文章编号：1003-1421(2025)12-0138-10
引用格式：龙昭，丁天悦，李忠灿，等. 基于离散事件驱动的铁路编组站仿真建模方法研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(12)：138-147.
LONG Zhao，DING Tianyue，LI Zhongcan，et al. A Simulation and Modelling Method of Railway Marshalling Station Based on Discrete Event[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(12)：138-147.

基于离散事件驱动的铁路编组站仿真建模方法研究

龙 昭[1]，丁天悦[2]，李忠灿[2]，董 炜[3]，燕 翔[1]，李 玮[1]

(1.北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 运输指挥与信息技术研究院，北京 100070；2.清华大学 自动化系，北京 100084；3.清华大学 北京信息科学与技术国家研究中心，北京 100084)

摘 要：铁路编组站阶段计划是车站作业计划的重要组成部分，是指导车站下一阶段作业的重要依据，其编制过程需综合考虑多种复杂因素。目前，现场主要依靠调度员人工经验编制阶段计划，尚缺乏一种通用且高效的自动化编制方法，难以保证计划编制的质量。本研究在CIPS数据结构的基础上，提出了一种基于离散事件驱动的铁路编组站仿真建模方法，并构建了基于离散事件驱动的编组站仿真模型，用以支持阶段计划的模拟推演。该模型可在给定输入条件下，对站内列车到达、技术作业、解体与编组、出发、本务机转线等各环节进行全过程仿真，同时其输出结果涵盖接车股道分配、解体与编组方案、调机运用方案、发车时序等关键内容。基于现场实际数据驱动的仿真案例表明，所提出的仿真模型具备对阶段计划进行仿真和验证的能力，为实现铁路编组站阶段计划的智能化编制奠定了基础。

关键词：CIPS；编组站；仿真模型；离散事件；条件事件
中图分类号：U292.1 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250606003

A Simulation and Modelling Method of Railway Marshalling Station Based on Discrete Event

LONG Zhao[1]，DING Tianyue[2]，LI Zhongcan[2]，DONG Wei[3]，YAN Xiang[1]，LI Wei[1]

(1. Institute of Transportation Dispatch and Information Technology, CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd. (CRSCD), Beijing 100070, China; 2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The stage plan of the railway marshalling station serves as a critical part of the station operation plan, guiding the station operation in the next stage. The compilation process needs to consider a variety of complex factors. At present, the station stage plan is primarily formulated empirically by dispatchers, and there remains a lack of a universal and efficient automated method. This often cannot ensure the plan quality. Based on the data structure of computer integrated process system (CIPS), this paper proposed a simulation and modeling method of a railway marshalling station based on discrete event and constructed the corresponding simulation model of

收稿日期：2025-06-06 **修订日期**：2025-09-20
通信作者：李忠灿(1995—)，男，四川南充人，清华大学自动化系助理研究员。
基金项目：中国铁路通信信号股份有限公司科研项目(2024KJ02)；国家自然科学基金项目(72401158)；中国博士后科学基金项目(2023M741956)

the marshalling station to support the stage plan simulation. This model can conduct a full-process simulation of various stages such as the arrival of trains at the station, technical operations, train disassembly and reassembly, departure, and transfer of the main locomotive. At the same time, its output results cover key elements such as arrival track assignments, disassembly and reassembly schedules, shunting locomotive deployment, and departure sequencing. The simulation case based on the actual data of the field shows that the proposed approach is capable of simulating and verifying the stage plan. This has laid the foundation for the intelligent formulation of the stage plan at railway marshalling stations.

Keywords: Computer Integrated Process System (CIPS); Marshalling Station; Simulation Model; Discrete Event; Conditional Event

0　引言

编组站综合自动化系统(Computer Integrated Process System，CIPS)基于管控一体的理念，将铁路编组站的信息系统和信号控制系统进行了综合集成[1]。编组站现场的实际工作则是在阶段计划的指导下有序进行的。根据编组站的车流、时段、需求等因素，阶段计划通常为3~4 h制定一次，并根据实际作业情况调整，其内容包括到发线的使用、调机运用方案、解体顺序和解体方案的确定、编组场分类线的运用，以及发车时间和车次、车流的确定等，以此来保障编组站内各种设备资源的有效利用，从而确保列车可以在规定的时间内完成作业任务并准时出发。由于阶段计划直接指导编组站的运输组织和资源调度，其优化决策在提升编组作业效率中具有关键意义。

然而，目前编组站阶段计划编制的自动化程度较低[2]，现场的阶段计划编制依然依赖调度员的人工操作，各类决策主要基于调度员的经验，难以在面对车流不均衡、突发故障或极端天气等复杂场景时给出最佳决策[3-5]。此外，这种依赖人工经验的方式缺乏科学性和一致性，容易因个人判断差异导致决策的标准不统一。CIPS在阶段计划自动编制方面进行了多方面的探索，基于目前掌握的全面信息，引入了知识库等手段，但是并没有完全解决问题[6-10]。

为应对阶段计划依赖人工编制、效率低且缺乏智能化的问题，目前已有诸多研究尝试通过优化方法提升其自动化生成能力。从研究方法的角度来看，现有工作主要可分为数学规划方法、启发式算法和强化学习方法3类。其中数学规划方法[11-12]在满足约束条件的前提下，能够提供理论上的最优解，但这类方法在求解大规模问题时往往难以在有限时间内给出解。相较之下，启发式算法和强化学习方法[13-17]可以基于仿真模型进行优化，并能够在有限的时间内求解这类复杂问题，其中仿真模型提供了一个受控、可重复的实验平台，让智能体或启发式算法能够评估策略、产生行为、获取反馈并优化性能。因此，仿真模型的精确与否从根本上决定了算法所给出的解在实际场景下的可行性与质量，但现有的编组站阶段计划优化研究所搭建的仿真模型均对关键场景进行了一定程度上的简化，例如没有考虑进路联锁和资源占用等冲突、将各类作业的过程进行了简化、各类解编作业的执行时间采用标准时间等，从而导致仿真模型的运行结果和实际现场有很大差别，并且在这样的仿真模型上优化得到的决策往往无法直接应用于现场。

除此之外，仿真模型为编组站人员培训与跨部门协同提供了低成本、高效率的平台。编组站调度员与现场操作人员往往需要在真实环境中进行长时间的“跟班”学习，才能熟悉各种应急预案和操作流程，培训周期较长。而通过仿真模型，参训人员能够快速测试决策的效果并获得反馈，显著缩短培训周期、降低培训成本。

综上所述，搭建一个既能充分模拟编组站核心作业流程、又能高效重复执行的仿真模型，对阶段计划方案的高效验证与迭代优化、支撑编组站阶段计划各类优化算法的研究以及大幅提升现场操作人员培训效率都具有重要意义。

1　编组站仿真模型构建

1.1　问题分析

编组站仿真系统核心目标是在考虑进路联锁、资源占用等实际物理约束，对编组站内无岔区段、道岔、信号机等物理设施以及调机、驼峰等资源进

行建模，以离散事件仿真方法实现对编组站内列车的到达、解体、编组、出发等作业流程的仿真，从而为编组站现场作业优化、培训演练提供有效支持。编组站仿真模型是阶段计划验证过程的核心组成部分，然而，现有的编组站仿真模型存在如下问题。首先，现有研究中使用的仿真模型往往对现场情况进行了一定的简化，例如忽略了进路走行和解锁、调机连挂等各作业过程，或者是将编组站内实际作业的约束进行收紧从而简化问题，例如忽略了乱车解体过程等。前者将会导致仿真模型的验证结果与现场的实际执行结果存在无法容忍的差距，进而导致仿真模型验证结果不再具备参考价值，而后者则会导致一些现场可以执行的作业流程违背仿真约束从而无法模拟，严重影响了仿真模型的应用范围；其次，在参数计算上，现有仿真模型往往缺乏对现场各作业时间以及走行时间的严谨计算，这同样会导致仿真模型的计算结果有别于真实情况，影响仿真模型的验证效果；最后，在接口方面，现有仿真模型往往没有考虑与实际现场的对接，所生成的结果往往无法直接应用于实际现场，对仿真模型的实际效果产生了一定的影响。

1.2　解决方案

为了能够解决上述现有仿真模型存在的问题，采用面向对象的建模方式进行模型构建，具体而言，编组站内存在不同颗粒度的实体，例如车辆实体，其属性包括车辆换长、位置、组号、自重、载重等；而列车也是一类实体，其属性不仅包括列车长度、位置和总重等，同时还包括组成该列车的车辆。通过将这些不同的实体以类和对象的形式进行统一建模和管理是一种非常自然和便捷的方式。具体而言，编组站仿真模型内需要考虑的因素包括以下几种。①车站物理设施系列：包含轨道基本结构类、道岔类、无岔区段类、信号机类和进路类。②可移动设施系列：包含车辆类、机车类、车列类和列车类。③事件类：包含基础事件类和业务事件类，每个事件定义了其触发条件和触发时执行的逻辑。

经过上述建模过程，所得到的将是一个编组站的静态仿真模型，能够模拟实际编组站在任意时刻的站场状态，但本研究所设计的铁路编组站仿真模型的目标是搭建一个能够在输入驱动下进行推演的动态模型，为此需要设计仿真模型的驱动层，以控制仿真模型的状态演变。由于编组站场景实质上是一个业务场景，里面存在着不同类型的“作业”，具体包括如下模块。①列车走行模块实现列车按照所排列的进路动态占用、出清轨道区段；②到达技术作业模块实现列车到达至到达技术作业完毕；③解体作业模块实现调车机车空程开始至解体车列分解结束；④编组作业模块实现调机空程开始至将编组车列全部牵引至出发场；⑤出发技术作业模块实现出发车列牵引至出发场到出发技术作业完毕；⑥本务机车作业模块实现本务机在站内的立折、入段、出段的过程。通过将这些“作业”抽象为事件——定义了执行时间和执行内容的不同类，进而采取离散事件驱动的方式来推进仿真的执行。这样一来，铁路编组站仿真模型只需要根据输入来生成特定的事件并为这些事件提供参数和执行时间，仿真模型便可以通过按时间先后依次执行这些事件来推进仿真时间和状态的演变。

在时间计算上，仿真模型基于目前CIPS的编组站站场平面图、区段长度表、联锁表和进路表等基础数据，完整模拟联锁系统的信号逻辑。通过关联调机的型号与牵引动力等参数，计算调机进行各类作业的行驶速度，进而仿真各类调车、走行作业的时间；使用历史数据中不同作业条件下(如不同溜放车数)的溜放(如单溜、连溜等)、连挂、编组等作业的平均时间作为仿真时间。通过对这些作业细节的还原，使仿真模型在各业务环节的执行时间上尽可能逼近真实现场，为后续的调度决策和性能评估提供可靠依据。

最后，仿真模型的决策输入包括接车股道、解体顺序及解体计划、编组计划、出发列车计划在内的4种核心作业。模型提供操作(输入)接口以及输出文件接口，接口定义了标准化的输入和输出，可灵活对接强化学习、遗传算法等决策算法模块，实现决策算法与仿真平台、仿真平台与实际现场数据的无缝对接。

1.3　仿真场景与约束

本模型以已开通CIPS的某标准三级六场编组站为原型进行研究。

根据现场调研，在解体作业过程中，存在如下特殊情况。①某些车辆虽然在本行别到达，但是要发往另一行别，这样的车辆只能解体至交换线上。交换线位于每一行别编组场的特定股道。后续将由另一行别的驼峰调机将交换线上的车列拉走并进行解编。②由于编组场线路资源紧张，因此允许部分编组线上的车辆进行二次解体，这样的线路被称为“乱车线”。乱车线是在解体过程中自由选择的，编组场除一部分特殊股道外任意线路都可以作为乱车线使用。③对于禁止过峰车辆需要送至编组场的迂回线，对于禁溜车需要送至禁溜线，后续再将禁溜线上的车列调入编组场股道。

编组站作业过程中涉及许多复杂约束，而所构建模型的优势在于可以用仿真的逻辑对这些复杂约束进行表达。编组站仿真模型所考虑的核心约束以及实现方式如下。

（1）股道长度约束：所有列车和车列的长度加上机车长度不能超过股道的有效长度。在仿真模型中，若某一列车的整体长度大于该股道有效长，则该列车不允许接入当前股道。

（2）调机资源约束：每一行别的解体和编组调机各有2台。

（3）车列走行约束：车列、调机在站内的移动严格按照联锁进路执行，并实现分段解锁。

（4）编组约束：在进行编组时，调车机车编组计划最多允许双线编组，此条目前基本上能够满足编组站的需求。仿真模型通过对编组决策的输入参数进行检查实现该约束，即最多允许指定2条编组线上的车列进行编组作业。

（5）编组计划约束：对于每一个去向的出发列车，在静态数据表中对该列车所包含的车辆均有明确的约束，即允许包含的车辆组号、辆数、换长、质量、编挂要求等限制。仿真模型通过对编组决策的输入参数进行检查实现该约束，只有编组计划允许的编组方案才会被执行。

（6）隔离规则约束：为保证安全，特种货物车辆、特殊车辆之间存在隔离要求，仿真模型必须严格满足隔离要求。

（7）出发事件约束：从班计划中抽线运行，发车时间满足列车运行间隔要求。

（8）股道资源约束：在编组站仿真模型中，股道资源有限，仿真模型按照编组站实际股道资源进行配置，具体而言，编组站每一行别的到达场有11条可用股道、编组场有32条可用股道、出发场有13条可用股道。

（9）驼峰资源约束：编组站仿真模型中，每一行别都存在一个驼峰，驼峰采用双推单溜作业方式，驼峰上包含2条推送线，允许同时将2列车列推上驼峰(双推)，但同一驼峰同一时刻只允许进行一列车列的解体溜放作业。

（10）技检作业约束：仿真模型考虑了到达技术作业和出发技术作业。

1.4　仿真系统总体架构设计

编组站仿真系统按照功能不同可划分为决策层、模型层和支撑层。编组站仿真系统架构如图1所示。本系统采用自下而上、由微观到宏观的分层架构。具体而言，支撑层用于驱动仿真的推进以及状态的变化；模型层用于模拟编组站内核心的作业流程；决策层用于接收外部的决策输入并提供模型状态。这种分层设计使得系统各层职责明确、耦合度低，当需要实现新的业务时，只需要在调度层进行修改，而无需考虑底层的事件驱动方式，并且车列在运行过程中的安全将由运行控制层保证。这种分层结构使得仿真模型能够轻松实现水平扩展与垂直升级，灵活应对仿真规模扩大及算法演进，满足从局部到整体的复杂仿真需求。

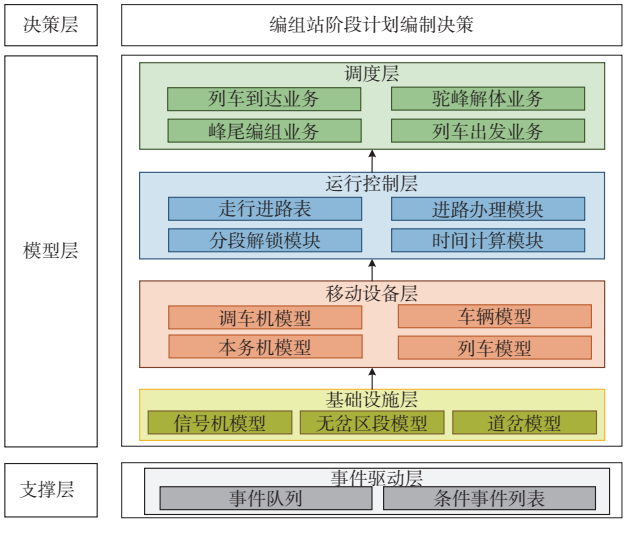

图1　编组站仿真系统架构

Fig.1　Architecture of marshalling station simulation system

决策层作为外部决策输入接口，接收决策参数并提供模型状态，推进模型运行。每3 h阶段运行完毕后，决策参数构成阶段计划。同时返回站场状态(车辆分布、作业进展、出发车辆等)供算法决策参考。

模型层包括仿真核心，按依赖关系自下而上划分为4层。①基础设施层：包括信号机、无岔区段、道岔模型，模拟移动设备行驶的物理条件。②移动设备层：包括调机、本务机、车辆、列车模型，模拟设备运行状态。③运行控制层：包括进路表、进路办理、分段解锁、时间计算模块，保证车列按联锁进路行驶。④调度层：包括列车到达、驼峰解体、峰尾编组、列车出发业务，统筹安排作业任务推进。

支撑层包含了事件队列和条件事件列表，支撑层的作用是驱动仿真模型按仿真事件的时间戳顺序和条件事件的条件逻辑实现仿真运行。

2　编组站仿真模型功能实现

基于离散事件驱动的铁路编组站模型整体流程如图2所示。

模型从接口获取输入信息，然后按照接车、解体、编组、发车的顺序进行模拟推演，中间兼顾本务机的入段、立折和出段，最终形成推演结果。列车在编组站内的到达–解体–编组–出发作业决策流程如图3所示。

（1）到达决策：仿真模型按到达时间将列车排队，满足接车条件后办理进路，列车进入股道开始技术作业。

（2）解体决策：当驼峰空闲时触发解体车列选择事件，调机连挂解体车列推上驼峰后进行溜放，将车列拆分并溜放至相应编组线。

（3）编组决策：当编组场存在满足编组计划的满轴车列且峰尾调机空闲时，调机前往编组线连挂车列，经固定连挂时间后牵引至出发场股道，车列需满足编组计划的编挂要求及辆数/长度/质量约束。

（4）出发决策：编组完成后触发出发作业，满足出发时间要求的列车驶出编组站，同时删除站内对应车辆对象。

另外，车站联锁进路对车站作业至关重要，对各作业的时间影响较大。相较于以往研究，本研究搭建了能够完全模拟现场进路排列与区段占用、分段解锁功能的仿真联锁系统。为了能够在仿真模型中实现这些功能，首先需要对编组站站场进行建模。在站场结构上，仿真模型以“区段基本结构”作为最小单位，区段基本结构为岔心–绝缘节或绝缘节–绝缘节之间的轨道区段。其中每个无岔区段都由一个区段基本结构组成，而每个道岔区段则由3个区段基本结构以及1个岔心组成。道岔区段示意图如图4所示，道岔区段212DG由岔心212以及区段基本结构e_1，e_2，e_3组成。所有的区段基本结构长度和连接关系均按照实际站场平面图和区段实际长度进行设置[18]。

在所构建的编组站站场模型上，联锁进路模型的功能实现如下：当某车列需要办理进路并行驶到另一轨道区段时，给定某条进路，首先判断该进路上包含的所有轨道区段是否处于空闲状态，若处于空闲状态，则将进路中包含的道岔调整到对应的定反位并锁闭；若某轨道区段不处于空闲状态，则等

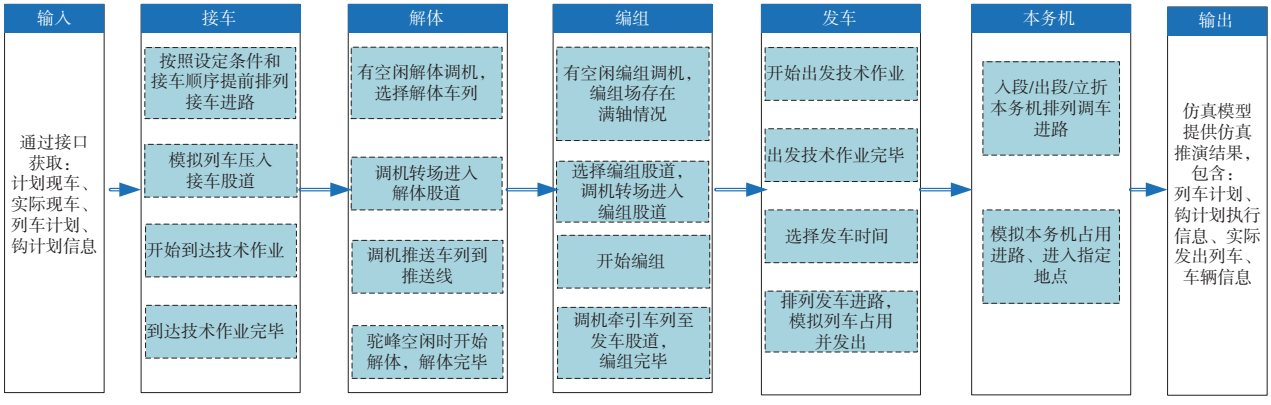

图2　铁路编组站模型整体流程

Fig.2　Overall process of railway marshalling station model

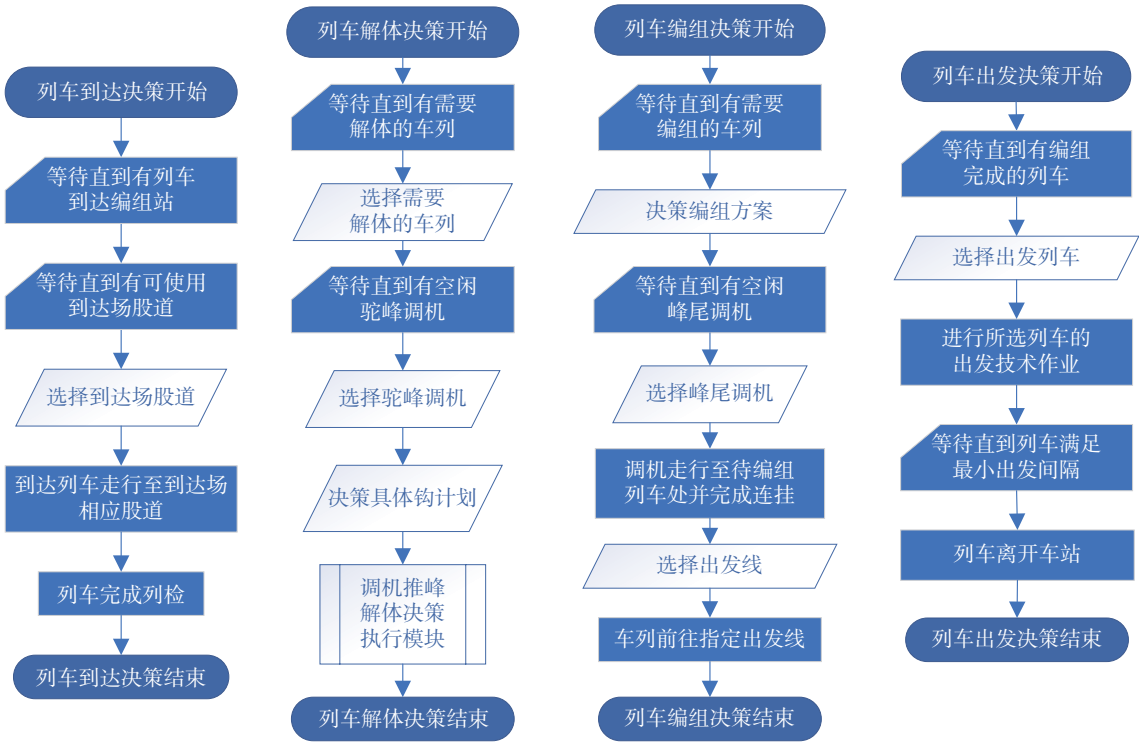

图3　到达–解体–编组–出发作业决策流程

Fig.3　Train arrival, disassembly, reassembly, and departure operation process

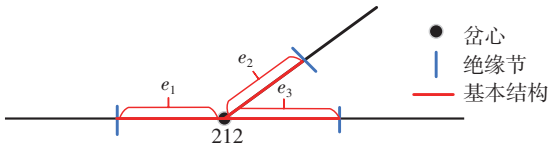

图4　道岔区段示意图

Fig.4　Turnout section

待直到所有的轨道区段恢复为空闲状态。而在车列行驶过程中，若满足分段解锁条件，则释放对应的轨道区段。

仿真模型中涉及的各业务参数，例如车列速度、编组规则、作业(溜放、送车等)时长等，采用如下几种方式获取。①车列速度通过对应调机的型号与牵引动力等参数计算得到；②编组规则、车辆去向、作业时长参照编组站《车站行车工作细则》与其他说明文件进行配置；③溜放时长首先使用编组站近一年的历史数据中的解体作业时间进行统计，历史数据中记录了真实解体作业的耗时，以及当前解体作业中包含的不同类型的溜放方式的次数，将各类型溜放方式(单溜、连溜、送车)作为变量，采用最小二乘法计算拟合系数，经过核对修正，得到最终的作业时长：单溜每钩作业时间为4.5 min，连溜每钩作业时间为30 s，送车每钩作业时间为15 min。

除溜放时长外，仿真模型中其他操作还包括列车的移动、到达技术作业以及出发技术作业。其中，列车的移动时长计算方法为所选进路总长度除以列车行驶速度；到达技术作业、出发技术作业的时长采取从车站获取的平均业务时间。而对于调度层的宏观业务，例如解体、编组等事件，其执行时间由业务中包含的全部操作的执行时间以及等待时间之和计算得到。由于列车因进路冲突和资源受限而产生的等待时间是不固定的，因此各业务的实际执行时间并不固定。

3　编组站仿真支撑层关键技术

3.1　离散事件队列驱动的仿真执行机制

为满足编组站各因素(固定设备、移动装备、作业流程等)间的充分交互，采用离散事件仿真(Discrete Event Simulation，DES)方法[19]。DES是以事件驱动的仿真方法，用于分析系统状态随时间的变化过程。仿真系统通过事件队列管理，记录所有待发生事件并按仿真时间排序。每个事件包含时间戳和操作指令，仿真推进时取出最早事件，将仿真

时间推进至该时间戳并执行操作指令更新系统状态。事件操作指令分为2类：状态更新指令(如释放调机、解锁轨道区段)和事件产生指令(如“进路办理成功”事件生成车列走行、区段占用等新事件)。新生成的事件重新插入队列，推动系统演化。该仿真模型适用于具有排队、调度、资源竞争特征的系统，契合铁路编组站任务调度需求，相比连续仿真模型具有更高效率。

事件队列执行过程示意图如图5所示。编组站仿真模型的执行过程由离散事件队列管理，模型中共有2种不同类别的事件，其中内部事件代表不需要外部提供决策输入的事件，例如车列走行、资源占用与释放、状态修改等；而外部事件对应到达、解体、编组、出发等业务事件，需要外部提供决策参数才能推动仿真模型继续执行。仿真模型将会依次按照时间戳的先后弹出并执行事件队列中的事件，从而实现仿真时间的推进，而事件的精细程度则决定了仿真模型执行的计算时间。

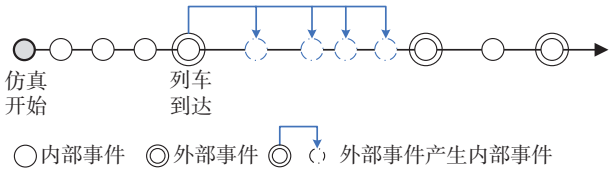

图5　事件队列执行过程示意图

Fig.5　Execution process for event queue

编组站仿真模型的最基本事件为内部事件，其基本类型包括：移动(车列走行)、状态改变(例如道岔开向变更)、等待指定时长(例如到达与出发技术作业)组成，编组站内所有业务事件都由这3种内部事件按顺序组合形成，各类业务执行过程的本质就是按顺序执行内部事件直至整个业务被执行完毕为止。每个业务已经定义好了所包含的内部事件，当这些业务对应的外部事件被触发时，业务内部包含的内部事件的执行时间、执行顺序和具体参数将被计算得到。其中，那些有确定开始时间的内部事件将直接被赋予时间戳并插入到事件队列中，而对于条件满足时开始的内部事件，则会由条件事件列表进行管理。内部事件在执行完毕时将会被销毁。

3.2　基于条件事件列表的仿真事件触发机制

在编组站场景下，并非所有的外部事件都有明确的开始时间，例如解体作业将会在驼峰空闲、存在可解体车列且存在空闲的解体调机时才会被触发，这一逻辑体现为if…then…规则。为了能够实现在某些条件满足的情况下自动执行某些功能的逻辑，编组站系统仿真模型设计了条件事件列表功能。条件事件列表执行过程示意图如图6所示，条件事件列表中存放了许多条件–事件对，每当仿真模型执行事件队列中的事件后，仿真模型的状态也随之发生改变，此时将遍历条件事件列表，判断是否有条件被满足，如果有则自动触发对应的事件。例如在执行完“释放驼峰”内部事件后，判断条件事件列表中“解体车列选择事件”条件满足，意味着可以进行解体作业，此时需要外部提供决策参数以确定下一步要进行解体的车列，随后仿真模型执行该外部事件，并产生对应的内部事件插入到事件队列中。

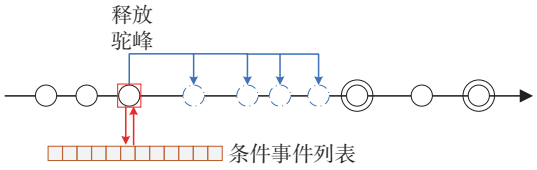

图6　条件事件列表执行过程示意图

Fig.6　Execution process of conditional event list

4　编组站仿真模型运行案例

4.1　数据介绍

为了验证所搭建的编组站仿真模型的实际效果，本研究从实际编组站现场中采集了某一天的真实数据进行仿真案例验证。所采集的数据包括：①实际现车信息，即当前时刻编组站内各车辆所在位置；②计划列车信息，即未来3 h内计划到达编组站的列车信息；③计划到达列车的确报信息，包括车号、到站、组号、换长、自重、载重等。除此之外，技术作业时间、溜放时间、车列走行速度、区段长度、货物列车编组计划等静态信息均使用现场实际参数进行配置。该阶段开始时的现车车辆数为2 823辆、计划到达列车数为12列、计划到达车辆数为652辆。所有实验均在一台操作系统为Windows 11、配备Intel Core i9–13980处理器(5.6 GHz)和64 GB内存的工作站上运行。

4.2　仿真输入输出及运行结果

由于仿真模型外部事件需要提供对应的决策参

数，因此本研究利用该仿真模型设计了强化学习算法，能够在对应的外部事件触发时根据当前的仿真状态给出相应的动作。在仿真模型的运行过程中，会自动打印当前各事件的决策参数与执行情况，以便于用户随时查看仿真模型的运行状态，编组站仿真模型运行过程打印信息如图7所示。除此之外，仿真模型在执行解体和编组操作后会对切面信息进行一次保存，以便于用户查看每一步决策后模型状态的改变情况。仿真模型切面信息如表1所示。

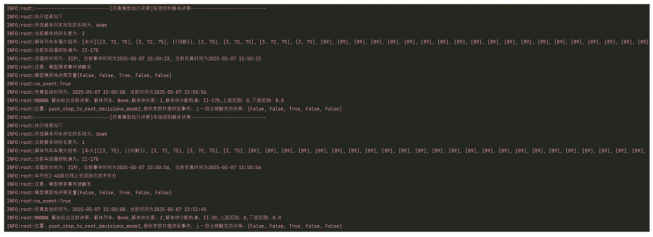

图7　编组站仿真模型运行过程打印信息

Fig.7　Printing information of operation process of marshalling station simulation model

表1　仿真模型切面信息

Tab.1　Simulation model cross-section information

线路名称	线路上的车辆号	车辆数/辆	车辆组号
Ⅳ-2G	5722851，5791951，……	36	汉旺，汉旺，汉旺，……
Ⅳ-3G	5246656，3413854，……	5	X，新丰镇及其以远，……
Ⅳ-4G	3827388，3835488，……	47	P，兴隆场及其以远，P，……
Ⅳ-5G	6603923，6616484，……	37	襄樊北及其以远，……
⋮	⋮	⋮	⋮

仿真模型输入输出与处理流程如下。①输入数据。上阶段未执行完毕的钩计划目录、钩计划正文、待规划阶段计划列车信息、确报信息及阶段开始时的实际现车信息。计划列车信息如表2所示，确报详细信息如表3所示，钩计划目录信息如表4所示，钩计划正文信息如表5所示。②输出数据。优化后的计划列车信息、钩计划目录与钩计划正文、确报详细信息。

仿真模型的处理流程如下。①初始推演。仿真模型执行上阶段未执行完毕的钩计划目录、钩计划正文中所制定的解体和编组计划，并推演车站状态变化，从推演结束状态开始接收外部决策并仿真。②交互优化。当仿真状态可进行到达、解体、编组、出发4类外部事件时，状态转移暂停，强化学习算法根据当前状态给出决策参数，仿真模型接收参数后继续执行，重复此过程直至3 h阶段时间结束。③结果输出。仿真结束后自动保存输出文件并发送至CIPS系统，为现场阶段计划编制提供决策参考。

为了对比强化学习算法的效果，设计基于先到

表2　计划列车信息

Tab.2　Scheduled departure train information

车号	到发类型	总重/t	换长	车辆数/辆	列车ID	到发时间
45305	到达	22 171	58.7	46	1	2025-05-07 15:01
10501	到达	42 710	69.2	51	2	2025-05-07 15:11
39007	到达	44 908	67.1	51	3	2025-05-07 15:19
—	出发	13 235	67.2	51	4	2025-05-07 15:47
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表3　确报详细信息

Tab.3　Detailed train information

车辆ID	车号	所在列车ID	列车内顺序
146051372	1550752	4	1
146051367	1601892	4	2
146051368	1602487	4	3
146051376	1649841	4	4
⋮	⋮	⋮	⋮

表4　钩计划目录信息

Tab.4　Catalog information of shunting operation plan

钩目录ID	钩计划类型	占用调机	场域
1	解体	805	上行场
2	解体	806	上行场
3	编组	807	上行场
4	编组	808	上行场
⋮	⋮	⋮	⋮

表5　钩计划正文信息

Tab.5　Text information of shunting operation plan

钩作业ID	作业股道ID	车辆数/辆	作业车号	连挂总长(换长)	连挂总重/t
1000	262	42	1509325，1510645，……	53.8	1 217
1001	271	1	1509325	52.5	1 194.3
1002	288	3	1510645，1527750，……	48.6	1 110.6
1003	296	1	1587487	47.3	1 025.9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

先服务的启发式规则方法，其决策规则为：按到达时间先后顺序依次解体到达列车，在到达列车全部解体完毕后开始进行乱车解体，且优先解体车辆平均等待时间最久的乱车车列。经验证，强化学习算法在该阶段(15:00—18:00)的总发出车辆数为530辆，总发出列车数为12列，仿真总执行时间为16.002 s，而先到先服务规则的总发出车辆数为446辆，总发出列车数为10列，仿真总执行时间为8.042 s。从结果上来看，经过训练后的强化学习算法，其发出车辆数相比于启发式规则提升了18.83%，且求解时间更短，这证明研究所构建的编组站仿真模型能够有效支撑阶段计划优化算法的训练与决策。

仿真模型运行结束后，根据执行完毕后的接发车情况和编组场存车情况对阶段计划的编制质量进行评价。根据现场的详细调研，阶段计划编制质量考核的一个重要思想是为下一阶段打基础的水平(如乱车线应较少、空线的数量应足够)。为了对阶段计划的编制质量进行评价，对基于强化学习的编组站计划编制方法的推演结果进行分析，编组站仿真模型运行结束时现场切面信息如图8所示。仿真在结束时编组场上乱车线过多(II-9G、II-21G、II-24G、II-26G、II-29G、II-32G)，而空线太少(1条)，且II-26G股道上的车辆明显可以在溜放时放置于II-18G股道上，这样可以多出1条空线，为下一阶段打下良好的基础。以这样的方式，可以通过仿真模型的切面信息以及输出文件对阶段计划的编制质量进行评估和分析，为后续智能调整阶段计划提供优化目标。

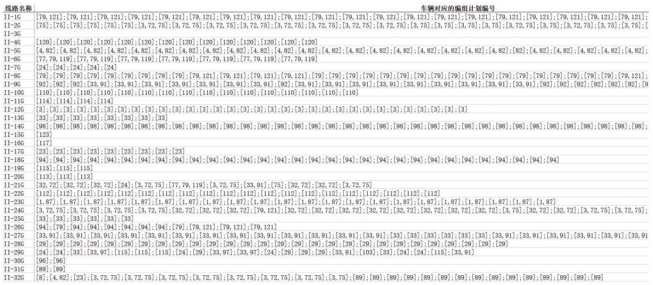

图8　编组站仿真模型运行结束时现场切面信息

Fig.8　Section information of marshalling station simulation model at end of simulation

5　结论与展望

人工编制的阶段计划往往会受到人的主观因素影响，缺乏科学性和一致性，并且容易因个人判断差异导致决策的标准不统一。因此，在新技术不断应用于铁路的大环境下，阶段计划自动编制、智能编制是一种趋势，而建立编组站仿真模型，可以为强化学习等人工智能方法提供仿真环境，是实现阶段计划自动编制的必由之路。在此背景下，本研究在CIPS数据结构的基础上，提出了一种基于离散事件驱动的铁路编组站仿真建模方法，并构建了基于离散事件驱动的编组站仿真模型。本研究的主要贡献如下。

（1）搭建了针对编组站阶段计划优化的一体化仿真模型，相较于既有研究，该模型实现了阶段计划中到达、解体、编组及出发作业的全流程自动化仿真，且完整考虑了包含调机预推、交换车/乱车二次解体等实际作业类型，以及进路联锁、资源占用等实际物理约束。实验结果证明，该仿真模型通过决策参数输入接口，能够为强化学习等各类阶段计划优化算法提供直接的仿真环境支撑。

（2）仿真模型在物理结构上严格按照进路表、站场平面图、各作业时间表及车列行驶速度等现场属性进行配置，同时在作业上按照现场实际的作业流程及编组计划约束进行仿真，相较于以往研究，该模型给出的阶段计划方案能够直接用于指导编组站现场作业，并且通过实际现车、计划到达列车等配置文件以及钩计划、出发列车计划等输出文件，实现了与CIPS系统的连接。

基于实际数据的仿真案例研究表明，仿真系统在用户可接受的时间内可以得到正确仿真推演结果，并具备对阶段计划进行仿真和验证的能力。本研究工作为阶段计划智能化编制奠定了基础。未来还可以进一步丰富该仿真模型的功能，如对取送车、车辆检修、设备故障等作业进行仿真模拟。

参考文献：

[1] 丁　昆. 我国铁路编组站信息化技术发展策略[J]. 铁道运输与经济，2006，28(7)：67-69.

[2] 杨　浩. 铁路运输组织学：第4版[M]. 北京：中国铁道出版社，2015.

[3] 吴惠娜. 编组站综合自动化计划协同管理的研究[J]. 铁道货运，2019，37(1)：23-27.

WU Huina. A Study on the Strategy to Implement Coordinated

Management of the Integrated Automatic Planning System at Railway Marshalling Yards[J]. Railway Freight Transport，2019，37(1)：23-27.

[4] 张从立. 提升徐州北编组站运输效率的思考与实践[J]. 铁道货运，2023，41(2)：1-5，27.
ZHANG Congli. Improvement of Transport Efficiency of Xuzhoubei Marshalling Station：Reflection and Practice[J]. Railway Freight Transport，2023，41(2)：1-5，27.

[5] 高克锋，贾双营，郭占清，等. 贵阳枢纽作业车运输组织优化研究[J]. 铁道货运，2024，42(2)：1-6.
GAO Kefeng，JIA Shuangying，GUO Zhanqing，et al. Optimization of Transportation Organization of Operation Vehicles in Guiyang Railway Junction Terminal[J]. Railway Freight Transport，2024，42(2)：1-6.

[6] 娄正良，李文婷. 基于知识库的调车计划自动编制系统[J]. 中国铁路，2010(8)：38-42.

[7] 龙　昭. 基于日班计划的车流推算研究[J]. 铁路通信信号工程技术，2016，13(3)：12-16.
LONG Zhao. Research on Traffic Flow Estimation Based on Daily Plan[J]. Railway Signalling & Communication Engineering，2016，13(3)：12-16.

[8] 李　玮. 摘挂列车调车计划的算法研究及实现[J]. 铁道运输与经济，2007，29(3)：79-81，84.
LI Wei. Research and Realization of Algorithm of Shunting Plan for Train Detaching and Attaching[J]. Railway Transport and Economy，2007，29(3)：79-81，84.

[9] 褚晓东. 编组站CIPS系统下调度算法的研究[D]. 北京：清华大学，2008.

[10] 常效辉. 编组站综合自动化系统功能[J]. 铁路通信信号工程技术，2017，14(6)：56-59.

[11] 向江海，赵　军，张思宇，等. 铁路编组站到发场技术作业计划编制优化方法研究[J]. 铁道学报，2025，47(2)：11-23.
XIANG Jianghai，ZHAO Jun，ZHANG Siyu，et al. Optimization Approach for Design of Technical Operation Plan for Arrival-Departure Yard of Railway Marshalling Station[J]. Journal of the China Railway Society，2025，47(2)：11-23.

[12] 姚宇峰. 编组站到发线运用计划优化的研究[J]. 铁道货运，2022，40(7)：51-58.
YAO Yufeng. Optimization of Arrival and Departure Track Operation Plan of Marshalling Station[J]. Railway Freight Transport，2022，40(7)：51-58.

[13] 何占元，许展瑛，姚宇峰，等. 考虑计划分配优先级与干扰条件的编组站阶段计划自动编制研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(2)：105-111，119.
HE Zhanyuan，XU Zhanying，YAO Yufeng，et al. Automatic Preparation of Marshalling Station Stage Plan Considering Priority of Plan Allocation and Interference Conditions[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(2)：105-111，119.

[14] 刘鹏毅. 基于邻域搜索算法的编组站解编方案优化研究[D]. 石家庄：石家庄铁道大学，2024.

[15] 马凯臻. 基于货物优先级的编组站动态配流优化研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2023.

[16] 余双江. 基于车辆的铁路编组站列车组成与解编排序整体优化研究[D]. 成都：西南交通大学，2023.

[17] 赵　军，张思宇，赵嵩森，等. 铁路双向编组站列车-车场指派优化模型与算法[J]. 铁道学报，2024，46(6)：22-35.
ZHAO Jun，ZHANG Siyu，ZHAO Songsen，et al. Optimization Model and Algorithm for Train-to-Yard Assignment at Railway Bidirectional Marshalling Stations[J]. Journal of the China Railway Society，2024，46(6)：22-35.

[18] 丁　昆，李　玮，娄正良. CIPS按计划自动办理进路的原理[J]. 铁道通信信号，2010，46(11)：15-19.

[19] 杜旭升，韩买良. 基于离散系统仿真的编组站到解作业能力计算技术[J]. 高速铁路技术，2011(12)：348-351.

(责任编辑　魏　然)