文章编号：1003-1421(2026)02-0001-14
引用格式：张如，陶思宇，彭其渊，等.高速铁路综合维修天窗与列车运行协调优化研究综述[J].铁道运输与经济，2026，48(2)：1-14，28.
ZHANG Ru，TAO Siyu，PENG Qiyuan，et al. Review on Integrated Maintenance Window of High Speed Railway and Train Operation Coordination[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：1-14，28.

高速铁路综合维修天窗与列车运行协调优化研究综述

张　如[1,2,3]，陶思宇[1,2,3]，彭其渊[1,2,3]，陈立强[1,2,3]，冯　涛[1,2,3]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都　611756；2.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都　611756；3.西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都　611756)

摘　要：高速铁路综合维修天窗与列车运行协调优化是保障运输安全和提升运营效率的关键。从建模与算法设计的视角，梳理了国内外相关研究现状，旨在揭示列车运行与维修协调优化领域的理论演进与技术瓶颈。研究发现，随着高铁向网络化与多元化发展，既有基于静态假设的模型在刻画动态干扰下的非线性耦合关系时存在局限，现有算法在求解效率与全局收敛性方面亦面临挑战；特别是在跨网协同、多目标权衡与紧急维修响应等新需求背景下，现有理论与方法体系需进一步完善。基于此，本综述重点剖析了现有模型与算法的不足，并展望了融合大数据与人工智能技术的研究方向，提出构建“感知-优化-执行”一体化的智能闭环决策框架，以期为推动我国高速铁路列车运行与天窗维修协调的智能化发展提供参考。

关键词：综合维修；列车运行；运维协调优化；求解算法；研究综述
中图分类号：U292.4+1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250317006

Review on Integrated Maintenance Window of High Speed Railway and Train Operation Coordination

ZHANG Ru[1,2,3]，TAO Siyu[1,2,3]，PENG Qiyuan[1,2,3]，CHEN Liqiang[1,2,3]，FENG Tao[1,2,3]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: The coordinated optimization of the high speed railway comprehensive maintenance window and train operation is the key to ensuring transportation safety and improving operation efficiency. From the perspectives of modeling and algorithm design, this paper reviewed domestic and international research to reveal the theoretical evolution and technical challenges in the field of operation-maintenance coordination. Research indicates that, as high speed rail continues to develop

收稿日期：2025-03-17　　**修订日期**：2025-05-20
通信作者：陶思宇(1980—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，西南交通大学交通运输学院副教授。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682025CX185)

toward networking and diversification, existing models based on static assumptions show limitations in characterizing nonlinear coupling relationships under dynamic disturbances, while current algorithms also face challenges in terms of computational efficiency and global convergence. Especially under new requirements such as cross-network coordination, multi-objective trade-offs, and emergency maintenance response, existing theoretical and methodological systems require further refinement. Based on this analysis, this review critically examined the shortcomings of current models and algorithms, explored future research directions integrating big data and artificial intelligence technologies, and proposed the construction of an integrated "perception-optimization-execution" closed-loop intelligent decision-making framework, providing insights to promote the intelligent development of operation-maintenance coordination for high speed railway in China.

Keywords: Comprehensive Maintenance; Train Operation; Coordination Optimization of Operation and Maintenance; Solution Algorithm; Research Review

0　引言

综合维修天窗是在铁路运输中为确保线路、信号、供电等基础设施维护而专门划定的非运营时段，列车运行图则是列车在区间运行及在车站到发或通过时刻的技术文本。在当下高速铁路快速发展的情境下，高速铁路综合维修天窗与列车运行图协调优化(以下简称“运维协调优化”)面临独特挑战：一方面，高速铁路以高密度、高准点率为核心特征，夜间行车需求(如夕发朝至列车)与天窗时段(通常为0:00—6:00)冲突显著；另一方面，随着铁路线路成网，跨线列车日益增多，致使线路间的相互影响加剧。一条线路的维修天窗安排可能会影响到与之相连的多条线路的列车运行，进而波及整个路网的顺畅运转。传统的运维计划分阶段编制模式采用“先确定一方案，再依剩余能力编另一方案”的模式，难以统筹线路间的复杂关联。且仅依靠经验及人机交互的编制模式难以实现动态路网资源的最优配置，影响运输安全与效率。因此，系统研究高速铁路运维协调优化理论与方法，对提升运输系统的可靠性、线路的资源利用效率、列车运行的稳定性及最小化列车运维之间的矛盾具有重要意义。

为宏观把握运维协调优化领域的研究脉络，基于文献计量分析方法，绘制了高速铁路运维协调优化研究的关键词共现图如图1所示。图1中节点大小表征关键词出现频次，节点间连线的密度反映共现强度。研究聚焦于“高速铁路”与“维修天窗”的协同问题，“运输组织”“维修天窗”“通过能力”“客运专线”等高频节点形成紧密关联簇群，表明领域内核心议题集中于维修天窗设置与运输效率的协同优化。具体而言，既有研究早期主要关注天窗设置对铁路运输能力的约束效应[1-4]，随后，逐步深入到运行图与维修间的一体化优化[5-8]、考虑站线资源限制的天窗优化[9]及考虑客运需求的天窗与列车协同优化[10-12]。相比之下，针对“夜行列车”[13-15]“动卧列车”[16-17]“夕发朝至列车”[18-19]等多样化运输需求与天窗冲突的协同优化研究相对较少。在求解方法上，“仿真”[20]“遗传算法”[21-22]“数据驱动”[23]等智能算法开始兴起。



图1　关键词共现图

Fig.1　Keyword visualization

1　高速铁路运维协调优化概述

1.1　运维协调优化概念与内涵

高速铁路运维协调优化，是指在确保行车安全与满足天窗开设条件的双重约束下，对列车运行计划与基础设施维修作业进行一体化统筹与优化的过程。其核心目标是实现列车运行和维修作业的高效协调，在保障天窗维修效能的同时，最小化对正常

运输服务的干扰。从研究范畴上看，研究聚焦的对象主要涵盖时速350 km等级高速铁路、时速250 km等级高速铁路以及按高速铁路标准管理的时速200 km客货共线铁路。不同类型线路在运营模式(如纯客运、客货混跑)与速度标准上存在显著差异，直接影响运维协调模型的构建与优化策略的选择。与普速铁路相比，高速铁路天窗时段与夜间行车需求存在固有冲突，且线路负荷高、跨线列车比例大，需通过动态优化模型(如时空网络框架)平衡天窗分段、列车限速约束与旅客服务质量，这对求解算法的智能化水平(如强化学习、元启发式算法)提出了更高要求。在传统运输调度理论的基础上，该领域已衍生出列车时刻表优化、维修作业计划优化及两者协调优化等多个研究方向，高速铁路运维协调优化研究内容如图2所示。

1.2　运维协调优化研究历程

我国对高速铁路运维协调的研究可追溯至20世纪90年代，早期主要关注天窗设置对区间通过能力的影响[1]。1999年，Cheung等[24]创新性地将轨道维修作业表述为具有特殊约束的资源分配问题，通过协调列车运行和维修作业时序，实现最优的任务分配计划，并缩短维修作业时间。罗建等[2]首次将概率论中的频数思想引入该领域，用于刻画天窗对列车始发时段的影响，并通过构建天窗与列车协调优化模型确定最佳天窗开设时段。近年来，研究范畴与深度显著拓展，大致可分为3类：①天窗既定条件下列车运行图优化[25-28]与定量评估[29]；②在既有列车运行图中插入天窗使得运行图调整最小[30]；③列车运行图与天窗协同优化[31-34]。此外，除采用优化模型对运维进行协调优化外，还有学者打破日维修天窗形式，采用“隔日开天窗”[35]等策略(如单线封锁维修+邻线行车、双线交替隔日维修)缓解运维冲突。运维协调优化研究历程如图3所示。当下，高新机械维修技术、列车运行图智能化编制

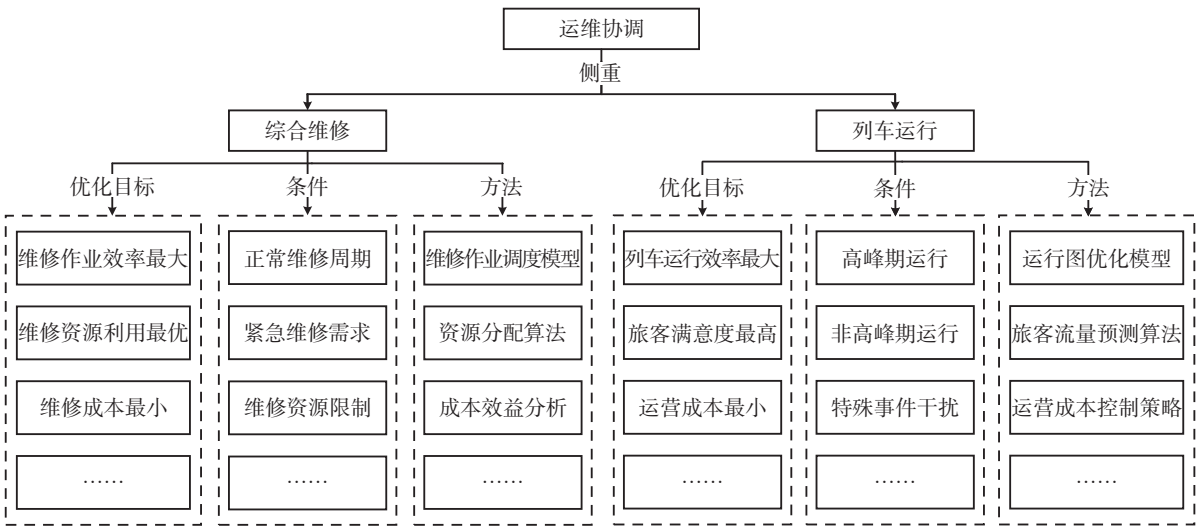

图2　高速铁路运维协调优化研究内容

Fig.2　Content on coordinated optimization of high speed railway integrated maintenance and train operation

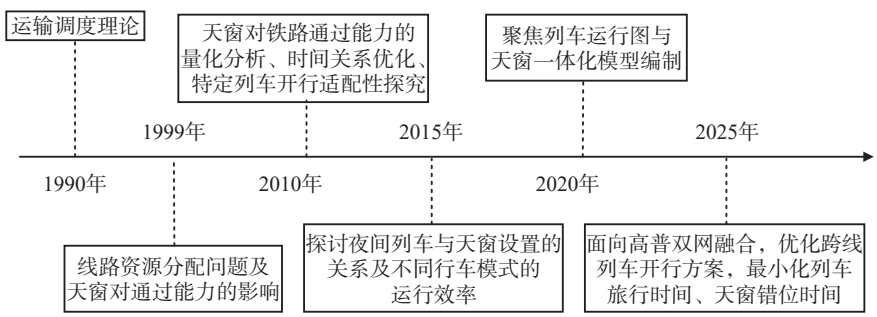

图3　运维协调优化研究历程

Fig.3　Research process of operation and maintenance coordination optimization

技术以及人工智能算法持续取得突破，对于综合维修干扰能够迅速进行调整，为高速铁路列车运维协调优化提供技术支撑，促使运维协调优化研究朝着智能化方向发展。

2　国内外高速铁路运维协调优化研究现状

随着我国“八纵八横”高速铁路网的全面建成，运输产品多元化需求增加。夕发朝至列车与综合维修天窗在时空资源上的占用矛盾加剧，推动研究焦点转向高速铁路夜间行车与天窗设置协同优化问题。在天窗设置方面，研究不同时段开设天窗、不同天窗形式及不同开设时长对于列车运行的影响[1，6，10，36]；并深入天窗内部，对比分析了“全封闭”与“一线维修、一线行车”等模式的优劣[11，37]。基于周期性天窗，利用斜率分析法探究不同天窗分段数对夕发朝至列车开行数量的影响[3]，王进勇等[4]则通过灵敏度分析，研究V型天窗内各因素与线路通过能力的扣除关系。在行车组织方案方面，研究探讨无夜间天窗、单线行车的等线、下线、下线-上线和换乘等多种模式，以分析夕发朝至列车的运行效率与可行性，丰富了高速铁路运维协调优化的理论体系[38-41]。协调优化主体如图4所示，其核心在于平衡综合维修作业、列车运行以及基础设施资源之间的关系。

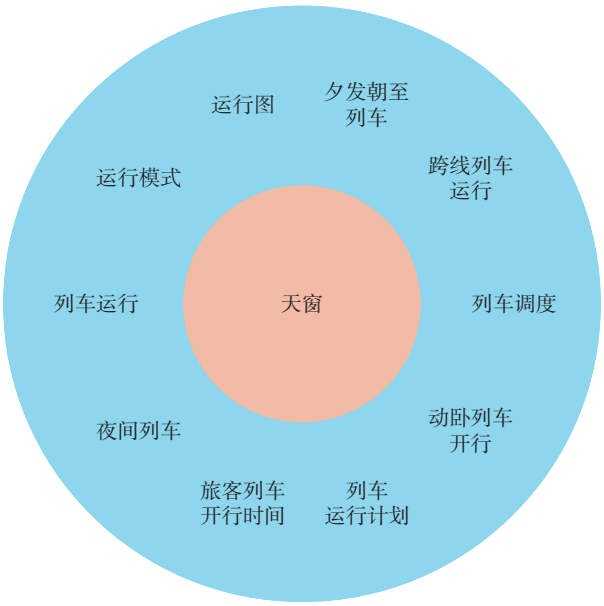

图4　协调优化主体

Fig.4　Entities of coordination and optimization

2.1　运维协调优化模型构建

既有研究中的高速铁路运维协调优化模型多基于运筹学优化模型，按决策变量一般分为2类：一类侧重于时刻表优化模型，以列车运行为核心；另一类侧重于资源分配优化，以轨道、车站等资源的占用为核心。这2类模型相互交叉，时刻表的优化以考虑资源的可用性为前提，而资源的有效分配又能够支持时刻表的可行性。不同于部分学者用0-1变量描述线路占用情况，穆策等[32]将维修任务视为伪列车，并将维修约束转化为列车类约束，实现了在同一个框架内对列车运行和维护任务的协同优化[42-44]，并利用启发式方法对列车运行或维护任务进行选择[42]。

2.1.1　决策变量

目前，高速铁路运维协调优化模型中采用的决策变量主要包括列车运行时间变量、线路及车站资源变量、列车运行模式变量以及客流相关变量，决策变量类型如图5所示。通过调整变量的值，可以实现不同维度的优化目标[22]。在运维协调优化模型中，决策变量起着将实际运营场景转化为数学模型的关键作用，是构建模型的核心要素。诸多研究通过精准定义决策变量搭建起模型框架，为解决运维协调优化问题奠定基础。在列车运行方面，张春田[45]基于列车运行线的铺画位置、列车的开行模式、运行径路、到发时刻及顺序等因素构建决策变量，描述列车在铁路网络中的运行状态和轨迹，作为构建列车运行图相关模型的基础元素[46-47]。在天窗设置方面，主要包括天窗开设时间、天窗的分段形式及长度、天窗的位置等决策变量，用以明确维修天窗在时间和空间上的分布特征。这些变量相互关联，共同构成运维协调优化模型的基本架构，反映出行车与维修在时空资源上的布局关系[22]。此外，还有学者采用时空网络建模方法并融合时空维度信息，构建扩展时空网络中轨道能力的辅助约束变量、列车在时空网络中的路径变量等，全面地描述了列车在铁路网络中的动态运行过程以及与维修天窗在时空上的交互关系[45]，在此基础上，Qian等[48]利用0-1变量构建三维时空框架，除时空维度外，增加对“状态”的考虑。

此外，在对复杂模型进行求解的过程中，通过

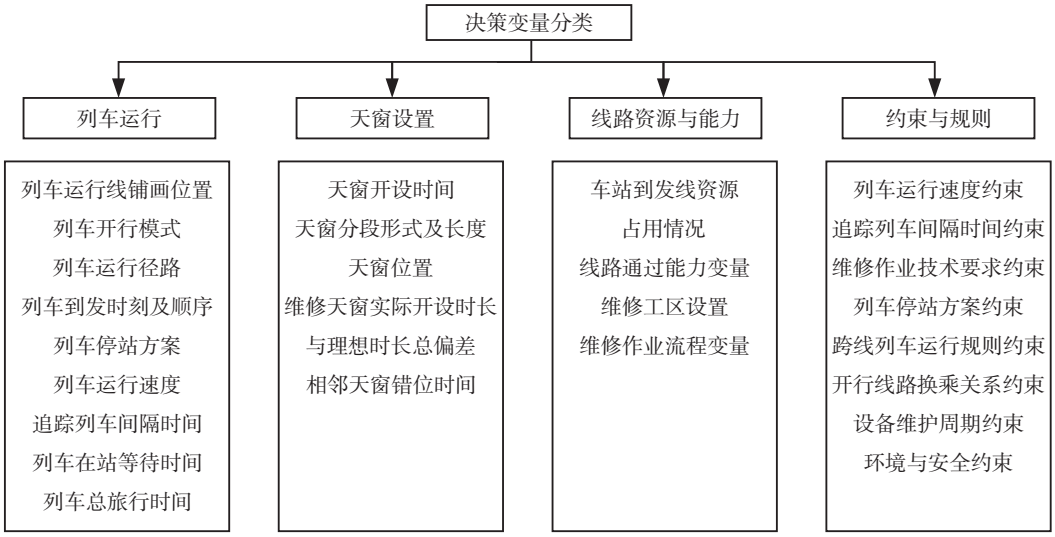

图5　决策变量类型

Fig.5　Types of decision variables

不断调整决策变量的值，可提高算法在解空间的搜索效率，逐步逼近满足目标函数和约束条件的最优解或近似最优解[5]。徐长安等[31]通过对决策变量进行特殊处理，实现天窗分段与衔接的快速识别和优化，有效避免局部最优解的困局，提升了求解效率和质量。还有一些模型通过引入2类0-1变量关联列车开行和运行图，并设计跨尺度一致性约束耦合变量，实现运输资源的合理配置和运输效率的提升[49]；或通过设置列车限速次序放行条件、时间放行条件等表述天窗期间不同的行车组织规则[50]。在采用模拟退火算法求解时，通过对决策变量的随机扰动并结合接受准则的设定来探索解空间；遗传算法、分支定价算法等则通过选择、交叉、分支等操作遍历变量组合。除利用决策变量提升求解效率外，张哲铭等[7]还对模型本身进行简化处理，利用0-1变量将模型线性化；或是设置辅助变量，将维修天窗视为“虚拟列车”，通过其与其他列车的关系判断限速列车，线性化困难约束，从而降低求解难度[32]。

2.1.2　优化目标

（1）单目标优化。在单目标优化研究中，既有文献在处理运维协调优化问题时，通常选择在天窗或列车运行固定的情况下，优化列车运行或天窗维修效率，或把列车运行或天窗作为约束考虑。如针对不同运行模式或天窗类型分析列车运行效率优劣[1, 6]，或将维修任务视为伪列车，把维修约束转化为列车类约束[32, 42-44]。从目标内容上看，优化目标主要分为时间类[16, 50]和运行影响类[15]。通过分析天窗与列车运行之间的动态影响关系，以最小化列车运行时间的加权增加量为目标，构建优化模型[51]。亦有研究直接以天窗影响列车OD数最少为目标，建立求解天窗位置优化模型[11]。

（2）多目标优化。由于列车运行图的编制涉及因素众多，在缓解列车运行与天窗间的冲突时，不仅要考虑减少时间，还要从根本上提高区段通过能力与铁路综合效益[52]。随着模型算法的持续迭代，多目标优化在运维协调优化领域的应用逐渐广泛。

从减少运行干扰层面，Higgins[53]着力于最小化列车运行和维护任务之间的预期干扰，同时缩短线路处于次优状态的时间，以此保障列车运行的稳定性与安全性；Budai等[54]利用0-1整数规划模型对单条轨道的维护任务进行聚类优化，结合启发式算法降低对铁路运营的直接干扰；张哲铭等[7]则以最小化列车总运行时间和维修天窗实际开设时长与理想时长的总偏差为目标，提升天窗开设下列车运营的连续性。在追求运营效率最大化方面，Albrecht等[42]以最小化列车运行和维修任务的总延迟为目标，统筹优化提升铁路网络运营效率；Forsgren等[55]建立了包含最小化运行干扰、最大化维修需求满足度、运营成本最小及提升时刻表稳健性的多元目标体系，运用混合整数规划协同优化列车时刻表与维修计划。面向网络整体优化，Zhang等[56]构建

联合优化模型，综合考虑网络运输效率、乘客出行便捷性及维修资源最优分配等多目标，促进高铁网络均衡发展。在兼顾旅客体验与成本控制上，王宇嘉等[57]以所有列车在停靠站的到发时刻满意度最大为目标；赵凤娟[12]针对紧急维修提出旅客导向优化模型，以最小化旅客额外出行成本与紧急维修成本为目标，保障旅客利益并控制运维成本。此外，张梦涵[5]通过引入权重系数，以最小化列车总运行时间和维修天窗总持续时长加权和为目标，灵活权衡运营与维修需求[58]；邓智文等[59]以列车总旅行时间最小和维修天窗开设总时长最大为目标，而杨浩[60]则以最小化所有列车总旅行时间为首要目标，兼顾列车运行图排布密集度和列车在站等待时间最小化，提供快捷出行服务。随着可持续发展理念的深入，低碳目标逐渐受到关注。部分研究开始以碳排放量为目标，同时考虑优化运行时间与维修频率[61]。

2.1.3　约束条件

由于高速铁路列车运行与天窗维修在时间资源、空间资源及技术标准方面存在竞争性与差异性，为实现天窗开设合理性及列车运行安全高效性的双重目标，需综合考虑时空资源上的多重约束。既有研究中的约束条件集中于天窗类约束与运行过程约束，包括列车到发时间域、天窗开设时间段、列车追踪时间间隔、车站到发线数量及运行图均衡性[59]等。此外，张天伟等[62]还考虑列车运行与天窗设置的关联约束。在面向不同优化目标时，需引入或改进相应的约束条件。李雪芹等[63]为研究天窗期间列车合理开行对数，在满足通过能力、车站到发线长度等约束条件下，得出组合列车开行对数的合理范围。袁博等[17]提出包含天窗错位时间约束的整数规划模型，并引入车站天窗包含关系约束与车站到发线能力约束，以满足列车可用到发线数量的限制。Lidén 等[64]进一步考虑维修人员可用性、工作时间规定等维修资源约束，确保维修任务在有限人力资源下顺利完成，从而实现维修成本与列车运营成本总和的最小化。

除了经典的天窗设置时段与时长约束、列车运行间隔约束外，部分学者进一步结合车站通过能力及列车速度限制，将到发线数量约束转换为车站停靠列车数量约束[32, 56]，并考虑天窗开设条件下的列车运行速度约束[7, 47]，及车站存车能力对列车运行和维修天窗的制约作用[60]。在保障列车安全运行方面，除考虑安全间隔约束，还需设置列车运行时序约束、维修天窗的非重叠约束及列车运行和维修天窗之间的协调约束[5]。为响应绿色发展理念，田志强等[65]考虑了再生制动阶段和牵引阶段重叠时间约束，在协调列车运行与维修天窗冲突的同时，为列车节能运行提供有利条件，实现了铁路运输经济效益与环境效益的共同提升。此外，也有学者从旅客角度出发，设置旅客服务质量约束[66]。

综上，既有研究中的约束可归纳为以下 4 类。①列车运行类约束：包括列车到发时间域、列车追踪时间间隔、列车运行时序约束等，主要用于保障列车运行过程中的安全性和有序性。②天窗类约束：涵盖天窗开设时段、天窗与列车运行关系约束、天窗错位时间约束等，以保证维修作业的有效进行。③资源能力约束：涉及人员、线路设备等资源情况，包括到发线数量、到发线长度、车站及到发线通过能力、车站存车能力、维修人员数量等，确保资源的合理配置与利用。④运行速度类约束：包括列车运行速度约束及维修限速约束等，以保障列车运行的安全性和维修作业的顺利进行。

2.2　模型求解算法

高速铁路运维协调优化属于组合优化问题。由于列车在线网中运行的连续性及运行与维修间的关联性，在以最小化列车受天窗影响为目标的问题中，通常引入 0–1 变量来表示关键列车及线路占用的情况。同时，路网规模复杂性与天窗设置约束进一步增加了问题的复杂度，对求解算法提出了较高要求。

2.2.1　精确算法

对于小规模协同优化问题，部分研究采用线性或整数规划构建模型，并借助 CPLEX、GUROBI 等商业求解器求取最优解[17, 32, 55, 66]。李博[18]通过将非线性规划模型转化为线性规划模型，再利用 LINGO 进行求解，或是将多目标转化为单目标再利用 GUROBI 求解[7]。刘敏等[15]则通过辅助矩阵将模型转化为线性规划形式，采用改进的 ε-约束法，借助 GUROBI 最大化夜行列车开行数量，虽缩减了求

解规模，但仍因变量和约束较多而具有较高复杂度[65]。兰泽康等[47]通过引入惩罚系数、行生成方法及两阶段法处理约束，并利用GUROBI最小化列车总旅行时间和列车取消数量。针对两阶段模型，GUROBI无法返回可行解，Ji等[67]基于对偶分解将原始问题分解为一组变量数量更少的子问题。还有学者将CPLEX与NSGA-Ⅱ结合[50]，或采用OPL编程调用CPLEX求解器进行模型求解[16]。

2.2.2　启发式算法

（1）启发式算法。高速铁路运维协调优化问题属于经典的NP-hard问题，随着研究扩展至路网层面及约束变量的增加，问题复杂度呈指数增长。一般的求解软件难以满足实时求解要求，需利用启发式算法求取近似最优解[19, 22]，包括两阶段启发式解法、基于最早冲突法、邻域搜索算法以及滚动时域算法[12, 68]等。Higgins[53]采用两阶段启发式解法，先基于贪婪搜索与任务优先级分配资源，再利用禁忌搜索进行优化，降低了列车运行与维修任务间的干扰及线路次优状态时间。在进行天窗与列车运行优化时，徐长安等[31]先基于专家经验构建初始框架，再采用禁忌搜索获取全局最优解，减少列车在站停留时间或晚点时间。穆策[50]利用最早冲突法生成运行图并进行冲突疏解，结合邻域搜索优化，缩短列车旅行时间。启发式算法计算效率较高，能在较短时间内给出可行解，尤其适用于实时性要求较高的场景，但可能无法保证全局最优性。此外，还有学者将维修天窗与列车时刻表协同优化问题转化为包含多类型弧的多商品网络流问题，并基于变邻域搜索、交替方向乘子法框架的启发式算法求解子问题[69]。

（2）元启发式算法。启发式算法依赖于直观经验或特定规则，虽可以快速生成可行解，但难以确保全局最优且通用性有限。元启发式算法通过模拟自然现象等抽象模式进行随机搜索，更易获取全局近似最优解，尤其适合复杂非线性问题，主要包括模拟退火算法、问题空间搜索、遗传算法[5]、并行蚁群算法[58]等。杨奎等[51]通过设计模拟退火算法，并结合编程软件求解天窗与夜间列车协调优化模型，以最小化列车运行时间增加量。针对大规模线网，宋凯文[9]采用自适应大邻域搜索算法和模拟退火算法，有效降低列车总运行时间以及受影响列车数量。Rudek[70]采用了一种结合Nawaz-Enscore-Ham启发式算法和模拟退火元启发式算法的方法，最小化列车不可用时间。元启发式算法能在复杂解空间中高效搜索，但算法参数设置往往较为复杂，且计算时间相对较长。

2.2.3　其他优化算法

面对大规模运维协调优化问题，既有研究还采用了多种其他算法和策略。Zhang等[56]开发了一种基于拉格朗日松弛的启发式算法，通过动态约束生成技术高效处理大量约束，有效应对调度冲突和列车路径优化问题。针对天窗方案协调优化问题，石浩林[21]设计了改进遗传算法，通过自适应交叉和变异，平衡全局和局部搜索的能力。为求解双目标优化问题，于婕[52]改进了NSGA-Ⅱ算法，并引入非支配排序和拥挤度计算，提高算法的全局搜索能力，为运维协调优化提供有效的工具。基于单条线路，Bahramian等[71]以列车受施工维修影响造成的总延误最小为目标，设计了元胞自动机分别与遗传算法、动态维度搜索算法结合的2种混合算法，并用实际算例对2种算法进行评价。Meng等[72]提出了一种多层次分支求解程序，通过系统地生成和选择在不同随机情景下的交会和越行方案，提升求解效率及处理复杂调度问题的能力，并能够在实时环境中快速适应运营条件变化。随着技术发展，部分学者[61]开始利用ADMM驱动和嵌套仿真启发式算法对运维协调优化模型进行求解。高速铁路运维协调优化研究代表文献如表1所示。

2.3　运维协调优化研究现状与瓶颈透析

在高速铁路运维协调优化领域，国内外学者已取得诸多成果。国内研究集中在夕发朝至列车开行的可行性及与综合维修天窗的协调优化方面。如运用频数思想与同余思想分析列车合理开行范围[2]，以最小化列车总旅行时间和最大化天窗时间为目标，协同优化列车运行图与综合维修天窗[5]，或在高普结合条件下分析跨线列车对天窗方案的影响[21]，或基于对天窗设置与线路能力协调的分析，建立夜间行车与天窗设置的协调优化模型[9]。针对高速铁路夜间行车与综合维修天窗间严重冲突问题，彭其渊等[13]构建了列车运行图与综合维修天窗

表1　高速铁路运维协调优化研究代表文献

Tab.1　Representative literature on coordinated optimization of high speed railway integrated maintenance and train operation at home and abroad

文献来源	优化目标						约束条件				求解算法
	时间层面		效益层面		干扰层面		列车运行	维修天窗	资源能力	运行限度	
	旅行时间	延误时间	满意度	费用成本	关键列车	偏差调整					
Higgins[53]	维修时间		—	—	—	√	—	√	√	—	贪婪+禁忌搜索
杨　奎等[51]	—	√	—	—	—	—	√	√	—	—	MATLAB+ CPLEX 模拟退火算法
高海涛[68]	—	√	—	√	—	—	√	√	—	—	CPLEX 滚动时域算法
宋凯文[9]	√	—	—	—	√	—	√	√	—	—	自适应大邻域搜索+传统模拟退火
赵凤娟[12]	—	—	√	√	—	—	√	√	√	√	商业求解器+滚动时域优化算法
袁　博等[17]	√	—	—	—	—	√	√	√	√	—	GUROBI
石　赟等[22]	√	√	—	—	—	—	√	√	—	—	NSGA-II
Rudek[70]	列车不可用时间		—	—	—	—	√	√	—	—	Nawaz-Enscore-Ham+模拟退火元启发式算法
Meng等[72]	—	√	—	—	—	—	√	—	—	—	多层次分支解决方案程序
Albrecht等[42]	—	√	—	—	—	—	√	√	√	—	问题空间搜索元启发式算法
Peng等[73]	—	—	—	√	√	—	时间窗、互斥、优先性				迭代启发式算法

注：“√”表示含有或考虑；“—”表示未考虑。

协调优化线性规划模型[16]，朱绪斐[14]运用定性分析与图示说明相结合的方法，系统比较不同行车方式技术条件、组织特点及与天窗的协调策略，明确各方法的适用场景。此外，还有学者将天窗视为“虚拟列车”[20]，允许其能够在一定范围内移动，以减少列车晚点时间并降低天窗对列车运行的干扰。

国外研究多从利益相关者视角出发，聚焦于维修计划优化与全生命周期成本最小化，提出多种以降低维修费用为目标的模型，包括轨道状况预测模型[8]、区域铁路网维修调度模型[74]及道砟更新计划优化模型[75]。在多主体协同机制研究上，Buurman等[76]通过分析列车运营商和维修承包商的限制性和灵活性，优化双方利益；D’Ariano等[77]提出随机集成优化方法，综合考虑了列车排序、路径选择以及与短期维修作业时机，实现了交通流和轨道维修活动的协同。对于时刻表适配性优化问题，Arenas等[78]针对列车运营过程中的突发维修需求，综合考虑维修列车的安排和临时速度限制等实际因素，设计了一种混合整数线性规划模型，为运维协调提供了有效的决策支持工具；Lidén等[64]综合考虑了维修资源限制与运维协调，构建了以最小化维修作业和列车运营总成本为目标的优化模型。

虽然众多学者对运维协调优化进行了大量研究，但在客运需求日益多样化与智能化技术快速发展的背景下，既有研究仍难以完全满足运输需求。一方面，面对日益增长的夕发朝至列车与夜间列车行车需求，现有研究在列车运行与天窗开设的协调机制方面缺乏更具前瞻性和适应性的解决方案，未能充分结合智能化调度技术实现更高效的资源配置。另一方面，在智能铁路技术持续突破的趋势下，现有研究较少利用大数据、人工智能等新技术实现设备状态实时监测和预测，从而动态调整维修策略与列车运行计划，限制了运营效率和安全性的进一步提升。为满足新建、改造200 km/h客货共线铁路对列车结构与天窗设置的要求，皮雪清等[79]通过分析相关要素、梳理6条典型线路现状并总结特征，提出列车结构、天窗的单独设置策略及针对不同线路条件与运输需求的协同设置策略。然而，针对复杂多变的运行环境和突发状况，现有模型和方法在灵活性和鲁棒性方面仍有待加强。

3　结论与展望

3.1　结论

在高速铁路运维协调优化领域，现有研究已从多个层面展开深入探讨，但随着铁路建设进程加快及智能化技术创新，既有研究成果难以满足日益增长的运维一体化优化需求。基于此，通过系统梳理既有研究成果与瓶颈问题，形成以下结论。

（1）高速铁路作为现代交通系统的关键组成部分，其运营与维护涉及多利益主体与复杂要素。在单目标规划阶段，研究分别从列车运行与天窗维修2个层面展开。在列车运行方面，以提高运输效率、增强运行稳定性及提升旅客满意度为核心目标，通过协同优化减少列车延误、维持运行秩序并合理开行区段列车，实现铁路运输系统整体性能优化；在维修天窗方面，研究聚焦于保障维修作业时间、提升天窗施工效率[80]及降低维修成本[81]，通过合理规划天窗与列车运行计划，保证维修作业安全高效实施，减少对列车运行干扰并避免额外资源投入。伴随研究的逐步深入，学者开始综合考虑列车运行与维修两方需求，协同目标逐步扩展到运输效率、服务质量及维修需求等多个方面，以兼顾不同利益主体的诉求。然而，目前仍存在多目标协同机制不够完善、跨层级调度灵活性不足、绿色低碳目标缺失及智能化技术落地滞后等问题，制约着天窗资源与运输效率的全局优化。

（2）既有研究模型动态适应性欠佳，难以有效响应实时扰动与复杂场景。静态的列车运行图与天窗编制模型难以应对突发故障、临时维修等动态调整需求[66]，对客流波动、设备故障等动态场景的适配性较弱。且建模中未考虑复杂路网下多专业(工务、电务、供电)协同冲突、设备状态时变特性及人员技能差异等现实因素。尽管数字孪生等新技术已被引进以增强数据驱动能力，但在跨专业耦合建模与实时交互决策中的应用仍相对较少，针对时变情形及复杂路网下的天窗维修作业、态势推演等方面的相关研究较为匮乏。

（3）既有研究多聚焦单一线路或局部区域优化，全路网协同与特殊场景适应性仍有待加强。针对长大坡道线路[65]、高原铁路[59]等特殊线路的差异化运维协调优化模型尚处于起步阶段，且客货共线等新型运输组织模式下的通过能力缺乏系统性分析[66]。此外，固定天窗模式在应对列车晚点时容易导致运营效率下降，而柔性天窗的鲁棒性提升机制(如时段浮动、时长调整规则)尚未明确，致使维修作业在复杂运营环境下难以灵活调整。既有维修偏差研究多假设时间服从特定概率分布(如正态分布)，与实际运营环境下的动态偏离情况差异显著，难以准确反映维修作业的实际情况。

（4）既有研究在算法设计上呈现从线性规划到智能优化的发展趋势。早期因铁路网络架构相对简单、运营数据规模有限，多采用线性规划模型结合简单调度规则，并依托商业求解软件实现初步求解。随着高铁网络复杂化，约束条件激增(包括线路容量、天窗时空兼容性等多维限制)，定制化启发式算法成为主要求解方法，但大规模路网下的实时求解效率仍是关键瓶颈。近年来，机器学习增强数字孪生系统在高铁网络预测性维护中的应用开始被探索，以实现故障预测、异常检测和资源优化，然而跨域数据异构性与隐私保护机制缺失等制约了相关技术的实际落地。

3.2　展望

基于现有研究不足，后续研究在构建运维协调优化问题模型时，可依据节能减排理念设定目标，并紧扣“动态耦合、全域协同、智能驱动”三大核心方向，重点突破以下关键问题。研究展望如图6所示。

（1）面向“双碳”目标与复杂利益主体协同需求，需开发融合碳排放实时追踪的多目标优化模型。重点应对不同区域可再生能源渗透率差异导致的碳排放核算偏差，建立基于电网实时碳强度的运维全过程影响评估模型，并结合联邦学习实现跨层级目标权重的动态校准。同时，亟待建立突发事件下的弹性优先级调整机制，如极端天气下安全维修目标的自适应强化，与常态运营中运输效率–碳减排目标的深度协同，以破解固定天窗模式可能引发的迂回径路增碳问题。针对突发事件的应急决策，未来将开发分层响应框架，在战略层采用强化学习动态调整目标优先级，在战术层借助轻量化混合整数规划快速生成临时天窗方案，实现应急响应速度与全局最优性的统一。

（2）突破传统静态建模范式，提升模型对动态场景的适应性。在二维时空网络[61]模型基础上，嵌入设备健康状态监测数据(如基于故障预测与健康管理系统的实时指标)与能源消耗动态数据，构建“运行–维修–能耗”多维耦合推演模型，实现对设备状态、列车运行、能耗变化的协同预测。针对突发故障(如接触网断裂)等低概率–高影响事件，构建

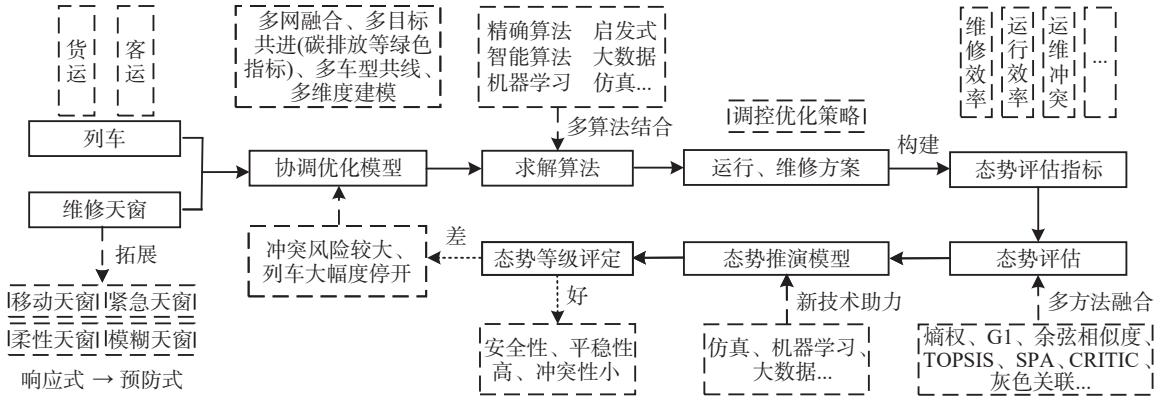

图6　研究展望

Fig.6　Overall framework of research outlook

“实时监测–数字孪生仿真–弹性约束优化–多智能体协同调度”一体化的综合应急决策体系，通过数据驱动建模与智能算法实现快速响应、精准修复与全局优化，全面提升铁路系统的应急韧性。此外，还应设计弹性天窗时长浮动机制，并采用轻量化求解器缩短应急响应时间，以平衡高铁应急决策系统鲁棒性与实时性。

（3）面对日益复杂的铁路线网和多元化的运输需求，需建立全路网多模态协同优化框架。在客货混跑场景下，需系统性分析天窗设置对不同优先级列车(如动车组列车与货运班列)的干扰效应，构建差异化通过能力评估模型。针对高原、长大坡道等特殊场景，融合地理环境参数(如海拔、坡度)与设备退化速率关联规则，研发“环境–设备–调度”一体化协同优化模型。研究还将聚焦特殊场景下的紧急维修天窗，构建动态–鲁棒混合优化框架，通过数字孪生、深度强化学习等技术实现实时响应与多目标(安全、效率、低碳)权衡。推动天窗模式从固定时段向动态、柔性及不确定(时长、时段浮动)转变，提升运行图的鲁棒性，探索动态调整策略的优化范围与结合方式，为智能调度和实时优化提供理论支撑。

（4）依托人工智能技术，高速铁路运维协调优化正经历从“经验驱动”向“数据–知识驱动”的范式转变。通过构建多智能体协同优化框架，将故障传播链预测(采用LSTM–GNN混合模型)与实时调度决策(融合强化学习与规则引擎)纳入闭环架构，实现维修方案与调度指令的全局最优。针对跨域数据异构性(如设备监测数据、列车调度数据格式差异)与数据安全问题，设计异构数据自适应聚合机制(如统一设备监测数据与调度数据格式)，升级联邦学习架构(如采用横向联邦实现跨路局数据协同)，突破多主体协作中的隐私–效率瓶颈。此外，构建自进化调度系统，战略层采用蒙特卡洛树搜索处理天窗时长不确定性，战术层通过在线优化算法(如滚动时域优化)实时调整运行图，并借助数字线程技术确保调度指令从决策层精准下达到现场设备，实现“决策–执行–反馈”闭环。

未来研究将强化基于数字孪生的运维态势推演能力，融合设备健康预测与冲突检测，实现“维修–评估–预警–调控”闭环；同时推动列车运行与维修由分管模式向运维一体化管理转变，构建多目标协同、时段时长可调的柔性天窗与智能调度体系，最终全面提升铁路系统在安全、效率与低碳目标下的智能化和可持续性水平。

参考文献：

[1] 刘　波. 双线自动闭塞电化区段接触网维修“天窗”对区间通过能力的影响[J]. 铁道运输与经济，1990，12(3)：27–28.

[2] 罗　建，彭其渊. 综合维修天窗与列车开行方案的协同优化研究[J]. 铁道运输与经济，2007，29(8)：65–67.
LUO Jian，PENG Qiyuan. Study on Collaboratively Optimizing the Coordination between Train Running Schedule and the Comprehensive Maintenance Gap[J]. Railway Transport and Economy，2007，29(8)：65–67.

[3] 陶思宇，黄树明，屈明月. 基于周期天窗的高速铁路夕发朝至列车通过能力研究[J]. 铁道运输与经济，2014，36(1)：9–13.
TAO Siyu，HUANG Shuming，QU Mingyue. Study on Carrying

Capacity of Evening-Departure & Morning-Arrival High Speed Trains Based on Periodical Maintenance Window[J]. Railway Transport and Economy，2014，36(1)：9-13.

[4] 王进勇，闫海峰，许绍兴．V型天窗对线路通过能力的影响[J]. 西南交通大学学报，2003，38(2)：196-200.
WANG Jinyong，YAN Haifeng，XU Shaoxing. Influence of V Form Skylight on Carrying Capacity of Railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2003，38(2)：196-200.

[5] 张梦涵．高速铁路列车运行图与综合维修天窗一体化优化模型与算法[D]. 北京：北京交通大学，2020.

[6] 赵丽珍，赵映莲，杨岳勤，等．高速铁路综合维修“天窗”开设形式与行车组织协调问题的研究[J]. 中国铁道科学，2002，23(2)：127-131.
ZHAO Lizhen，ZHAO Yinglian，YANG Yueqin，et al. Ways of Opening Comprehensive Maintenance Window and Its Coordination with Traffic Organization for High Speed Railway[J]. China Railway Science，2002，23(2)：127-131.

[7] 张哲铭，何世伟，李光晔，等．考虑Pareto最优的列车运行图与维修天窗协调优化[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(3)：949-958.
ZHANG Zheming，HE Shiwei，LI Guangye，et al. Coordinated Optimization of Train Timetable and Maintenance Skylight Considering Pareto Optimality[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(3)：949-958.

[8] ZHANG C T，GAO Y，YANG L X，et al. Integrated Optimization of Train Scheduling and Maintenance Planning on High Speed Railway Corridors[J]. Omega，2019，87：86-104.

[9] 宋凯文．基于车站与线路能力协调的路网天窗优化方案研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2021.

[10] 王相平，花　伟，李　博，等．基于矩型天窗下客运专线开行夕发朝至列车的可行性研究[J]. 铁道运输与经济，2007，29(11)：16-17，48.
WANG Xiangping，HUA Wei，LI Bo，et al. Feasiblity Study on Operating Sunset-Departure and Sunrise-Arrival Passenger Trains under the Rectangular Skylight[J]. Railway Transport and Economy，2007，29(11)：16-17，48.

[11] 聂　磊，胡必松，付慧伶，等．客运专线夜间行车与天窗的相互影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2010，10(5)：66-72.
NIE Lei，HU Bisong，FU Huiling，et al. Interaction Analysis between Night Train Operation and Maintenance Time on Passenger Dedicated Railway Line[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2010，10(5)：66-72.

[12] 赵凤娟．旅客导向的高速铁路列车运行调整与紧急维修协同优化[D]. 北京：北京交通大学，2023.

[13] 彭其渊，杨　奎，文　超，等．我国高速铁路夜间行车组织方法[J]. 西南交通大学学报，2015，50(4)：569-576.
PENG Qiyuan，YANG Kui，WEN Chao，et al. Organization Methods of Overnight Operation for Chinese High Speed Railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2015，50(4)：569-576.

[14] 朱绪斐．我国高速铁路夜间行车方法[J]. 交通运输工程与信息学报，2019，17(2)：98-105，114.
ZHU Xufei. Overnight Operation Methods for Chinese High Speed Railways[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2019，17(2)：98-105，114.

[15] 刘　敏，朱克非，李　博．高速铁路夜行列车开行和天窗设置优化研究[J]. 铁道运输与经济，2015，37(11)：22-25，88.
LIU Min，ZHU Kefei，LI Bo. Study on Optimization of Night Train Operation and Maintenance Window Configuration of High Speed Railway[J]. Railway Transport and Economy，2015，37(11)：22-25，88.

[16] 张　雷，熊剑春，汤轶雄，等．新型动卧列车开行与4小时综合维修天窗设置研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2020，39(2)：43-49.
ZHANG Lei，XIONG Jianchun，TANG Yixiong，et al. Operation of New High Speed Sleeper EMU Train and Setting of 4-Hour Comprehensive Maintenance Window[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)，2020，39(2)：43-49.

[17] 袁　博，李海鹰，廖正文．高速铁路动卧开行日列车运行图与维修天窗协调优化[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(4)：1309-1319.
YUAN Bo，LI Haiying，LIAO Zhengwen. Integrated Optimization on Train Timetabling and Maintenance Time for the Operation Day of High Speed Sleeper Trains[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(4)：1309-1319.

[18] 李　博．成网条件下高速铁路夕发朝至列车开行方案编制关键问题研究[D]. 北京：中国铁道科学研究院，2017.

[19] 关　禹，徐行方．高速铁路天窗设置与夕发朝至列车运行组织协调研究[J]. 综合运输，2018，40(6)：17-21.
GUAN Yu，XU Xingfang. Study on Coordinated Operation of Skylight Setting and Overnight Trains on High Speed Railway[J]. China Transportation Review，2018，40(6)：17-21.

[20] 邓洪波，万宇航，甘浩正，等. 考虑天窗位置移动影响的列车运行计划调整优化模型及算法[J]. 铁道经济研究，2025(1)：71-81.
DENG Hongbo，WAN Yuhang，GAN Haozheng，et al. Optimization Model and Algorithm of Train Operation Plan Adjustment Based on Window Position Movement[J]. Railway Economics Research，2025(1)：71-81.

[21] 石浩林. 双网融合条件下铁路天窗方案协调优化模型及算法研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2023.

[22] 石　赟，牟海波，黄志鹏，等. 考虑跨线列车的运行图与天窗一体化模型与算法[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(5)：1761-1773.
SHI Yun，MU Haibo，HUANG Zhipeng，et al. Integrated Optimization Model and Algorithm for Timetable and Maintenance Window Considering Cross-Line Trains[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(5)：1761-1773.

[23] SU Z，DE SCHUTTER B. Optimal Scheduling of Track Maintenance Activities for Railway Networks[J]. IFAC-PapersOnLine，2018，51(9)：386-391.

[24] CHEUNG B S N，CHOW K P，HUI L C K，et al. Railway Track Possession Assignment Using Constraint Satisfaction[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence，1999，12(5)：599-611.

[25] 彭其渊，朱松年，王　培. 网络列车运行图的数学模型及算法研究[J]. 铁道学报，2001，23(1)：1-8.
PENG Qiyuan，ZHU Songnian，WANG Pei. Study on a General Optimization Model and Its Solution for Railway Network Train Diagram[J]. Journal of the China Railway Society，2001，23(1)：1-8.

[26] 史　峰，黎新华，秦　进，等. 单线列车运行图铺划的时间循环迭代优化方法[J]. 铁道学报，2005，27(1)：1-5.
SHI Feng，LI Xinhua，QIN Jin，et al. A Timing-Cycle Iterative Optimizing Method for Drawing Single-Track Railway Train Diagrams[J]. Journal of the China Railway Society，2005，27(1)：1-5.

[27] 黄　鉴，彭其渊. 基于分时客运需求的客运专线列车运行图优化[J]. 铁道科学与工程学报，2012，9(6)：66-71.
HUANG Jian，PENG Qiyuan. Train Diagram Optimization of Passenger Dedicated Line Based on Passenger Transport Demand in Different Time[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2012，9(6)：66-71.

[28] CAIMI G，FUCHSBERGER M，LAUMANNS M，et al. Periodic Railway Timetabling with Event Flexibility[J]. Networks，2011，57(1)：3-18.

[29] 袁　林，吕红霞，倪少权，等. 基于效用理论的铁路综合维修天窗开设方案决策研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(9)：9-14，27.
YUAN Lin，LYU Hongxia，NI Shaoquan，et al. Decision-Making of Railway Comprehensive Maintenance Skylight Opening Plan Based on Utility Theory[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(9)：9-14，27.

[30] 校　磊，安　定. 高速铁路列车夜间开行维修天窗设置研究[J]. 铁道运输与经济，2013，35(9)：58-61，78.
XIAO Lei，AN Ding. Research on Setting up Night Maintenance Window for High Speed Railway Trains[J]. Railway Transport and Economy，2013，35(9)：58-61，78.

[31] 徐长安，倪少权，陈钉均. 基于两阶段算法的运行图与天窗协同优化[J]. 西南交通大学学报，2020，55(4)：882-888.
XU Chang'an，NI Shaoquan，CHEN Dingjun. Collaborative Optimization for Timetable and Maintenance Window Based on Two-Stage Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2020，55(4)：882-888.

[32] 穆　策，孟令云，廖正文，等. 维修天窗与列车运行图一体化编制模型[J]. 铁道科学与工程学报，2018，15(8)：2155-2162.
MU Ce，MENG Lingyun，LIAO Zhengwen，et al. Integrated Optimization Model on Maintenance Time Window and Train Timetabling[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2018，15(8)：2155-2162.

[33] BOLAND N，KALINOWSKI T，WATERER H，et al. Scheduling Arc Maintenance Jobs in a Network to Maximize Total Flow over Time[J]. Discrete Applied Mathematics，2014，163：34-52.

[34] BOLAND N，KALINOWSKI T，WATERER H，et al. Mixed Integer Programming Based Maintenance Scheduling for the Hunter Valley Coal Chain[J]. Journal of Scheduling，2013，16(6)：649-659.

[35] 关晓频，文　超. 单向隔日矩形天窗对高速铁路的适应性分析[J]. 交通运输工程与信息学报，2010，8(3)：15-21.
GUAN Xiaopin，WEN Chao. Analysis on Adaptability of Unidirectional Rectangle Skylight on Alternate Days to the High Speed Railways[J]. Journal of Transportation Engineering and Information，2010，8(3)：15-21.

[36] 赵　鹏. 双线电气化铁路综合维修“天窗”开设相关问题研究[D]. 成都：西南交通大学，2008.

[37] 侯　倩，姚树金．高铁综合维修天窗内不同行车方式的同效比较法[J]. 铁道运营技术，2013，19(1)：12-15.

[38] 张天伟，聂　磊，贺振欢．基于全线矩形天窗的高速铁路夕发朝至列车开行模式选择优化模型[J]. 铁道学报，2015，37(2)：1-9.
ZHANG Tianwei，NIE Lei，HE Zhenhuan. Optimization Model of Organization Modes Choice of Sunset-Departure and Sunrise-Arrival Train Based on Simultaneous Integrated Maintain Time on High Speed Railway[J]. Journal of the China Railway Society，2015，37(2)：1-9.

[39] 张天伟．高速铁路夕发朝至列车开行模式优化理论与方法[D]. 北京：北京交通大学，2015.

[40] 张天伟，聂　磊，路　晋．高速铁路夕发朝至列车开行模式综合比选[J]. 交通运输系统工程与信息，2014，14(4)：209-216.
ZHANG Tianwei，NIE Lei，LU Jin. Comprehensive Comparison and Selection of Operation Modes of Sunset-Departure and Sunrise-Arrival Train on High Speed Railway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2014，14(4)：209-216.

[41] 张天伟，杨晓霞，董泽生．高速铁路夕发朝至旅客列车需求分析[J]. 铁道运输与经济，2017，39(1)：61-65，87.
ZHANG Tianwei，YANG Xiaoxia，DONG Zesheng. Demand Analysis of Sunset-Departure and Sunrise-Arrival Train on High Speed Railway[J]. Railway Transport and Economy，2017，39(1)：61-65，87.

[42] ALBRECHT A R，PANTON D M，LEE D H. Rescheduling Rail Networks with Maintenance Disruptions Using Problem Space Search[J]. Computers & Operations Research，2013，40(3)：703-712.

[43] JOVANOVIĆ D，HARKER P T. Tactical Scheduling of Rail Operations：The SCAN I System[J]. Transportation Science，1991，25(1)：46-64.

[44] LUAN X J，MIAO J R，MENG L Y，et al. Integrated Optimization on Train Scheduling and Preventive Maintenance Time Slots Planning[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2017，80：329-359.

[45] 张春田．成网条件下铁路列车运行图编制与调整优化方法研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.

[46] 王艺楠，孟令云，龙思慧，等．高速铁路列车区间故障条件下列车运行调整优化模型[J]. 电气技术，2019，20(S1)：9-16.
WANG Yi'nan，MENG Lingyun，LONG Sihui，et al. An Optimization Model of Train Operation Adjustment Plan under the Condition of Train Section Failure in High Speed Railway[J]. Electrical Engineering，2019，20(S1)：9-16.

[47] 兰泽康，何世伟，黎浩东，等．考虑维修天窗和到发线数量的复线铁路列车运行图优化[J]. 北京交通大学学报，2018，42(3)：30-36.
LAN Zekang，HE Shiwei，LI Haodong，et al. Optimization for Double-Track Railway Train Timetabling Considering the Maintenance Skylight and the Number of Arrival-Departure Tracks[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2018，42(3)：30-36.

[48] QIAN M J，HUANG X，LI M L. Optimization Research of High Speed Railway EMU Utilization Schedule Based on Three-Dimensional Space-Time Network[J]. Engineering Letters，2025，33(4)：1008-1019.

[49] 张永祥．复杂典型场景下铁路列车运行图编制优化模型与算法研究[D]. 成都：西南交通大学，2020.

[50] 穆　策．列车运行图与施工天窗一体化编制模型与算法[D]. 北京：北京交通大学，2018.

[51] 杨　奎，彭其渊，鲁工圆，等．高速铁路天窗设置与夜间列车运行协调优化技术[J]. 铁道学报，2015，37(4)：1-7.
YANG Kui，PENG Qiyuan，LU Gongyuan，et al. Co-Optimization between Maintenance Curfew and Overnight Train Plan in High Speed Railway[J]. Journal of the China Railway Society，2015，37(4)：1-7.

[52] 于　婕．繁忙铁路干线施工天窗与列车运行图协同优化研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.

[53] HIGGINS A. Scheduling of Railway Track Maintenance Activities and Crews[J]. Journal of the Operational Research Society，1998，49(10)：1026-1033.

[54] BUDAI G，HUISMAN D，DEKKER R. Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities[J]. Journal of the Operational Research Society，2006，57(9)：1035-1044.

[55] FORSGREN M，ARONSSON M，GESTRELIUS S. Maintaining Tracks and Traffic Flow at the Same Time[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management，2013，3(3)：111-123.

[56] ZHANG C T，GAO Y，YANG L X，et al. Joint Optimization of Train Scheduling and Maintenance Planning in a Railway Network：A Heuristic Algorithm Using Lagrangian Relaxation[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2020，134：64-92.

[57] 王宇嘉，贾永刚，杨　桉，等．高速铁路基础设施综合维修技术规章体系构建研究[J]. 铁道运输与经济，2021，

43(12)：72-79.
WANG Yujia，JIA Yonggang，YANG An，et al. Construction of Technical Regulation System for Comprehensive Maintenance of High Speed Railway Infrastructure[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(12)：72-79.

[58] 徐长安，李晟东，陈钉均，等. 列车运行图天窗分段与衔接优化技术研究[J]. 计算机仿真，2021，38(3)：68-72，102.
XU Chang'an，LI Shengdong，CHEN Dingjun，et al. Segmentation and Connection Optimization Technique for Maintenance Window in the Train Timetable[J]. Computer Simulation，2021，38(3)：68-72，102.

[59] 邓智文，刘　斌，田志强，等. 高原铁路列车运行图与维修天窗协调优化研究[J]. 深圳大学学报(理工版)，2025，42(2)：216-225.
DENG Zhiwen，LIU Bin，TIAN Zhiqiang，et al. Coordinated Optimization Research of Train Diagram and Maintenance Window on Plateau Railway[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)，2025，42(2)：216-225.

[60] 杨　浩. 列车运行图天窗优化设置研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2021.

[61] YANG H N，NI S Q，HUO H Y，et al. Integrated Robust Optimization of Maintenance Windows and Train Timetables Using ADMM-Driven and Nested Simulation Heuristic Algorithm[J]. Transportation Research Part C：Emerging Technologies，2024，160：104526.

[62] 张天伟，梁　巍，佟　璐. 高速铁路夜行列车运行与天窗设置协同优化线性规划模型[J/OL]. 铁道学报，1-13[2025-05-17]. https：//link. cnki. net/urlid/11. 2104. U. 20240612. 1530. 002.

[63] 李雪芹，丰　伟，周　勇. 天窗期间组合列车合理开行对数的研究[J]. 铁道运输与经济，2006，28(11)：69-71.
LI Xueqin，FENG Wei，ZHOU Yong. Research on the Reasonable Number of Combined Trains in Skylight Period[J]. Railway Transport and Economy，2006，28(11)：69-71.

[64] LIDÉN T，KALINOWSKI T，WATERER H. Resource Considerations for Integrated Planning of Railway Traffic and Maintenance Windows[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management，2018，8(1)：1-15.

[65] 田志强，刘　磊，孙国锋，等. 铁路长大坡道线路考虑维修天窗设置的列车运行图优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2025，25(3)：288-298.
TIAN Zhiqiang，LIU Lei，SUN Guofeng，et al. Optimization of Train Operation Diagram Considering Maintenance Windows on Railway Lines with Long and Steep Gradients[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2025，25(3)：288-298.

[66] 刘　磊，田志强，靳欣妮，等. 高原地区客货共线铁路综合维修天窗设置研究[J]. 铁道技术标准(中英文)，2024(5)：45-52.
LIU Lei，TIAN Zhiqiang，JIN Xinni，et al. Research on the Setting of Comprehensive Maintenance Windows for Passenger and Freight Co-Line Railways in Plateau Areas[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English)，2024(5)：45-52.

[67] JI H Y，WANG R，ZHANG C T，et al. Optimization of Train Schedule with Uncertain Maintenance Plans in High Speed Railways：A Stochastic Programming Approach[J]. Omega，2024，124：102999.

[68] 高海涛. 列车运行计划调整与临时天窗一体化优化模型与算法[D]. 北京：北京交通大学，2020.

[69] YANG H N，NI S Q，HUO H Y，et al. Variable Neighborhood Search and Alternating Direction Method of Multipliers for Integrated Optimization of Maintenance Windows and Train Timetables[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2024，25(11)：16370-16391.

[70] RUDEK R. A Neighborhood Search Relaxation towards Railway Maintenance Optimization[C]//2024 28th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). Kraków，Poland：IEEE，2024：405-410.

[71] BAHRAMIAN Z，BAGHERI M. A Simulation-Based Optimization Approach for Passenger Train Timetabling with Periodic Track Maintenance and Stops for Praying[J]. Journal of Modern Transportation，2015，23(2)：148-157.

[72] MENG L Y，ZHOU X S. Robust Single-Track Train Dispatching Model under a Dynamic and Stochastic Environment：A Scenario-Based Rolling Horizon Solution Approach[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2011，45(7)：1080-1102.

[73] PENG F，KANG S，LI X P，et al. A Heuristic Approach to the Railroad Track Maintenance Scheduling Problem[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering，2011，26(2)：129-145.

[74] BRESSI S，SANTOS J，LOSA M. Optimization of Maintenance Strategies for Railway Track-Bed Considering Probabilistic Degradation Models and Different Reliability Levels[J]. Reliability Engineering & System Safety，2021，207：107359.

[75] CAETANO L F，TEIXEIRA P F. Strategic Model to Optimize

（下转第28页）