空预测和专业工具协同等方面拓展了研究路径:SpatialVLM 利用三维空间问答数据增强空间关系判断[27];UrbanGPT 结合时空依赖编码与指令微调开展城市时空预测[28];TrafficGPT 通过语言模型与交通分析工具协同,支持交互式交通分析和决策辅助[29];面向几何与拓扑关系的大模型能力评估,则为检验空间推理的适用范围提供了依据[30]。这些进展为重载铁路提供了方法基础,其工程适用性仍需结合具体任务和运行条件验证。

然而,将上述方法用于重载铁路自主决策,仍需解决多源信息如何相互印证、推理结果如何符合实际工况与运行要求的问题。关键挑战在于多模态证据、物理作用与运行约束的协同表达。图像、点云、监测波形、运行轨迹和检修记录在空间参照、采样频率与语义粒度上存在差异,需要对应到同一对象及其具体工况,才能形成相互校核的推理依据。空间邻近、统计相关、物理作用和业务依赖具有不同含义,异常成因及其跨对象影响需要结合机理与专业证据判断。从状

态解释转向策略生成,还需建立行动、系统响应与业务影响之间的联系,检验候选方案是否满足运行规程、资源能力和安全边界要求。观测证据不足或工况超出模型适用范围时,推理结论的不确定性也需要明确表达,并结合工程预测中的不确定性量化方法进行评价[31]。

针对上述问题,需要研究工程语义引导的多模态联合表征与机理约束推理。依托数字孪生,将观测状态、历史事件和模型响应关联至具体对象及工况,在对象对应、空间关系和时间顺序约束下开展跨模态对齐,结合自监督预训练[32]与领域知识适配,形成面向运行情境的统一表征。在此基础上,融合多模态模型的情境理解与候选策略生成能力,以及专业模型的过程推演与约束检验能力,通过动力学仿真、运输组织分析和优化计算评价方案,并依据计算反馈修正判断。结合证据溯源、不确定性分析与跨工况验证,明确推理结果的可靠性和适用范围,为重载铁路自主决策提供可靠依据。

### 2.3 重载铁路系统多专业协同空间智能体

空间智能体是以对象的空间结构、动态状态及相互作用为依据,在任务目标与时空约束下组织感知、推理、规划和行动,并通过环境反馈调整行为的智能系统[33]。面向重载铁路,多专业协同空间智能体需要将运输组织、装备运行、设施运维、安全保障和能源管理等专业能力,组织为具有任务依赖、执行分工与反馈机制的协同过程,实现从状态研判和方案形成到任务实施的衔接。

本文按主要行动接口与作用对象,将空间智能体区分为数字行动智能体与物理行动智能体两类。数字行动智能体依托数字孪生和业务系统,调用空间分析、专业仿真与优化工具,完成方案检验、任务分配和流程调度;物理行动智能体依托列车、无人机、巡检机器人及作业装备,通过定位感知、运动规划和控制执行与物理环境交互,行为受到装备构型和作业空间约束,体现具身特征。“多专业”对应知识体系与职责分工,两类行动接口对应执行方式,同一业务任务可由二者协同完成。

重载铁路跨专业任务具有状态部分可观测、决策相互依赖和反馈时效不一等特征。长编组列车运行调整涉及运输调度、牵引制动与供能管理,区段异常处置涉及现场观测、风险评估、行车组织和检修作业,不同专业的行动可能改变其他任务的执行条件。现有研究为此提供了不同层次的方法基础:PaLM-E融合视觉、连续状态估计和语言输入,支持机器人任务规划[34-35];RT-2学习视觉、语言与机器人动作之间的映射[36];ReAct通过推理与外部行动交替推进任务[37];Spatial-Agent面向地理分析组织可执行的空间计算流程[38]。铁路多智能体强化学习研究还探索了列车时刻表的协同编制[39]。上述工作分别支持环境交互、工具调用与主体协作,尚需进一步处理重载铁路异构专业之间的联合约束。

重载铁路多专业协同空间智能体的关键挑战,在于将任务目标转化为满足工程约束的具体行动、协调不同专业的任务执行,以及依据不完整或滞后的反馈调整方案。首先,运输调整、设备检修等任务需要落实到明确的对象、位置、时序和操作要求,模型与工具调用须符合适用工况,执行指令须满足装备能力和作业规程。其次,各专业独立形成的可行方案,在共同使用线路、时间窗口、装备及能源资源时仍可能发生冲突,需要统筹任务依赖和资源占用,保证联合执行的可行性。最后,观测误差、通信时延和执行偏差可能影响任务判断,并在连续决策中累积;设施劣化与维修效果又具有较长的时间尺度,难以通过即时反馈充分评价。因此,智能体需要综合实时观测与长期状态记录,判断任务进展和处置效果,为策略修正与异常恢复提供依据。

针对上述问题,需要建立工程约束下的任务表达与协同执行机制,将业务目标转化为具有明确前置条件、预期效果和完成判据的任务,在共享场景状态下表达任务依赖、资源占用与执行时序,开展任务分配、冲突消解和动态重规划。数字行动智能体组织专业计算与业务流程,物理行动智能体依托专业控制及安全防护系统落实装备行动,并通过数字孪生推演与现场反馈校核执行条件。持续比较预测状态、指令执行状态和实际结果,明确补充观测、方案调整及安全处置的触发条件,以任务完成、约束满足和异常恢复等指标评价协同效果,形成可追溯、可验证的自主任务闭环[40]。

## 3 自主式智慧重载空间智能应用场景

基于前述参考架构,围绕跨节点运输协同、单列操纵与列车群组控制、智能体与无人装备协同,以及行车与供电联合调控,分析典型场景的空间智能需求与实现机制,探讨测绘地理信息支撑重载铁路自主运行的应用路径。

### 3.1　自主式重载铁路产运销一体化智慧运输组织

重载铁路运输服务正向贯通矿山、铁路、港口、航运、仓储与终端用户的大宗商品供应链延伸[2]。自主式智慧物流网络以客户需求为牵引、产运销一体化协同为基础，在利益协调与资源共享机制下，将运输需求转化为跨主体、跨运输方式的资源配置和作业安排。铁路内部贯通“计划-调度-车站-列车”，对外衔接多式联运中的枢纽集疏运、装卸与库存管理[41]，统筹送达时效和综合物流成本，如图 4 所示。

支撑这一体系的空间基础是能够表达网络连接、资源分布与作业状态的数字孪生物流场景。在统一时空参照下，组织铁路、公路、航线及站场、堆场、泊位等信息，关联运输装备位置、货物批次、库存状态与作业进度，将网络连通、线路通过能力、节点作业能力及交付时窗纳入方案约束。结合分货类、分流向、分时段的需求预测[42-43]，优化运输方式组合、径路选择与货流分配[44]，联动列车运行图、机车运用及车站作业计划，协调铁水联运、公铁联运中的运输与中转安排。




图 4　自主式铁路产运销一体化智慧运输组织

Fig. 4　Autonomous Integrated Transport Organization in Heavy-Haul Logistics Network

朔黄铁路“按图运营系统”于 2025 年 5 月全面试运行，支持产销联动、运力适配、施工协同及运输计划自动铺排与优化[45]。同年 3 月 22 日投运的黄骅港站智能调车系统，衔接作业计划编制、进路排列与调车自动驾驶，利用北斗定位和 5G 通信支持机车自动操纵及停车对位；运营方公布的调车计划自动编制率为 85%，进路智能排列率超过 95%[46]。

面向更高自主化水平，空间智能需要沿网络拓扑与作业依赖关系，推演节点能力变化、货流波动和作业延误对运输衔接、库存及交付时效的影响。在既定业务权限与安全约束下，自主协调矿区发运、列车开行和港站作业，并通过执行反馈校正场景状态与过程模型，依据运行偏差调整任务，形成产运销一体化与多式联运条件下的跨节点自主闭环。

### 3.2　自主式万吨重载列车群组智能运行

在大轴重、长编组条件下，车辆沿线分布、分布式动力操控与制动传播时延共同影响全列车纵向受力[47]，单列运行调整又会改变相邻列车的追踪条件。空间智能通过关联车辆位置、线路条件与动力学状态，贯通列车牵引制动协调和列车之间协同追踪，支撑单列操纵优化与群组运行，如图 5 所示。

重载机车自主感知与智能控制需要将各车辆位置、载荷及牵引制动状态与线路纵断面对应。长编组列车可同时跨越不同坡段，坡道阻力差异、分布式动力操控与制动传播时延共同影响全列车纵向受力。依托组合定位、多传感器融合及车地协同观测，关联坡度、曲线、限速和电分相信息，补充车载视域之外的线路环境信息。机车智能体据此调用动力学与制动模型，推演候选操纵方案下的车钩力、制动距离及能耗，协调分布式动力操控与空电联合制动，经专业控制系统执行，并依据实际响应修正状态估计和操纵策略[48-49]。

重载列车群组自主协同运行，以具备独立牵引制动能力的列车为单元，通过列车间、车地间及列车与调度系统信息交互，衔接列控、联锁与行车组织。综合各列车位置、速度、制动能力和

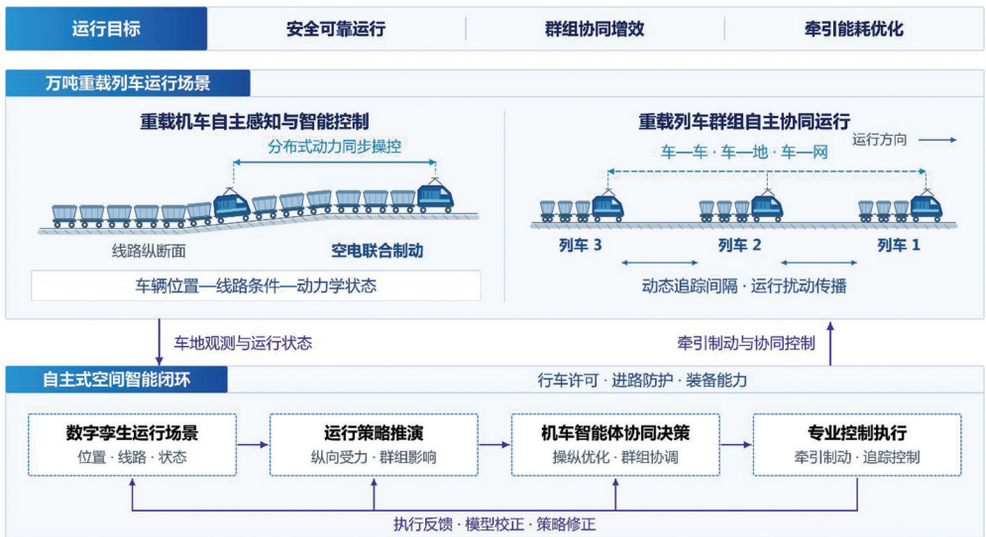



图5 自主式万吨重载列车群组智能运行

Fig. 5 Autonomous Coordinated Operation of Groups of 10 000-Tonne Heavy-Haul Trains

完整性状态,顾及定位误差、通信时延及通信异常,推演前后列车操纵变化与扰动传播[50]。在列控系统给定行车许可和进路防护约束下,协同运行速度、牵引制动及追踪间隔,通过反馈修正单列策略与群组方案,兼顾纵向受力、追踪安全和群组运行稳定性[51-52]。

澳大利亚力拓AutoHaul系统已实现重载列车无人驾驶商业运营[53]。朔黄铁路2021年移动闭塞发布材料提出,该技术可将平均发车间隔由11 min缩短至7.3 min,约缩短34%[54];2024年万吨级无人驾驶试验测算预计,无人驾驶批量推广后,平均运行速度提高1.7 km/h,平均牵引能耗降低2.9%[55]。2025年12月,包神铁路完成7列5 000 t级列车组成的3.5万t级群组试验,验证虚拟连挂、动态组群和自动解编等功能[56]。

面向更高自主化水平,需进一步贯通风险辨识、策略优化、异常处置与安全降级,通过工程验证逐步扩展自主运行范围。人员职责随系统能力提升,由现场操纵向运行监督、远程干预和异常接管转变,推动单列自动驾驶向列车群组自主协同运行演进。

### 3.3 自主式基础设施少人、无人智能运维

重载循环荷载与外部环境共同影响轨道、路基和桥隧的服役性能,高密度运输与大功率牵引对通信信号和牵引供电的可靠性提出更高要求。综合检测列车、轨旁检测和在线监测,结合遥感、视频、光纤及雷达等手段[57-59],已提供多源观测基础,但检测信息向诊断决策的转化及无人装备自主作业能力仍需加强。面向大中修、日常维修、巡视检查和应急保障,可围绕“机械化换人、数字化减人、智能化无人”,将空间智能融入装备作业与运维管理,支撑少人化、无人化运维,如图6所示。

“机械化换人”以成套装备替代重体力、高风险人工操作。针对换轨换枕、捣固打磨及桥隧整治,结合山区线路、有限空间和维修天窗配置作业装备。高精度定位与精密测量将轨道线形、构件位置及检测结果对应至作业部位,支撑机械定位、工艺参数设定与质量检验;通过任务指令交互和作业状态回传,为多机协同及自主作业提供装备与控制基础。

“数字化减人”通过设备信息关联与流程贯通,减少人工转录、重复核查和线下协调。依托统一时空基准与设备标识,贯通设备履历与典型设施数字孪生、综合检测监测、生产作业闭环管理三类系统,将设计施工、多源检测及历次检修信息对应至同一设备和构件[60-61],为诊断预测、维修优化及设备更新提供连续、可追溯的依据。

“智能化无人”以限定条件下的自主巡检、自主检修和风险处置为目标。空间智能体综合观测证据、检修履历与专业模型开展诊断预测,依托数字孪生比选方案,依据热巡、雨巡等需求及现场变化调整任务,协调机巢无人机、巡检机器人和智能检修装备。机器人自主测绘与铁路巡检车辆研究为定位、感知和检测协同提了基础[62-63]。足式机器人研究已验证复杂地形下感知与运动控制协同的可行性[64];面向铁路作业,具身智能装备仍需结合设施几何形态、作业空间与工艺要求,在安全约束下执行相应操作;过程监

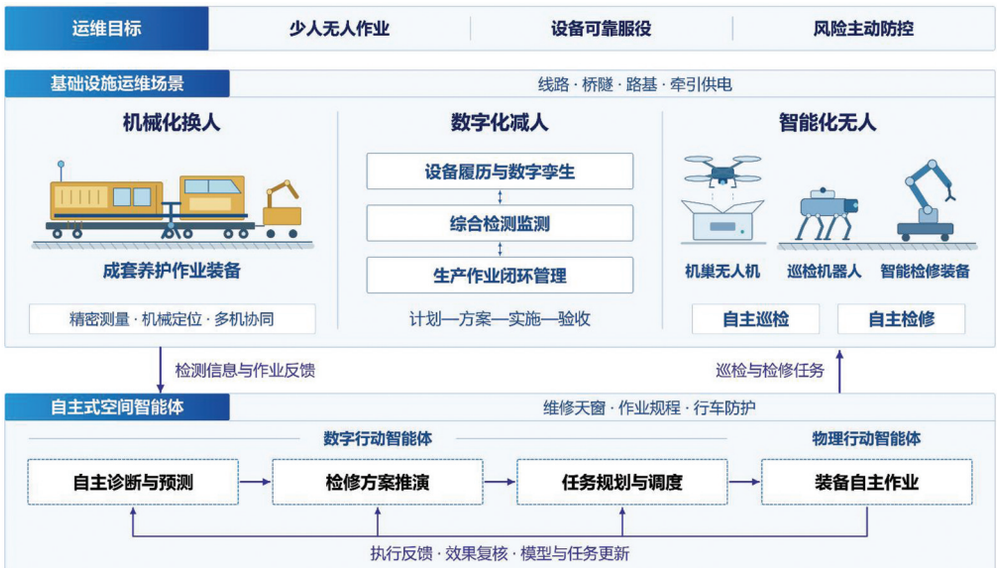



图 6　自主式基础设施少人、无人智能运维

Fig. 6　Autonomous Infrastructure Operation and Maintenance with Reduced Human Intervention

测与作业复测反馈支撑状态更新、效果复核和任务调整,形成“检-诊-治”闭环。

### 3.4　自主式“网源储车云”一体化交能融合

重载铁路绿色发展正由单设备单站点节能,向能源供给、列车运行与运输组织的系统协同拓展[65]。2025 年,交通运输部等十部门联合印发《关于推动交通运输与能源融合发展的指导意见》,提出加强基础设施规划协同,推进清洁能源开发利用[66]。面对供需协调不足、再生制动电能消纳受限及节能改造局部化等问题,需要统筹沿线能源资源、牵引供电能力与运输需求,推动铁路向产用能一体化发展[67-69]。

实现上述协同,需要在“源网荷储”框架下进一步纳入列车移动负荷与运输组织,依托云端平台构建“网-源-储-车-云”一体化交能融合体系,如图 7 所示。其中,网端采用柔性牵引供电、同相供电等技术,改善供电条件与电能质量;源端促进沿线分布式新能源接入与就近消纳;储端支撑牵引负荷调节与再生制动电能存储;车端结合运行图、编组和操纵状态开展功率预测与用能优化;云端依托多源供能数字孪生集成运行信息与专业模型,为行车与供电联合调控提供支撑。

该场景对空间智能的需求源于列车移动负

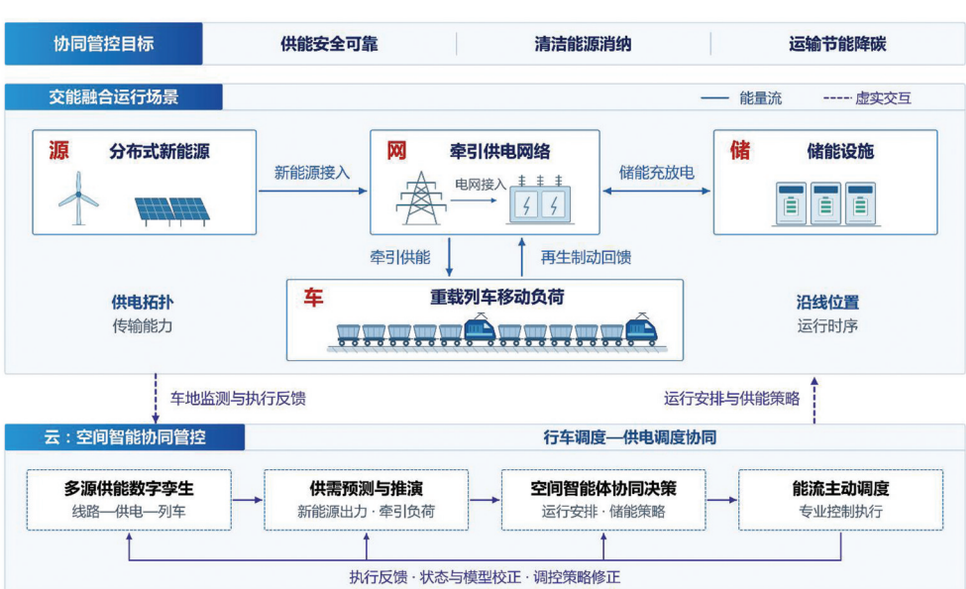



图 7　自主式“网-源-储-车-云”交能融合智能管控

Fig. 7　Autonomous Transportation-Energy Coordination Based on Grid-Generation-Storage-Train-Cloud Framework

荷与沿线供能的动态时空匹配。列车位置与牵引供电网络的实际运行拓扑共同决定供电连接关系;坡度、编组载荷及操纵状态影响牵引和再生制动功率。牵引和再生制动功率随列车位置、线路坡度及运行状态变化,新能源出力具有时空波动,能量交换还受供电拓扑、回馈通道、传输能力与储能状态约束。重载铁路柔性牵引变电所研究已探索光伏、储能和牵引负荷的协同能量管理[70]。空间智能可进一步关联线路环境、能源设施与列车状态,联合列车运行和牵引供电模型,推演运输调整对能源供需的影响及供能变化对列车运行的约束,支撑运输、供能与储能的联合优化。

面向自主运行,空间智能体组织供需预测、方案推演与协同决策,在运输任务、供电安全及设备能力约束下,协调运行安排、供能策略和储能充放电,经专业控制系统落实能流调控。车地监测与执行反馈持续用于校正状态和模型、检验调控效果,并依据供需变化及运行偏差修正策略,形成行车与供电协同的自主闭环,统筹效率、能耗、成本与碳排放,支撑低碳重载运输通道建设。

## 4 结 语

智慧重载铁路自主式发展需要在统一时空框架下理解移动装备、基础设施与环境的相互作用,将状态认知转化为满足工程约束的协同行动。空间智能是贯通这一过程的重要基础,也是测绘地理信息与铁路工程、人工智能及自动控制交叉融合的重要研究方向。本文围绕自主式智慧重载的概念内涵与能力演进,提出空间智能共性参考架构,梳理关键技术挑战,并结合运输组织、列车群组运行、基础设施运维及交能融合,探讨空间信息支撑“感知-决策-执行”自主闭环的应用机制。

面向上述需求,测绘地理信息需进一步贯通空间表征、认知推理与自主行动:发展物理等效数字孪生,实现几何结构、物理状态与行为机理的一体化表达;加强数据、模型与知识协同的多模态空间推理,提升状态诊断、过程预测与行动决策能力;构建多专业协同空间智能体,衔接任务规划、装备控制与业务执行。本文提出的分级与架构属于研究性参考框架,其适用性仍需结合具体任务与运行条件开展工程验证。推进上述能力的协同实现,将拓展测绘地理信息服务复杂工程系统自主运行的研究内涵与应用边界,为重载铁路及交通、能源等领域的自主化发展提供共性支撑。

## 参 考 文 献


[1] ZHAI W M, STICHEL S, LING L. Train-Track Coupled Dynamics Problems in Heavy-Haul Rail Transportation [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2025, 63(7): 1187-1240.

[2] International Heavy Haul Association. Heavy Haul Vision 2030: Railways of the Future [R/OL]. [2026-09-28]. https://ihha.net/vision-2030.

[3] 李德仁, 郭昊南, 金文杰. 时空智能学:理论与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(9): 1755-1764.
LI Deren, GUO Haonan, JIN Wenjie. Spatiotemporal Intelligence: Theory and Applications[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(9): 1755-1764.

[4] MAI G C, HUANG W M, SUN J, et al. On the Opportunities and Challenges of Foundation Models for GeoAI (Vision Paper)[J]. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems*, 2024, 10(2): 1-46.

[5] RAMSAY D. Autonomous Networks: Level 4 Industry Blueprint[R/OL]. [2026-09-28]. https://inform.tmforum.org/research-and-analysis/reports/autonomous-networks-level-4-industry-blueprint.

[6] LI F F. With Spatial Intelligence, AI Will Understand the Real World [EB/OL]. (2024-04-11) [2026-09-28]. https://www.ted.com/talks/fei_fei_li_with_spatial_intelligence_ai_will_understand_the_real_world.

[7] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1267-1281.
TAO Fei, ZHANG Chenyuan, QI Qinglin, et al. Digital Twin Maturity Model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(5): 1267-1281.

[8] KAPTEYN M G, PRETORIUS J V R, WILLCOX K E. A Probabilistic Graphical Model Foundation for Enabling Predictive Digital Twins at Scale [J]. *Nature Computational Science*, 2021, 1(5): 337-347.

[9] WILLCOX K, SEGUNDO B. The Role of Computational Science in Digital Twins[J]. *Nature Computational Science*, 2024, 4(3): 147-149.

[10] THOMPSON E A, LU P, ALIMO P K, et al. Revolutionizing Railway Systems: A Systematic Re-

view of Digital Twin Technologies[J]. *High-speed Railway*, 2025, 3(3): 238-250.

[11] ALBALKHY W, KARMAOUI D, DUCOULOMBIER L, et al. Digital Twins in the Built Environment: Definition, Applications, and Challenges[J]. *Automation in Construction*, 2024, 162: 105368.

[12] 张利国，丁雨淋，朱庆，等. 铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2024，49(6)：1018-1027.
ZHANG Liguo, DING Yulin, ZHU Qing, et al. A Holistic Multi-domain Association Model for Railway Geographic and Geologic Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(6): 1018-1027.

[13] 毛庆洲，徐浩轩，朱璟，等. 利用高密度点云现场检测在建隧道超欠挖[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2025，50(3)：562-570.
MAO Qingzhou, XU Haoxuan, ZHU Jing, et al. Immediate Detection of Over-Under Break of Tunnel Under Construction Using High-Density Point Cloud[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(3): 562-570.

[14] 谢亚坤，张杨，胡语侬，等. 顾及几何细节特征的铁路基础设施BIM简化算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2026，51(4)：826-839.
XIE Yakun, ZHANG Yang, HU Yunong, et al. A Simplified Algorithm to Railway Infrastructure BIM Considering Geometric Detail Features[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(4): 826-839.

[15] LI H K, ZHU Q, ZHANG L G, et al. Integrated Representation of Geospatial Data, Model, and Knowledge for Digital Twin Railway[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2022, 15(1): 1657-1675.

[16] ZHANG H, ZHAO W, HAN Z J, et al. Knowledge-Guided Digital Twin Modeling Method of Generating Hierarchical Scenes for a High-Speed Railway[J]. *Transactions in GIS*, 2023, 27(7): 2017-2041.

[17] AHMAD S, SPIRYAGIN M, WU Q, et al. Development of a Digital Twin for Prediction of Rail Surface Damage in Heavy Haul Railway Operations[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2024, 62(1): 41-66.

[18] DE ANGELIS M, GRAY A, FERSON S, et al. Robust Online Updating of a Digital Twin with Imprecise Probability[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 186: 109877.

[19] DESAI A S, NAVANEETH N, ADHIKARI S, et al. Enhanced Multi-Fidelity Modeling for Digital Twin and Uncertainty Quantification[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2023, 74: 103525.

[20] LIANG P P, ZADEH A, MORENCY L P. Foundations & Trends in Multimodal Machine Learning: Principles, Challenges, and Open Questions[J]. *ACM Computing Surveys*, 2024, 56(10): 1-42.

[21] YIN S K, FU C Y, et al. A Survey on Multimodal Large Language Models[J]. *National Science Review*, 2024, 11(12): nwae403.

[22] YANG H N, NI S Q, HUO H Y, et al. Integrated Robust Optimization of Maintenance Windows and Train Timetables Using ADMM-Driven and Nested Simulation Heuristic Algorithm[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 160: 104526.

[23] HOGAN A, BLOMQVIST E, COCHEZ M, et al. Knowledge Graphs[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 54(4): 1-37.

[24] WILLARD J, JIA X W, XU S M, et al. Integrating Scientific Knowledge with Machine Learning for Engineering and Environmental Systems[J]. *ACM Computing Surveys*, 2022, 55(4): 1-37.

[25] KARNIADAKIS G E, KEVREKIDIS I G, LU L, et al. Physics-Informed Machine Learning[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(6): 422-440.

[26] VON RUEDEN L, MAYER S, BECKH K, et al. Informed Machine Learning: A Taxonomy and Survey of Integrating Prior Knowledge into Learning Systems[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2023, 35(1): 614-633.

[27] CHEN B Y, XU Z, KIRMANI S, et al. SpatialVLM: Endowing Vision-Language Models with Spatial Reasoning Capabilities[C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Seattle, USA, 2024.

[28] LI Z H, XIA L H, TANG J B, et al. UrbanGPT: Spatio-temporal Large Language Models[C]//30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Barcelona, Spain, 2024.

[29] ZHANG S Y, FU D C, LIANG W Z, et al. TrafficGPT: Viewing, Processing and Interacting with Traffic Foundation Models[J]. *Transport Policy*, 2024, 150(C): 95-105.

[30] JI Y H, GAO S, NIE Y, et al. Foundation Models for Geospatial Reasoning: Assessing the Capabilities of Large Language Models in Understanding Geometries and Topological Spatial Relations[J]. *International Journal of Geographical Information Science*,

2025, 39(9): 1866-1903.

[31] NEMANI V, BIGGIO L, HUAN X, et al. Uncertainty Quantification in Machine Learning for Engineering Design and Health Prognostics: A Tutorial [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 205: 110796.

[32] GUI J, CHEN T, ZHANG J, et al. A Survey on Self-Supervised Learning: Algorithms, Applications, and Future Trends[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024, 46(12): 9052-9071.

[33] WANG L, MA C, FENG X Y, et al. A Survey on Large Language Model Based Autonomous Agents [J]. *Frontiers of Computer Science*, 2024, 18(6): 186345.

[34] DRIESS D, XIA F, SAJJADI M S M, et al. PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model[C]//The 40th International Conference on Machine Learning, Honolulu, USA, 2023.

[35] FIROOZI R, TUCKER J, TIAN S, et al. Foundation Models in Robotics: Applications, Challenges, and the Future[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2025, 44(5): 701-739.

[36] BROHAN A, BROWN N, CARBAJAL J, et al. RT-2: Vision-Language-Action Models Transfer Web Knowledge to Robotic Control [EB/OL]. [2023-07-15]. https://arxiv.org/abs/2307.15818.

[37] YAO S, ZHAO J, YU D, et al. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models [C]//The 11th International Conference on Learning Representations, Kigali, Rwanda, 2023.

[38] BAO R Y, YANG C, YU D Z, et al. Spatial-Agent: Agentic Geo-Spatial Reasoning with Scientific Core Concepts[C]//The 64th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, San Diego, USA, 2026.

[39] LI W Q, NI S Q. Train Timetabling with the General Learning Environment and Multi-agent Deep Reinforcement Learning [J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2022, 157: 230-251.

[40] BRUNKE L, GREEFF M, HALL A W, et al. Safe Learning in Robotics: From Learning-Based Control to Safe Reinforcement Learning[J]. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2022, 5: 411-444.

[41] ZHANG Y M, TAN X R, GAN M, et al. Operational Synchromodal Transport Planning Methodologies: Review and Roadmap[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2025, 194: 103915.

[42] ZHANG Y M, LI X L, VAN HASSEL E, et al. Synchromodal Transport Planning Considering Heterogeneous and Vague Preferences of Shippers[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2022, 164: 102827.

[43] ZHANG Y M, GUO W J, NEGENBORN R R, et al. Synchromodal Transport Planning with Flexible Services: Mathematical Model and Heuristic Algorithm[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2022, 140: 103711.

[44] WANG E T, YANG L X, LI P H, et al. Joint Optimization of Train Scheduling and Routing in a Coupled Multi-resolution Space-Time Railway Network [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 147: 103994.

[45] 芦明生, 孙振乾. 企业数字化转型管理新模式亮相我国西煤东运第二大通道[EB/OL]. (2025-05-13)[2026-09-28]. https://www.ceic.com/gjnyjtww/newCE0301/202505/dbb2f4ca2bb64d76a99bf7671ff2e557.shtml.
LU Mingsheng, SUN Zhenqian. A New Model of Corporate Digital Transformation Management Debuts on China's Second-Largest West-to-East Coal Transport Corridor[EB/OL]. (2025-05-13)[2026-09-28]. https://www.ceic.com/gjnyjtww/newCE0301/202505/dbb2f4ca2bb64d76a99bf7671ff2e557.shtml.

[46] 孙振乾, 王子昌. 我国自主研发首套重载铁路智能调车系统在朔黄铁路投运[EB/OL]. (2025-03-23)[2026-09-28]. https://www.ceic.com/gjnyjtww/chnjtyw/202503/bb3e0b2cf790467eac576f41e79121ab.shtml.
SUN Zhenqian, WANG Zichang. China's First Domestically Developed Intelligent Shunting System for Heavy-Haul Railways Enters Operation on the Shuohuang Railway [EB/OL]. (2025-03-23)[2026-09-28]. https://www.ceic.com/gjnyjtww/chnjtyw/202503/bb3e0b2cf790467eac576f41e79121ab.shtml.

[47] ZHANG W L, LI W, FAN Y, et al. Influence of Cyclic Pneumatic Brake on the Longitudinal Dynamics of Heavy-Haul Combined Trains[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(3): 2545-2557.

[48] WANG X, SU S, CAO Y, et al. Robust Cruise Control for the Heavy Haul Train Subject to Disturbance and Actuator Saturation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(8): 8003-8013.

[49] CAI L C, HUANG D Q. Trajectory Tracking Control of Heavy Haul Train in Whole Operation Procedure[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(11): 16225-16237.

[50] WU Q, GE X H, HAN Q L, et al. Railway Virtual Coupling: A Survey of Emerging Control Techniques[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(5): 3239-3255.

[51] CHEN L S, YANG H, JIN F Y, et al. Distributed Global Composite Learning Cooperative Control of Virtually Coupled Heavy Haul Train Formations [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(9): 11200-11213.

[52] MA X L, ZHOU M, WANG H W, et al. Virtual-Coupling-Based Timetable Rescheduling for Heavy-Haul Railways Under Disruptions[J]. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2024, 11 (5): 7045-7054.

[53] Rio Tinto. First Ore Delivered at Gudai-Darri Iron Ore Mine in the Pilbara[EB/OL]. (2022-06-15) [2026-09-28]. https://www. riotinto. com/news/releases/2022/rio-tinto-first-ore-delivered-at-gu - dai-darri-iron-ore-mine-in-the-pilbara.

[54] 郝华，章鹏. 国内首条移动闭塞技术重载铁路在朔黄铁路开通[EB/OL]. (2021-06-22) [2026-09-28]. https://www. ceic. com/gjnyjtww/chnjcxw/202106/ae98c3f87cb0413db82207c0918df56b. shtml.

HAO Hua, ZHANG Peng. China's First Heavy-Haul Railway Using Moving Block Technology Opens on the Shuohuang Railway[EB/OL]. (2021-06-22) [2026-09-28]. https://www. ceic. com/gjnyjtww/chnjcxw/202106/ae98c3f87cb0413db82207c0918df56b. shtml.

[55] 孙振乾，陈跃峰. 我国无人驾驶重载列车在朔黄铁路首试成功[N/OL]. 国家能源集团报，(2024-09-30) [2026-09-28]. https://epaper. ceic. com/pad/content/202409/30/content_7692. html.

SUN Zhenqian, CHEN Yuefeng. China's Unmanned Heavy-Haul Train Successfully Completes Its First Trial on the Shuohuang Railway[N/OL]. CHN Energy News, (2024-09-30) [2026-09-28]. https://epaper. ceic. com/pad/content/202409/30/content_7692. html.

[56] 张国振，魏博，成容，等. 中国3.5万吨重载铁路群组试验世界首次成功[EB/OL]. (2025-12-15) [2026-09-28]. https://qlth. crsc. cn/news/tsi_1653_4613_93309. html.

ZHANG Guozhen, WEI Bo, CHENG Rong, et al. China Successfully Completes the World's First 35 000-Tonne Heavy-Haul Train-Group Trial[EB/OL]. (2025-12-15) [2026-09-28]. https://qlth. crsc. cn/news/tsi_1653_4613_93309. html.

[57] MOSLEH A, MOHAMMADI M, SILVA R, et al. Recent Advances in Wayside Condition Monitoring for Railways: A Comprehensive Review[J]. *Railway Engineering Science*, 2026. DOI: 10.1007/s40534-025-00423-2.

[58] CHA Y J, ALI R, LEWIS J, et al. Deep Learning-Based Structural Health Monitoring[J]. *Automation in Construction*, 2024, 161: 105328.

[59] YE J Q, STEWART E, CHEN Q Y, et al. Deep Learning and Laser-Based 3-D Pixel-Level Rail Surface Defect Detection Method[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 2513612.

[60] SEDGHI M, KAUPPILA O, BERGQUIST B, et al. A Taxonomy of Railway Track Maintenance Planning and Scheduling: A Review and Research Trends[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215: 107827.

[61] LEE J S, YEO I H, BAE Y. A Stochastic Track Maintenance Scheduling Model Based on Deep Reinforcement Learning Approaches[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 241: 109709.

[62] 杨必胜，李健平，李清泉. 复杂空间机器人自主测绘的现状与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2026, 51(9): 1878-1890.

YANG Bisheng, LI Jianping, LI Qingquan. Autonomous Robotic Mapping for Complex Spaces: Progress, Challenges and Future Perspectives[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(9): 1878-1890.

[63] LI J, DURAZO-CARDENAS I, RUIZ-CARCEL C, et al. Smart Railways: The Design and Construction of an Autonomous Inspection and Maintenance Vehicle [J]. *Procedia CIRP*, 2024, 128: 61-65.

[64] MIKI T, LEE J, HWANGBO J, et al. Learning Robust Perceptive Locomotion for Quadrupedal Robots in the Wild [J]. *Science Robotics*, 2022, 7 (62): eabk2822.

[65] AHSAN N, HEWAGE K, RAZI F, et al. A Critical Review of Sustainable Rail Technologies Based on Environmental, Economic, Social, and Technical Perspectives to Achieve Net Zero Emissions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 185: 113621.

[66] 交通运输部，国家发展改革委，工业和信息化部，等. 关于推动交通运输与能源融合发展的指导意

见：交规划发〔2025〕42号[EB/OL]. (2025-04-25)[2026-09-28]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202504/t20250425_4167770.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Guiding Opinions of Ten Departments Including the Ministry of Transport on Promoting Integrated Development of Transportation and Energy: Jiao Gui Hua Fa [2025] No. 42[EB/OL]. (2025-04-25)[2026-09-28]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/zhghs/202504/t20250425_4167770.html.

[67] DING F, YANG J P, ZHOU Z. Economic Profits and Carbon Reduction Potential of Photovoltaic Power Generation for China's High-Speed Railway Infrastructure[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 178: 113272.

[68] DONG H Z, TIAN Z B, SPENCER J W, et al. Coordinated Control Strategy of Railway Multi-source Traction System with Energy Storage and Renewable Energy[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(12): 15702-15713.

[69] XING Z Y, ZHANG Z Y, GUO J, et al. Rail Train Operation Energy-Saving Optimization Based on Improved Brute-Force Search[J]. *Applied Energy*, 2023, 330: 120345.

[70] LI B, CHEN M W, YU G W, et al. Robust Real-Time Energy Management of Flexible Traction Substation with Energy Storage and PV for Heavy-Haul Railways[J]. *Control Engineering Practice*, 2025, 165: 106558.