

铁路车站到发线冲突态势感知与消解研究进展

文 超

广州理工学院新能源汽车与现代航空学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月19日; 录用日期: 2026年1月4日; 发布日期: 2026年1月15日

摘 要

为解决铁路车站到发线冲突管理问题, 提高铁路车站到发线运用优化决策效度, 促进铁路智能调度理论发展, 基于到发线冲突的基本概念和内涵, 分析到发线冲突检测、列车晚点传播理论、数据驱动在铁路运输组织领域的最新研究进展; 分析了当前铁路车站到发线冲突检测与消解存在的不足, 提出未来的研究趋势与方向, 得出以下结论: 数据驱动模型相比传统数学优化模型对实际的运输生产更具指导意义, 该模型将应用于到发线冲突态势的评估和演化理论以及到发线冲突消解理论。

关键词

铁路车站, 到发线冲突, 冲突感知, 冲突消解, 数据驱动

Research Progress in Conflict Awareness and Resolution of Arrival Departure Tracks in Railway Stations

Chao Wen

School of New Energy Vehicles and Modern Aviation, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou Guangdong

Received: November 19, 2025; accepted: January 4, 2026; published: January 15, 2026

Abstract

To address the management of conflicts on arrival departure tracks in railway stations, enhance the effectiveness of optimization decisions for the utilization of arrival and departure tracks, and promote the development of railway intelligent dispatching theory, this paper analyzes the following: The basic concepts and implications of arrival and departure track conflicts. The latest research progress in arrival and departure track conflict detection, train delay propagation theory, and data-

driven approaches in the field of railway transportation organization. The paper analyzes the shortcomings in current railway station arrival and departure track conflict detection and resolution methods, proposes future research trends and directions, and draws the following conclusion: Data-driven models are more instructive for actual transportation production compared to traditional mathematical optimization models. These models will be applied in the evaluation and evolution theory of arrival and departure track conflict situations, as well as in the theory of arrival and departure track conflict resolution.

Keywords

Railway Station, Arrival-Departure Track Conflict, Conflict Awareness, Conflict Resolution, Data-Driven

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铁路运输系统是一个由车、机、工、电等多个部门组成的复杂巨系统，各子系统之间联系密切协调运作。科学合理地运用到发线不仅可使列车高效安全地完成车站作业，而且可方便旅客乘降。到发线作为重要的铁路运输资源，具有有限性和独占性两大特征，故到发线运用须满足唯一性约束和最小安全间隔约束等。但列车在运行过程中会不可避免地受自然环境、设施设备状况以及组织管理水平等的干扰，导致列车偏离运行计划，而且随着铁路路网规模的扩大，列车受到干扰的可能性随之增加，从而产生到发线运用冲突等问题。研究和实践表明，调度员需用 80% 的工作时间发现和判定冲突，其余时间则用于疏解冲突和制定调整策略[1]。因此，快速感知到发线冲突并实施精准的冲突消解对于调度员保障良好的列车运行和运输资源运用态势、提升客货服务品质意义重大。

目前随着列车行车速度的提高以及铁路网结构逐渐复杂完善，铁路智能化已成为当今世界各国铁路发展的必然趋势[2]。法国、德国、瑞士、英国、澳大利亚、美国、加拿大、日本、韩国等国家铁路相继提出了数字化与智能化发展的战略规划，以支撑调度决策知识自动化。例如：大数据技术已经在德国铁路股份公司的分析与预测、决策支撑及自动化应用方面取得了一定进展；瑞士联邦铁路从 2014 年开始在全路应用自适应列车运行调整系统，在精确预测列车运行状态的基础上，可动态、自动识别列车运行过程中的潜在冲突[3]。同时，智能调度是我国智能铁路建设需解决的核心问题，也适应我国“交通强国、铁路先行”和“高铁走出去”战略的需求。而到发线冲突态势感知与冲突消解是智能调度亟待突破的关键问题，近年来随着大数据、人工智能的发展以及列车运行实绩的有效记录并保存，越来越多的学者采用数据驱动模型研究列车运行冲突检测与消解，综述数据驱动的研究模型的文献不多。

因此，笔者拟基于列车运行冲突和到发线冲突的基本概念和内涵，分析到发线冲突检测、列车晚点传播理论、数据驱动在铁路运输组织领域应用的最新研究进展，并基于其现状和已有研究成果，提出未来研究的重点和方向，为到发线冲突检测和消解的研究工作提供一定的参考，以期完善铁路智能调度和运输资源优化运用理论。

2. 基本概念

2.1. 铁路车站到发线冲突

铁路运输资源有限性及列车间资源竞争是列车运行冲突的根源，列车运行冲突是资源竞用产生的结

果[4][5],当两列及以上列车占用运输资源时间重叠时会发生冲突[6][7]。铁路到发线冲突主要包括列车进路冲突和到发线占用时间间隔冲突。列车进路冲突指在一段时间内两条进路道岔位置相同又有重叠部分的进路存在冲突。到发线占用时间间隔冲突是指到发线的使用不能满足列车的接发需求,如一列车在某时刻只能占用一条到发线,后续列车占用同一到发线的时间间隔应满足最小安全间隔时间,否则会引起冲突。

铁路到发线冲突主要包括列车进路冲突和到发线占用时间间隔冲突。

1) **列车进路冲突**是指在一段时间内两条进路道岔位置相同又有重叠部分的进路(敌对进路)存在冲突。如图1所示,在衡山西站,下行列车G1101与上行G1124的进路为敌对进路,两条进路在4-8道岔区形成列车通过进路与接车进路的敌对进路冲突。

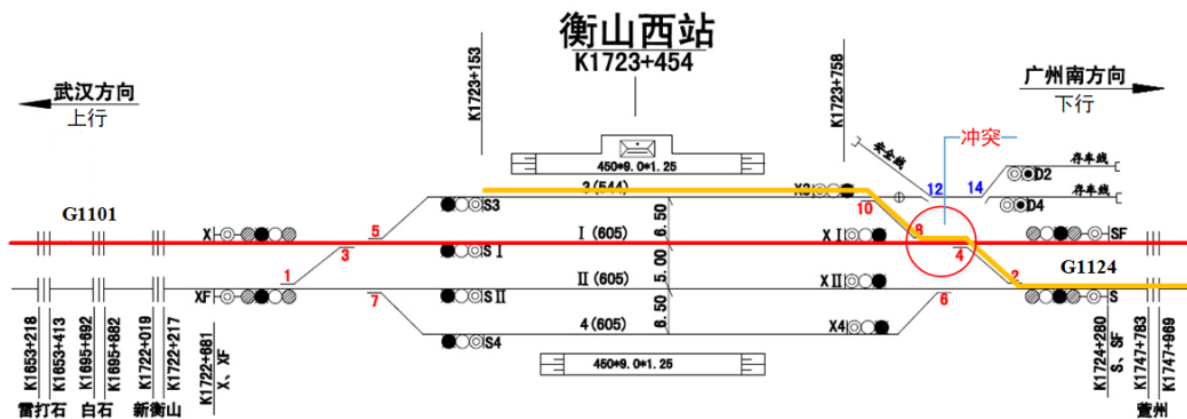


Figure 1. Train routing conflict

图 1. 列车进路冲突

2) **到发线占用时间间隔冲突**是指到发线的使用不能满足列车的接发需求,如一列车在某时刻只能占用一条到发线,后续列车占用同一到发线的时间间隔应满足最小安全间隔时间,否则会引起冲突。如图2(a)所示,假设列车 i 占用一条到发线 m 的预定时间窗口是 $[st_1, et_1]$,而列车 $i+1$ 的预定时间窗口是 $[st_2, et_2]$; st_1 和 st_2 分别是两列车的计划占用起始时间; et_1 和 et_2 是计划占用结束时间(含必要的最小列车间隔时间 I)。由于列车 i 延误,导致实际占用结束时间变成 ET_1 ($ET_1 > et_1$)。显然,当 $[st_1, ET_1] \cap [st_2, et_2] \neq \emptyset$ 时,两列车在到发线 m 会发生占用时间间隔冲突,其冲突时间为 $[st_2, ET_1]$ 。到发线冲突可以转化为列车在站的到发间隔时间冲突来计算,如图2(b)所示是到发线冲突体现在运行图上的示例(列车到达间隔时间冲突)。图中 $A_{i,j}$ 和 $A_{i+1,j}$ 分别为两列车的实际到达时刻, $A'_{i+1,j}$ 为列车 $i+1$ 的计划到达时刻,由于 $A'_{i+1,j} - A_{i,j} < I$,故两列车在 j 站存在到发线冲突,如图中道岔区4~8圆圈所示。

正常情况下,列车按照列车运行计划运行,不存在上述时间冲突,只有当列车偏离列车运行计划,即列车运行晚点的情况下,才会产生上述时间冲突。因此,研究到发线冲突的态势感知与消解,核心是研究列车晚点情况下不同列车占用运输资源时间的分析、建模、预测、调整等,主要要完成以下工作:

- 基于列车运营数据分析影响列车占用资源时间的要素,分析冲突产生的机理;
- 提出时间冲突的判定、列车占用运输资源时间的预测、冲突的程度度量方法等;
- 提出随着列车的运行、运输资源的运用,上述冲突的时空演化模型;
- 通过冲突消解策略调整列车对运输资源占用的时间从而消解上述冲突,到发线冲突消解策略主要包括:改变列车到发及通过时刻、改变行车间隔、改变到发线和岔区运用方案等。

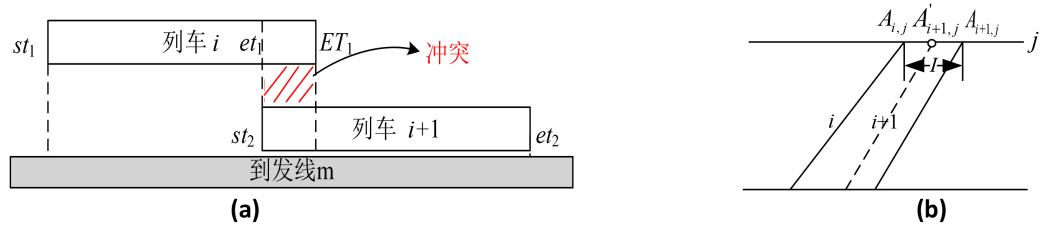


Figure 2. Arrival/departure track occupancy interval conflict
图 2. 到发线占用时间间隔冲突

2.2. 铁路车站到发线冲突感知与消解的流程

铁路车站到发线冲突感知是一个识别冲突发生时间和地点的过程，而到发线冲突消解的本质则是重新确定冲突列车及受影响列车占用车站到发线的顺序和时间，实现列车运行调整。到发线冲突态势感知涵盖觉察、理解和预测三个层次，旨在获取、理解能够引起到发线冲突态势变化的要素、冲突的等级，并预测冲突态势的演化趋势，从而进行冲突消解决策与控制[8]。当列车受到的干扰累积到一定程度产生到发线冲突，且列车运行图中冗余时间不足以使列车恢复正常的运行秩序时，调度员需实时掌握到发线和动车组等运输资源、运输计划、气象等运输环境数据，及时感知运输态势并根据优化目标进行调度调整决策。结合铁路调度指挥的过程、列车运行冲突检测的流程[9]和冲突消解的流程[10]，图 3 显示了调度员进行到发线冲突感知与消解的一般流程，可快速感知到发线冲突并实施精准的冲突消解。

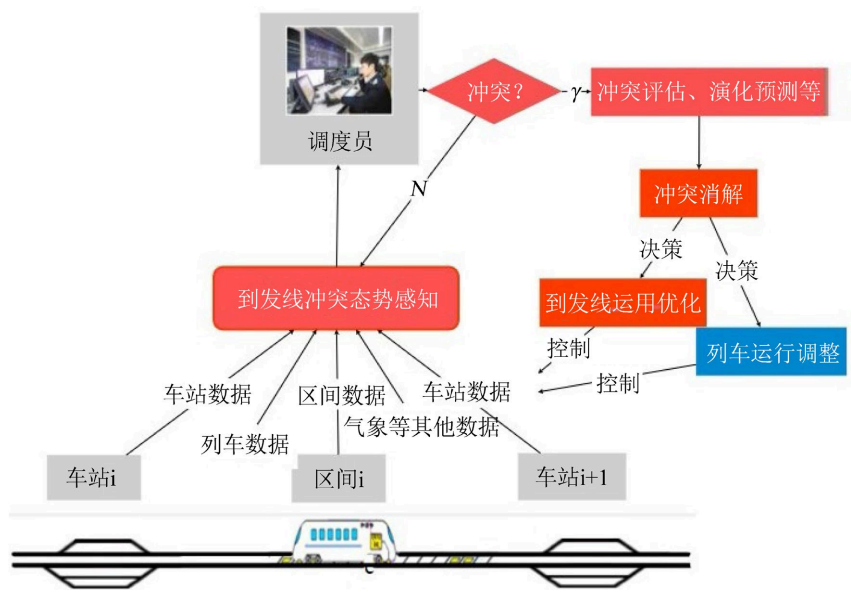


Figure 3. General process for conflict general process for conflict detection and resolution
图 3. 到发线冲突感知和消解一般流程

3. 研究动态分析

3.1. 列车运行冲突与晚点传播的关系

列车运行干扰的横向和纵向传播和其累积可直接使列车到达车站或进入区间的晚点，在不考虑人为调整和控制因素的情况下，以上晚点将导致大量列车运行冲突产生。冗余时间可以吸收列车在运行过程中受到的干扰，在一定程度上减少或消除列车运行延误，从而减少或消除列车运行冲突。即列车运行冲

冲突与列车运行干扰正相关,与运行图冗余时间负相关。列车运行冲突可分为静态冲突和动态冲突 2 类[11],也可根据检测目的的不同,将列车运行冲突分为安全层面冲突和运营层面冲突[12]。如果列车运行冲突没有被及时合理地消解,则将可能发展为列车间的冲撞,而冲突之间是相互依赖和嵌套的,解决一个冲突可能引起其他冲突,其直观表现为冲突引发列车产生连带(二次)晚点[13],且冲突的消解难度随着路网结构、行车量大小和列车种类的复杂度而增大[4] [14] [15]。因此,列车运行冲突与列车晚点传播过程存在着非常紧密的作用关系。既有研究对列车运行冲突与晚点传播关系的研究主要采用系统分析、逻辑推理等定性方法。

3.2. 到发线冲突态势感知

冲突检测被视为识别冲突发生时间和地点的过程,研究发现:荷兰超过一半的列车晚点(晚点超过 3 分钟)都是列车进路冲突引起的[16],故冲突的检测与消解一直是调度员工作的重点。21 世纪初许多专家学者开始收集、转换、处理和挖掘列车运行数据获取列车的股道占用水平、列车的径路冲突等信息用于铁路运营分析。Daamen 等[17]基于图论提出了识别列车进路冲突和间隔冲突的方法[18]并展示了相应的 TNV-Conflict 工具自动识别冲突。随后,基于 TROTS-logfiles, Kecman 等[9]提出了冲突识别的主要流程,并初步实现了冲突列车可视化;Leopard 系统可自动识别列车间的冲突并给予警告[19]。彭其渊等[20]将到发线冲突预警级别分为一般、较为严重和特别严重三个级别。孟令云等[21]采用轨道区段锁闭时间理论识别列车间的运行冲突。张京波[22]为车站的每条到发线建立了一个占用时间链表;王鹏玲等[23]基于可达树的冲突分析方法,分析了列车到发线是否冲突。文超等通过建立高铁事件时态关系的时间拓扑矩阵,实现了到发线运用冲突的判定,度量了列车运行冲突的严重程度(含到发线冲突)[24] [25]。彭文高[26]基于武广高铁的统计数据,发现跨线列车对接发车的干扰最为严重;陈慧[27]研究了跨线列车运行图的衔接来减少跨线列车对运行资源的冲突。上述既有研究以传统数学模型为主,建立在一定假设和抽象的基础上,冲突检测以逻辑判断为主,冲突度量以定性分级为主。

3.3. 到发线冲突消解

到发线冲突消解是一个对冲突列车占用车站到发线的次序和时间的重新确定问题。消解到发线冲突的目标主要有连带晚点列车数或连带晚点总时间最小[28]、旅客满意度高[29]、到发线使用成本低[30] [31]或提高到发线利用率等,其研究模型绝大部分为多目标组合优化模型。国外学者一般将到发线冲突消解看作列车站台运用优化问题的子问题,以寻找最好的列车进路方案从而减少晚点[32] [33],替代图[34] [35]、约束规划[36]、混合整数规划[37] [38]、多商品流模型[39]等被广泛应用于该问题的建模。Caimi 等[40]使用局部搜索求解列车晚点下的列车运行进路实时调整方案;Alberto [41]基于整数规划方法提出了鲁棒性进路模型以及相应的调整算法。Chakroborty [42]通过算例得出确定列车晚点到达时刻的早晚与客运站的到发线调整的灵活程度呈线性关系。Dewilde 等[43]提出一种增强车站作业计划鲁棒性的方法论,可减少 40%左右的连带晚点。国内学者一般认为到发线运用冲突消解属于到发线运用调整问题[44],线性 0~1 规划模型[30] [31]、非线性 0~1 规划模型[45]、混合整数规划模型[46] [47]常被用于此类问题的建模,其对应的求解算法主要有遗传算法[28] [48]、模拟退火算法[49]、分支定界算法[29]等。刘伟等[50]建立了基于安全约束的晚点列车到发线分配模型,通过案例分析得出:当列车晚点时间较短时,到发线运用调整宜采用“先到先服务”的原则。李宇航[51]建立了基于冲突概率计算的车站到发线分配优化模型,采用克隆算法求解模型。文超提出了基于后效冲突最小的列车运行调整理论与方法和单个冲突消解的策略,其中到发线冲突只是所研究列车运行冲突中的一类[52]。基于数据驱动的铁路车站到发线冲突判定方法能够为到发线运用调整提供理论支持[53],而深度强化

学习方法则对到发线运用冲突调整进行了验证[54]。

上述既有研究主要集中于运用运筹学最优化理论解决到发线运用调整问题，到发线冲突消解为其中的一个主要优化目标，对问题进行了一定抽象和简化以适应模型求解。

通过对既有典型研究所关注问题及采用方法的分析总结，得到了表 1 所示的汇总表。

Table 1. Representative literature and key methods
表 1. 代表性文献及方法

文献	研究问题	方法
[9]	到发线冲突识别	图论
[17]	到发线冲突识别	着色 petri 网，图论
[19]	列车站台与进路分配	线性混合整数规划
[28]	到发线分配优化	整数规划、遗传算法
[29]	到发线运用调整	分支定界算法和同步调整算法
[34]	决策支持系统，调度优化	替代图，分支定界算法
[36]	列车实时调度	约束规划，SYSIFE 仿真器
[38]	实时铁路交通管理问题	元启发式算法
[40]	列车运行进路的编制和调整	定点迭代，局部搜索
[41]	列车运行进路的编制和调整	混合整数规划
[42]	列车站台优化分配	线性混合整数规划，CPLEX
[43]	车站作业计划优化	混合整数线性规划，禁忌搜索算法
[46]	到发线分配优化	模拟退火，遗传算法
[47]	到发线调整	拉格朗日松弛
[48]	到发线调整	遗传模拟退火算法
[49]	到发线分配的编制和动态调整	模拟退火
[50]	到发线运用调整	混合整数规划、模拟退火算法
[51]	到发线运用优化	克隆算法
[52]	列车运行冲突消解	整数规划、遗传算法
[53]	到发线运用冲突判定	列车运行实绩数据驱动
[54]	到发线运用冲突调整	深度强化学习

4. 既有研究的不足和研究方向

4.1. 既有研究的不足

综上所述，虽然国内外专家学者开展了大量的研究，取得了较为丰硕的研究成果，既有研究存在以下不足：

(1) 已有研究侧重于使用传统数学优化模型解决到发线运用调整和冲突消解问题，对问题进行了一定简化和抽象，对到发线冲突的度量、分级、演化、预测、消解体系理论尚需深入研究。

(2) 总体来说，受限于数据获取的规模和有效性，国内外能用来研究到发线冲突态势感知和冲突消解的数据较为缺乏，尤其缺乏高铁运营数据。因此，挖掘多源数据隐藏的规律并应用于高铁到发线冲突态

势感知的研究缺乏。

(3) 在运用数据驱动模型方面,既有研究主要运用 Petri 网等智能计算模型识别列车到发线冲突,这类模型仍需以一定的先验调度知识为基础,不能实现完全客观、自动的列车运行冲突自动检测。随着信息技术、大数据、人工智能的发展,数据驱动模型和方法需逐步应用于列车运行冲突检测与消解。

(4) 既有研究在列车运行冲突的产生机理、列车运行图编制过程中消除各类时间和资源冲突等方面取得了较多的理论成果,但对于冲突发展演变规律、冲突的检测与智能消解研究方面尚缺。因此,研究基于自动化知识的到发线冲突智能消解理论是高铁到发线运用管理智能化亟待解决的难题之一。

4.2. 未来研究趋势及方向

以数据科学为基本工具,以数据驱动和机器学习为主要方法,研究到发线冲突形成机理、到发线冲突检测-影响度量-分级的理论、到发线冲突态势不同层级的演化理论和到发线冲突消解理论是未来研究的重要趋势,以期为铁路智能调度系统建设提供理论和技术支撑,为铁路车站到发线等运输资源优化运用提供一定理论指导:

(1) 收集和梳理铁路列车运行及运输资源运用相关的数据,运用现代统计模型研究到发线冲突分时段、车站等的分布特征,解析到发线冲突的时空分布规律,揭示铁路到发线冲突的产生机理。

(2) 基于历史数据析取到发线冲突形成的影响因素、建立铁路到发线冲突的自动识别模型,实现到发线冲突的实时检测。建立基于冲突-晚点影响程度的到发线冲突影响机器学习预测模型,从而实现到发线冲突影响的预测;构建多源数据驱动的铁路到发线冲突态势评估理论,实现对冲突的检测、影响预测和分级。

(3) 建立基于到发线运用方案、列车运行计划、气象条件、故障及列车运行干扰、动车组接续等数据的到发线冲突演化预测模型,实现铁路到发线冲突态势多维演化预测。

(4) 析取到发线冲突消解策略,建立基于行车条件、冲突等级、冲突消解效率等的冲突消解策略的学习模型,构建实现铁路到发线冲突消解策略选择自动化知识库,为到发线冲突消解提供自动化知识。

5. 结束语

本文综述了到发线冲突检测、列车晚点传播理论、数据驱动在铁路运输组织领域应用的既有研究成果,分析了当前铁路列车运行冲突检测与消解存在的 4 方面不足,并提出未来的研究趋势,得出以下结论:

(1) 已有研究偏向于使用传统数学优化模型解决到发线运用调整和冲突消解问题,但传统数学模型是建立在对问题有足够的认识和精确的描述上,模型和算法对使用范围要求比较严苛,而对运输实际生产的指导性不足,相关模型、算法以及据此开发的系统基本都还处于实验室阶段。

(2) 基于列车运行产生的海量多源数据,运用数据驱动方法可以尽可能建立全面的模型模拟真实情况,无需进行建模的假设和简化,可克服既有数学模型难以应用于生产实践的问题。

(3) 既有研究在列车运行冲突的产生机理、列车运行图编制过程中消除各类时间和资源冲突等方面取得了较多的理论成果,但对于冲突发展演变规律、冲突的检测与智能消解研究方面尚缺。随着信息技术、大数据、人工智能的发展,数据驱动模型和方法将逐步应用于此方面的研究。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(71871188)-列车运行实绩数据驱动的高速列车晚点传播机理与恢复理论。

参考文献

- [1] 文超, 彭其渊, 陈芋宏. 高速铁路单个列车运行冲突消解研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2741-2747.
- [2] 李平, 邵赛, 薛蕊, 等. 国外铁路数字化与智能化发展趋势研究[J]. 中国铁路, 2019(2): 25-31.
- [3] 唐涛, 李开成, 宿帅, 等. 瑞士铁路调度指挥系统特点分析及对我国启示[J]. 中国铁路, 2019(11): 18-23.
- [4] Törnquist, J. (2006) Computer-Based Decision Support for Railway Traffic Scheduling and Dispatching: A Review of Models and Algorithms. *5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways (ATMOS'05)*, Zürich, 14 September 2006, 659.
- [5] Wen, C., Li, J., Peng, Q., Li, B. and Ren, J. (2013) Predicting High-Speed Train Operation Conflicts Using Workflow Nets and Triangular Fuzzy Numbers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **229**, 268-279. <https://doi.org/10.1177/0954409713509978>
- [6] Wen, C., Peng, Q., Chen, Y. and Ren, J. (2013) Modelling the Running States of High-Speed Trains Using Triangular Fuzzy Number Workflow Nets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **228**, 422-430. <https://doi.org/10.1177/0954409713480488>
- [7] 文超, 彭其渊, 陈芋宏. 高速铁路列车运行冲突机理[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 119-126.
- [8] 葛朝强, 葛敏辉, 翟海保, 等. 基于大数据分析的智能电网安全态势感知[J]. 信息技术, 2019(10): 144-148+153.
- [9] Kecman, P. and Goverde, R.M.P. (2012) Process Mining of Train Descriptor Event Data and Automatic Conflict Identification. *WIT Transactions on the Built Environment*, **127**, 227-238. <https://doi.org/10.2495/cr120201>
- [10] Şahin, İ. (1999) Railway Traffic Control and Train Scheduling Based Oninter-Train Conflict Management. *Transportation Research Part B: Methodological*, **33**, 511-534. [https://doi.org/10.1016/s0191-2615\(99\)00004-1](https://doi.org/10.1016/s0191-2615(99)00004-1)
- [11] Makkinga, F. and Metselaar, S. (1998) Automatic Conflict Detection and Advanced Decision Support for Optimal Usage of Railway Infrastructure: Prototyping and Test Results. *WIT Transactions on the Built Environment*, **34**, 907-915.
- [12] Zhu, T. and Mera Sanchez de Pedro, J.M. (2017) Railway Traffic Conflict Detection via a State Transition Prediction Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **18**, 1268-1278. <https://doi.org/10.1109/tits.2016.2603441>
- [13] Goverde, R.M.P. and Meng, L. (2011) Advanced Monitoring and Management Information of Railway Operations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, **1**, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2012.05.001>
- [14] Oh, S., Hong, S. and Choi, I.C. (2004) Railway Conflict Detection and Resolution in the Korean Railway System. *WIT Transactions on the Built Environment*, **74**, 675-684.
- [15] Mazzarello, M. and Ottaviani, E. (2007) A Traffic Management System for Real-Time Traffic Optimisation in Railways. *Transportation Research Part B: Methodological*, **41**, 246-274. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.005>
- [16] Weeda, V. (2006) Analyse dispuñtualiteit, verstoringsregistratie en rij-en halteertijden: Resultaten casestudy Rotterdam-Dordrecht. Report T&P 2006.007, Department Transport & Planning, Delft University of Technology. (In Dutch)
- [17] Daamen, W., Goverde, R.M.P. and Hansen, I.A. (2008) Non-Discriminatory Automatic Registration of Knock-On Train Delays. *Networks and Spatial Economics*, **9**, 47-61. <https://doi.org/10.1007/s11067-008-9087-2>
- [18] Daamen, W., Houben, T., Goverde, R., et al. (2003) Monitoring System for Reliability of Rail Transport Chains. *Technology*, **2003**, 2002.
- [19] Sels, P., Cattrysse, D. and Vansteenwegen, P. (2016) Automated Platforming & Routing of Trains in All Belgian Railway Stations. *Expert Systems with Applications*, **62**, 302-316. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.05.042>
- [20] 彭其渊, 彭丹, 宁佳, 等. 高铁客运站到发线运用冲突预警技术[J]. 综合运输, 2018, 40(11): 62-69.
- [21] 孟令云, M.P. Goverde R. 基于实际数据分析的列车晚点传播过程构建方法与实例[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(6): 15-20.
- [22] 张京波, 胡思继. 列车运行调整模型的研究[J]. 铁路计算机应用, 2001, 10(7): 9-12.
- [23] 王鹏玲, 马磊, 王青元, 等. 基于 Petri 网列车群模型的列车运行冲突分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(3): 1-7.
- [24] 文超, 彭其渊, 陈芋宏, 等. 高速铁路列车运行冲突判定及其实现[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 867-873.
- [25] 文超, 彭其渊. 高速铁路列车运行冲突管理理论与方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
- [26] 彭文高. 武广高速铁路跨线列车运输组织模式优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(12): 6-12.
- [27] 陈慧. 客运专线跨线运输衔接相关问题研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [28] 姜旭. 列车晚点条件下大型客站到发线与咽喉运用优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.

- [29] 彭其渊, 宁佳, 鲁工圆. 大型高铁客运站到发线运用调整模型及算法[J]. 铁道学报, 2019, 1(41): 10-19.
- [30] 史峰, 陈彦, 秦进, 等. 铁路客运站到发线运用和接发车进路排列方案综合优化[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 108-113.
- [31] 陈彦, 史峰, 秦进, 等. 旅客列车过站径路优化模型与算法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 101-107.
- [32] Corman, F. and Meng, L. (2015) A Review of Online Dynamic Models and Algorithms for Railway Traffic Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **16**, 1274-1284. <https://doi.org/10.1109/tits.2014.2358392>
- [33] Fang, W., Yang, S. and Yao, X. (2015) A Survey on Problem Models and Solution Approaches to Rescheduling in Railway Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **16**, 2997-3016. <https://doi.org/10.1109/tits.2015.2446985>
- [34] Corman, F., D'Ariano, A., Hansen, I.A. and Pacciarelli, D. (2011) Optimal Multi-Class Rescheduling of Railway Traffic. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, **1**, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2011.06.001>
- [35] Corman, F., D'Ariano, A., Pacciarelli, D. and Pranzo, M. (2014) Dispatching and Coordination in Multi-Area Railway Traffic Management. *Computers & Operations Research*, **44**, 146-160. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.11.011>
- [36] Rodriguez, J. (2007) A Constraint Programming Model for Real-Time Train Scheduling at Junctions. *Transportation Research Part B: Methodological*, **41**, 231-245. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.006>
- [37] Lamorgese, L. and Mannino, C. (2015) An Exact Decomposition Approach for the Real-Time Train Dispatching Problem. *Operations Research*, **63**, 48-64. <https://doi.org/10.1287/opre.2014.1327>
- [38] Samà, M., Pellegrini, P., D'Ariano, A., Rodriguez, J. and Pacciarelli, D. (2016) Ant Colony Optimization for the Real-Time Train Routing Selection Problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, **85**, 89-108. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.005>
- [39] Caimi, G., Fuchsberger, M., Laumanns, M. and Lüthi, M. (2012) A Model Predictive Control Approach for Discrete-Time Rescheduling in Complex Central Railway Station Areas. *Computers & Operations Research*, **39**, 2578-2593. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.01.003>
- [40] Caimi, G., Burkolter, D. and Herrmann, T. (2005) Finding Delay-Tolerant Train Routings through Stations. In: Fleuren, H., Hertog, D. and Kort, P., Eds., *Operations Research Proceedings*, Springer, 136-143. https://doi.org/10.1007/3-540-27679-3_17
- [41] Caprara, A., Galli, L., Kroon, L., et al. (2010) Robust Train Routing and Online Re-Scheduling. *10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS'10)*, Volume 14, 24-33.
- [42] Chakroborty, P. and Vikram, D. (2008) Optimum Assignment of Trains to Platforms under Partial Schedule Compliance. *Transportation Research Part B: Methodological*, **42**, 169-184. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.07.003>
- [43] Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D. and Vansteenwegen, P. (2013) Robust Railway Station Planning: An Interaction between Routing, Timetabling and Platforming. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, **3**, 68-77. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2013.11.002>
- [44] 谢楚农, 黎新华. 铁路客运站到发线运用优化研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 130-133.
- [45] 王保山, 侯立新, 刘海东. 客运专线车站到发线运用优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(2): 105-110.
- [46] 刘伟. 非常态下的大型客站咽喉利用与到发线分配优化研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [47] 邓远冬. 列车晚点下高速铁路车站到发线运用调整研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [48] 彭其渊, 张永祥, 鲁工圆, 等. 基于时空资源的铁路客运站到发线运用调整[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 1011-1021.
- [49] 朱昌锋. 铁路大型客运站到发线分配耦合优化及时域调整研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [50] 刘伟, 朱晓宁. 基于安全约束的客站晚点列车到发线分配优化[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(4): 39-45.
- [51] 李宇航. 大型客运站高峰期到发线运用优化方案研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [52] Wen, C. and Li, B. (2013) Train Operation Adjustment Based on Conflict Resolution for High-Speed Rail. *Journal of Transportation Security*, **6**, 77-87. <https://doi.org/10.1007/s12198-012-0104-9>
- [53] 杜雨琪, 文超, 杨盛蓝. 高速铁路车站到发线运用冲突产生机理及其判定[J]. 综合运输, 2022, 44(11): 117-122.
- [54] 田锐, 孟令云, 王维, 李忠灿, 唐晓龙, 孙飞. 基于深度 Q 网络的高速铁路车站到发线运用冲突调整研究[J]. 铁道学报, 2025, 47(3): 1-9.