文章编号：1003-1421(2026)06-0172-11
引用格式：王爱丽，孙喜利，靳磊，等. 铁路列车多智能体协同运行数字化仿真建模技术和系统研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：172-182.
WANG Aili，SUN Xili，JIN Lei，et al. Research on Digital Simulation Modeling Technology and System for Multi-Agent Collaborative Operation of Railway Trains[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：172-182.

铁路列车多智能体协同运行数字化仿真建模技术和系统研究

王爱丽[1]，孙喜利[2]，靳　磊[3]，王子腾[2]，李　璐[2]

(1.中国铁路信息科技集团有限公司 网信技术处，北京　100038；2.中国铁路信息科技集团有限公司 中铁信(北京)网络技术研究院有限公司，北京　100038；3.中国铁路信息科技集团有限公司 研发与建设处，北京　100038)

摘　要：在数字铁路发展的进程中，将数字化仿真、智能体等技术与铁路业务深度融合，开展铁路列车运行数字化仿真技术研究，对提升铁路列车运行管理的高效性、科学性具有重要意义。首先研究铁路列车物理运行环境数字化技术，分析铁路基础物理运行环境特征，采用主流数字化技术，应用模块化组件化的方式，分层次建立虚拟运行仿真对象的数字化模型，然后采用系统动力学和多智能体仿真系统等技术，研究构建铁路列车智能体协同运行仿真模型，应用图论和马尔可夫决策等技术建立多智能体间通信拓扑结构和仿真决策控制策略。最后设计和开发原型系统，对相关技术进行验证。研究成果可为铁路列车运行作业和能耗的数字提效管理提供重要的技术支撑和辅助决策。

关键词：铁路列车运行；物理空间模型；数字化仿真技术；多智能体技术；仿真原型系统
中图分类号：U231.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250822001

Research on Digital Simulation Modeling Technology and System for Multi-Agent Collaborative Operation of Railway Trains

WANG Aili[1]，SUN Xili[2]，JIN Lei[3]，WANG Ziteng[2]，LI Lu[2]

(1. Cyberspace and Information Technology Office, China Railway Information Technology Group Co., Ltd., Beijing 100038, China; 2. SinoRail (Beijing) Network Technology Research Institute Co., Ltd., China Railway Information Technology Group Co., Ltd., Beijing 100038, China; 3. Development and Construction Office, China Railway Information Technology Group Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: In the process of digital railway development, deeply integrating technologies such as digital simulation and intelligent agents with railway operations and conducting research on digital simulation technology for railway train operation are of great significance for enhancing the efficiency and scientificity of railway train operation management. Firstly, the digitalization technology of the physical operation environment of railway trains was studied; the characteristics of the basic physical operation environment of railways were analyzed, and mainstream digital technologies and a modular and componentized method were applied to hierarchically establish the

收稿日期：2025-08-22　　**修订日期**：2026-02-09
基金项目：中国铁路信息科技集团有限公司科技研究开发计划课题(2022A06)

digital models of virtual operation simulation objects. Then, by using technologies such as system dynamics and multi-agent simulation systems, the simulation model for the collaborative operation of railway train agents was studied and constructed. Moreover, technologies such as graph theory and Markov decision-making were applied to establish the communication topology structure and simulation decision control strategy among multiple agents. Finally, a prototype system was designed and developed to verify the related technologies. The research results can provide important technical support and auxiliary decision-making for the digital efficiency improvement management of railway train operation and energy consumption.

Keywords: Railway Train Operation; Physical Space Model; Digital Simulation Technology; Multi-Agent Technology; Simulation Prototype System

0　引言

数字铁路是服务国家战略、提质增能创效、保障运输安全、提升服务水平和促进高质量发展的重要手段，是数字时代推进铁路现代化的重要引擎。经过多年的发展，我国铁路在数字化基础设施建设、数字化创新应用等方面取得较大成效，为铁路工程建设、运输指挥、经营开发等提供了有力支撑[1]。在数字铁路发展的进程中，将数字化仿真、数字孪生、智能体等数字技术与铁路业务深度融合，开展铁路列车运行仿真技术研究，实现路网列车运行过程的数字化复现、列车运行方案的模拟预演，对提升铁路列车运行作业的高效性、科学性及数字化水平具有重要意义[2-4]。

国外研究机构围绕交通领域开展数字化仿真技术研究，如德国PTV公司研发了Vissim交通仿真平台，支持多方式交通混合仿真，广泛应用于交通工程设计、评估和科研；美国Caliper公司研发了TransModeler仿真系统，与GIS数据无缝集成，支持从宏观到微观的仿真；俄罗斯圣彼得堡理工大学研发了智能体的建模技术，对行人的复杂决策行为进行仿真模拟[3]。国内学者开展数字仿真技术在智慧交通、智能运营等方面的创新应用研究，黄正锋等[3]融合国内交通流特征，研发综合交通仿真平台并推广应用；刘亿等[4]开展数字孪生仿真技术在铁路智能车站领域的创新应用；孟昕然等[5]提出基于客流仿真模拟的铁路客运站安检通道设计优化方法；安真慧[6]开展高速列车多智能体系统的固定时间一致性研究，构建列车智能体领导跟随模型；马小平等[7]采用数字孪生并基于模型的系统工程技术，重新设计了铁路防灾监测仿真推演系统架构；严晗等[8]提出一种基于数字孪生仿真的城市轨道交通主动安全保障系统架构及运行机制。近几年，铁路行业还依托京张高速铁路(北京北—张家口)、京雄城际铁路(北京西—雄安)等工程项目，大力推进数字孪生仿真和人工智能等技术在数字铁路建造领域的创新应用。

我国铁路运输仿真研究已取得较大进展，但主要集中在列控系统、车站系统等。随着数字化技术的快速发展，为有效提升铁路列车运行的数字化管理能力，需进一步强化数字化仿真、智能体等技术在铁路列车运行管理方面的研究，虚拟映射铁路站-线-网列车运行状态，有效支撑铁路列车运营管理在数字孪生模拟、数字化分析研判、智能演算等方面的深化应用。研究围绕铁路列车运行数字化仿真需求，提出铁路列车运行仿真系统的研究架构，开展铁路列车物理运行环境数字化建模、铁路列车智能体协同运行仿真建模等研究，设计并开发仿真原型系统的架构及功能，对相关技术进行有效性验证。

1　研究框架

总体研究框架如图1所示，首先开展铁路列车物理运行环境数字化技术[7, 9]研究，通过分析铁路基础物理运行环境的空间信息、属性信息、构成成分、物理状态与实体关系[3]，以及采用主流数字化技术和模块化组件化的方式，分层次建立路网、线路、区间、车站、列车等虚拟运行仿真对象的数字化模型，以二维、三维、实景漫游的形式真实呈现物理运行环境，为仿真系统提供基础底座；然后，采用系统动力学(System Dynamics，SD)和多智能体仿真系统(Multi-Agent System，MAS)等技术[6, 10]，将每个列车实体抽象为单个智能体(Agent)模型，多个列车抽象为多智能体(Multi-Agent)系统模型，研

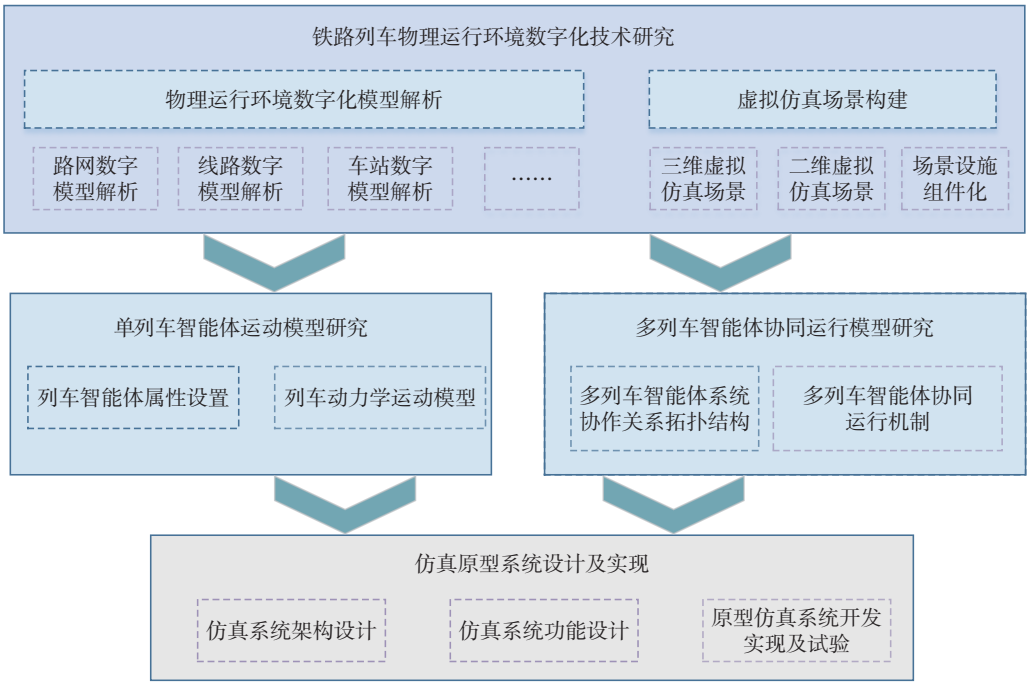


图1　总体研究框架

Fig.1　Overall research framework

究构建铁路列车智能体协同运行仿真模型；最后设计和开发仿真原型系统，对相关技术和模型进行有效性验证，以多个视角实现铁路物理运行环境的数字化展示，实现铁路列车运行过程的动态仿真复现，为铁路列车运行数字提效管理提供技术支撑。

2　铁路列车物理运行环境数字化技术研究

围绕铁路列车物理运行环境数字化开展关键技术研究，首先对铁路基础物理运行环境的空间信息、属性信息、构成成分、物理状态与实体关系进行分析，然后采用主流的Leaflet，GaodeMap，GIS，BIM和Unity等数字化技术，应用模块化组件化的方式，分层次建立路网、线路、区间、车站、列车等虚拟运行仿真对象的数字化模型，以二维、三维的形式真实呈现物理运行环境，为仿真系统提供基础底座。

仿真环境数字模型的构建、传输、交付和解读应包含模型单元的几何造型、几何精度、基本信息，并设定信息深度等级，按一定规则和要求展示具体信息。仿真环境数字模型构建流程如图2所示，定义仿真环境数字化模型拓扑结构，添加仿真环境模型关键要素，设置路网、线路、车站等要素、数据和衔接关系。

2.1　物理运行环境数字化模型解析

（1）路网数字模型信息解析。在电子地图的基础上，按照图层铺画铁路路网图，构建铁路路网数字模型。路网数字模型信息主要包括电子地图、线路、站点、区间等[7]。路网层面以全局的视角展示路网结构，将线路、站段、车场等大型节点转化为关键节点，建立“宏观锚点弧集合”，构建路网拓扑数字模型，实现路网整体情况的全局概览和数字信息管理。

（2）线路数字模型信息解析。采用拓扑图构建线路数字模型，实现运行线路铺画、沿线资源配置、沿线站点结构信息的管理，在考虑线路和路网布局结构的基础上，兼顾区段、车站股道等基本要素，以区段的衔接点、车站进站边界点、股道中心点等节点为关键点。数字模型信息主要包括线路基本信息和区段信息，其中线路基本信息包括线路编号、线路名称、设计速度、轨道类型、衔接关系等，区间信息主要包括线路坐标、里程、坡段、曲线、桥隧等。

（3）车站数字模型信息解析。分析车站运行环境、设施设备等要素，结合车站特征构建车站运行环境数字模型，对布局结构、运行状态、衔接关系

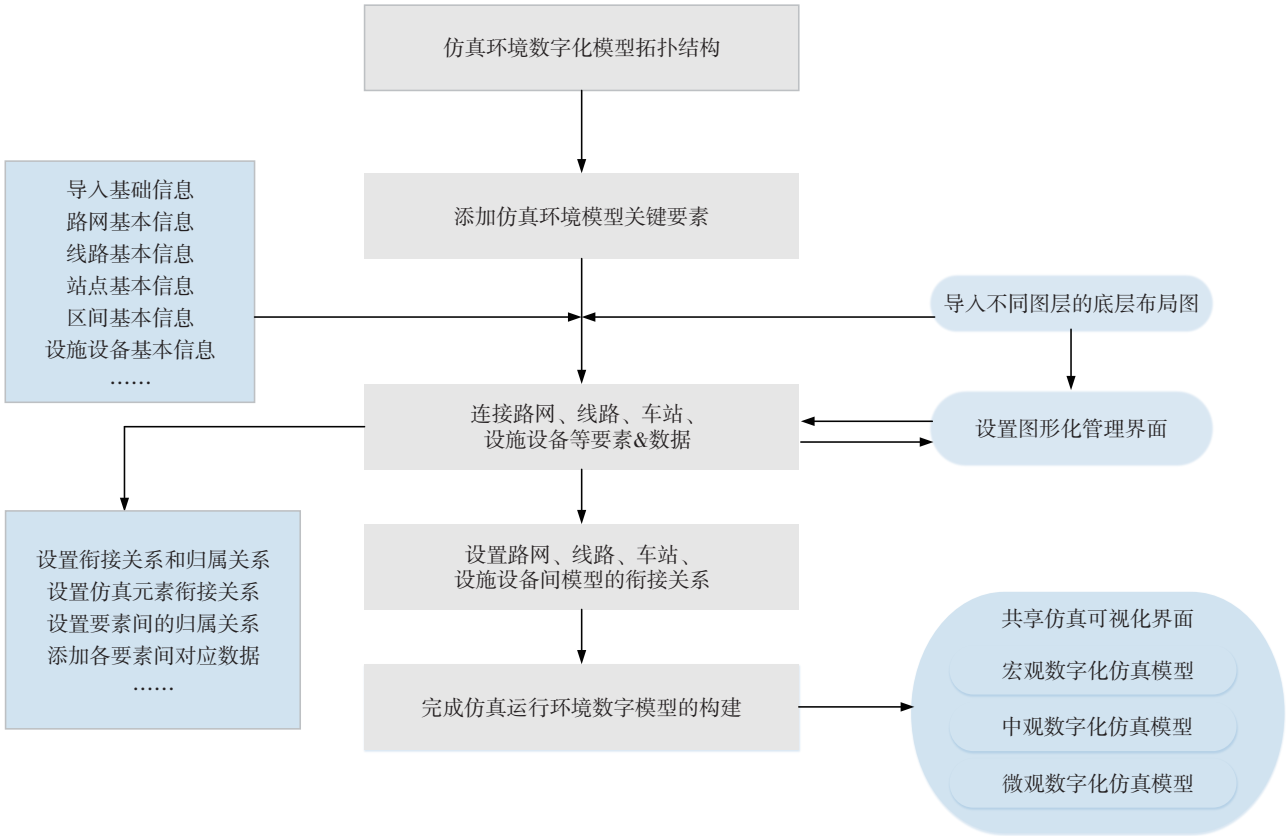


图2　仿真环境数字模型构建流程

Fig.2　Construction process of digital model for simulation environment

等信息进行管理和展示。车站数字模型信息主要包括编号、名称、类型、等级、位置坐标、前后站点、相邻区间编号或名称、车站基础设备设施、车站平面图等。

2.2　三维和二维虚拟仿真场景构建

（1）三维虚拟仿真场景构建。为快速构建虚拟运行仿真环境的三维模型，采用CAD与Revit三维建模软件，创建线路桥梁、路基、枕木、地下隧道等相关模型，配置相应的场景投影、地理参数、线路站点等信息，将模型导入GIS基础软件引擎中，设置相应的地理背景，将地理背景地图与导入的模型一起发布成地图服务，由前端Web调用相应的接口进行模型和线路的展示。将构建的三维模型导入Unity 3D软件引擎中进行着色渲染、表面贴图等，并发布生成可在Web中运行的WebGL应用，以构建高清场景下复杂的3D仿真模型[7, 11]。

（2）二维虚拟仿真场景构建。结合业务需求、成本和技术难度，选取矢量图技术绘制铁路路网二维图，电子底图采用矢量瓦片技术生成，支持高德、百度、天地图等不同来源的瓦片图层；通过读取车站名称、经纬度坐标等数据，在瓦片图层之上添加车站标记，基于Canvas渲染方式，在车站标记上显示车站名称标签，为避免标签重叠，需根据车站等级和地图缩放级别显示/隐藏标签，通过读取车站节点连接关系数据，绘制连接车站节点线段。

（3）仿真场景基础设施组件化。为减少仿真模型的重复开发和场景模型的复杂度，提高仿真的流畅性，梳理多次重复使用的基础设施属性信息，构建模块化集约化的组件，研发仿真环境基础设施设备“预制体”，基于线路、站点等基础数据，对仿真基础设施设备组件进行封装与发布，为用户提供统一的API调用接口，通过import引入JS库并注册组件后即可快速接入铁路物理运行环境可视化服务，按照层次结构可快速组装基本的仿真环境模型[7, 11]。

3　铁路列车智能体协同运行仿真技术研究

智能体建模是铁路列车运行仿真的重点。首先将每个列车实体抽象为单个智能体模型，设计动静

态属性，采用单质点模型构建单个列车的运动模型；然后采用图论建立一条线路上沿同一方向运行的多个列车智能体间的通信拓扑机制，实现列车智能体与其他相邻列车的信息交互；在此基础上，将多个列车抽象为多智能体系统模型，引入马尔可夫决策(Markov Decision Process，MDP)等技术[11-12]构建仿真决策控制策略，可根据通信信息和运动模型，对列车智能体的运行状态进行动态调整。

3.1　单列车智能体运动模型

（1）单列车智能体属性设置。列车智能体代表铁路路网中的运行列车，每列列车都有相应的动静态属性信息，列车智能体可根据自身属性与环境的动态交互进行仿真运行，根据列车智能体的特征设计了基础属性、空间属性、运行属性和统计属性[13-14]，列车智能体属性设计如表1所示。

表1　列车智能体属性设计

Tab. 1　Attribute design of train agent

属性类别	属性说明	属性类别	属性说明
基础属性	列车类型	空间属性	列车起始站
	列车车次		列车终点站
	列车编组		列车规划路径
	列车长度		列车当前所处位置
	列车重量		列车运行下一个站点
	列车牵引性能、制动性能等		列车运行上一个站点等
运行属性	列车运行起始时间	统计属性	列车累计运行距离
	列车运行终点时间		列车累计运行时间
	列车到达各站点时间		列车行驶路径节点信息
	列车运行速度		列车作业信息
	列车运行加速度		列车运行工况信息
	列车作业时间等		其他列车运行统计信息

（2）单列车智能体动力学运动模型。铁路列车运行环境存在多种非线性因素，需综合多个因素，建立精准模拟列车运行的动力学模型，全面考虑多种阻力的变化规律和相互间的作用。列车运行过程建模主要采用单质点和多质点2种方式；单质点模型将整列列车抽象化为一个刚性且无实际尺寸的质点，简化了分析过程和运动模型；多质点模型充分考虑列车各个部分的动力学特性，模型复杂度高，但能更精准地描述列车运行状态[6, 10]。

单质点和多质点方法在不同情境下有各自的应用场景与优劣势。为降低计算复杂度，直观呈现铁路路网多列车协同运行过程，采用列车单质点模型作为基础运动模型，将整个列车看作一个质点，根据实际运行环境的牵引力、制动力和基本阻力智能计算列车的运行速度。在仿真的时间步长Δt足够小时，认为作用在列车上的力在足够小时间步长内是不变的，具体运动计算模型为

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{1+\gamma}\left[\frac{\mu_t F_t(v)+\mu_b F_b(v)}{M}-\left[r_f(v)-r_a(x)\right]g\times 10^{-3}\right] \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}=\frac{1}{v}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

$$r_f(v)=a+bv+cv^2 \tag{3}$$

$$r_a(x)=i(x)+r_c(x)+r_t(x) \tag{4}$$

式中：x为列车的当前位置；v为列车运行速度，km/h；t为列车运行时间，h；$F_t(v)$为列车在当前速度下的最大牵引力，kN；$F_b(v)$为最大制动力，kN；$r_f(x)$为基本阻力，kN；a，b，c为戴维斯系数(基本阻力系数)；$r_a(x)$为当前位置的附加阻力，kN；M为列车质量，t；γ为列车的回转质量因子；μ_t，μ_b为牵引力和制动力系数；$i(x)$为坡道附加阻力，kN；$r_c(x)$为曲线附加阻力，kN；$r_t(x)$为隧道附加阻力，kN。

3.2　多列车智能体协同运行模型

（1）多列车智能体系统协作关系拓扑模型。在多列车协同运行的复杂场景中，需建立多列车智能体间的通信拓扑结构和相互约束关系，实现运行信息的交互和协同运行，可采用有向图[6, 10]建立多列车智能体间的通信拓扑结构，分析多列车智能体网络的拓扑结构、信息传递路径、节点间的影响因素等。假设多列车智能体系统存在n个列车智能体，通信拓扑有向图可表示为

$$G=(A_G,\ E_G) \tag{5}$$

$$A_G=\{A_1,\ A_2,\ \ldots,\ A_n\} \tag{6}$$

$$E_G=\{(A_i,\ A_j)|A_i,\ A_j\in A_G,\ i\neq j\} \tag{7}$$

$$\Lambda=\begin{bmatrix}a_{11} & \cdots & a_{1n}\\ \vdots & & \vdots\\ a_{n1} & \cdots & a_{nn}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：G为有向图集合；A_G为系统的顶点集合；E_G为信息传递路径的边集；Λ表示顶点间的交互关系，当2个列车智能体存在通信关系时$a_{ij}=1$，不

存在通信关系 $a_{ij}=0$。

在多列车协同运行时，每列列车可接收邻接列车的运行速度、位置等状态信息，在此基础上，每列列车根据通信信息和自身状态信息，依据协同运行机制对列车智能体的运行状态进行动态调整。

（2）多列车智能体协同运行机制。在仿真过程中，当列车智能体运行偏离了运营计划时，需采取相关控制策略及时调整优化。建议采用自适应协同控制策略，该策略可根据列车的实时状态、运行环境的动态变化，设计列车运行奖励函数，自主学习运行模式和控制策略，以确保与预期的运行计划保持一致。在自适应强化学习过程中，列车智能体将与运行环境动态交互，以奖励函数为导向，通过不断地迭代和优化[14-15]，不断提高仿真系统的精准性和流畅性。

铁路列车自适应学习交互过程示意图如图3所示，该控制策略可通过MDP方法进行高效建模[10]，主要包括智能体、环境、状态、动作、奖励等要素。首先将列车运行过程离散化，根据速度、位置、时间等因素确定列车当前运行状态；然后根据列车的输出力系数定义动作控制决策模式，主要包括牵引、惰行、制动等；最后根据列车的当前状态、所采取的行动和环境因素的影响而调整转换列车的运行状态。同时，在列车运行过程中，设计奖励函数，引导列车智能体学习，列车运行奖励函数主要由列车速度奖励和位置奖励组成，鼓励列车保持特定的速度范围，不断接近目的地；当列车即将到达目的地时，应鼓励列车减速停站，设置停车奖励函数；当列车运行出现不符合要求的动作时，则采用基于惩罚的奖励函数，对列车运行行为进行自动纠正。

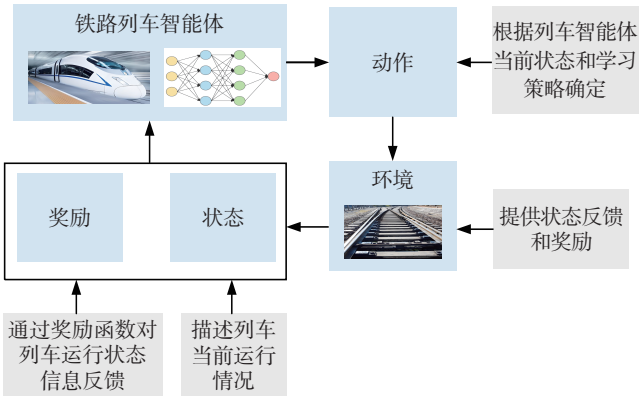


图3　铁路列车自适应学习交互过程示意图

Fig. 3　Schematic diagram of adaptive learning interaction process of railway trains

$$S_k=[v_k,\ x_k,\ t_k]\qquad k=0,\ 1,\ \ldots.,\ N \tag{9}$$

$$A_k=\{a_k|a_k\in[-1,\ 1]\} \tag{10}$$

$$S_{k+1}=f(S_k,\ A_k)\qquad k=0,\ 1,\ \cdots,\ N-1 \tag{11}$$

$$R_{op}=R_v+R_x \tag{12}$$

式中：S_k为列车当前运行状态；A_k为列车输出力系数；S_{k+1}为调整转换后的列车运行状态；R_{op}为列车运行奖励函数；R_v为列车速度奖励；R_x为列车位置奖励。

4　铁路列车运行仿真系统设计及实现

4.1　仿真系统架构设计

4.1.1　列车运行仿真逻辑流程设计

列车运行仿真底层逻辑模块主要负责设置列车运行仿真系统中的仿真规则，列车运行仿真逻辑流程如图4所示，主要包括仿真环境拓扑结构和运行计划等配置信息的设置，涉及列车入网、列车进站、列车停站、列车出站、列车区间运行、列车到达终点、列车出网等关键流程[10]。根据实际运行设置和具体运行规则[12-13]，列车智能体具备进站、出站、区间运行等功能。

4.1.2　仿真系统架构设计

根据铁路列车运行管理需求，开展铁路列车运行仿真系统架构设计，仿真系统架构如图5所示，主要包括基础设施层、技术服务层、数据服务层、仿真建模层、仿真应用层、用户访问层。

基础设施层：主要对仿真系统各节点的基础设施资源进行整合和统筹管理，提供统一的计算、存储、网络、安全等信息资源，以开放标准的方式高效支撑业务运行。

技术服务层：综合应用检索引擎、流程引擎、仿真引擎、地图引擎、2D和3D建模引擎、统计分析、可视化组件、安全认证等服务，为仿真系统业务功能研发提供基础支撑和服务。

数据服务层：设计仿真系统数据规范，建立内外部仿真数据接入接口，汇聚各类基础仿真数据，包括铁路站-线-网的基础运行环境信息、列车的动静态属性信息、列车作业计划信息等。支持各类仿

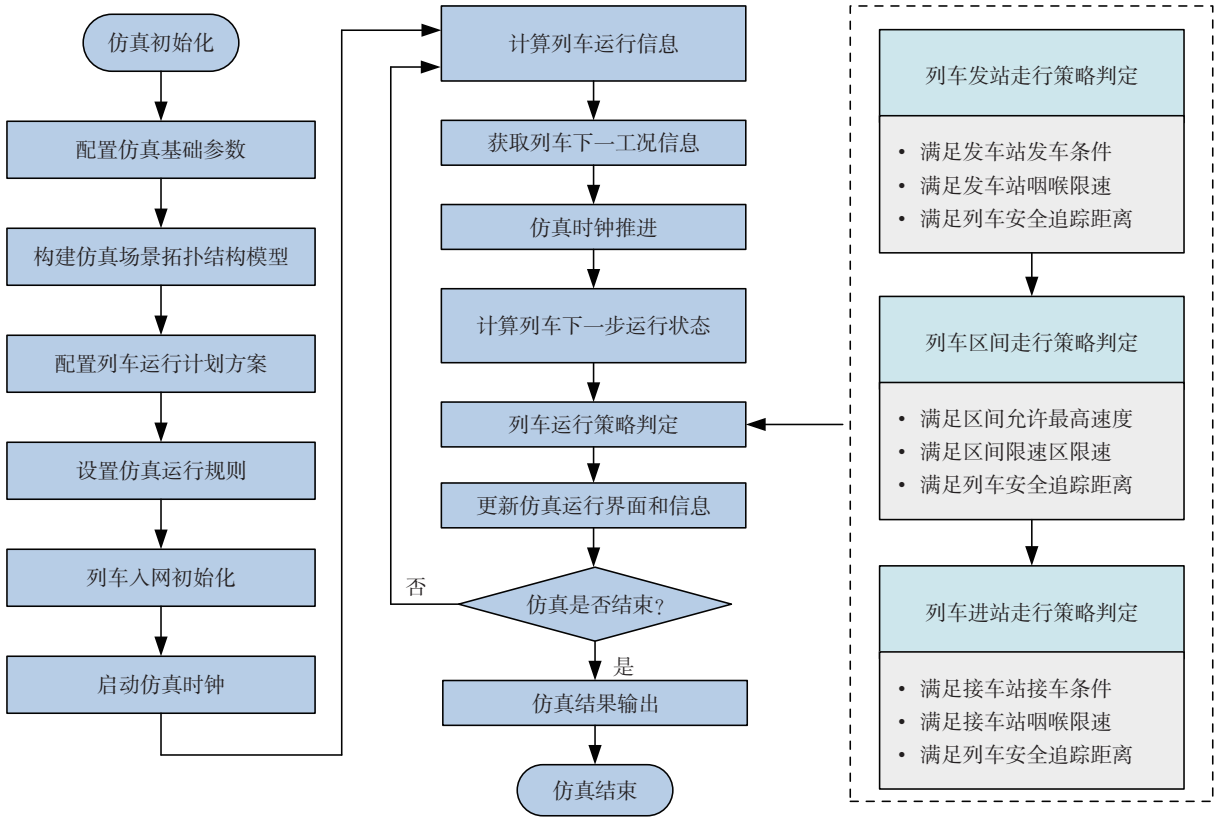


图4　列车运行仿真逻辑流程

Fig.4　Logic flowchart of train operation simulation

真数据的接入、清洗、加工、整合、存储、服务等，实现相关数据的自动抽取、映射匹配、关联标引、分类归集和计算转换，构建面向仿真业务的主题数据库，提供分级分类的数据管理、数据检索、数据建模等服务。

仿真建模层：构建铁路路网、线路、车站、列车等物理运行环境和对象的3D和2D数字化仿真模型，建立车站列车进站、停靠、出站等作业仿真模型，建立路网和线路单列车智能体运行仿真模型、多列车智能体协同运行仿真模型等。

仿真应用层：搭建仿真场景，配置仿真逻辑规则和基础资源，根据不同运营方案实现铁路站–线–网列车运行实况的动态复现，提供仿真过程控制、仿真结果统计分析、仿真效果评价、运输组织方案合理性和可行性验证等功能。

用户访问层：面向铁路运输管理、勘察设计、教学培训等用户，提供多层次、多维度的运输组织方案的仿真复现和统计分析等功能，为用户提供方便、快捷、直观的系统使用体验。

4.2　仿真系统功能设计及实现

4.2.1　仿真系统功能设计

仿真系统的业务功能主要包括仿真数据管理、仿真环境配置管理、仿真动态管理、仿真统计分析、仿真系统管理等模块，铁路列车运行仿真系统功能架构如图6所示。

（1）仿真数据管理模块：提供铁路列车、车站、线路、路网、运行方案等基础信息的汇集和动态管理，支持仿真环境和仿真对象的基本信息、配置信息、状态信息及关联信息的管理维护。

（3）仿真环境配置模块：提供仿真环境界面绘制、编辑，仿真拓扑结构图自动生成，列车运行信息、列车运行计划、仿真场景信息、仿真运行规则等方案的配置。

（3）仿真动态管理模块：提供站–线–网列车运行过程的动态仿真复现，根据仿真步长，实时计算和更新列车运行位置和速度，支持仿真全过程的动态控制、实时仿真信息的动态更新，实现站线网不同视角的动态仿真概览，实现2D/3D、实景动态漫

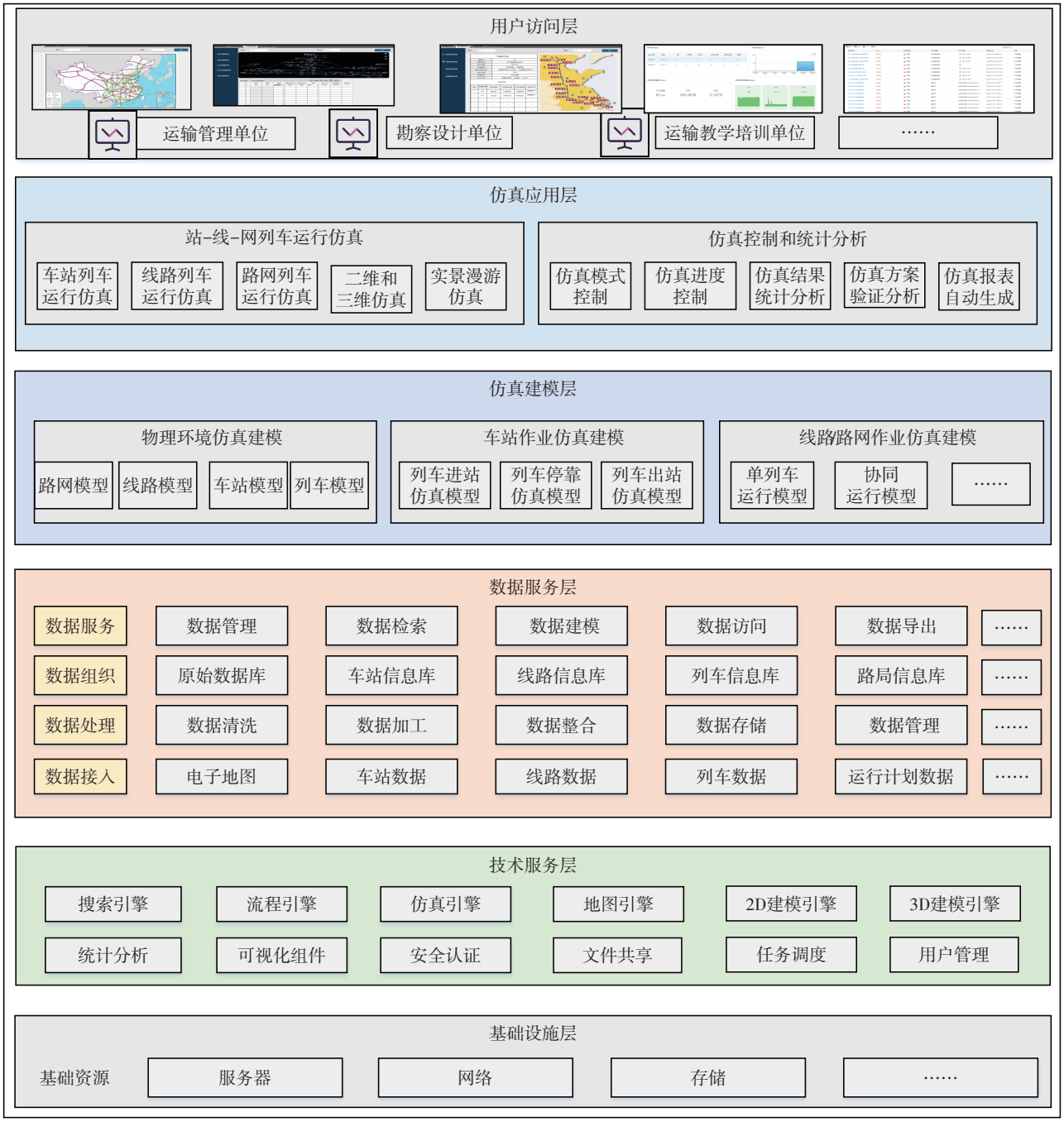


图5　仿真系统架构

Fig.5　Architecture diagram of simulation system

游等不同模式的仿真。

（4）仿真统计分析模块：提供仿真信息的计算存储、仿真报表自动生成、仿真记录存储管理等，支持列车、车站、线路、区间、路网、路局等不同维度的仿真实况信息的专题统计分析，支持不同列车运行方案的验证分析。

（5）仿真系统管理：提供角色管理、日志管理、配置管理、权限管理等功能，为系统运行和管理提供辅助支撑。

4.2.2　仿真系统实现及试验

在上述研究设计的基础上，基于B/S架构和当前主流的前后端分离开发框架，采用Java，MySQL，Nginx，Vue3，Leaflet，Echart等开发技术，开展铁路列车运行仿真方法及系统部分功能的研发和试验。

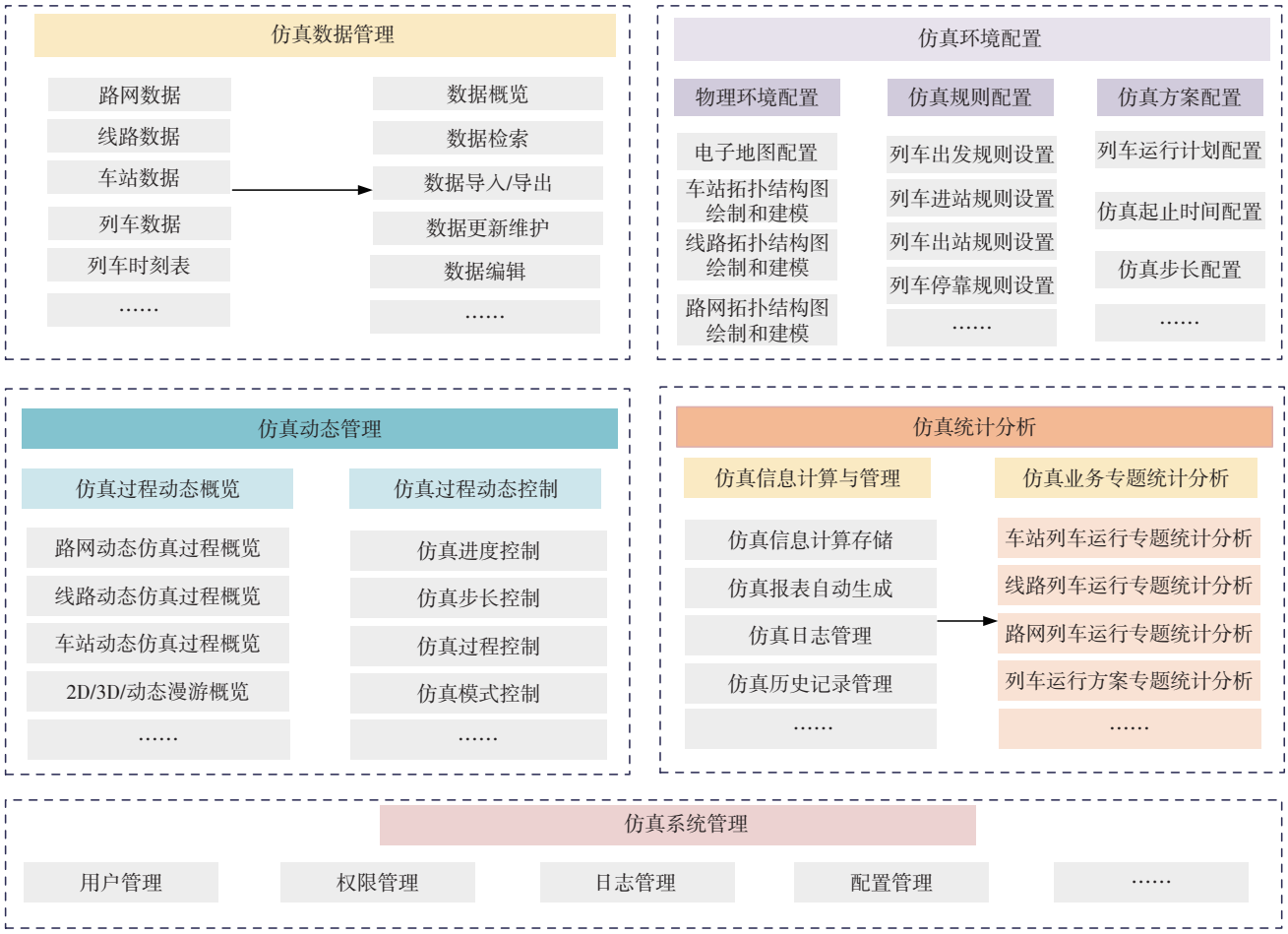
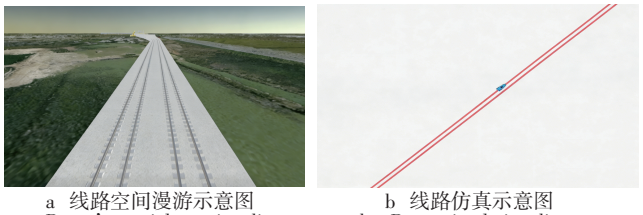


图6　铁路列车运行仿真系统功能架构

Fig.6　Functional architecture of railway train operation simulation system

（1）仿真基础数据配置。梳理了铁路路网既有数据，将既有车站、线路等信息标注为路网节点，用连接节点的线表示节点间的铁路线路。并选取某线路作为二三维虚拟仿真场景应用案例，将相关仿真案例数据导入仿真系统，主要包括线路信息、区段信息、桥隧信息、站点信息、股道信息、道岔信息、曲线信息等。在既有电子地图的基础上，按照图层铺画铁路路网图，以不同视角配置路网、线路、站点等结构。

（2）仿真系统功能研发。仿真基础信息配置后，将铺画仿真物理运行环境，基于地理坐标数据，在电子地图上绘制铁路路网和仿真线路，标注车站、桥梁、隧道、线路所、涵洞、路基、里程等信息，实现路网、线路、站点等信息的可视化展示，支持对线路名称、线路长度、起始站、终点站、开通日期、车站数、设计时速、正线数目，以及沿线桥梁、隧道、车站等物理基础设施的名称、几何信息、结构形式、里程等信息的查询和概览；支持站线网等不同层面的缩放和概览，支持线路漫游和空间漫游等功能；支持仿真信息综合呈现、统一检索概览、专项统计分析等功能。仿真可视化界面及运行效果示意图如图7所示。



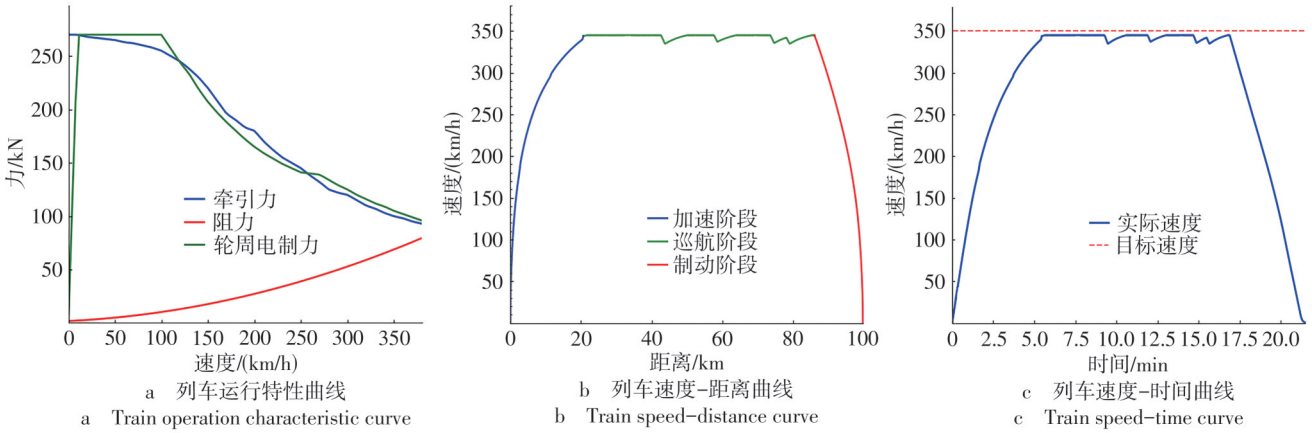
a　线路空间漫游示意图　　b　线路仿真示意图

a　Route's spatial roaming diagram　　b　Route simulation diagram

图7　仿真可视化界面及运行效果示意图

Fig.7　Schematic diagram of simulation visualization interface and operation effect

（3）仿真模型试验验证。为验证列车智能体运动模型的有效性，选取某8编组CRH列车作为仿真对象，列车运行仿真效果图如图8所示，列车质量



a　列车运行特性曲线
a　Train operation characteristic curve

b　列车速度-距离曲线
b　Train speed-distance curve

c　列车速度-时间曲线
c　Train speed-time curve

图8　列车运行仿真效果图

Fig.8　Effect diagram of train operation simulation

为410 t，列车回转系数设为0.08，基本阻力戴维斯系数a=1.954，b=0.041，c=0.000 43。假设，仿真线路长度为100 km，仿真时长为5 000 s，仿真初始速度为0。设置MDP模型决策要素，将列车运行速度划分为8个速度区间，设置牵引、匀速、制动3种动力模式。从图8可见，可有效模拟列车牵引、巡航、惰性、制动等运行工况的演变过程，可有效仿真列车最大加速、定速巡航、最大制动等过程；仿真速度和位置变化曲线相对平滑，在目标速度350 km/h附近波动较小，运行速度和位置变化与实际场景运行变化一致。后续将完善线路坡度、曲线半径等实际运行环境信息，提升计算精度；充分结合实际运营和能耗数据迭代优化MDP模型，增强控制策略的实用性。

5　结束语

研究分析了铁路列车物理运行环境特征，采用主流的数字化建模技术，构建了铁路物理运行环境和列车仿真对象的数字化模型，为仿真系统提供基础底座；其次，研究系统动力学和多智能体仿真系统技术，应用图论和深度强化学习等技术建立多智能体间通信拓扑结构和仿真决策控制策略，从而构建铁路单列车和多列车智能体协同运行仿真模型；最后设计列车运行仿真逻辑流程、仿真系统总体架构和功能架构，并开发原型系统对相关技术和模型进行有效性验证，该方法可有效模拟列车牵引、巡航、惰性、制动等运行工况的演变过程，可实现铁路列车运行环境的二三维的数字化展现和线路列车运行过程的数字化复现，为铁路列车运行方案的制定和智能分析预演提供重要的技术支撑和辅助决策。后续将结合实际铁路线路运行特征及运营信息，强化深度自学习的智能感知和决策能力，提升仿真系统的精准性、实操性和有效性，为铁路智慧运营管理提供技术支撑。

参考文献：

[1] 中国国家铁路集团有限公司. 数字铁路规划[R]. 北京：中国国家铁路集团有限公司，2023.

[2] 李得伟，杨雨铭，赵书毅，等. 基于数字孪生的铁路客运站视频监控仿真评价研究[J]. 综合运输，2025，47(3)：94-99，168.

[3] 黄正锋，郑彭军，李　璇. 建模仿真技术及其在交通系统中的应用[M]. 杭州：浙江大学出版社，2022.

[4] 刘　亿，栾　中，李　平，等. 数字孪生技术在智能车站领域应用展望[J]. 铁道运输与经济，2024，46(10)：157-165，177.
LIU Yi，LUAN Zhong，LI Ping，et al. Prospect for the Application of Digital Twin Technology in the Field of Intelligent Railway Stations[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(10)：157-165，177.

[5] 孟昕然，安　迪，王　睿，等. 基于客流仿真模拟的铁路客运站安检通道设计优化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(2)：190-197.
MENG Xinran，AN Di，WANG Rui，et al. Design Optimization of Security Check Channel at Railway Passenger

Stations Based on Passenger Flow Simulation[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(2)：190-197.

[6] 安真慧. 高速列车多智能体系统的固定时间一致性研究[D]. 大连：大连交通大学，2024.

[7] 马小平，王　旭，贾利民，等. 基于数字孪生和MBSE的铁路防灾监测仿真推演系统设计[J]. 中国铁道科学，2024，45(3)：168-181.
MA Xiaoping，WANG Xu，JIA Limin，et al. Design of Railway Disaster Prevention Monitoring Simulation System Based on Digital Twin and MBSE[J]. China Railway Science，2024，45(3)：168-181.

[8] 严　晗，程晓卿，马小平，等. 基于数字孪生的城市轨道交通主动安全保障系统架构与关键技术[J]. 铁道运输与经济，2025，47(6)：170-179.
YAN Han，CHENG Xiaoqing，MA Xiaoping，et al. Architecture of Digital Twin-Based Active Safety Assurance System for Urban Rail Transit and Key Technologies Involved[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(6)：170-179.

[9] 王爱丽，靳　磊，孙喜利，等. 铁路路网列车运行径路推算与轨迹仿真复现技术[J]. 中国铁路，2024(1)：141-147.
WANG Aili，JIN Lei，SUN Xili，et al. Train Operation Route Calculation and Trajectory Simulation and Reproduction Technology in Railway Network[J]. China Railway，2024(1)：141-147.

[10] 蓝祝愿. 高速列车群协同运行控制优化研究[D]. 南昌：华东交通大学，2024.

[11] 刘浩德，陈　峰，杨　岳. 基于三维场景的铁路车站列车运行联锁控制仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(4)：1345-1354.
LIU Haode，CHEN Feng，YANG Yue. Simulation Research on Train Operation Interlocking Control in Train Station Based on 3D Scene[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(4)：1345-1354.

[12] 张鸿飞. 高速铁路车站列车运行仿真系统设计[D]. 成都：西南交通大学，2023.

[13] 王超宇，宋嘉雯. 面向高速铁路追踪运行的列车智能体模型[J]. 计算机仿真，2022，39(12)：209-214，219.
WANG Chaoyu，SONG Jiawen. Train Agent Model for Tracking Operation of High Speed Railway[J]. Computer Simulation，2022，39(12)：209-214，219.

[14] 尹彦博，何必胜，陈　鹏，等. 基于多智能体的编组站工作组织仿真研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：191-199，209.
YIN Yanbo，HE Bisheng，CHEN Peng，et al. Simulation Research on Railway Marshalling Yard Operation Organizations Based on Multi-Agent Technology[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(1)：191-199，209.

[15] LIU J，YU Y，WANG Q，et al. Fixed-Time Event-Triggered Consensus Control for Multi-Agent Systems with Nonlinear Uncertainties[J]. Neurocomputing，2017，260：497-504.

(责任编辑　金　晶)