文章编号：1003-1421(2026)01-0141-10
引用格式：骆晖.铁路列车群运行多智能体感知模型与仿真[J].铁道运输与经济，2026，48(1)：141-150.
LUO Hui. Multi-Agent Perception Model and Simulation for Railway Train Group Operation[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：141-150.

铁路列车群运行多智能体感知模型与仿真

骆 晖[1，2]

(1.中铁第四勘察设计院集团有限公司 数智化勘察设计系统铁路行业工程研究中心，湖北 武汉 430063；2.中铁第四勘察设计院集团有限公司 数智化事业部，湖北 武汉 430063)

摘 要：为探讨铁路高精度与智能化运行仿真，研究铁路工程数据驱动建模与列车群多智能体自主感知仿真理论与方法。首先以工程勘察设计数据驱动生成线路等矢量数据模型，构建轨道区段、信号机、道岔、列车等智能体模型；其次研究单列车自主感知控制模型的构建与运行；最后通过构建CTC智能体实现数据感知与处理分析、列车群运行状态的动态监控与调度，完成列车群自主仿真运行。仿真实验结果表明，在CTC智能体的智能监测和决策下，单列车及列车群模型可实现安全、高效地仿真运行。研究通过数据驱动建模，解决传统仿真系统模型精度不足、建模效率低下的问题，通过CTC智能体集中控制，实现列车群的协同仿真与自主决策，为构建自主化、智能化的铁路运输仿真系统提供了理论支撑和技术路径，为铁路线路及车站设计、能力评估提供高可信度仿真工具。

关键词：数据驱动建模；铁路运行仿真；列车群多智能体；CTC智能体；自主感知控制
中图分类号：U292.4；TP391.9 **文献标识码：**A **DOI：**10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20241231003

Multi-Agent Perception Model and Simulation for Railway Train Group Operation

LUO Hui[1，2]

(1. Engineering Research Center of Railway Industry on Digital and Intelligent Survey and Design System, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China; 2. Digital Intelligence Business Unit, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: This research investigated the high-precision and intelligent operation simulation of railways by exploring data-driven modeling of railway engineering and multi-agent autonomous perception simulation theories and methods for train groups. First, vector data models of railway lines were generated through engineering survey and design data, building intelligent agent models including tracks, signals, switches, and trains. Subsequently, the autonomous perception-control model for single-train operation was developed. Finally, by implementing a CTC intelligent agent for data perception, processing analysis, and dynamic monitoring and dispatch of train group operations, achieving autonomous simulation of train groups. Experimental results demonstrate that under the intelligent monitoring and decision-making of the CTC agent, both single-train and train-group models can operate safely and efficiently in simulations. In conclusion, the proposed data-driven modeling resolves precision deficiencies and low modeling efficiency in traditional simulation

收稿日期：2024-12-31
基金项目：中国铁建股份有限公司科技研发计划项目(2022-A02)；国家重点研发计划项目(2021YFB2600400)

systems. By leveraging centralized control via the CTC agent, collaborative simulation and autonomous decision-making for train groups are realized, providing theoretical foundations and technical pathways for building autonomous and intelligent railway transportation simulation systems, offering high-credibility simulation tools for railway line design, station planning, and capacity evaluation.
Keywords: Data-Driven Modeling; Railway Operation Simulation; Train Group Multi-Agent System; CTC Agent; Autonomous Perception and Control

0　引言

近年来，随着智能交通技术的迅速进步，传统铁路建设及运营正在加速推进智能化和数字化转型。在高速铁路领域，基于实际工程勘察设计数据驱动建模，将显著提升列车在复杂运行环境中的仿真运行精确度，同时，随着智能交通调度系统的持续完善，智能调度中心实现对列车群运行状态的监控与管理，提高了安全性和运营效率。这一创新技术为数字铁路建设注入了新的活力，有助于构建更加智能、高效的铁路运输体系，推动铁路行业的高质量发展。

当前，国内外针对铁路列车群仿真运行研究取得了一定成果。

在单列车牵引计算研究方面。孟建军等[1]采用线性插值法计算列车牵引力和制动力，并设计了列车多质点模型来模拟列车运行；Dong等[2]建立了列车动力学模型用于牵引能耗计算，使用戴维斯方程计算列车空气阻力；Zhang等[3]利用小步长迭代列车运行过程，提出了一种加减速过程的基准计算方法。

在多列车运行调度运营组织研究方面。OpenTrack软件平台[4]建立起微观同步模型，基于用户定义的列车、基础设施和时刻表数据库来模拟铁路系统运行；帅斌等[5]基于元胞自动模型理论建立了高速铁路仿真系统，并模拟了设备正常、区间临时限速、股道故障3种场景列车运行情况；白鑫[6]基于时间驱动机制提出了仿真系统工作流程，重点设计了列车调度、列车运行控制功能，并对系统进行了仿真论证；李靖等[7]提出了基于启发式A*算法的高速铁路网径路搜索方法，为列车运行仿真中的径路规划和多列车路径优化提供了技术支撑；李和壁[8]通过建立同异步架构下的多并发列车群运行控制仿真模型实现了多列车群调度集中(Centralized Traffic Control，CTC)仿真控制；田锐等[9]研究了高速铁路智能调度系统需求、总体架构、数据平台及关键技术，为高速铁路智能调度系统建设提供决策支撑；王建英[10]提出了一种智能调度集中系统，实现了列车运行计划的自动调整以及列车按图行车控制的功能；针对高速列车速度跟踪控制，费宇晗[11]提出了一种改进的灰色预测模糊PID控制器实现了列车的智能追踪。

当前研究仍存在一定的不足，一是基于整体工程数据线路模型进行仿真研究与实践较少，二是基于CTC实现列车群调度与控制的仿真研究较为欠缺。

本研究提出的铁路列车群全过程运行仿真由工程勘察设计数据驱动，建立线路、车站的轨道区段、信号机、道岔、列车等智能体模型，基于列车动力学原理及机车车辆或动车组性能参数，完成单列车的仿真运行；构建CTC智能体模型，设计实现列车群智能感知控制算法，各列车以及列控中心实时感知多源信息，智能监测区间、车站内环境变化信息(包括区间动态临时限速信息、车站进路及设备信息)，CTC针对环境变化信息进行智能决策，动态生成所有列车的移动授权(Move Authority，MA)信息并下达，各列车智能体在MA授权范围内运行，并自主动态调整运行策略以保证安全运行。

1　基础工程智能体模型

智能体是指在具有一定自主性和感知、决策和行动能力的环境中运行的计算系统[12]。为了实现列车群智能感知仿真控制，先设计了基础工程智能体模型，随后设计了一种铁路列车群运行智能感知控制算法来约束各个智能体之间的行为交互。

基础工程智能体模型包括基于工程勘察设计数据驱动生成高精度空间信息矢量模型、线路及车站设备智能体模型(由轨道区段智能体模型、道岔智能体模型、信号机智能体模型构成)以及基于现实性能参数的列车智能体模型。

1.1　高精度线路空间信息矢量模型

铁路线路以正线线路为空间结构支撑核心，首

先讨论线路空间信息的建模。高精度空间信息矢量模型通过点、线等几何元素来表达地理特征，存储了线路的工程特性，如坡度、曲线半径、公里标和限速信息等。

1.1.1　数据获取

从智能勘察设计平台数据接口中获取测绘、线路等相关专业的结构化数据。整体线路由多段曲线(半径为0的曲线即为直线)组成，每段曲线信息包括以下要素：起点经距S_e、起点纬距S_n、终点经距E_e、终点纬距E_n、曲线半径R(单位：m)、曲线夹直线长度L(单位：m)、坡度S_{slope}(单位：‰)、起点公里标S_m、终点公里标E_m、隧道起点里程S_{tunnel}、隧道终点里程E_{tunnel}以及限速V_{lim}(单位：km/h)。

1.1.2　空间矢量模型建立

通过对工程坐标数据(经距、纬距)进行归一化处理，并基于图层坐标系进行比例缩放，可构建具有空间一致性的矢量空间模型。该模型由离散点要素和连续曲线要素2类矢量数据集构成，其空间关系严格保持原数据的几何比例。用二元组表示{$\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{C}$}。

（1）$\boldsymbol{P}$表示点矢量模型集合。包含点比例图坐标及公里标信息，由各条曲线数据的起点数据和终点数据组成，起点数据表示为$P_s=\{(S_{xi},\ S_{yi},\ S_{mi})\ |i=1,\ 2,\ \cdots,\ n\}$，终点数据表示为$P_e=\{(E_{xi},\ E_{yi},\ E_{mi})\ |i=1,\ 2,\ \cdots,\ n\}$，其中$S_{xi}$为起点经距转换成的比例图横轴坐标，$S_{yi}$为起点纬距转换成的比例图纵轴坐标，$S_{mi}$为起点里程；$E_{xi}$为终点比例图横轴坐标，$E_{yi}$为终点比例图纵轴坐标，$E_{mi}$为终点里程，曲线起点和终点的数量均为$n$。

（2）$\boldsymbol{C}$表示曲线矢量模型集合。包括曲线起点、曲线终点、曲线半径、曲线长度、坡度、曲线限速等属性，$C=\{(P_{si}\ ,\ P_{ei},\ R_i,\ L_i,\ S_{\text{slope}i},\ V_{\text{lim}i})\ |i=1,\ 2,\ \cdots,\ n\}$(直线以半径为0的曲线表示)，其中$n$表示曲线数据的总数量。

在任意位置，可以通过空间矢量模型获取其工程特性，进而实现列车动力学分析等其他功能。

1.2　线路及车站设备智能体模型

线路及车站设备智能体模型包括轨道区段、道岔、信号机等智能体模型。本节主要描述其静态属性和自主感知规则。

1.2.1　轨道区段智能体模型

（1）轨道区段智能体模型。模型用T_{section}描述，$T_{\text{section}}=\{T_{\text{engineering data}},\ T_{\text{location}},\ T_{\text{state}},\ T_{\text{link}}\}$，其中$T_{\text{engineering data}}$表示轨道区段静态工程属性，包括坡度、曲线、隧道、长度等；T_{location}表示轨道区段位置信息；T_{state}表示轨道区段状态集合，$T_{\text{state}}=\{T_{\text{occupy}},\ T_{\text{setted}},\ T_{\text{free}}\}$，其中$T_{\text{occupy}}$表示轨道区段占用，$T_{\text{setted}}$表示轨道区段锁闭，$T_{\text{free}}$表示轨道区段空闲；$T_{\text{link}}$表示轨道区段两端链接设备信息。

（2）轨道区段智能体自主感知规则。用I_{section}描述，轨道区段上电解锁前处于锁闭状态，上电解锁后转换至空闲状态；当进路开通后，进路内的轨道区段处于锁闭状态；当有列车经过且未出清时轨道区段处于占用状态；当列车出清后，轨道区段恢复空闲状态。

1.2.2　道岔智能体模型

道岔智能体模型负责控制道岔的开通方向，确保列车按照预定的方向安全通过。

（1）道岔智能体模型。模型用W_{switch}描述，$W_{\text{switch}}=\{W_{\text{engineering data}},\ W_{\text{location}},\ W_{\text{state}},\ W_{\text{link}}\}$，其中，$W_{\text{engineering data}}$表示道岔静态工程属性，包括道岔图号等；$W_{\text{location}}$表示道岔位置信息；$W_{\text{state}}$表示道岔状态集合，$W_{\text{state}}=\{W_n,\ W_r,\ W_s,\ W_b\}$，$W_n$表示道岔处于定位，$W_r$表示道岔处于反位，$W_s$表示道岔处于四开状态，$W_b$表示道岔处于锁定状态；$W_{\text{link}}$表示道岔链接设备信息。

（2）道岔智能体自主感知规则。用I_{switch}描述，进路开通前检查道岔不处于锁定和四开状态，当进路开通后，将道岔转化至定位或者反位并锁定。

1.2.3　信号机智能体模型

信号机智能体模型用于根据进路信息动态控制信号显示，指导列车的运行。

（1）信号机智能体模型。模型用S_{signal}描述，$S_{\text{signal}}=\{S_{\text{engineering data}},\ S_{\text{location}},\ S_{\text{state}},\ S_{\text{link}}\}$，其中$S_{\text{engineering data}}$表示信号机静态工程属性，包括高柱矮柱信息等；$S_{\text{location}}$表示信号机位置信息；$S_{\text{state}}$表示信号机状态集合，$S_{\text{state}}=\{S_f,\ S_a\}$，$S_f$表示信号机显示禁止灯光，$S_a$表示信号机显示允许灯光；$S_{\text{link}}$表示信号机链接设备信息。

（2）信号机智能体自主感知规则。用I_{signal}描

述，信号机常态灭灯，表示禁止通过；当进路建立后，信号机显示允许信号，指示列车通过；当列车越过信号机后，信号机自动恢复为灭灯状态。

1.3　列车智能体模型

（1）列车智能体参数。参数来源于专业数据库，包括列车型号、长度、质量、最大速度、牵引力性能数据、制动力性能数据等。

（2）列车智能体模型。模型用L_{train}描述，$L_{\text{train}}=\{L_{\text{location}}, L_{\text{parameter}}, L_v, L_a, L_{\text{state}}\}$，其中$L_{\text{location}}$为列车在空间的位置信息，包含了坐标和所在区段、车站等；$L_{\text{parameter}}$为列车参数信息，包括了列车的牵引力性能数据、制动力性能数据等；L_v为列车当前速度，km/h；L_a为列车当前加速度，m/s^2；L_{state}为列车状态集合，$L_{\text{state}}=\{L_{\text{normal}}, L_{\text{stop}}, L_{\text{failure}}\}$，其中$L_{\text{normal}}$表示列车正常运行，$L_{\text{stop}}$表示列车停车等待，$L_{\text{failure}}$表示列车故障。

（3）列车智能体自主感知规则。用I_{train}描述，$I_{\text{train}}=\{A_L, A_F\}$，其中$A_L$表示微小步长控制的列车状态动态迭代算法，$A_F$表示列车牵引制动策略智能控制算法。具体的算法描述将在2.1节展开。

2　铁路列车群运行智能感知控制算法

在完成对线路、车站及列车智能体等基础工程模型的构建后，设计了基于时钟步长的集中式铁路列车群运行智能感知控制算法。该算法的核心有2个部分，一是集中式控制机制的设计，二是控制策略的设计。集中控制下的列车群运行智能感知控制算法如图1所示。

（1）集中式控制机制为CTC智能体集中控制，CTC智能体能够感知所有智能体的状态信息，触发器在每个时钟步长触发一次CTC智能体的动作。

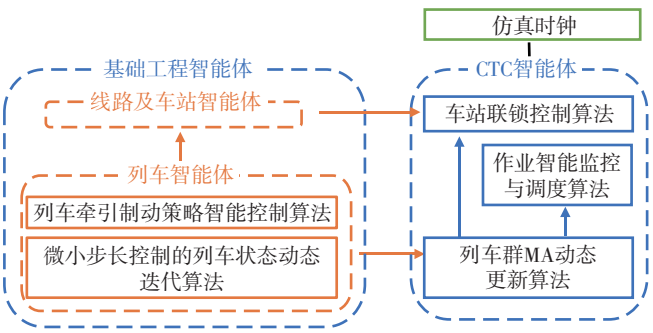


图1　集中控制下的列车群运行智能感知控制算法

Fig.1　Centralized control-based intelligent perception control algorithm for train group operation

（2）控制策略分为单列车自主感知控制算法以及多列车智能感知控制算法。列车智能体通过单列车自主感知控制算法完成自身状态的更新；多列车智能感知控制算法集中在CTC智能体中，在每个仿真步长内，融合处理所有智能体信息，更新调度命令。

（3）制约关系。图1中使用箭头表示制约关系，箭头出发位置表示被制约一方：列车智能体的动力学运行状态受线路及车站智能体制约，因需获取列车所在线路工程数据进行列车受力分析计算；列车智能体的MA受CTC智能体中列车群MA动态更新算法制约，列车根据MA控制行车、保证安全追踪间隔；线路及车站智能体的运行逻辑状态受车站联锁控制算法制约；列车群MA动态更新算法受车站联锁控制算法、车站智能监控与调度算法共同制约，CTC根据车站联锁进路信息、作业计划信息实时更新MA。

为了讨论CTC控制下的多列车控制，对于铁路列车群运行控制，进行以下边界假设。

（1）仿真模型列控制式兼容CTCS−3、CTCS−2列控制式，以CTCS−3列控系统控制方式介绍仿真模型，闭塞方式采用自动闭塞。根据“目标−距离控制方式”，列车基于MA行车。

（2）仿真模型假设总控制中心为CTC智能体，不再分设各车站、线路控制中心以及无线闭塞中心(Radio Block Centre，RBC)。CTC智能体不仅承担传统CTC的全局调度与监控功能，而且整合了在现实系统中由RBC、车站及线路控制中心负责的部分关键控制逻辑，例如基于全系统信息直接生成和下发MA。此假设忽略了现实系统中由于通信距离、多级控制架构带来的具体实现细节和通信延迟，但保留了确保列车安全、高效运行所需的核心决策与控制功能。

2.1　单列车自主感知控制算法

单列车自主运行，是列车群仿真运行的基础。为了实现对列车运行过程的精确模拟，设计了列车牵引制动策略智能控制算法以及微小步长控制的列车状态动态迭代算法。

2.1.1　列车牵引制动策略智能控制算法

在列车运行控制系统中，综合控制牵引力和制动力是确保列车按照预定速度和位置安全行驶的关

键环节。模糊控制作为一种非线性控制方法，能够处理不确定性和模糊性问题，广泛应用于列车运行控制系统[13]。第1步确定列车输出力的类型(牵引力或者制动力)，第2步根据当前速度和目标速度差值基于模糊控制算法计算列车牵引力档位。

控制策略的实现过程如下。

（1）牵引加速/制动减速策略。各列车首先按照安全性能制动模型[14]计算常用制动曲线，将列车当前速度L_v与常用制动曲线的目标速度进行比对，如果列车当前速度L_v小于当前位置限速$V_{\lim}$，那么输出牵引力；如果L_v接近或超过$V_{\lim}$，那么输出常用制动力。

（2）基于模糊控制算法计算列车牵引力档位。基于模糊逻辑，建立以L_v，v_{target}为输入，牵引力档位为输出的控制系统。控制系统的逻辑设计如下：模糊化，将输入变量(L_v，v_{arget})转化为模糊集；规则库，定义模糊规则，决定如何将输入映射到输出；推理机，根据模糊规则对输入进行推理，生成模糊输出。去模糊化，将模糊输出转化为清晰的控制信号(列车控制力F_c)。

2.1.2　微小步长控制的列车状态动态迭代算法

该算法基于列车动力学模型[15-16]在每个仿真步长内进行列车受力分析，实时更新列车状态。

微小步长控制的列车状态动态迭代算法如表1所示。算法输入包括曲线矢量数据$\boldsymbol{C}$、列车控制力F_c、列车参数$\boldsymbol{L}_{\text{parameter}}$、$t$时刻下列车状态$\boldsymbol{L}_t$。算法输出为更新后的列车状态$\boldsymbol{L}_{t+\Delta t}$。

表1　微小步长控制的列车状态动态迭代算法

Tab.1　Dynamic iterative algorithm for train state with small step size control

算法：微小步长控制的列车状态动态迭代算法
输入：$(C,\ F_c,\ L_t)$
输出：$(L_{t+\Delta t})$
1　Begin
2　计算列车当前时刻基本阻力$R_b=(\alpha+\beta v_x+\gamma v_x^2)\times G_{\text{Truck}}+r_b\cdot G_{\text{Train}}$
3　计算列车当前时刻附加阻力$R_a=(r_s+r_c+r_t)\cdot(G_{\text{Truck}}+G_{\text{train}})$
4　if 列车需加速运行 then 按照$F=F_c$计算列车输出控制力
5　if 列车需匀速运行 then 按照$F=R_b+R_a$计算列车输出控制力
6　if 列车需减速运行 then 按照$F=-F_c$计算列车输出控制力
7　计算列车当前时刻加速度$L_{a(t)}=\dfrac{F-(R_a+R_b)}{M_{\text{Truck}}+M_{\text{train}}}$
8　计算列车下一时刻速度$L_{v(t+\Delta t)}=L_{v(t)}+L_{a(t)}\cdot\Delta t$
9　计算列车下一时刻位置$L_{x(t+\Delta t)}=\dfrac{L_{v(t+\Delta t)}+L_{v(t)}}{2}\cdot\Delta t$
10　end

列车基本阻力R_b计算公式为

$$R_b=(\alpha+\beta v_x+\gamma v_x^2)\cdot G_{\text{Truck}}+r_b\cdot G_{\text{Train}} \tag{1}$$

式中：R_b为列车基本阻力，N；α，β，γ为特定常数；v_x为当前位置下的列车速度，km/h；G_{Truck}为车辆总重力，kN；r_b为机车单位基本阻力，N/kN；G_{Train}为机车总重力，kN。

列车附加阻力R_a计算公式为

$$R_a=(r_s+r_c+r_t)\cdot(G_{\text{Truck}}+G_{\text{train}}) \tag{2}$$

式中：R_a为列车附加阻力，N；r_s为单位坡道附加阻力，N/kN；r_c为曲线附加阻力，N/kN；r_t为单位隧道附加阻力，N/kN；r_s，r_c，r_t数据根据$\boldsymbol{C}$获取。

列车控制力合力F，根据列车运行状态以及列车牵引制动策略智能控制算法确定的列车控制力F_c来计算。

列车当前时刻加速度$L_{a(t)}$，将列车视作单质点模型[11]来计算，如公式(3)所示。

$$L_{a(t)}=\frac{F-(R_a+R_b)}{M_{\text{Truck}}+M_{\text{train}}} \tag{3}$$

式中：F为列车控制力合力，N；$L_{a(t)}$为列车当前时刻加速度，m/s^2；M_{Truck}为车辆总质量，kg；M_{train}为机车总质量，kg。

2.2　多列车智能感知控制算法

多列车协同运行的智能感知控制逻辑为：CTC智能体通过实时数据感知与处理分析，实现对列车群运行状态的动态监控与调度；CTC智能体需感知列车智能体群、轨道区段智能体群、道岔智能体群、信号机智能体群、车站进路等的状态信息，将数据融合处理后再进行智能决策调度。

CTC智能体在每个仿真步长Δt的执行逻辑如下。

（1）数据请求。CTC智能体实时请求其他智能体群信息，包括列车速度、位置、各设备运行状态等。

（2）数据融合。通过数据融合技术，将数据整合形成统一的状态信息。

（3）决策支持。基于融合后的数据，采用智能算法进行决策分析，为调度提供科学依据。

CTC智能体决策规则用R_{CTC}描述，$R_{\text{CTC}}=\{R_I,\ R_M,\ R_P\}$，其中$R_I$表示车站联锁控制算法，$R_M$表示列车群MA动态更新算法，$R_P$表示列车运行状态智能监控与调度算法。

2.2.1　车站联锁控制算法

车站联锁控制算法确保在任何时刻列车在车站内安全运行。联锁逻辑集成了信号机、道岔和轨道区段智能体模型的控制关系，以集合{T_{section}，W_{switch}，S_{sig}，I_{section}，I_{switch}，I_{sig}}表示。核心进路控制仿真流程如下。

（1）进路申请。列车智能体根据运行计划向CTC智能体申请进路，CTC智能体根据车站静态进路表、车站股道使用方案建立进路。

（2）进路建立。系统在确认进路涉及的所有设备(信号机、道岔、轨道区段)均可用后，建立进路，设置道岔到所需方位并锁定，设置相关轨道区段为白光带，将相关信号机显示为允许信号。若发生设备故障，CTC剔除故障设备相关的进路信息，从可用集合中选择进路，若无可用进路，CTC将MA设置于进站信号机前方，确保行车安全。

（3）进路解锁。当列车通过进路后，自动解除道岔锁定，信号机恢复为红灯，轨道区段状态更新。

2.2.2　列车群MA动态更新算法

在列车群运行过程中，根据CTCS-3列控系统控车原理，CTC智能体综合实时数据计算所有列车的MA，从而保证列车安全运行。列车群MA动态更新规则以$R_M=\{R_{ML}, R_{MP}, R_{\lim v}\}$描述，其中$R_{ML}$表示对于当前列车，感知前行列车所在闭塞分区入口位置再加一段安全距离作为追踪点M_1，R_{MP}表示按照作业计划以及进路开放情况确定的车站内进路终点作为追踪点M_2，CTC综合M_1、M_2，以及线路限速信息$R_{\lim v}$最终计算得到每列列车MA并下达。

2.2.3　列车运行状态智能监控与调度算法

（1）列车时刻表自动解析与下达。列车时刻表信息用$\boldsymbol{P}_{\text{plan}}=\{(S_{\text{si}}, T_{\text{tracki}}, T_{\text{typei}}, T_{\text{timei}})\,|\,i=1, 2, \cdots, n\}$描述[17]，其中$S_{si}$表示列车运行过程中$i$站名称，$T_{\text{tracki}}$表示列车在$i$站的作业站线，$T_{\text{typei}}$表示列车在$i$站的作业类型(包括始发终到、通过、立折等)，$T_{\text{timei}}$表示列车在$i$站的停站时间。CTC初始化时接受列车时刻表信息，并将其解析后下达给各列车，各列车根据列车时刻表信息行车。

（2）作业计划智能调度。①列车发车时间智能调整，CTC智能体实时监控多列车的运行状态，能够根据实际情况动态调整列车的运行计划时间。例如，在出现突发事件或延误时，从运输组织角度，CTC智能体可以调整列车的站停时间从而缓解列车延误，确保整体系统的高效性和灵活性。②到发线作业计划智能调整，通过实时数据监测和智能算法，根据列车运行状态、到发线占用情况，动态调整车站到发线的作业计划。

2.3　仿真流程

各智能体通过自主状态感知机制(实时获取邻域智能体信息)与事件驱动响应机制(基于优先级队列执行指令)，实现了动态环境下的智能协同。

仿真系统多智能体协作过程如图2所示。

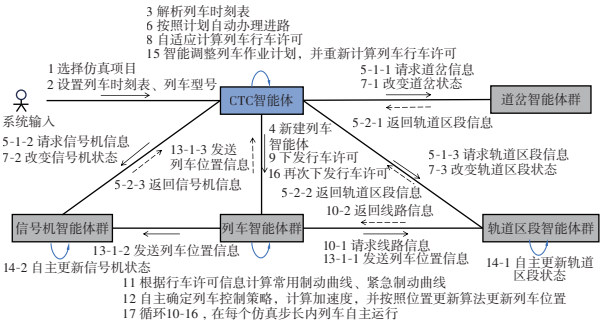


图2　仿真系统多智能体协作过程

Fig.2　Multi-agent collaboration of a simulated system

步骤1—2：系统输入，在仿真系统入口选择仿真项目、列车时刻表及列车型号等信息，开始仿真。

步骤3—9：CTC智能体在运行前，自动完成列车时刻表的解析，生成各列车的运行计划；同时，系统在计划时刻、起点位置加入相应的列车智能体进行初始化，获取道岔、信号机、轨道区段的动态信息；CTC对信息进行综合判断，按照计划自动办理进路，并将状态变化指令下达给各智能体，同时将MA下发给列车智能体。

步骤10—13：列车智能体获取当前位置后，依据工程数据、列车参数，按照2.1节设计的单列车自主感知控制算法计算加速度，完成速度、位置信息等自动更新，并将信息返回至CTC智能体。

步骤14：列车将位置信息发送给相应轨道区段智能体和信号机智能体，轨道区段和信号机自主根据列车位置信息更新显示信息。

步骤15—16：CTC根据所有设备、列车智能体信息以及作业计划信息按照2.2节设计的算法进行

智能调度，生成各列车新的MA并重新下达给各列车。异常情况下，当区间某轨道区段设置临时限速时，CTC更新接近列车智能体的MA位置及临时限速值，并下发给接近列车智能体；当区间某轨道区段发生故障时，CTC标记故障区段，并更新接近列车智能体的MA位置，即停车点。

步骤17：重复步骤10—16，直到所有列车作业计划完成。

2.4　传统仿真调度控制方法与CTC智能体的区别

传统仿真调度控制方法主要依靠预设的控制逻辑和人工干预对列车运行进行调度，其数据采集及处理较为单一，控制决策存在一定滞后性。相比之下，本研究提出的CTC智能体模型融合了自主感知、数据实时采集与智能决策等先进机制，传统仿真调度控制方法与CTC智能体的区别如表2所示。

综上所述，CTC智能体通过集成实时数据采集、智能融合及动态决策等关键技术，实现了多智能体主动感知与自适应调度，突破传统仿真调度控制方法，为铁路列车群运行管理提供了新的智能化技术路径。

3　实例分析

为了验证研究设计的仿真智能体模型有效性，基于赣深高速铁路(赣州西—深圳北)工程勘察设计数据进行了铁路列车仿真建模分析。其中，数据建模与列车运行仿真分析的范围为赣州西—定南南。

3.1　数据建模

首先，基于C#的WPF框架设计桌面端应用，在应用程序中完成工程勘察设计数据的处理，将其转换为高精度的线路、车站矢量数据模型。以赣深高速铁路DK0+000—DK135+000段与其中定南南站为例，赣深高速铁路DK0+000—DK135+000段与定南南站建模结果如图3所示，建模结果和数据之间呈现双向关联性，在图中选择任一直线、曲线、点位可以查看其关联的矢量数据信息。

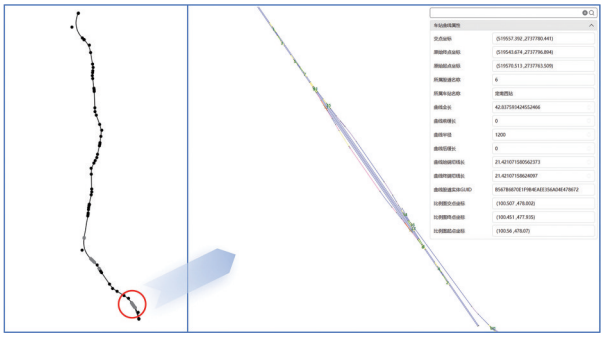


图3　赣深高速铁路DK0+000—DK135+000段与定南南站建模结果

Fig.3　Modeling results of Ganzhou-Shenzhen High Speed Railway section from DK0+000 to DK135+000 and Dingnannan Station

部分线路纵断面数据如图4所示，此处数据已做模糊处理，仅作示意。

仿真参数设计如表3所示。

3.2　单列车仿真运行验证

为了验证单列车自主感知控制模型的有效性，根据中国铁路南昌局集团有限公司列车时刻表数据中的高速列车运行、停站时分，制定“GXXX1”及“GXXX2”在赣州西站至定南南站间的上下行运行计划。

单列车仿真运行结果如图5所示，其中列车实绩运行图展示了列车按计划运行情况，列车速度-运行距离图展示了列车在线路上运行时，速度、加

表2　传统仿真调度控制方法与CTC智能体的区别

Tab.2　Comparative analysis of conventional simulation-based scheduling control methods with proposed CTC agent

	传统仿真调度控制方法	CTC智能体
数据获取与处理方式	主要依赖周期性数据更新和固定算法进行状态监控，信息传输往往存在延时，且数据采集渠道相对单一	感知其他智能体(包括列车、轨道区段、道岔、信号机等)信息，实现多源数据融合处理，形成统一的全局状态视图，为后续决策提供精准依据
决策机制与调度策略	采用固定预设的调度规则，调整手段较为有限，难以适应突发变化	在获取全局信息的基础上，通过自主感知与自适应算法实现决策支持，能够根据实时运行环境动态调整列车运行参数，从而更有效地优化列车间隔、调度时序和应急响应策略
系统集成与协同效应	各控制单元(如车站、线路控制中心及无线闭塞中心)分布化管理，信息孤岛现象较为严重，整体调度协调存在瓶颈	将各子系统数据集成于统一平台内，不仅实现了跨单元协同，还通过智能决策逻辑确保整个铁路网在多列车协同运行下始终维持高效与安全水平
灵活性与扩展性	架构相对固化，难以快速响应新技术和运营需求的变化	构建在开放、模块化的平台之上，便于后续引入多元数据接口以及先进的人工智能算法，从而不断提升整个系统的灵活性、可扩展性和主动防控能力

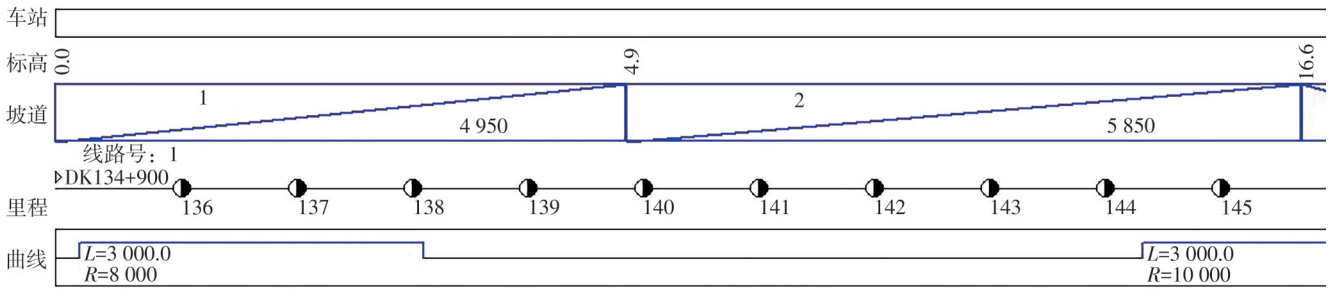


图4　部分线路纵断面数据

Fig.4　Partial route longitudinal profile data

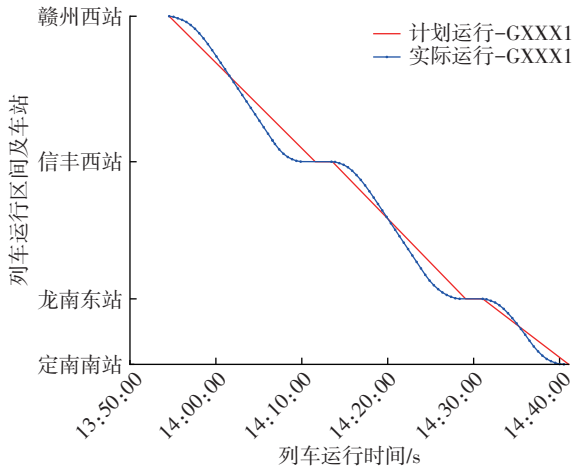
表3　仿真参数设计

Tab.3　Simulation parameters design

参数名称	参数说明
仿真步长	3 s
列车型号	CR400AF
列车时刻表	中国铁路南昌局集团有限公司列车时刻表

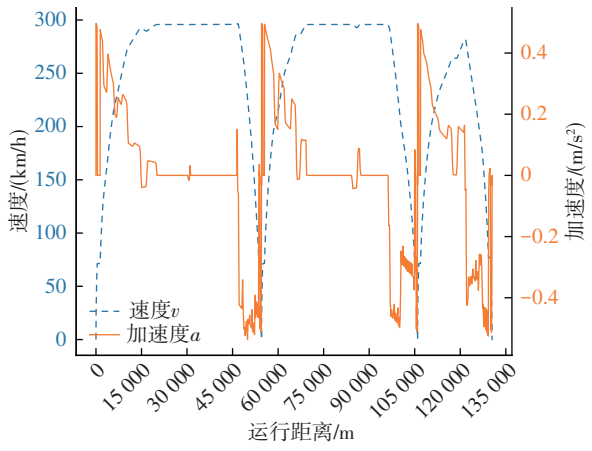
速度随运行距离变化情况。

列车计划时刻与仿真运行时刻比较表(单列车)如表4所示，由结果可以看出，赣州西站—定南南站间下行GXXX1次列车计划运行时分为46 min 30 s，仿真运行时分为46 min 16 s；上行GXXX2次



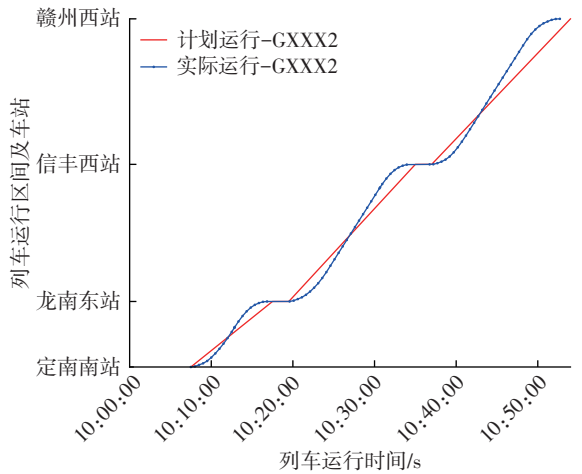
a　下行方向列车仿真运行图

a　Simulation operation diagram for downbound trains



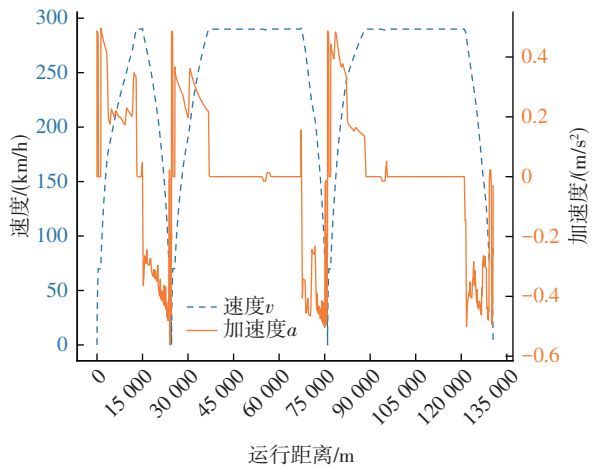
b　下行方向列车速度-运行距离图

b　Speed-distance diagram for downbound trains



c　上行方向列车仿真运行图

c　Simulation operation diagram for upbound trains



d　上行方向列车速度-运行距离图

d　Speed-distance diagram for upbound trains

图5　单列车仿真运行结果

Fig.5　Single train simulation results

表4　列车计划时刻与仿真运行时刻比较表(单列车)

Tab.4　Comparison of scheduled timetables and simulated operation times for single train

车次 / 车站	GXXX1		GXXX2	
	计划	仿真运行	计划	仿真运行
赣州西	—	—	—	—
	13:54:34	13:54:34	10:54:00	10:52:52
信丰西	14:11:34	14:10:29	10:37:00	10:37:00
	14:13:34	14:13:34	10:35:00	10:34:42
龙南东	14:29:04	14:28:50	10:19:30	10:19:30
	14:31:04	14:31:04	10:17:30	10:17:10
定南南	14:41:04	14:40:50	10:07:30	10:07:30
	—	—	—	—

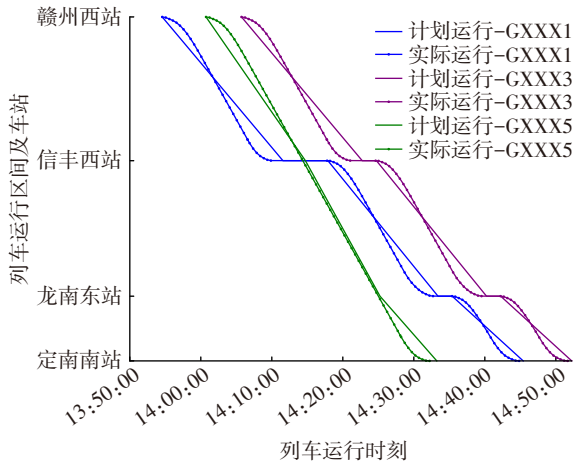


图6　多列车越行试验结果

Fig.6　Tain over taking simulation results

列车计划运行时分为46 min 30 s，仿真运行时分为45 min 22 s，研究设计的智能体仿真系统中单列车能够按照计划运行图时刻运行，仿真运行数据与计划运行数据拟合度在97%以上。

3.3　多列车仿真运行验证

为了验证CTC智能体控制下多列车自主感知模型的有效性，选取多列CR400AF动车组列车在线路模型上进行越行仿真试验。多列车越行试验结果如图6所示，其中计划列车1(GXXX1)发车后，在CTC控制下在信丰西站停站作业并等待，计划列车2(GXXX3)越行计划列车1，随后列车3(GXXX5)正常追踪运行，实现连续发车条件下的越行作业。

列车计划时刻与仿真运行时刻比较表(越行)如表5所示，由计划及仿真运行数据可知，研究设计的智能体仿真系统中多列车能够按照计划运行图时刻进行停站、追踪及越行，仿真运行数据与计划运行数据拟合度在98%以上。

4　结束语

为解决目前行业内对于铁路列车群仿真的不足，研究了一种基于工程数据驱动的多智能体铁路列车仿真模型与方法，通过线路坡度、曲线、限速等勘察数据构建高精度线路空间信息矢量模型；通过模糊控制与微小步长迭代算法，优化单列车牵引/制动策略，提升仿真精度；轨道区段、信号机、道岔、列车等多智能体协同控制，通过CTC智能体实现列车群的动态调度与MA生成、多列车智能感知控制。经系统试验，仿真运行数据与计划运行数据拟合度可达97%以上，初步验证了本研究的可行性与准确性。

本研究为构建自主化、智能化的铁路运输仿真系统提供了理论支撑和技术路径，为铁路线路及车

表5　列车计划时刻与仿真运行时刻比较表(越行)

Tab.5　Comparison of scheduled timetables and simulated operation times for overtaking train

车次 / 车站	GXXX1		GXXX3		GXXX5	
	计划	仿真运行	计划	仿真运行	计划	仿真运行
赣州西	—	—	—	—	—	—
	13:54:34	13:54:34	14:00:44	14:00:44	14:05:44	14:05:44
信丰西	14:11:34	14:10:29	—	—	14:22:44	14:21:39
	14:17:54	14:17:54	14:14:44	14:14:33	14:24:44	14:24:44
龙南东	14:33:24	14:33:10	—	—	14:40:14	14:40:00
	14:35:24	14:35:24	14:25:14	14:25:12	14:42:14	14:42:14
定南南	14:45:24	14:45:10	14:33:14	14:32:41	14:52:14	14:52:00
	—	—	—	—	—	—

站设计、能力评估提供高可信度仿真工具。可应用于新建铁路或既有铁路提质增效项目、场站设计项目等应用场景，在方案比选、场站布局与规模确定等工作中，分析线路条件、车站咽喉区布置、列控系统影响的科学合理性，研判系统短板与瓶颈，辅助研究人员从运营角度优化设计方案。

本研究也存在一些局限性，仿真主要集中于特定线路和站点，缺乏对大范围铁路网络的系统性验证，未来的研究可以扩展仿真模型的应用范围，进一步提升研究的适应性与应用价值。

参考文献：

[1] 孟建军，陈晓强，胥如迅，等. 基于多质点的城轨列车牵引计算分析与仿真[J]. 系统仿真学报，2015，27(3)：603-608，619.
MENG Jianjun，CHEN Xiaoqiang，XU Ruxun，et al. Traction Calculation Analysis and Simulation of Urban Rail Train on Multi-Particle Model[J]. Journal of System Simulation，2015，27(3)：603-608，619.

[2] DONG H R，ZHU H N，GAO S G. An Approach for Energy-Efficient and Punctual Train Operation *via* Driver Advisory System[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine，2018，10(3)：57-67.

[3] ZHANG H X，GUO M，HU L Y，et al. A Multi-Agent Simulation Based Train Platforming Research for Facilitating Passenger Transfer in a High Speed Railway Station[J]. Simulation Modelling Practice and Theory，2024，130：102856.

[4] NASH A，HUERLIMANN D. Railroad Railroad Simulation using OpenTrack[J]. WIT Transactions on the Built Environment，2004，74：45-54.

[5] 帅　斌，秦梦瑶，许旻昊. 基于元胞自动机的高速铁路列车运行仿真研究[J]. 计算机仿真，2022，39(8)：153-159.
SHUAI Bin，QIN Mengyao，XU Minhao. Simulation Study of High Speed Railroad Train Operation Based on Cellular Automata[J]. Computer Simulation，2022，39(8)：153-159.

[6] 白　鑫. 高速铁路行车仿真系统研究[J]. 铁道运输与经济，2017，39(9)：26-31，42.
BAI Xin. Research on High Speed Railway Train Operation Simulation System[J]. Railway Transport and Economy，2017，39(9)：26-31，42.

[7] 李　靖，王　涛，李　博，等. 高速铁路网列车运行径路精细化搜索算法研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(2)：1-9.
LI Jing，WANG Tao，LI Bo，et al. Refined Search Algorithm for Train Routing in High Speed Railway Network[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(2)：1-9.

[8] 李和壁. 高速铁路列车群运行仿真系统技术研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2021.

[9] 田　锐，赵　飞. 高速铁路智能调度系统功能架构及关键技术探讨[J]. 铁道运输与经济，2022，44(5)：52-56，78.
TIAN Rui，ZHAO Fei. Discussion on Functional Architecture and Key Technologies of Intelligent High Speed Railway Traffic Control System[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(5)：52-56，78.

[10] 王建英. 智能调度集中系统研究[J]. 铁道通信信号，2022，58(7)：7-12.
WANG Jianying. Study on Intelligent Centralized Traffic Control System[J]. Railway Signalling & Communication，2022，58(7)：7-12.

[11] 费宇晗. 高速铁路自动驾驶智能控制算法研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2023.

[12] SHI P，YAN B. A Survey on Intelligent Control for Multiagent Systems[J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics：Systems，2021，51(1)：161-175.

[13] 田桦东. 基于AnyLogic列车追踪运行过程仿真研究[D]. 北京：北京交通大学，2021.

[14] 彭云龙，康元磊，于逸尘，等. 基于精准停车及节能优化的列车速度跟随控制[J]. 城市轨道交通研究，2024，27(6)：215-220.
PENG Yunlong，KANG Yuanlei，YU Yichen，et al. Train Speed Following Control Based on Precise Parking and Energy Saving Optimization[J]. Urban Mass Transit，2024，27(6)：215-220.

[15] LI S K，YANG L X，GAO Z Y. Coordinated Cruise Control for High Speed Train Movements Based on a Multi-Agent Model[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2015，56：281-292.

[16] WANG X，LI S K，CAO Y，et al. Dynamic Speed Trajectory Generation and Tracking Control for Autonomous Driving of Intelligent High Speed Trains Combining with Deep Learning and Back Stepping Control Methods[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，2022，115：105230.

[17] CHAI S M，YIN J T，D'ARIANO A，et al. Train Schedule Optimization for Commuter-Metro Networks[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2023，155：104278.

（责任编辑　汪沁萱）