文章编号:1673-0291(2026)03-0115-13 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250102

基于多智能体的铁路枢纽区段站通过能力仿真计算方法

魏孟骞[a],张宏翔[a],鲁工圆[a,b]
(西南交通大学a.交通运输与物流学院,b.综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室,成都 611756)

摘 要:针对铁路枢纽区段站通过能力计算与能力利用评估问题,提出一种基于多智能体的枢纽区段站通过能力仿真计算方法.首先,分析枢纽区段站设备功能及布置、办理列车类型及技术作业组织流程.其次,结合多智能体仿真技术和枢纽区段站技术作业内容,设计列车、机车、车辆3类智能体,分析其行为过程并设计智能体决策模块,建立基于多智能体的枢纽区段站作业组织仿真模型.再次,提出一种基于车站现有车流结构构造过饱和车流条件的方法,并将生成的车流输入仿真模型,输出饱和态势下的最大接发列车数,以此得到枢纽区段站通过能力.最后,结合实际案例进行仿真计算,验证结果的有效性,并设置多种车站作业场景进行仿真分析.研究结果表明:算例枢纽区段站通过能力为80列,车站既有通过能力利用率为82.5%,与利用率法计算结果的相对误差为3.6%;在现有技术设备条件下,通过增加无改编中转货物列车的接入比或办理股道数可以有效提高枢纽区段站的通过能力;所提出的通过能力仿真计算方法能有效评价枢纽区段站通过能力,为优化车站作业组织提高运输效率提供依据支持.

关键词:铁路运输;枢纽区段站;车站通过能力;过饱和车流;多智能体仿真
中图分类号:U292.5 **文献标志码**:A

A multi-agent-based simulation method for calculating the carrying capacity of a railway hub district station

WEI Mengqian[a], *ZHANG Hongxiang*[a], *LU Gongyuan*[a,b]
(a.School of Transportation and Logistics, b.National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To address the challenges of calculating the carrying capacity and evaluating the capacity utilization of railway hub district stations, this study proposes a multi-agent-based simulation method for capacity calculation. First, the equipment functions and layouts, types of trains handled, and technical operation workflows at the hub district station are analyzed. Second, by combining multi-agent simulation technology with the technical operations of the station, three types of agents, trains, locomotives, and railcars, are designed. Their behavioral processes are analyzed, and corresponding decision-

收稿日期:2025-07-07;**修回日期**:2026-01-12
基金项目:四川省科技计划"骈骥"项目(2025HJPJ0011);国家自然科学基金(52272324)
Foundation items: Sichuan Science and Technology Program "PIANJI" Project (2025HJPJ0011); National Natural Science Foundation of China (52272324)
第一作者:魏孟骞(2003—),男,四川成都人,硕士生.研究方向为交通运输规划与管理.**email**:weimengqian2020@outlook.com.
通信作者:鲁工圆(1983—),男,四川射洪人,教授,博士,博士生导师.**email**: lugongyuan@home.swjtu.edu.cn.

引用格式:魏孟骞,张宏翔,鲁工圆.基于多智能体的铁路枢纽区段站通过能力仿真计算方法[J].北京交通大学学报,2026,50(3):115—127.
WEI Mengqian, ZHANG Hongxiang, LU Gongyuan. A multi-agent-based simulation method for calculating the carrying capacity of a railway hub district station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(3): 115—127. (in Chinese)

making modules are developed to establish a multi-agent simulation model for station operations. Third, a method for constructing oversaturated train flow conditions based on the station's existing train structure is proposed. The generated train flow is input into the simulation model to determine the maximum number of arriving and departing trains under saturated conditions, thereby obtaining the carrying capacity of the station. Finally, a real-world case study is conducted to validate the effectiveness of the proposed simulation method, and various operational scenarios are simulated and analyzed. The research results indicate that the carrying capacity of the case station is 80 trains, and the existing capacity utilization rate is 82.5%, with a relative error of 3.6% compared to the traditional utilization rate method. Under current technical equipment conditions, increasing the proportion of non-reorganized transit freight trains or the number of handling tracks can effectively enhance the carrying capacity of the hub district station. The proposed simulation method effectively evaluate hub district stations' carrying capacity, providing theoretical support for optimizing station operation organization and improving transportation efficiency.

Keywords: railway transportation; hub district station; station carrying capacity; over-saturated train flow; multi-agent simulation

随着我国铁路网络持续加密和“公转铁”政策深化落实,2024年我国铁路营业里程达16.2万公里,铁路货运量达51.75亿吨[1].枢纽区段站作为铁路货运网络中承担车辆中转、列车编组、货物集散等作用的关键节点,其通过能力对整个路网的效能发挥具有重要影响.现有关于区段站通过能力的研究,无论是基于通过能力分析的扩能改造方案研究[2-4],还是面向作业组织优化的通过能力挖潜研究[5-6],均首要依赖于区段站通过能力的计算和评估,特别是在推进“强网补链”、实现铁路高质量发展的战略要求下[7],准确计算和提高枢纽区段站的通过能力,对协调车站工作组织、合理安排列车作业、加快车流组织和货物周转[4]具有重要意义.

目前车站通过能力计算方法可分为分析法、优化法和仿真法3类[8].分析法通过理论公式进行静态性计算,依赖理论推导和经验参数快速估算,包括直接计算法、利用率法等[9],既有区段站通过能力研究[2-3,5-6,10]均采用此法计算.分析法简便易行,但对动态交互、随机扰动等因素的简化假设使其精度较低、在复杂场景的适用性受限.为提高通过能力评估的精细化水平,诸多学者开始采用优化法,建立数学模型并设计算法求解.文献[11]针对没有列车时刻表指导的铁路系统能力计算问题,建立能力评估数学模型,刻画铁路设施占用情况并计算能力消耗.文献[12]将高铁枢纽通过能力计算问题分解成列车到达问题和列车时空路径问题,建立相应数学模型并采用拉格朗日算法求解.文献[13]以不同运行图铺画方式为约束,构建单线铁路成对追踪平行运行图最小周期的混合整数线性规划模型,采用Lingo编程求解通过能力.文献[14]基于图解法思想在既有车站作业方案中不断输入列车,建立车站作业方案优化模型,采用Gurobi求解高铁站高峰时段通过能力.文献[15-16]基于车站轨道电路分组和车站分区划分方法计算高铁站通过能力.优化法提高了计算精度,但也提高了复杂度,且难以直接反映车站作业的动态演化过程.

仿真模型对整个车站系统进行模拟,可真实还原列车在站作业过程,具有适应性强、可控性高、易于复现等优点,是计算车站通过能力的高效手段.文献[17]探究了客运专线客运站通过能力的仿真模型及设计流程.文献[18]建立了基于离散事件的货运站作业仿真模型,通过仿真货运站作业并准确计算其通过能力.文献[19]建立高铁车站通过能力计算仿真模型,基于正交试验方法对不同高铁车站作业方案下的通过能力进行仿真计算和对比.文献[20]考虑车站设备状态和各类列车作业流程时间等约束,构建高铁车站最大通过能力计算模型,以事件调度法对通过能力进行仿真求解.除了离散事件仿真外,智能体仿真也是铁路车站作业组织的重要研究手段,相关研究[21-24]一般将列车、设备等主体视为具有自主决策与交互行为的智能体,从而精确刻画铁路车站系统中的作业单元并行运行及其作业过程,更有利于研究车站作业组织相关优化问题和准确计算车站通过能力.例如,文献[23]为强化学习智能体,构建了高铁车站进路与到发线运用仿真模型作为其训练环境,实现了到发线运用方案的高精度实时调整.文献[24]依据多智能体理论开发三层智能体仿真模型来模拟高速铁路的运营过程,通过Net-

Logo仿真平台计算京沪高铁沿线车站的通过能力.

综上,现有区段站通过能力研究多采用分析法计算;仿真方法能较好地模拟车站作业组织流程,但采用仿真方法计算车站通过能力的现有研究主要集中在作业流程规范、列车类型单一的高铁车站方面,缺乏针对列车种类多样、涉及解编等复杂作业的枢纽区段站作业组织仿真建模和基于智能体仿真的通过能力计算.本文从设施设备功能、办理列车类型出发分析枢纽区段站技术作业组织过程,采用多智能体仿真方法建立枢纽区段站作业组织仿真模型,通过仿真过饱和车流下的车站作业组织,对枢纽区段站通过能力进行计算和评估,并以此为枢纽区段站通过能力提升提供决策建议支持.

1　枢纽区段站及其技术作业内容

1.1　枢纽区段站概述

枢纽区段站是指有两条或两条以上的铁路线会合或交叉的区段站,大部分是由于支线引入后汇合而形成,一般有3~4个衔接方向[25].枢纽区段站的布局和设备配置与一般区段站大同小异,通常包括客货运设备、行车运转设备、机务设备、车辆设备及其他信号、照明等作业组织设备.

一个典型的枢纽区段站场设备布置示意图如图1所示,通常为横列式.图1中:B、C、H表示车站衔接的3个方向;为使两端咽喉区作业负担均衡,第三方向H应从没有机务段一侧引入;各方向进出站线路均应有独立进路通向到发场,保证能同时接入各方向列车,所有到发线应按双进路设计,以便折角列车作业.

由图1可知,枢纽区段站设备布置复杂,设备之间相互关联,任意一环节的效率低下都会影响车站通过能力.因此,在进行仿真建模之前,有必要对其站内技术作业内容和过程进行分析.

1.2　枢纽区段站内的技术作业内容及过程

枢纽区段站内不同类型列车办理的技术作业内容及过程见图2,通常包括接车作业、到达作业、发车作业,不同类型列车由于自身属性性质,所办理的作业程序不同,相应的作业组织过程也不同.

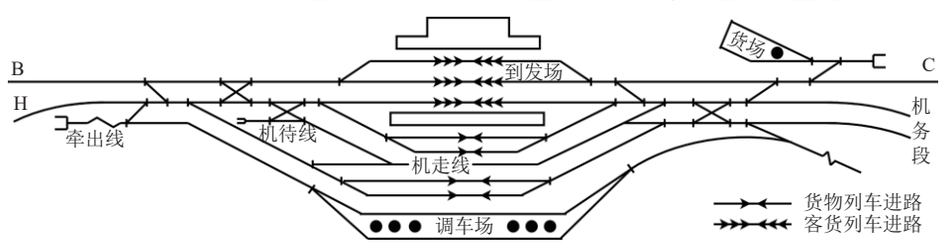


图1　枢纽区段站布置示意图

Fig.1　Schematic layout of a railway hub district station

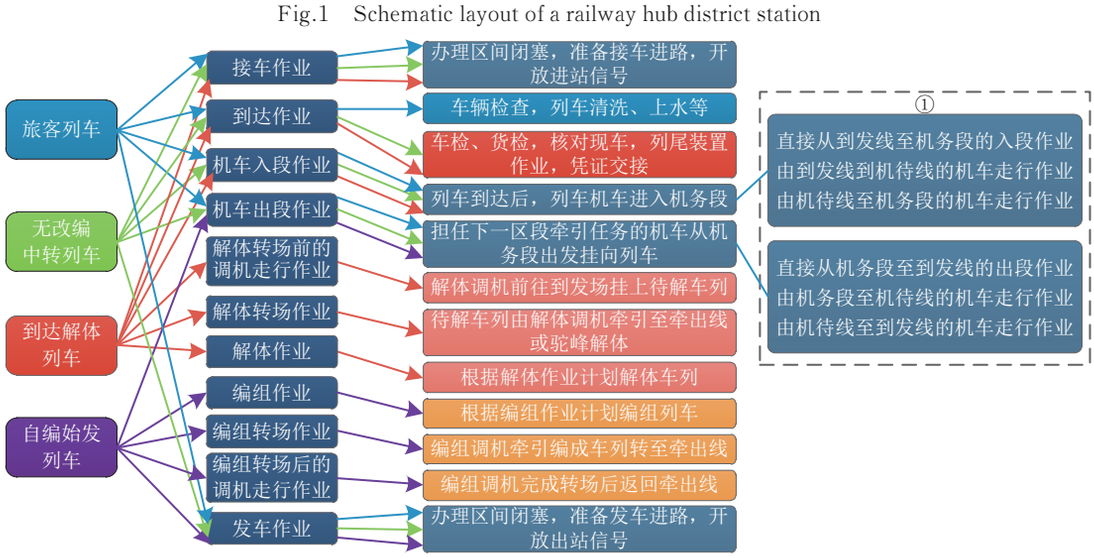


图2　枢纽区段站各类型列车技术作业内容及过程

Fig.2　Technical operations and procedures for various types of trains at a hub district station

图2中:旅客列车包括停站列车和直接通过列车,直接通过列车不办理到达作业而直接通过车站,少部分停站列车在枢纽区段站会进行机车出入段作业[26];无改编中转货物列车接车进站后,不进行解体、编组作业,办理机车出入段作业及列检、货检等到达作业后安排发车;到解列车接入车站到发场后,

首先摘下机车入段，车列进行一系列到达技术作业后由调机牵引至牵出线或驼峰进行解体作业；自编始发列车的车辆，在调车场集结成列，经过编组作业由调车机车转场送至到发场进行技术检查作业，挂上本务机车后办理出发作业.

枢纽区段站由于有多个引入方向和折角车流的存在，对于需在站内进行折返或需变更运行方向的列车，机车出入段包含的机车走行作业可按图2区域①内容进行细分，即直接经到发线的入/出段走行作业或经过机走线从机待线或牵出线折返的出/入段走行作业.

1.3 枢纽区段站通过能力分析

枢纽区段站通过能力是指在枢纽区段站现有设备条件下，采用合理的技术作业过程，一昼夜所能接发的各方向货物（旅客）列车数和规定的旅客（货物）列车数，其大小受车站到发线数量、咽喉区结构、办理列车的种类和数量、货物列车到发的均衡度及到发线空费时间等因素影响.

依据枢纽区段站通过能力的不同利用场景，可以将其划分为现有能力、实际能力和理论能力[27]. 现有能力是车站现有作业计划和运行图规定办理的接发列车数；实际能力为文中所讨论的通过能力，即车站根据其设备条件和作业性质所能办理的最大接发列车数；理论能力是在理想条件下基于咽喉和到发场利用率计算得出的能力. 在车站现有能力办理计划下，确定其实际通过能力有利于评价车站现有能力利用情况，同时为提高车站运营效益提供指导.

在现场的能力计算中，分析计算法简便易行，新建车站或既有车站在前期求算时均可采用，为通常使用方法，但无法考虑列车运行的动态性，只能求出某项设备通过能力的概略平均. 而优化法计算难度大，约束条件不易考虑全面而产生较大误差. 本文采用多智能体仿真模型能对车站环境、列车实体、车站作业过程进行模拟，对车站作业计划的变化及调整也能快速适应，精确记录各项作业的起止时刻和输出指标，提供更为精确的计算结果.

2 仿真模型构建

为了精确计算枢纽区段站的通过能力，采用多智能体仿真建模方法对枢纽区段站的列车作业过程进行建模，以还原列车及机车车辆在站作业过程.

2.1 车站站场拓扑模型

枢纽区段站站场拓扑模型作为列车作业过程仿真的基础，是承载列车作业、刻画进路排列与线路占用释放的关键. 采用基于节点-弧线（Node-Arc）的拓扑结构，节点是车站站场图中的道岔岔心及车站特殊线（牵出线、机待线等）的起讫点，弧线是连接这些节点的轨道区段，令枢纽区段站站场拓扑结构模型为

$$M=(S,A) \tag{1}$$

式中：S是拓扑图中的节点集合；A是拓扑图中的弧线段集合. 由此构建的枢纽区段站站场网络拓扑结构如图3所示.

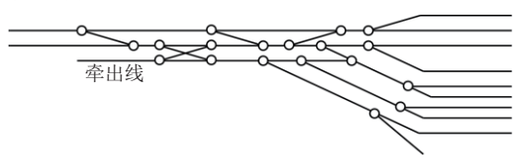


图3 车站站场网络拓扑结构示意

Fig.3 Schematic of the station yard network topology

建立描述枢纽区段站站场网络拓扑结构的数学符号表述如表1所示，且$A=G\cup R\cup D$.

表1 车站站场网络拓扑模型中的数学符号

Tab.1 Mathematical symbols in the station yard network topology model

符号	说明	符号	说明
S	道岔岔心及特殊线起讫点集合，$S=\{s_1,s_2,\cdots,s_{\max}\}$	R	咽喉区两节点之间构成的轨道区段集合及特殊线轨段，$R=\{r_1,r_2,\cdots,r_{\max}\}$
G	到发线集合，$G=\{g_1,g_2,\cdots,g_{\max}\}$	D	调车线集合，$D=\{d_1,d_2,\cdots,d_{\max}\}$

在此拓扑结构模型下，使用文献[28]的节点-弧识别存储方法将站场布置文件转换为站场拓扑模型数据文件，供仿真平台识别建模.

2.2 枢纽区段站作业仿真系统多智能体行为过程

多智能体系统（Multi-Agent System，MAS）是由多个智能体组成，交互协调合作完成系统功能，具有一定层次结构、松耦合网络和组织关系的系统. 其将庞大作业系统分解成多个智能体，各智能体之间相互协调、通信交互，以协作的方式共同完成系统作业.

枢纽区段站作业仿真系统主要包括列车智能体（Train Agent）、机车智能体（Loco Agent）、车辆智能体（RailCar Agent）3类，是列车运行过程仿真的主要实体对象，具有自主性、社会性、主动性、反应性等基本特征.

第1类：列车智能体. 列车智能体包括机车和车辆智能体组合，能主动感知环境中的进路，并根据自身性质自主决策和执行在站作业逻辑.

旅客列车智能体在仿真模型中的作业过程:生成旅客列车智能体→响应接车进路→直通列车通过;停站列车到达停站股道→停车等待旅客乘降→响应发车进路→驶离车站消失.

货物列车智能体到达车站后会产生机车和车辆智能体,当货物列车为无改编中转列车时,无改编中转货物列车智能体在仿真模型中的作业过程为:到达停站股道→分解为机车和车辆智能体→机车智能体响应入段进路→车辆智能体等待,办理到达作业→机车智能体响应出段进路→合并为列车智能体→响应发车进路→驶离车站消失.当货物列车为到达解体列车时,到解列车智能体在仿真模型中的作业过程为:分解为机车和车辆智能体→机车智能体响应入段进路→解体调机智能体响应待解指令→合并为待解列车智能体→解体作业.当货物列车为直通列车时,作业过程为:生成直通货物列车智能体→检测进路冲突并疏解→响应通过进路→列车通过.

第2类:机车智能体.机车智能体是整个列车作业过程实现的接口,一般在仿真模型中的作业过程为:列车到站→响应入段进路→机车智能体入段→机车整备检修→响应出段进路→机车智能体出段.除列车智能体中的机车智能体外,承担解体或编组作业的机车智能体与车辆智能体进行交互,完成列车智能体的解体和编组作业.

第3类:车辆智能体.车辆智能体是列车智能体的重要组成,是车组及车列的基本组成单元,从到解列车智能体分解出来的车辆智能体,按属性(如去向、组号等)划分为多个车组及车辆,在解体作业时对应提钩而在调车场集结,其行为过程为:车辆智能体形成车列等待解体→解体调机挂车→响应集结股道→解体作业,提钩分解→调车场集结.车辆智能体在调车场集结满轴后反馈给编组调机智能体,进而执行自编始发列车作业:车辆智能体集结满轴→编组调机智能体交互指令→编组列车→响应转场进路→自编始发列车智能体到站→编组调机回线→机车智能体出段→准备发车作业→响应发车进路→发出车站并消失.

基于以上对智能体功能和作业过程的分析,进一步确定智能体作业组织决策方法,从而构建列车作业过程仿真模型.

2.3　智能体作业组织决策方法

2.3.1　智能体路径选择

在触发智能体移动完成某项作业之前,应先为其确定进路.在现实世界中,最短路径是最广泛使用的路径规划原则,在本文构建的仿真模型中也继承了这一原则.最短进路指智能体占用咽喉进路时间最短的进路方案,以便快速地完成当前作业,可用进路的占用时间指标衡量[19],进路占用时间为

$$F(t)=\sum_{j=1}^{J}\sum_{l\in L_j}y_{jl}t_{jl} \tag{2}$$

式中:J为车站所有作业车(列车、机车和车辆智能体)集合;L_j为当前作业车j的作业进路集合;y_{jl}为0-1变量,当作业车j选择进路l时取1,否则取0;t_{jl}为j占用l的时间.

2.3.2　进路冲突判断与疏解

由于车站行车资源有限且这些行车资源不能在同一时刻被多辆作业车占据,对任意输入仿真模型的作业车,作业进路不得与其他作业车产生交叉干扰、道岔占用、到发线占用等时空冲突.

采用最短路径规则排列作业进路,一次锁闭分段解锁规则占用和释放进路.对有车作业的到发线,列车进站接车排列进路不得包含该到发线,以避免产生到发线占用冲突.若作业车j占用其进路中某条轨道区段a_i的起止时间为$(t_{a_i,j}^{\text{start}},t_{a_i,j}^{\text{end}})$,则冲突判定条件为

$$t_{a_i,k}^{\text{start}}<t_{a_i,j}^{\text{start}}<t_{a_i,k}^{\text{end}} \tag{3}$$

$$t_{a_i,j}^{\text{start}}<t_{a_i,k}^{\text{start}}<t_{a_i,j}^{\text{end}} \tag{4}$$

$$\begin{cases}t_{a_i,j}^{\text{start}}<t_{a_i,k}^{\text{start}}\\ t_{a_i,j}^{\text{end}}>t_{a_i,k}^{\text{end}}\end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases}t_{a_i,j}^{\text{start}}>t_{a_i,k}^{\text{start}}\\ t_{a_i,j}^{\text{end}}<t_{a_i,k}^{\text{end}}\end{cases} \tag{6}$$

式中:k为排列进路中包含a_i的前续任意车,满足$\forall k\in J_{a_i},k<j$;J_{a_i}为所有已排作业进路中包含轨道区段a_i的作业车集合.

若任意车k满足其中任一冲突判定条件,则当前作业车j在排列进路时存在交叉干扰冲突.此时需对作业车j进行冲突疏解,采用延误等待前续车占用结束的方法调整作业车j的初始占用时间.记P^j为j的作业进路所经轨道区段有序集合,$J_{a_i}^j$为J_{a_i}中与当前作业车j在轨道区段a_i有冲突的作业车集合.则作业车j的冲突等待时间Δt_j可计算为

$$\Delta t_j=\sum_{a_i\in P^j}\Delta t_{a_i} \tag{7}$$

$$\Delta t_{a_i}=\max_{m\in J_{a_i}^j}\left[t_{a_i,m}^{\text{end}}-\left(t_{a_i,j}^{\text{start}}+\sum_{n\in \overleftarrow{P}_{\text{before}\,a_i}^j}\Delta t_n\right)\right]+T_{\text{safe}} \tag{8}$$

式中:$\overleftarrow{P}^j$为P^j新增虚拟a_0为首元素的轨道区段有序集,$\overleftarrow{P}_{\text{before}\,a_i}^j$表示有序集合$\overleftarrow{P}^j$中$a_i$之前元素构成的集合;$\Delta t_{a_i}$为$j$在其排列进路的$a_i$处疏解冲突的等待时

间，且$\Delta t_{a_0}=0$；T_{safe}为安全间隔时间；Δt_j为作业车j总的进路冲突疏解所需延误等待时间，计算算法描述为

输入：轨道区段a_i；作业车j；P^j；T_{safe}.

输出：Δt_j.

初始化：$\Delta t_{a_i}=0$；$\Delta t_j=0$.

for a_i in P^j：

更新冲突后的起始时间$t_{a_i,j}^{\text{start}}+=\Delta t_j$

根据式(3)至式(6)获取冲突作业车集合$J_{a_i}^j$(可空)

for m in $J_{a_i}^j$：

求当前a_i下j对所有冲突车的最大延误时间

$\Delta t_{a_i}=\max(t_{a_i,m}^{\text{end}}-t_{a_i,j}^{\text{start}})+T_{\text{safe}}$

计算冲突延误等待时间$\Delta t_j+=\Delta t_{a_i}$

当作业车发生进路冲突时，势必会延误其正常作业的推进，从而在一定程度上影响车站的通过能力.

2.4 列车作业过程多智能仿真模型

2.4.1 仿真模型层次逻辑

依据多智能体仿真模型计算枢纽区段站通过能力的层次逻辑如图4所示.图4中：仿真模型的输入层包括车站拓扑结构、技术参数和作业计划，通过输入站场布置、股道数据、道岔和进路数据形成车站站场拓扑模型；车站作业时间、列车技术作业时间、车站间隔时间等参数输入列车智能体中，采用合理作业过程和组织方法将给定车站作业计划输入仿真模型；仿真模型基于输入数据对列车在站技术作业过程进行仿真，并进行技术指标计算和接发列车数统计；模型终止后输出列车到发时刻、设备运用、最大接发列车数等结果，由此得出枢纽区段站通过能力.

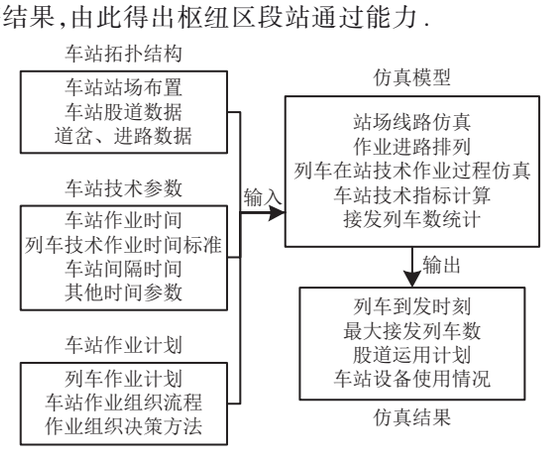


图4 仿真模型层次逻辑

Fig.4 Hierarchical logic of the simulation model

2.4.2 列车作业过程多智能体仿真模型执行流程

枢纽区段站作业仿真系统是一个复杂作业系统，由多个具备自主决策、外界交互及自我反馈能力的主体构成，这些主体在各个作业环节中相互作用、相互依赖，并存在内部冲突.多智能体模型能够对车站内移动实体的决策行为和作业过程进行有效仿真，模型执行过程就是车站列车技术作业办理过程.模型的执行以作业计划下各类型列车的作业时间顺序推进，各类型列车依据自身性质结合模型调整算法完成在站作业过程.

仿真模型具体执行流程如图5所示.图5中：模型首先读取作业计划时刻表生成列车，排列进站进路并检测冲突，安排列车进站；若为通过列车则排列通过进路，列车通过；非通过列车到站等待，根据列车类型安排作业；旅客列车停站后发车，货物列车进行摘机车、列检、货检等到达作业等待；摘下的机车排列入段进路，检测冲突并疏解入段；无改编中转货物列车等待机车出段，挂上机车后准备发车及发车；到达解体列车则安排解体调机去挂车，进行解体作业；调车场集结满轴后编组调机下场编车，自编始发列车转至到发场作业，等待机车出段后挂上机车，排列发车进路并疏解无冲突后发站.

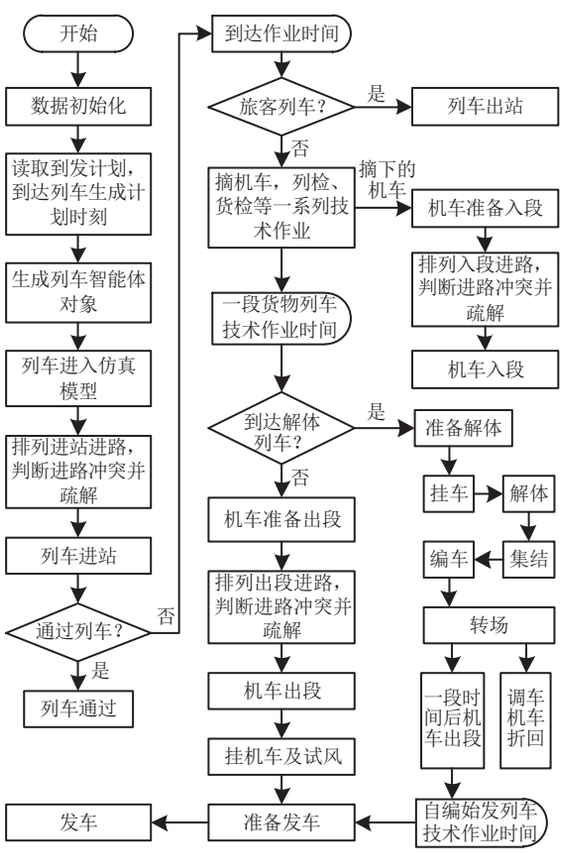


图5 仿真模型执行流程图

Fig.5 Execution flowchart of the simulation model

2.4.3 列车作业过程多智能体仿真模型构建

对枢纽区段站作业组织仿真模型的构建采用Anylogic仿真平台，使用轨道库和流程建模库设计列车作业过程逻辑，设计的逻辑模块关联如图6所示，涵盖列车自进站后的一系列行为过程.

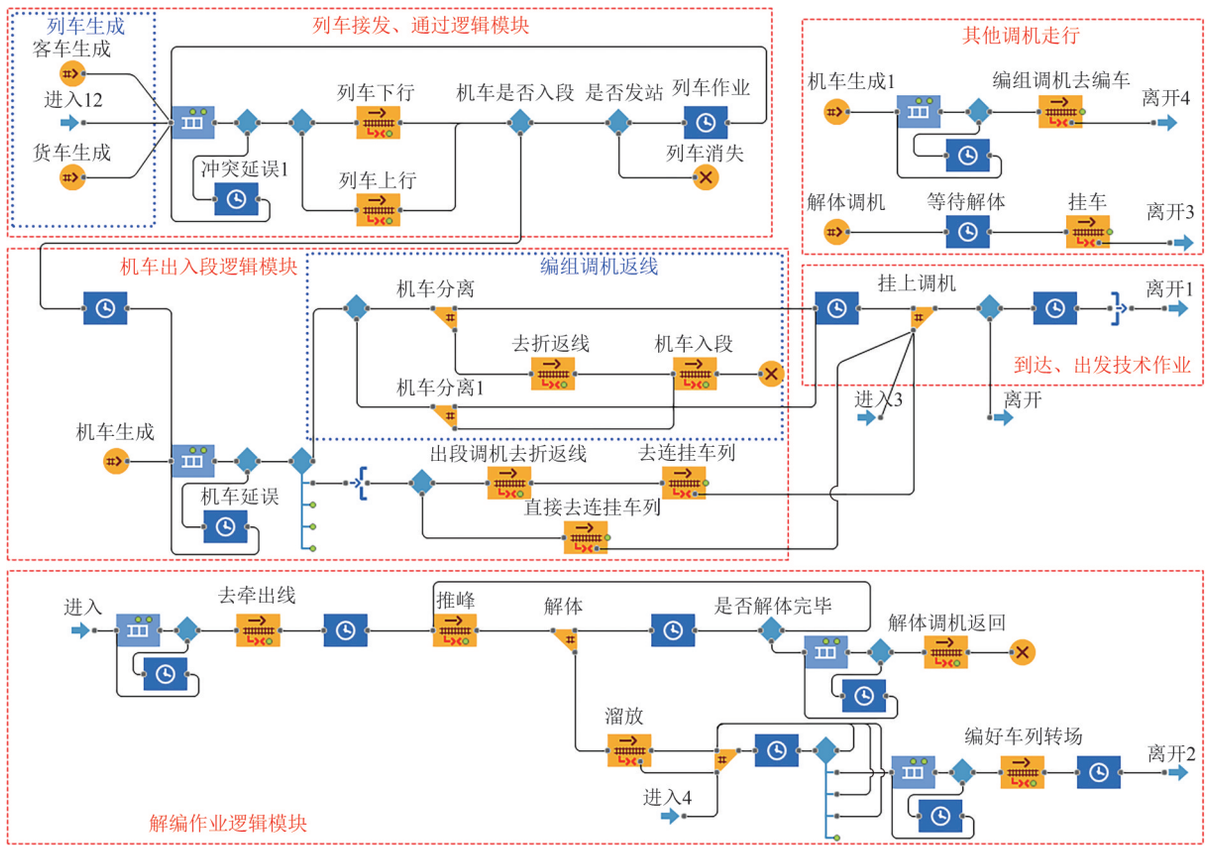


图 6　列车作业过程逻辑模块

Fig.6　Logic module of the train operation process

在 Anylogic 中新建模型并创造 5 个 Agent:Train、PsgCar(客车辆)、TruckCar(货车辆)、本务 Loco、调车 Loco,赋予不同属性和 3D 模型,开发站场数据 Java 类处理站场拓扑数据文件,驱动仿真三维可视化,如图 7 所示.决策方法或指令封包于函数或事件,承担上述逻辑执行关键接口.

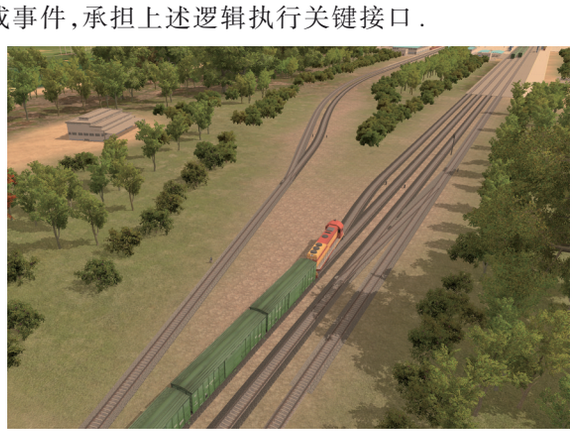


图 7　三维仿真效果示意

Fig.7　3D simulation schematic

3　车站通过能力仿真计算方法

依据图解法铺画“饱和车站作业方案”的思想,利用既有车站作业方案的车流信息构造超过车站现有能力的过饱和车流条件并进行优化调整,输入车站直到能力达到饱和,则一昼夜内车站所能办理接发的最大列车数即为车站的通过能力.根据这一思路,设计过饱和车流生成方法及枢纽区段站通过能力仿真计算方法.

3.1　过饱和车流条件生成方法

过饱和车流是枢纽区段站实际通过能力计算的数据基础,需要根据车流组织过程,结合车站衔接方向、现行作业计划生成.对于枢纽区段站作业组织仿真模型,到达车流的输入决定技术作业的模拟和指标的输出.枢纽区段站作业的到达车流信息主要包括车次编号、列车性质、进站的线路、到站时刻、进站占用的到达场股道、编组内容等.为保持车站作业的列车结构不变,以等比复制方式构造过饱和车流条件,生成方法共 4 个步骤.

步骤 1:预处理.基于车站的列车到达计划,将所有无改编中转货物列车按车站衔接方向汇总,各到达解体列车的编组内容按车站衔接方向合并.

步骤 2:等比复制.将各方向到达的无改编中转货物列车按等比复制方式扩大,到解列车作业计划(到达计划、解编计划)对应等比复制扩大.

步骤 3:随机处理.将无改编中转货物列车各方

向到达的列车发车顺序随机均衡打乱，到解列车编组内容以合并去向为车站衔接方向后的总数随机细分，以模拟现场多变场景.

步骤 4：过饱和车流生成.取消所有列车的到站时间和发站时间，记 $W=\{1,2,\cdots,w\}$ 表示无改编中转货物列车集合，$U=\{1,2,\cdots,u\}$ 表示到解列车集合，$E=\{1,2,\cdots,e\}$ 表示车站衔接的方向，列车计划到站时间以列车到达频率周期性安排，即

$$t_{ji}=T_1+\Delta f_1(j-1)+\tau(i-1) \tag{9}$$

$$t_k=T_2+\Delta f_2(k-1) \tag{10}$$

$$T_{\text{start}}\leqslant T_1<T_{\text{end}} \tag{11}$$

$$T_{\text{start}}\leqslant T_2<T_{\text{end}} \tag{12}$$

$$|T_2-T_1|\geqslant\tau \tag{13}$$

式中：Δf_1、Δf_2 为无改编中转货物列车、到解列车的到达频率；从一定时刻 T_1、T_2 始，不断以列车到达频率从各方向 $i(i=1,2,\cdots,e)$ 接入列车 $j(j=1,2,\cdots,w_i)$、从到解列车集合接入列车 $k(k=1,2,\cdots,u)$；τ 为车站不同时到达间隔时间；起止时间 $(T_{\text{start}},T_{\text{end}})$ 表示车站一昼夜内能接发列车进行作业的时间段.t_{ji} 为 i 方向的第 j 列无改编中转货物列车计划到站时间；t_k 为第 k 列到解列车的计划到站时间.列车发站时间以列车按作业时间参数和停站时间完成在站作业准备发站时模型自动输出.

3.2 基于过饱和车流条件的车站通过能力仿真算法

为计算车站通过能力，设置动态变量 N_{arr} 和 N_{dep}（初值都为 0）分别实时统计车站接入和发出列车数.考虑车站一昼夜内（0:00 至 24:00）存在对货物列车行车量增减无关的作业时间，用空费时间 T_k 表示，包括天窗，向车辆段、货场定时取送车辆，调机整备交接班、吃饭时间等.根据仿真模型随时间流逝而执行的连续性特点，在算法中将其简化为 0:00 至 T_k 不接入列车作业，即满足 $T_{\text{end}}-T_{\text{start}}+T_k=86\,400$ s.

基于车站作业计划生成的过饱和车流，固定其作业计划不变，通过过饱和仿真算法不断压缩列车到达频率计算车站通过能力，具体计算过程共 6 个步骤.

步骤 1：初始化参数.初始化车站拓扑结构、线路分工、作业时间标准、车站间隔时间、空费时间等参数.

步骤 2：构造超过车站现有能力的车流条件.基于过饱和方法生成过饱和车流，设置列车到达频率初始化过饱和车流到站时间.

步骤 3：列流到发计划输入.将过饱和列车初始到发计划按仿真时间输入仿真模型.

步骤 4：冲突判断与疏解.根据当前输入列车，基于最短进路原则排列列车作业进路，依据车站股道分工和图定作业计划安排到发线占用，并进行冲突判断与疏解，调整列车到发作业计划时间.

步骤 5：完成在站作业仿真过程并统计.调整后的列车按作业计划完成在站作业，完成一列列车接车 $N_{\text{arr}}+1$，完成一列列车发车 $N_{\text{dep}}+1$.

步骤 6：结束作业仿真.若仿真模型运行至 T_{end}，则结束作业仿真并输出仿真结果，否则返回步骤 3.

车站现场实际技术作业组织过程复杂，仿真模型对其进行了一定程度的简化和随机处理，尽管仿真结果存在一定的随机性，通过多次实验识别稳健作业过程并考虑车站通过能力下的列车车数为整，车站最终列车接、发车能力为

$$\overline{N_{\text{接}}}=\left\lfloor\frac{\sum_{c=1}^{n}N_{\text{arr}}}{n}\right\rfloor \tag{14}$$

$$\overline{N_{\text{发}}}=\left\lfloor\frac{\sum_{c=1}^{n}N_{\text{dep}}}{n}\right\rfloor \tag{15}$$

式中：n 为一种实验场景下的总实验次数；$\lfloor x\rfloor$ 表示 x 的向下取整值.

根据车站通过能力定义和本文提出的过饱和仿真计算方法，车站最终通过能力为该站办理的规定旅客列车数和最终货物列车接、发车能力最小值的总和.

4 算例与结果分析

以典型的单线 3 方向枢纽区段站为例，采用 Java 语言、AnyLogic 仿真平台，对该车站建立过饱和仿真模型，计算车站通过能力.

4.1 算例设置

使用的枢纽区段站布置如图 8 所示，该站为货运机车基本段，衔接 X、Y、Z 方向，第三方向从 Y 方向一侧引入.其中，股道Ⅱ连接正线 X、Y 方向，股道 1、3 用于接发旅客列车，股道 4～5、7～9 用于接发货物列车，股道 10～14 为调车线，并设有一条机走线股道 6，可供在股道 4 和 5 的机车或调机使用，牵 1 连接货场，调车场下方设有站修所，车站右端设小能力驼峰连接牵 2.车站所采用的具体线路分工使用情况如表 2 所示.

在此站场布置和线路使用情况下，该站运行图规定的某日车站作业计划包括 16 对旅客列车、40 对无改编中转货物列车和 10 对改编货物列车.考虑这 3 类列车，其中旅客列车停站时间 25 min；无改编中转货物列车占用到发线 84 min，其到达停站技术作

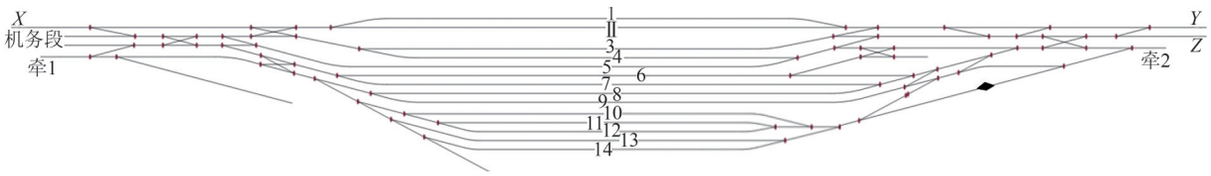


图 8　算例站场布置图

Fig.8　Layout diagram of the case station

表 2　各股道具体使用分工

Tab.2　Specific usage and work division for each track

股道编号	固定用途	股道编号	固定用途
1	接发 X 到 Y、Z 旅客列车	3	接发 Y、Z 到 X 旅客列车
4、5	接发 X 到 Y 直通货物列车 接发 Y 到 X 直通货物列车	7、8	接发 X、Y 到 Z 直通货物列车 接发 Z 到 X、Y 直通货物列车
9	接发 X 方向区段、摘挂列车 接发 Y 方向区段、摘挂列车 接发 Z 方向区段、摘挂列车	10、11、12	集结发往 X 方向的货车 集结发往 Y 方向的货车 集结发往 Z 方向的货车
13	集结货物作业车	14	集结空车

业时间 41 min;到达解体列车到达占用到发线 50 min,其到站技术作业时间 40 min;自编始发列车编组始发技术作业时间 33 min,发出占用到发线 45 min.设置车站空费时间 4 h,基于现场数据的其他仿真参数如表 3 所示.

表 3　车站作业仿真参数标准设置

Tab.3　Simulation parameters of train operations

速度参数	取值/(m/s)	时间参数	取值/min
列车进、出站	8.33	出入段时间	3
单机走行	5.55	追踪到达间隔	4
推峰速度	1.39	不同时发到时间	7
溜放速度	5.55	牵出转场时间	15
连挂走行速度	6.95	不同时到达间隔	5

4.2　基于过饱和仿真的枢纽区段站通过能力计算

采用 AnyLogic 仿真平台提供的 Dijkstra 算法排列最短进路,到发线使用以车站线路分工均衡占用,将算例车站作业计划 1.5 倍等比复制,设置 T_1 为 4:10、T_2 为 4:00,不断压缩列车到达频率将过饱和列车数据输入仿真模型,统计分析各到达频率下车站的接发列车数并最终得出车站通过能力.

4.2.1　单一车流过饱和仿真实验分析

实验首先对同一作业性质的列车流输入模型进行仿真,即控制模型只接入无改编中转货物列车或改编货物列车,统计出的车站列车接发能力如图 9 所示.

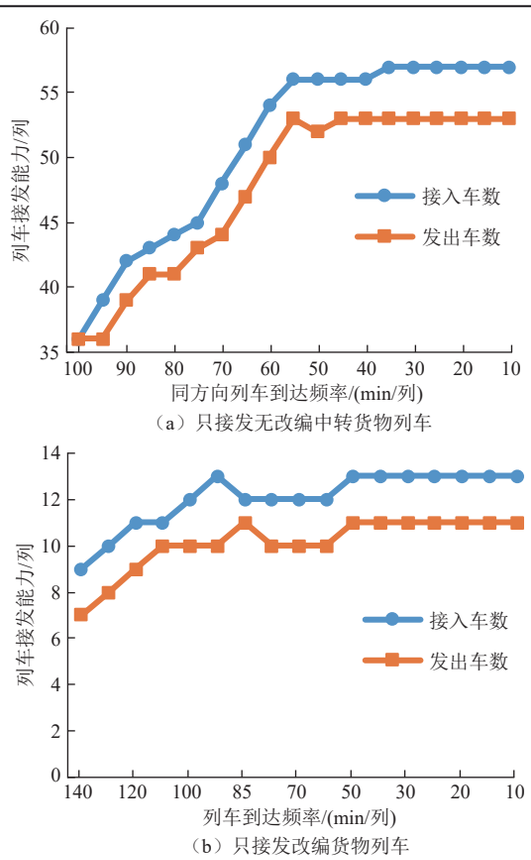


图 9　单一车流输入下车站列车接发能力

Fig.9　Train receiving and departure capacity under single-type train flow input

由图 9 可知,随着列车到达频率的逐渐压缩,在只接发单一类型车流下,车站无改编中转货物列车或改编货物列车的接发车数逐渐增多,并从一定频率开始达到饱和值.其中,无改编中转货物列车发出车数先达最大,饱和接、发列车数为 57、53 列;改编列车接、发车数同步达到最大,饱和接、发列车数为 13、11 列.

由于车站接发无改编中转货物列车的到发线较多,列车到达频率对无改编中转货物列车的接发影响较大,在 100 min/列至 55 min/列时增长较快,而改编货物列车变化不明显.

4.2.2 混合车流过饱和仿真实验分析

将改编与无改编两类货物列车同时接入车站进行作业，两类列车应能保证在站内独立完整完成各自技术作业，控制两类货物列车到达频率 Δf_1 和 Δf_2 不等，从指定频率开始不断以 5 min/列压缩，进行大量仿真实验测算，仿真结果如图 10 所示.

由图 10 可知，混合车流输入下，车站货物列车通过能力也随列车到达频率变化呈饱和态. 在不断压缩控制列车到达频率下，车站通过能力饱和态势下的结果为 63 列，但在 $(\Delta f_1, \Delta f_2)$ 取(20，45)、(20，90)、(10，45)等时均可达 64 列. 考虑实际通过能力的内涵，以能达到的最大能力为最终结果，结合算例规定的旅客列车现有通过能力，故车站最终通过能力为 80 列，其中旅客列车 16 列，无改编中转货物列车 53 列，改编列车 11 列.

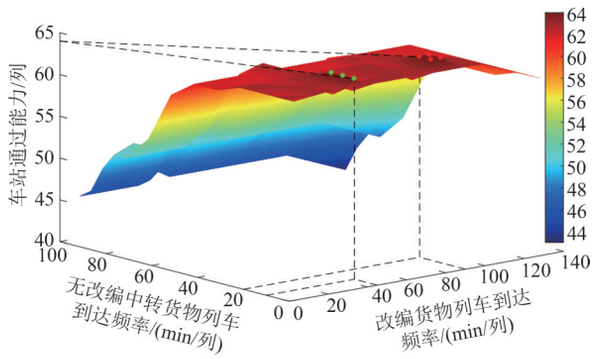


图 10 混合货物列车车流输入下车站的通过能力

Fig.10 Station carrying capacity under mixed freight train flow input

4.3 仿真结果验证

使用利用率法对仿真结果进行验证，保证过饱和仿真方法的有效性. 利用率法本质上是根据车站设备现阶段的利用情况，来推断在运用达到理想状态下的通过能力[29]. 利用率法计算式为

$$N = \alpha \times \frac{(1-\gamma_{空})(1440\Psi - T_{固})}{T - T_{固}} \tag{16}$$

式中：α 为占用某设备的现有列车数；T 为某设备的总占用时间；$T_{固}$ 为某设备的固定作业时间总和；Ψ 为设备数，当计算咽喉通过能力时取 1，计算到发线通过能力时为办理列车到发技术作业的线路数；$\gamma_{空}$ 为空费系数，取 0.2；N 为车站某项设备的通过能力.

利用率法分别计算出咽喉和到发线通过能力后，按方向分别将咽喉和到发线通过能力汇总，车站最终通过能力按办理该方向列车的各项设备中受控制(利用率最大)的某项设备的能力确定.

采用上述作业参数，利用率法的计算结果如表 4 所示，由表 4 可知：使用利用率法计算的车站各类列车的接车能力总和为 83.0 列、发车能力总和为 83.0 列；过饱和仿真计算的车站最大接、发车能力分别为 85、80 列，与利用率法结果相比，接车能力相对误差为 2.4%，发车能力相对误差为 3.6%，相对误差均小于 5%，可认为模型对算例技术作业组织过程和指标有较好的模拟和计算[18].

表 4 利用率法计算结果

Tab.4 Calculation results using the utilization rate method

接车	方向	图定车数/列	受控利用率	接车能力/列	发车	方向	图定车数/列	受控利用率	发车能力/列
无调	X	16	0.73	21.9	无调	X	16	0.73	21.9
	Y	14	0.73	19.2		Y	14	0.73	19.2
	Z	10	0.73	13.7		Z	10	0.73	13.7
有调	X	4	0.82	4.9	有调	X	4	0.82	4.9
	Y	4	0.82	4.9		Y	4	0.82	4.9
	Z	2	0.82	2.4		Z	2	0.82	2.4
客车	—	16	—	16.0	客车	—	16	—	16.0

4.4 枢纽区段站通过能力多场景仿真分析

4.4.1 不同列流结构下车站通过能力仿真分析

实验在过饱和货物列流 75 列下，设置 5 种不同货物列车列流结构，即在控制无改编中转货物列车和改编中转货物列车的接入比下，分析不同列流结构下车站的通过能力. 各列流结构下不同类型货物列车的列车到达频率取其均匀输入间隔，即将总模型时间按该列车接入数和车站方向划分的等间隔时间，以保证列车能理论全部接入并平衡列车到达节奏，仿真结果如图 11 所示.

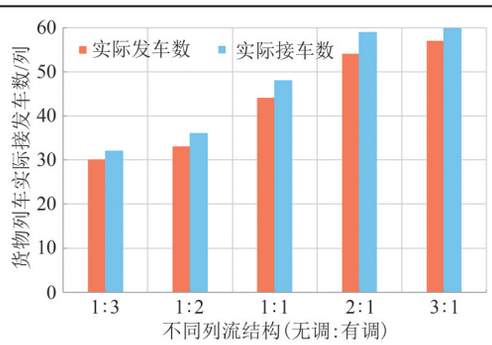


图 11 不同列流结构下车站通过能力仿真结果

Fig.11 Simulation results of station carrying capacity under different train flow structures

由图11可知:在这5种结构下,随着枢纽区段站办理的无调接车比增大,枢纽区段站接发车能力逐渐增大,无调中转货物列车作为枢纽区段站技术作业的主要车流,其接发能力主要影响枢纽区段站的通过能力.由于无改编中转货物列车无需在车站进行车辆的解编等作业,与改编货物列车相比,其在站停留时间相对较短,对车站的线路、股道等资源限制较小.因此,提高无改编中转货物列车的比例有助于减少车辆作业时间,提高车站的运输效率.

4.4.2　到发线灵活运用下车站通过能力仿真分析

在某些情况下,车站完成日班计划规定的某类列车作业能力比较紧张时,根据车站作业需求和设备能力,会将某条股道安排给该类列车作业使用.如算例主要办理无改编中转货物列车,当其某日调车能力紧张时,将邻近调车场的一条无改编到发线安排给改编列车接发使用.

考虑在均衡使用到发线[19]和最短进路下,安排算例5条货物列车到发线全部接发无改编中转列车作业、股道8功能重构给改编列车接发作业及算例到发线初始运用方案共3种到发线灵活运用场景,探究各场景下能实现的货物列车的最大接发车能力及结构,仿真实验结果如表5所示.

表5　车站到发线灵活运用下货物列车过饱和接发车能力结构

Tab.5　Composition of oversaturated receiving and departure capacity for freight trains under flexible utilization of arrival and departure tracks

到发线运用		无改编中转货物列车		改编货物列车		货物列车	
无改编	改编	接车/列	发车/列	接车/列	发车/列	接车/列	发车/列
4、5、7、8	9	56	53	13	11	69	64
4、5、7、8、9	—	71	66	0	0	71	66
4、5、7	8、9	42	39	28	24	70	63

由表5可知:在5条货物列车到发线全部接发无改编中转货物列车的运用场景下,车站最大接入货物列车71列,最大发出货物列车66列,相较初始运用方案下的最大通过能力64列有所提高;在仅接发无改编中转货物列车时,车站咽喉区冲突干扰减少,车站办理通过列车数增多;在新调股道8给改编列车接发作业的到发线运用场景下,车站最大货物列车接入70列,最大发出货物列车63列,相较于初始运用方案有所减少,说明此枢纽区段站的布置结构主要适合办理无改编中转货物列车;当增加改编列车作业数量时,咽喉区和牵出线调机交叉干扰增多,影响车站作业能力发挥,同时增加一条到发线给改编列车时可明显提高车站办理改编列车的通过能力,算例从11列增大到24列,在一些情况下可作为车站适应运输任务变化,合理调整到发线运用,从而提高运输效率的定量依据.

5　结论

1)采用提出的作业组织仿真模型和过饱和仿真方法计算出枢纽区段站通过能力80列,车站既有能力利用率82.5%;与利用率法计算结果83列相比,相对误差为3.6%,仿真模型能够反映枢纽区段站技术作业组织过程.

2)利用率法结果是根据车站设备的利用率和作业车数计算出的较理想化结果,而仿真模型能较好还原现场作业流程和冲突关系,计算的能力结果更加真实.在不同组织场景下,得出无调中转货物列车作为枢纽区段站技术作业的主要车流,其接发能力主要影响枢纽区段站的通过能力;新调股道办理改编列车作业时改编列车通过能力明显提高,但车站总的通过能力有所折损,到发线灵活安排与能力发挥密切相关,需要根据运输任务合理调整.

本文基于仿真模型计算车站通过能力时,对列车运行过程进行了简化,没有考虑列车动态加速、制动及货场取送作业的过程,同时研究场景局限于枢纽区段站,如何应用于刻画大型技术站作业组织并计算车站通过能力亟待进一步研究.

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国交通运输部.2024年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2025-06-12)[2025-09-10].https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202506/t20250610_4170228.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2024[EB/OL].(2025-06-12)[2025-09-10].https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202506/t20250610_4170228.html.(in Chinese)

[2] 彭少兵,王花兰.达州站解编系统能力扩能探讨[J].铁道货运,2018,36(6):39－45.
PENG Shaobing, WANG Hualan. A study on capacity expansion for the breaking-up and sorting system in Dazhou railway station[J]. Railway Freight Transport, 2018, 36(6): 39－45.(in Chinese)

[3] 唐文国，陈国鹏，单明路，等. 兰新线货运通过能力提升研究[J]. 兰州交通大学学报，2023，42(5)：31－40.
TANG Wenguo，CHEN Guopeng，SHAN Minglu，et al. Research on the freight capacity improvement of lanxin line[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University，2023，42(5)：31－40.(in Chinese)

[4] 姬燕男. 强网补链形势下哈密东区段站扩能方案研究[J]. 铁道标准设计，2025，69(4)：23－33.
JI Yannan. Research on capacity expansion schemes for Hami east section station in the context of strengthening the network and supplementing the chain[J]. Railway Standard Design，2025，69(4)：23－33.(in Chinese)

[5] 刘建宏，王清骏，冯刚，等. 金华东站运输组织优化研究[J]. 铁道货运，2023，41(7)：19－25.
LIU Jianhong，WANG Qingjun，FENG Gang，et al. Transport organization optimization of Jinhuadong Station[J]. Railway Freight Transport，2023，41(7)：19－25.(in Chinese)

[6] 贾双营. 南阳西站通过能力分析与提高措施[J]. 铁道货运，2023，41(1)：7－11.
JIA Shuangying. Carrying capacity of nanyangxi railway station and optimization measures[J]. Railway Freight Transport，2023，41(1)：7－11.(in Chinese)

[7] 宋锴，聂磊. 铁路网实施“强网补链”对策研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(8)：1－7.
SONG Kai，NIE Lei. Countermeasures for implementing “strengthening the network and supplementing the chain” in railway network[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(8)：1－7.(in Chinese)

[8] LINDFELDT O. Railway operation analysis：Evaluation of quality，infrastructure and timetable on single and double-track lines with analytical models and simulation[D]. Stockholm：Royal Institute of Technology，Sweden，2010.

[9] 韩松成，李依娜，王浩. 铁路通过能力计算方法综述研究[J]. 中国储运，2024(7)：90－91.
HAN Songcheng，LI Yina，WANG Hao. Summary and research on calculation methods of railway passing capacity[J]. China Storage & Transport，2024(7)：90－91.(in Chinese)

[10] 王军. 利用分析计算法计算库尔勒站通过能力[J]. 铁道运输与经济，2013，35(4)：22－26.
WANG Jun. Calculating passing capacity of Korla Station by using analytical calculations[J]. Railway Transport and Economy，2013，35(4)：22－26.(in Chinese)

[11] JENSEN L W，LANDEX A，NIELSEN O A，et al. Strategic assessment of capacity consumption in railway networks：Framework and model[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2017，74：126－149.

[12] YANG L，ZHOU L S，ZHOU H X，et al. A Lagrangian method for calculation of passing capacity on a railway hub station[J]. Mathematics，2023，11(6)：1418.

[13] 赵鹏，童有超，张进川，等. 单线铁路成对追踪平行运行图通过能力计算方法研究[J]. 铁道学报，2020，42(12)：1－9.
ZHAO Peng，TONG Youchao，ZHANG Jinchuan，et al. Research on method on calculating carrying capacity of parallel train working graph with tracking operation on single-track railway[J]. Journal of the China Railway Society，2020，42(12)：1－9.(in Chinese)

[14] 熊亚，李海鹰，廖正文，等. 高速铁路车站高峰时段通过能力计算方法[J]. 铁道学报，2021，43(8)：1－9.
XIONG Ya，LI Haiying，LIAO Zhengwen，et al. Calculation method of carrying capacity high-speed railway station during peak period[J]. Journal of the China Railway Society，2021，43(8)：1－9.(in Chinese)

[15] LI X J，HAN B M，YAN Z Y，et al. Calculation method for station carrying capacity of high-speed railway based on station blocking time method[J]. Journal of Southeast University，2019，35(4)：491－501.

[16] 李晓娟，杨阳，韩宝明，等. 基于分区优化的高铁车站通过能力提高方法[J]. 交通运输系统工程与信息，2020，20(3)：118－124.
LI Xiaojuan，YANG Yang，HAN Baoming，et al. A method for expanding station carrying capacity of high-speed railway based on block optimization method[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2020，20(3)：118－124.(in Chinese)

[17] 杜文，文东. 客运专线客运站通过能力仿真研究[J]. 西南交通大学学报，2006，41(5)：549－553.
DU Wen，WEN Dong. Simulation research on carrying capacity of high speed passenger railway line stations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2006，41(5)：549－553.(in Chinese)

[18] 周志龙，刘凯强. 基于离散事件的货运站通过能力仿真研究[J]. 铁道运输与经济，2017，39(增1)：69－74.
ZHOU Zhilong，LIU Kaiqiang. Simulation study of freight station capacity based on discrete event[J]. Railway Transport and Economy，2017，39(S1)：69－74.(in Chinese)

[19] 陈韬，吕红霞，陈钉均，等. 车站作业方案对高铁车站通过能力影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2016，16(2)：104－112.
CHEN Tao，LYU Hongxia，CHEN Dingjun，et al. Influence analysis of station operation schemes on HSR station carrying capacity[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，

2016, 16(2): 104－112. (in Chinese)

[20] 王博安, 潘金山, 倪少权. 高速铁路枢纽站高峰时段通过能力仿真研究[J]. 综合运输, 2023, 45(11): 114－120.
WANG Boan, PAN Jinshan, NI Shaoquan. Simulation research on the passing capacity of high-speed railway terminal during peak hours[J]. China Transportation Review, 2023, 45(11): 114－120. (in Chinese)

[21] 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.
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. (in Chinese)

[22] 刘俊杰, 鲁工圆, 张宏翔, 等. 基于多智能体仿真的高铁货运场站作业能力分析方法[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(12): 19－29.
LIU Junjie, LU Gongyuan, ZHANG Hongxiang, et al. A method for analyzing operational capacity of high speed rail freight terminals based on multi-agent simulation[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(12): 19－29. (in Chinese)

[23] ZHANG H X, D'ARIANO A, ZHU Y Q, et al. Learning to reschedule platforms: A graph neural network based deep reinforcement learning method for the train platforming and rescheduling problem[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2026, 183: 105453.

[24] GAO M, ZHOU L S, CHEN Y J. An alternative approach for high speed railway carrying capacity calculation based on multiagent simulation[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016, 2016(1): 4278073.

[25] 李海鹰, 张超. 铁路站场及枢纽[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
LI Haiying, ZHANG Chao. Railway yard and terminals[M]. Beijing: China Railway Publishing house, 2011. (in Chinese)

[26] 张博健. 区段站到发场线路综合运用优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZHANG Bojian. Research on comprehensive utilization optimization of line from section station to departure yard[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

[27] 刘敏, 韩宝明, 李得伟. 高速铁路车站通过能力计算和评估[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 9－15.
LIU Min, HAN Baoming, LI Dewei. Calculation and evaluation of carrying capacities at high-speed railway stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 9－15. (in Chinese)

[28] 鲁工圆, 徐进, 彭其渊. 基于图像识别的铁路车站站场网络拓扑模型建模方法: CN103345538[P]. 2016-04-27.
LU Gongyuan, XU Jin, PENG Qiyuan. Modeling method of railway station network topology model based on image recognition: CN103345538[P]. 2016-04-27. (in Chinese)

[29] 谭雪, 闫海峰, 辜雪菲, 等. 高铁车站通过能力综合分析计算法参数取值研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(2): 83－92.
TAN Xue, YAN Haifeng, GU Xuefei, et al. Research on comprehensive analysis and calculation method of high-speed railway station carrying capacity[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18(2): 83－92. (in Chinese)