文章编号：1003-1421(2026)02-0015-14
引用格式：何国强，杨建新，向万里.铁路空车调配问题理论模型与方法研究综述[J].铁道运输与经济，2026，48(2)：15-28.
HE Guoqiang，YANG Jianxin，XIANG Wanli. Review of Theoretical Models and Methods of Railway Empty Wagon Allocation Problems[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：15-28.

铁路空车调配问题理论模型与方法研究综述

何国强[1,2]，杨建新[3]，向万里[1,4]

(1.兰州交通大学 交通运输学院，甘肃 兰州 730070；2.甘肃财贸职业学院 物流学院，甘肃 兰州 730207；3.中国铁路兰州局集团有限公司 兰州北车站，甘肃 兰州 730050；4.兰州交通大学 高原铁路运输智慧管控铁路行业重点实验室，甘肃 兰州 730070)

摘 要：铁路空车调配是货运组织的核心环节，直接影响运输效率与运营成本。基于“问题-模型-算法”三维框架，系统梳理了该领域研究进展。研究发现，空车调配主要受三大因素影响：运输网络结构特性、需求不确定性和运营成本构成，这些因素通过非线性耦合作用导致空车利用率下降。理论模型方面，确定性调配采用线性规划等经典模型，不确定性调配运用随机规划、模糊规划和鲁棒优化等方法，其中“空车-重车-班列”3层服务网络等协同优化模型为提升调配精度提供了新思路。算法层面，传统优化算法适用于小规模路网，混合智能优化算法在大规模问题中优势显著。当前研究存在不确定性研究不足、多主体协同优化不完善、碳排放核算体系不健全等局限。未来应重点突破基于鲁棒优化的空车调配不确定性应对方法、多目标协同优化技术以及绿色低碳调度策略，推动空车调配系统向可持续化发展、协同化运行和智能化决策演进。

关键词：铁路空车调配；不确定性优化；协同调度；智能算法；低碳运输
中图分类号：U292 **文献标识码**：A DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250619002

Review of Theoretical Models and Methods of Railway Empty Wagon Allocation Problems

HE Guoqiang[1,2]，YANG Jianxin[3]，XIANG Wanli[1,4]

(1. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. School of Logistics, Gansu Finance and Trade Vocational College, Lanzhou 730207, Gansu, China; 3. Lanzhoubei Station, China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China; 4. Key Laboratory of Railway Industry on Plateau Railway Transportation Intelligent Management and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Railway empty wagon allocation is a core link of freight organization and directly affects transportation efficiency and operational costs. Based on the “problem-model-algorithm” three-dimensional framework, this paper systematically reviewed the research progress in this field. The results indicate that empty wagon allocation is mainly influenced by three key factors, including characteristics of transportation network structure, demand uncertainty, and operational cost structure. These factors interact nonlinearly, resulting in decreased wagon utilization. In terms of theoretical models, deterministic allocation adopts classical models such as linear programming,

收稿日期：2025-06-19
通信作者：向万里(1978—)，男，湖南永顺人，兰州交通大学交通运输学院教授。
基金项目：中国铁路兰州局集团有限公司科研项目(LZJKY2025016)

while uncertain allocation employs methods including stochastic programming, fuzzy programming, and robust optimization. Specifically, collaborative optimization models such as the "empty wagon-loaded wagon-train service" three-layer service network provide new perspectives for improving allocation accuracy. At the algorithmic level, traditional optimization algorithms are applicable to small-scale railway networks, while hybrid intelligent optimization algorithms demonstrate significant advantages in solving large-scale problems. However, existing studies still have limitations, including insufficient research on uncertainty, imperfect multi-agent collaborative optimization mechanisms, and incomplete carbon accounting systems. Future research should focus on making breakthroughs in robust optimization-based methods for addressing uncertainty in empty wagon allocation, multi-objective collaborative optimization technologies, and green and low-carbon scheduling strategies, thereby facilitating the evolution of railway empty wagon allocation systems toward sustainable development, collaborative operation, and intelligent decision-making.

Keywords: Railway Empty Wagon Allocation; Uncertainty Optimization; Collaborative Scheduling; Intelligent Algorithm; Low-Carbon Transportation

0　引言

铁路运输作为我国交通运输体系的重要组成部分，在大宗货物运输中起着举足轻重的作用。空车调配是铁路货运组织的核心环节，空车调配的合理性直接关系到铁路运输资源的利用效率和整体运营成本[1]。自20世纪70年代起，随着运筹学理论的发展，铁路空车调配问题逐渐被学术界所关注。欧美国家在成熟的铁路网络基础上，在空车调配模型构建[2]、算法设计[3]等方面取得了丰硕成果。我国学者自20世纪90年代开始，结合我国铁路运输的特点，积极探索空车调配优化理论和方法设计[4]。随着全球贸易量的增长和铁路网络的复杂化，空车调配正面临着如何将动态变化的需求和有限的运力资源实现最优匹配的复杂挑战，同时还需兼顾客户满意度、资源节约、环境友好及与其他运输方式的协同优化等多重目标[5]。

空车调配的复杂性主要体现在3个方面：①空车的分布与需求存在着时空分布不均衡现象，比如"西煤东运""北粮南运"等格局导致空车需要长距离回空调配[6]；②铁路网络拓扑结构的复杂性，包括铁路干线、支线、站点等多个层级，空车调配需要考虑网络容量约束[7]和路径选择[8]；③空车调配的动态性[9]和不确定性[10]，空车需求易受季节变化、经济波动、突发事件等多方面因素的影响，呈现出明显的时空不均衡特性[11]。因此，空车调配本质上是一个多目标、多约束、动态优化的复杂系统工程。

从研究脉络看，空车调配早期研究主要聚焦在静态空车调配模型，比如基于运输问题的线性规划方法[12]。随着运筹学和智能优化算法的进一步发展，动态规划[13]、随机优化[14]、智能优化算法[15]等逐渐应用到空车调配问题中。近年来，随着物联网、大数据和人工智能技术的兴起，空车调配正从经验决策向着数据驱动和智能优化方向发展[16]。同时，可持续发展目标推动学者将碳排放[17]、能耗[18]等环境因素纳入空车调配的优化框架中。然而，现有研究在空车调配理论模型构建、多目标协同优化、数字化转型应用等方面仍存在很多不足。

研究围绕铁路空车调配的研究问题、建模方法和求解算法3个核心方面展开，力求全面、系统地呈现该领域的研究现状和发展趋势。在研究问题部分，根据考虑约束的不同将详细阐述空车调配中的传统空车调配问题、多约束空车调配问题、动态协同空车调配问题、不确定性空车调配问题等4个方面内容。在建模方法部分，将针对研究问题，梳理各类数学模型的构建思路，包括决策变量的选取、约束条件的设定以及优化目标的确定。在求解算法部分，将介绍各类算法的原理、特点及其在空车调配问题中的应用效果。通过对这些内容的深入分析，期望能够为此类问题后续研究提供一个清晰的脉络，并揭示当前研究中存在的不足和未来可能的研究方向。铁路空车调配问题研究历程如表1所示。

1　铁路空车调配影响因素

铁路空车调配主要受"人–机–环–管"4个维度因素的影响：人的维度方面，调度员的经验差异、专业水平高低及决策延迟通常会导致响应性方面的波动；设备维度方面，空车设备的健康状况及站点

表1　铁路空车调配问题研究历程

Tab.1　Research history of railway empty wagon allocation

时间范围	研究特征	核心问题	方法创新	典型成果
1980—2000年	单目标静态优化	车站级空车分配	匈牙利法	汤代炎(1991)[4]
	小规模路网应用	供需平衡约束下的可行解	表上作业法	Haghani(1989)[19]
2001—2010年	大规模路网优化	计算效率提升、分层调配	区段中心法振荡法	熊红云等(2002)[15]
	多因素引入	车种代用、时间窗、不确定性	遗传算法模糊规划	Powell等(2004)[20]
	动态协同初探	空重车流协同、时空网络	动态规划	张进川等(2009)[21]
2011—2020年	智能算法主导	复杂约束下的高效近似解	蚁群算法、粒子群	景　云等(2012)[22]
	精确分解方法	大规模问题求解	分解算法Lingo求解器	郑可心等(2021)[9]
	多目标协同	成本、满意度、能力均衡	多目标规划	Palander(2015)[23] Gong等(2019)[16]
2021年—	空重车流深度协同	开行方案、动车组周转	差分进化非支配排序遗传算法	吕苗苗等(2024)[24]
	鲁棒性与实时调整	不确定干扰应对	鲁棒优化实时算法	路贞贞(2024)[25] Zhang等(2025)[26]
	特殊场景应用	商品车混编、群组运行模式	多层网络模型	袁志聪等(2025)[27]

和线路通过能力，均会影响调配效率；环境维度方面，客户需求的波动性及突发天气事件会造成局间通道能力临时衰减；管理维度方面，跨局协同机制不顺畅会导致资源调配的高延迟率和高成本。这4个维度通过非线性耦合作用，造成空车利用率下降、应急调整响应滞后等系统性问题。系统梳理现有研究发现，铁路空车调配研究均基于“人–机–环–管”系统框架展开，主要围绕其中的运输网络结构特性、需求不确定性、运营成本构成3大核心问题进行研究。影响空车调配的主要因素如图1所示。

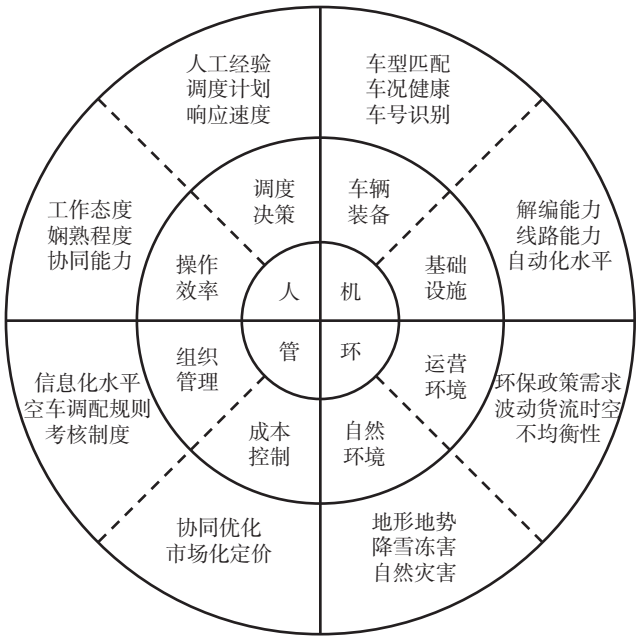

图1　影响空车调配的主要因素

Fig.1　Main factors influencing empty wagon allocation

1.1　运输网络结构特性

铁路空车调配首先受铁路物理网络结构的制约[28]。铁路站点的类型影响着空车集结和改编的效率，而站点的位置分布又决定了空车调配的路径选择。站点作业能力不足会显著影响空车调配的供需平衡，特别是在多车种混合调配[29]、时间窗约束[30]或需求不确定性[14]等复杂场景下，需要采取车种代用[31]、网络分层归并[32]或重载铁路特有的列车分解组合策略[21]来优化调配方案。合理的车站布局和等级划分能够显著减少空车在途时间和改编次数[7]。

线路通过能力对铁路空车调配具有决定性影响，其制约作用主要体现在以下3个方面。①线路通过能力不足会直接制约空车流的输送数量，导致空车积压和周转效率下降[21]；②线路通过能力的差异会影响空车调配路径的选择，增加走行距离和运输成本[33]；③线路通过能力对空车调配的决定性影响并非孤立存在，其与站点作业能力的协同配合，同样是保障空车高效周转的重要前提。这种协同优化不仅涉及线路通过能力与站点作业能力的深度耦合，还影响着空重车调配效率，需要借助时空网络建模[9]和智能优化算法[15]精准适配空重车流的时空分布规律。

1.2　需求不确定性

需求不确定直接影响调配方案的经济性和合理性。货运需求的随机波动会导致空车供需的不平衡，导致调运成本的增加和资源利用率的下降。在需求不确定情形下，传统空车调配模型很难求解出

调配方案的可行解，需结合鲁棒优化[10]、随机规划[34]或数据驱动的预测–优化方法[35]来提高方案的适应性。此外，需求波动使得装车点的空车需求难以准确预估[11]，需要结合动态调整策略[25]和机会约束规划方法[34]来应对这种不确定性。时间窗约束进一步增加了调配复杂性[36]，约78%的客户将时效可靠性作为选择铁路运输的首要考量[5]，客户对空车到达时间有明确要求，过早到达产生闲置成本，过晚则影响装车计划正常实施[37]，特别是在多式联运场景下，集装箱空箱调配需要与船舶、卡车时刻表紧密衔接[38]。

1.3　运营成本构成

空车调配的运营成本主要包括走行成本、停留成本、改编成本、车种代用成本[37]。走行成本与走行的里程直接相关，包括里程费用、中转费用等；停留成本由空车在车站等待改编或挂运产生；改编成本取决于技术作业的复杂程度；车种代用成本源于不同车种之间的替代调配费用，但该策略可缓解运力的紧张。空车走行不仅产生直接成本，还占用线路通过能力，间接影响整体路网的效率[39]。在全球应对气候变化背景下，低碳运输已成为铁路货运领域的重要发展方向，环境成本正成为不可忽视的因素[40]。单纯追求运营成本最小化可能导致环境成本增加，而过度强调环保又会使运营成本上升[41]。为实现可持续发展，需要建立多目标优化模型，平衡经济性与环保性，采用智能算法计算并找到成本效益最佳的调配方案[17]。

2　研究问题

通过对铁路空车调配影响因素的分析发现，铁路空车调配问题是一个复杂的系统工程，其复杂性主要体现在多维度耦合、动态时变性和不确定性交织的典型特征上。铁路空车调配问题的研究也经历了从简单到复杂、从静态到动态、从确定性到不确定性的演进过程。从建模难易角度分析，空车调配问题可以划分为4个层级：①传统空车调配问题，仅考虑供需平衡和最短路径，适用于早期小规模路网；②在传统空车调配问题中引入多种约束条件，如车种代用、时间窗约束等，使模型更贴近实际而求解难度进一步增加；③在空车调配中考虑了动态性，通过时空网络刻画多时段空重车流联动，实现系统级优化；④不确定性优化通过随机规划或鲁棒方法应对供需波动、作业时间不确定等现实挑战。由易到难的分类体系不仅揭示了铁路空车调配研究的理论发展脉络，更能为不同应用场景下的模型选择提供系统化指导。

2.1　传统空车调配问题

传统空车调配问题主要关注在一个固定的时间点或一个相对较长的规划周期内，根据已知的空车供给和需求情况，实现空车的最优分配。这类问题通常假设需求、供给、运输成本等参数在规划期内保持不变，不考虑时间维度上的动态变化。早期的研究多集中于静态和供需平衡问题，纪嘉伦等[42]提出重心优化法，将小规模空车调配问题视为线性规划问题，通过表上作业法求解。程学庆[43]提出多目标集成优化模型同时考虑企业经济效益最大化和货主满意度最大化，通过权重法转化为单目标线性规划。Sherali等[44]讨论了一种广泛使用的静态车队规模管理模型，该模型通常基于线性或整数规划方法，并依赖于固定时间段的平均需求数据来确定总车队规模。虽然传统空车调配问题具有结构相对简单、求解难度较低、适用于战略层面的规划等优点，但面对我国铁路网中包含数千个车站的大规模问题，这种方法的计算量较大，导致精确算法在实际应用中变得不可行。因此在实际运输组织中，常采用基于铁路局、分局、地区等级别的分层分配策略来获得可行解。

传统空车调配问题最初建立在供需严格平衡的理想假设基础上，要求各车种的空车供给与运输需求完全匹配。然而，实际铁路运输中，这种理想状态往往难以实现，不仅存在不同车种供需的结构性失衡的问题，还需满足货运需求方对时效性的严格要求。为应对这些现实挑战，学者逐步开展了车种代用约束和时间窗约束的相关研究。这一演进过程体现了铁路空车调配理论从简化假设到复杂现实问题解决的重要跨越。

2.2　多约束空车调配问题

2.2.1　车种代用约束

铁路运输中的空车具有多种类型，适用于装载不同种类的货物，如棚车、敞车、平车、罐车等。

多车种空车调配问题就是要在考虑不同车种特性和需求的前提下，实现各类空车的合理分配，以满足多样化的货运需求。传统空车调配模型往往忽略了车种的差异，将所有空车视为同质产品，这在实际应用中可能导致空车资源的浪费或某些特定需求无法满足。梁栋等[29]构建了多车种空车分配的数学模型，分析了空车类型替代对该模型的影响。曹学明等[45]将多车种空车分配问题纳入路径选择优化系统，构建基于树结构的多车种空重车流径路与空车分配协同优化模型。纪丽君等[46]考虑了区间通过能力和不同车种间替代的影响因素，将相对运行成本、车种替代成本和存储成本共同纳入目标体系，建立改进的多车种空车调配模型。王龙等[33]在构建空重车流径路优化模型时，通过加入空车类型替代，更全面地描述了铁路网络中空重车流的分配。这些研究都强调了考虑车种差异在空车调配优化中的重要性。

车种代用问题的研究，有助于实现空车资源的精细化管理，提高空车的利用效率和客户满意度。然而，如何准确地量化不同车种之间的替代关系和替代成本，如何处理大量车种带来的维度灾难问题，以及如何在动态环境下实现多车种空车的实时优化调配，仍然是需要进一步深入研究的方向。

2.2.2　时效性约束

考虑时效性的空车调配问题主要关注如何在满足空车需求时间窗口的前提下，实现空车的最优调配，以达到最小化延误成本或最大化按时到达率。传统空车调配模型往往没有充分考虑空车调配的时间效率，导致空车到达不及时或过早到达，增加额外成本。程学庆等[47]分析了早到或迟到将给铁路企业带来额外成本，以最小化空车的运输成本及时间惩罚成本为目标函数建立一个基于时间窗口和路段能力限制的空车供需平衡分配优化模型。Li 等[48]针对我国铁路系统中的空车调配服务时刻表不固定问题，考虑空车需求的时效性要求，以调配总成本最小为目标构建了整数规划模型。张进川等[21]针对重载铁路装车端的空车分布问题，定义了满意度的管辖函数来反映装车站点对空车列车到达时间的要求，以最大化装车站点的满意度和最小化空车列车的浪费时间为目标函数构建多目标模糊规划模型。李宗平等[30]提出了考虑时间约束的空车调配模型，该模型旨在减少空车走行距离，其核心方法是充分利用装车站及其邻近车站的可用空车资源，实施“以重代空”的优化调配。

考虑时效性的空车调配问题，通常需要将时间因素明确地纳入模型中，需要定义相应的时间惩罚成本，如延误成本、存储成本等，以反映不满足时效性要求所带来的损失。求解这类问题，对算法的效率和动态响应能力提出了更高的要求。通过考虑时效性，可以显著提高空车调配的服务质量，增强铁路运输的竞争力，但也增加了模型的复杂性，需要在时间和成本之间进行权衡。

以上 2 种约束既考虑代用带来的成本增加，又兼顾时间延误的惩罚费用，使空车调配模型从理想化的平衡假设，演进为能够同时解决资源错配和时效管理的实用工具，显著提升了方案的可操作性。但传统空车调配的静态特征不能适应空车资源的实时调配及货运需求的波动性。因此，动态空车调配问题的研究成为学者关注的焦点问题。

2.3　动态协同空车调配问题

动态空车调配问题充分考虑了空车供给、需求以及运输网络状态随时间的动态变化。它需要在多个连续的时间阶段内进行空车的动态调整和分配，以适应不断变化的运营环境。Sherali 等[44]提出一种基于时空网络表示的动态模型，该模型能够准确描述空车的存储和检索问题，并提供了更详细的调度信息。王龙等[49]提出了一种动态多周期优化思想，并构建了基于广义平均行驶速度的时空服务网络，以解决铁路局边界空车流出方案依赖静态方法和人工经验的局限性。Haghani[19]运用时空网络技术，将计划期内路网车站作业划分时段，各时段车站设 IN、OUT 点，以费用最小为目标构建空车分配、列车径路选择与编组计划综合优化模型。Zhang 等[50]以最小化空费时间为目标优化空车调配，将传统静态网络扩展为包含时间维度的时空网络；段刚等[36]建立了基于时间窗的重载铁路空车回送优化模型，以大秦铁路(韩家岭—柳村南)的实际数据验证了模型的正确性和有效性。张红斌等[51]结合区段及站点能力约束，建立以总收益最大的多目标动态时空网络模型，设计融合 K 短路算法的模拟退火算法。

空重车协同的动态空车调配研究也是目前的研究热点。吕苗苗等[24]建立了群组运行模式下双线重载铁路空车调配多目标优化模型，利用非支配排序遗传算法II(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II，NSGA-II)及组合分解策略减少空列空费时间，提升通道通过能力。Jing等[52]建立了最小化空重车停留时间的装车端车流组织方案优化模型。袁志聪等[27]针对我国铁路运输中空重车调配独立问题，提出“空车-重车-班列”3层服务网络，建立空重混编班列开行方案优化模型，有效提高商品车铁路运输时效、促进满轴满编、加快车辆周转。

动态空车调配问题的部分研究进一步实现了空重车运输资源的协同整合，显著提升了铁路运输系统的整体效率。但实际运营中仍面临诸多不确定因素的影响，主要包括空车需求的随机波动、空车供给的不确定性、运输时间的随机延误、线路能力的随机扰动等。传统的确定性模型难以应对这些不确定性，可能导致生成的调配方案在实际执行中效果不佳，甚至不可行。因此，考虑不确定性因素的空车调配问题成为研究的热点和难点。

2.4　不确定性空车调配问题

不确定性空车调配问题主要研究如何在不确定性环境下进行空车的合理分配，以提高调配方案的鲁棒性和可靠性。处理不确定性空车调配问题的方法主要有2大类：一类是将不确定性转化为确定性，如通过期望值、机会约束等方法；另一类是采用鲁棒优化方法，寻找在最差情况下仍能保持较好性能的方案。Zhao等[53]考虑动态时间段，基于构建的时空网络，以最小化规划期内的转移成本和存储成本为目标，构建了一个空车调配随机优化模型。雷中林等[14]提出的概率模型将空车需求处理为随机变量，通过机会约束将概率约束转化为确定性等价形式，这种方法能够在满足一定置信水平的前提下优化期望成本，提高方案的鲁棒性。刘星材等[34]对概率模型进行扩展，引入时间满意度函数，优化空车到达时刻的可靠性，提高客户满意度。陈胜波等[54]提出两阶段空车动态调配模型，第一阶段对固定需求进行优化，第二阶段对新产生的装车需求进行调整，提高方案的适应性。罗霞等[10]采用盒式不确定集描述车站作业的时间波动，构建鲁棒优化模型，使方案在时间不确定情况下仍然保持可行性。Zhang等[26]针对高速铁路网络客货混合运输中的空车调配问题，构建基于时空网络的鲁棒优化模型，开发了融合Benders分解和列约束生成策略算法，有效解决了列车车厢规划与客货流分配的协同优化问题。张喜等[55]引入知识约束概念，将专家经验转化为模糊约束条件，建立数学约束和知识约束的混合约束优化模型，该模型采用模糊量化指标策略处理空车调配中的模糊信息，如“合理流径”“适当改编次数”等定性描述。白鹏斌等[56]在车种代用模型中引入模糊随机变量来处理需求不确定性与车种适配性问题。

不确定性空车调配问题的研究，能够提高空车调配决策的科学性和适应性，减少因不确定性因素带来的损失。然而，如何准确地获取不确定性因素的概率分布，如何平衡模型的鲁棒性和经济性，以及如何设计高效的求解算法来处理大规模的随机规划模型，仍然是需要深入探讨的问题。

3　研究问题建模方法

针对铁路空车调配的各类研究问题，学者们构建了多种数学模型来描述问题的本质，明确优化目标、决策变量和约束条件，为后续的求解和决策提供基础。建模方法的选择直接影响模型的精度、复杂度和求解效率，因此，深入理解各类模型的构建思路至关重要。本节将针对上一节阐述的研究问题，详细介绍对应的建模方法。

3.1　决策变量

合理设置问题的决策变量，是正确构建空车调配数学模型的关键。通过对现有文献进行梳理发现，目前针对空车调配问题的决策变量，主要以整数变量和0-1决策变量两类为主。整数变量用来表示从某车站到另一车站的空车数量、在多时段动态调配中表示特定时空路径上的空车流量、在多车种模型中表示不同车种间的代用数量，包括了空车调配问题的绝大多数场景。0-1决策变量表示离散的二元选择，主要用于是否选择某条径路或弧段、是否在特定时段开行某列车、是否允许某车种代用另一车种、重载铁路中是否对空车列进行分解等四类场景。多位学者[10, 19, 29, 31, 50, 57]构建的车种代用及时间窗模型中，均使用了上述决策变量。现代铁路

空车调配问题往往需要考虑更多现实因素，催生了高阶决策变量的设计。协同调度变量用于处理不同车次间的衔接关系，确保车辆在换装站的有效转移。鲁棒性变量被引入以应对需求不确定性，表示各站点空车供需的正负偏差[11]。对于考虑维修计划的模型，需要引入状态变量表示车辆在站点是否处于维修状态。

3.2　约束条件

铁路空车调配问题是一个典型的多约束动态优化问题，其约束体系呈现出明显的层级递进特征：从最基础的线路通过能力和技术站作业能力等物理约束，到车种代用、优先保障约束、排空方向约束等操作规则约束，再到时空网络流平衡和空重车耦合等动态协同约束，最终延伸至机会约束和鲁棒优化等不确定性处理约束。这种“物理–规则–动态–随机”的4层约束架构，既反映了铁路运输系统的刚性物理限制，又体现了运营管理的柔性规则要求，同时通过时空网络建模将动态性和不确定性纳入统一优化框架，最终形成兼顾系统稳定性与经济性的智能调度方案。铁路空车调配问题关键约束如表2所示。

3.3　优化目标

空车调配问题的目标函数设计随着研究深入呈现出明显的动态演进特征。早期主要聚焦单目标经济性优化，以最小化空车走行里程[4]或调配费用[42]为核心；随着时间窗约束和车种代用的引入，目标函数扩展为多目标协同优化，兼顾如延误惩罚、货主满意度的时效性成本与综合收益最大化[47]；近年来，进一步强化动态性与不确定性处理，通过时空网络、随机规划和智能算法将空车供需波动、空重车流协同纳入目标体系[27]，形成以最小化广义总成本为主体，兼顾鲁棒性[10]、实时响应能力的复合目标框架。未来目标函数设计将更注重与列车开行方案、路网能力的深度耦合，并在多目标帕累托最优与计算效率间寻求平衡。

4　求解算法

铁路空车调配模型具有大规模、多约束、非线性等特点，精确算法在求解效率上往往难以满足实际需求，因此，研究和应用高效的求解算法成为铁路空车调配领域的重要课题。针对不同类型的模型和问题特性，学者们开发和应用了多种求解算法，包括精确算法、启发式算法和智能优化算法等。

4.1　传统空车调配问题求解算法

传统空车调配问题属于运输优化中的资源调度问题，核心目标是在多节点铁路网络中以最小成本或时间将空车从卸车点调配至装车点，常采用整数规划模型描述。求解算法主要包括精确算法和启发式算法2类。精确算法如线性规划[32]、整数规划[58]

表2　铁路空车调配问题关键约束

Tab.2　Key constraints in railway empty wagon allocation

约束类别	具体约束条件	传统模型	多约束模型	动态协同模型	不确定性模型	说明
基础约束	供需平衡约束	√	√	√	√*	随机需求转为概率形式
	线路容量约束	√	√	√△	√■	△分时段调整 ■鲁棒性边界
多车种约束	车种代用约束	—	√	√	√*	*代用可行性概率约束
	车种供需不平衡	—	√	√	—	考虑车型与货种匹配度
时间相关约束	时间窗约束	—	√	√	—	硬/软时间窗混合机制
	动态时效性约束	—	—	√	—	基于状态转移的时效惩罚
网络协同约束	时空网络流平衡	—	—	√	—	节点状态平衡方程
	空重车耦合约束	—	—	√	—	空重车转换系数
	技术站作业能力约束	—	—	√	√■	■考虑设备故障的鲁棒容量
不确定性约束	机会约束	—	—	—	√	需求被满足的概率高于置信水平
	鲁棒性约束	—	—	—	√	最坏情景下可行
	随机供需波动约束	—	—	—	√	基于历史数据的概率分布
特殊场景约束	装车点满意度约束	—	√	√	—	客户优先级加权
	应急物资优先权约束	—	√	—	—	战略物资保障
	列车组合/分解约束	—	—	√	—	

注：√表示基础约束形式；√*表示概率化/模糊化形式；√△表示动态调整形式；√■表示鲁棒优化形式；—表示不涉及该约束。

等，能够求得小规模路网问题的精确解。启发式算法利用经验原则和简化假设来降低问题的复杂度。在铁路空车调配的早期研究和实际应用中，传统优化算法发挥着重要作用。然而，随着问题规模的逐渐扩大和约束条件的递增，这些方法逐渐显示出自身的局限性。精确算法难以处理大规模路网问题，而启发式算法难以保证解的质量[15]。这促使学者转向更先进的智能优化算法，以在求解效率和解质量之间取得更好平衡。传统空车调配问题求解算法如表3所示。

4.2　多约束空车调配问题求解算法

多约束空车调配问题在传统空车调配问题基础上考虑了车种代用和时间窗等约束，一般采用整数规划或者混合整数规划模型进行表示，求解复杂度进一步提升。梁栋等[29]采用数值例子验证了车种代用模型的有效性，但未明确提及具体算法。范振平等[31]改进的模型同样基于整数线性规划，借助LINGO等商业软件求解小规模问题；曹学明等[45]在协同优化模型中，采用了类似分解的方法处理多车种和路径选择的复杂性。朱健梅等[61]设计了空车分配协同优化模型，并采用蚁群优化算法求解，指出该算法在空车调配问题中优于其他算法。程学庆等[47]采用LINGO软件求解整数线性规划模型，适用于包含3个供应站和4个需求站的算例。由于带时间窗的空车调配问题在大规模场景下呈现NP-hard性质，精确算法求解能力有限，因此采用启发式算法寻找满意解已成为主流且普遍的研究路径。Li等[48]设计拉格朗日松弛启发式算法，将复杂问题分解为子问题，通过松弛耦合约束，迭代求解对偶问题来获取原问题的近似最优解。陈煜等[62]设计了带时间窗的遗传算法，采用矩阵染色体结构的遗传算法，通过算例验证了算法的有效性。这些启发式算法能够在合理时间内找到满意解，满足实际运营需求。

4.3　动态协同空车调配问题求解算法

动态协同空车调配问题，在模型构建中由于引入了时间维度和空重车流协同，模型规模和复杂度显著增加，通常需要采用分解算法或智能优化算法。Sherali等[44]构建动态时空网络模型，开发基于分解的启发式算法独立求解各子问题的解，然后通过协调机制得到整个问题的近似最优解，实验证明该启发式算法能够以合理的计算量恢复所有测试问题的最优解。王龙等[49]构建基于广义平均行驶速度的时空服务网络优化模型，使用基于动态多周期优化思想的混沌粒子群优化算法求解。林柏梁等[58]构建了空车服务时空网络，并建立了铁路局下的空车多阶段优化模型，其求解思路涉及对不同阶段的问题进行序列化处理或耦合求解。曹学明等[45]提出空重车流路径及多种空车车辆配协调优化模型，首创车种代用机制，通过LINGO求解器实现不同车型间的动态替代，使空车利用率有效提升。王龙[33]在铁路网空重车流路径优化模型中完善网络化调配框架，首次实现全路网范围内的空重车流路径协同优化，降低运输成本；段刚等[36]基于时间窗的铁路重载运输空车选送优化模型，创新性提出“软硬时间窗混合惩罚机制”，通过LINGO求解器验证模型和算法有效性。

4.4　不确定性空车调配问题求解算法

不确定性空车调配问题的求解思路主要包括以下2种：①将随机模型转化为确定性等价模型，再采用相应算法求解；②采用能够处理不确定性的智能优化算法。对于较为复杂的随机规划模型，特别是当确定性等价形式不容易获得或比较复杂时，经

表3　传统空车调配问题求解算法

Tab.3　Algorithms for solving traditional railway empty wagon allocation problems

典型成果	研究方法	技术特点	适用规模
汤代炎(1991)[4]	匈牙利法	首次将运筹学方法引入空车调配	小规模
李文权等(1998)[12]	表上作业法	提出卸后空车优先利用原则	中等规模
纪嘉伦等(2001)[42]	表上作业法	在小型空车分配问题中效果良好，但无法解决复杂铁路网问题	小规模
果鹏文等(2002)[32]	振荡法	动态调整空车排空方向，迭代求解大规模路网问题	中等规模
杜艳平等(2006)[59]	蚁群算法	首次应用仿生优化算法，参数少、精度高	全路规模
梁　栋等(2007)[13]	动态规划方法	建立基于空车服务时空网络的多阶段动态规划模型，融合编组计划、运行图与日常计划等多重约束	中等规模
常　琦等(2009)[60]	混沌蚁群算法	引入混沌理论改进收敛性	全路规模

常需要借助随机模拟方法来估计目标函数值或约束条件的满足概率，并将其与遗传算法等智能优化算法相结合，这是求解此类复杂问题的有效方法。此外，鲁棒优化等方法也被用于处理特定的不确定性问题，通过设置波动率或保守度参数来平衡方案的可行性与经济性。不确定性空车调配问题求解算法对比分析如表4所示。

铁路空车调配不确定性问题研究在随机机会约束模型、多目标优化方法、鲁棒优化模型等方面已取得显著进展，这些建模理论和算法创新显著提升了车种代用效率，也进一步缩短了装车等待时间。然而，当前研究仍存在实时性不足、鲁棒性代价、扩展性局限等缺陷。未来研究需重点突破算法实时性、降低保守性代价，并提升大规模路网的适用性。

4.5　求解算法总结

空车调配算法的发展呈现出清晰的演进过程，各算法在不同发展阶段展现出独特的优势和局限性。从静态优化到动态协同，从确定性处理到不确定性应对，算法体系不断完善，形成了多层次的解决方案。在基础阶段，传统数学规划方法如匈牙利法和单纯形法为小规模静态问题提供了理论保障，但其计算效率难以应对复杂场景。随着问题复杂度的提升，智能优化算法如遗传算法和蚁群算法等通过仿生学原理实现了对大规模非线性问题的高效搜索，虽然存在早熟收敛等缺陷，但其灵活性和适应性使其成为主流选择。动态协同优化方法如时空网络流模型和多阶段规划等的引入标志着研究范式的转变，通过时空维度的扩展和空重车流的耦合建模，显著提升了方案的实用性。与此同时，随机规划和鲁棒优化这类不确定性优化方法通过概率描述和场景分析，有效应对了现实运输中的随机扰动。商业求解器的应用则体现了理论与工程的结合，在保证求解精度的同时提高了计算效率。这种算法体系的演进并非简单的替代关系，而是根据问题特征形成的互补体系，共同构建了空车调配问题的完整解决方案。未来研究将继续在算法融合、实时响应和跨网协同等方向寻求突破。

5　结论与展望

5.1　现状评述

铁路空车调配问题经过多年的研究，已经形成了较为丰富的理论体系和方法论。从研究问题来看，静态问题是基础，动态问题更贴近实际，多车种、空重车协同、不确定性和时效性是当前研究的重点和难点，它们共同构成了一个多维度、多层次的复杂问题体系。在建模方法上，从简单的线性规划模型，发展到动态时空网络模型、随机规划模型、多目标规划模型等。决策变量从单一的空车流量，扩展到考虑时间、车种、径路等多个维度。约束条件也从基本的供需平衡和容量约束，发展到包含车种替代、时间窗口、随机需求、空重车耦合等复杂约束。优化目标从单一的成本最小化，拓展到兼顾成本、客户满意度、服务时效性、系统效率等多目标优化。这些发展反映了对空车调配问题本质认识的不断深化。求解算法方面，呈现出从精确算法到启发式算法，再到智能优化算法的发展趋势。对于小规模、结构化强的问题，线性规划、表上作业法、最小费用最大流算法等精确算法仍发挥着重要作用。但对于大规模、复杂约束的实际问题，遗传算法、蚁群算法、粒子群优化算法、模拟退火算

表4　不确定性空车调配问题求解算法对比分析

Tab.4　Comparative analysis of algorithms for solving uncertain railway empty wagon allocation problems

典型成果	随机因素	建模方法	算法创新	效果提升
雷中林等(2005)[14]	需求波动	机会约束转化	标准遗传算法	运行里程下降5.43%
刘星材等(2013)[34]	车种+时间窗	多目标随机规划	和声搜索	代用成本下降32%
Zhao等(2014)[53]	动态/多阶段需求、运输与存储成本波动	时空网络整数线性规划模型	基于路径编码的遗传算法	与单阶段模型相比，总运输成本降低约30%；算法求解大规模实例(103个车站)稳定，误差小于1.52%
罗　霞等(2022)[10]	作业时间波动	鲁棒优化	CPLEX求解	效益波动小于28%
白鹏斌等(2023)[56]	站点空车供需服从随机分布	车种代用空重车协同调配随机规划模型	融合局部与全局信息素更新的改进蚁群算法	实现车种代用的敞车达1 566车，占调配重车数的61.4%
路贞贞(2024)[25]	突发需求	时空网络	遗传算法	空车利用率提升43.5%
Zhang等(2025)[26]	客货流分配	鲁棒优化	改进列约束生成算法	改善车厢与客货流分配的协同

法等启发式算法因其强大的全局搜索能力和鲁棒性而得到广泛应用。同时，分解算法、拉格朗日松弛算法等方法通过将复杂问题分解或松弛，为求解大规模问题提供了有效途径。多种算法的融合，如混合遗传算法、自适应变异粒子群算法成为提高求解性能的重要手段。

尽管铁路空车调配研究取得了丰硕成果，但在实际应用和理论深度上仍面临诸多不足与挑战。

（1）碳排放核算体系不完善。当前绿色低碳导向的空车调配研究虽已初步引入碳排放成本作为优化目标，但仍存在显著不足。核算体系不完善，现有研究多采用简化的线性碳排放因子，未考虑列车牵引能耗、空车编组方式及线路坡度等动态影响因素，导致碳足迹测算精度不足。多目标冲突协调不足，低碳目标常与经济效益、时效性形成帕累托前沿，但现有算法对权重分配依赖性强，缺乏基于实际运营数据的动态权衡机制。技术融合深度有限，新能源机车与空车调配的协同优化、光伏/储能系统在枢纽站的低碳调度应用等前沿方向尚未充分探索。

（2）多主体协同决策机制缺乏。铁路空车调配涉及多个利益主体，如不同铁路局集团公司、货运站、客户等，各主体的目标和利益可能存在冲突。现有模型多从单一决策者角度出发，缺乏考虑多主体利益协调机制。如何设计激励相容的协同决策模型和算法，实现各方共赢，是一个具有现实意义的研究课题。

（3）不确定性研究单一。现有随机规划或模糊规划模型多假设不确定性因素服从某种特定分布，但实际运营中的不确定性往往更为复杂和难以刻画，且大多数模型仅考虑单一或少数几种不确定性因素。在空车调配问题中综合考虑需求、供给、运行时间、线路能力等多种不确定性因素的耦合影响，并设计高效鲁棒的求解算法，是未来研究的重要方向。

5.2　研究展望

展望未来，铁路空车调配研究将朝着更加可持续、协同化和智能化的方向发展。

（1）绿色低碳与可持续发展。围绕构建“环境-经济-效益”协同优化体系，开展铁路空车调配面向绿色低碳可持续发展的研究，对不同部署方案的能耗、排放特征进行量化，通过建立以全生命周期考核为基础的碳足迹模型，开发多目标优化算法，将碳排放约束整合，把空车能耗、新能源汽车使用率等绿色指标增加到传统成本目标，研究提高车辆周转效率、降低无效碳排放的空重车辆协同调度机制。这一方向将突破传统的以经济性为核心的优化范式，构建涵盖“车-站-网”的多层次绿色调度体系，为铁路货运在“双碳”目标下的可持续发展提供智慧决策支撑。

（2）多目标协同与效益共享。深入研究空重车流、多车种、多主体间的协同优化问题，构建考虑经济效益、社会效益、环境效益的多目标优化模型。同时，探索基于博弈论或合作对策论的效益共享机制，设计激励机制促进各主体积极参与协同调配，实现整体最优和个体最优的统一。

（3）多重不确定性空车调配研究。鲁棒优化能够有效处理多重不确定性问题的关键在于其独特的数学建模框架和求解策略。通过构建包含多种不确定性因素的不确定集合，并借助智能算法自动优化集合边界参数，鲁棒优化可以在不依赖精确概率分布的情况下，同时考虑多个不确定性源的相互影响。采用分层或多阶段优化框架分离确定性和不确定性问题，结合机器学习技术实现方案的动态调整与自我优化，既保证了方案的可行性又提高了计算效率。将物联网实时数据采集技术、深度神经网络预测及鲁棒优化理论应用到多重不确定性空车调配问题研究中，可构建具有自主进化能力的决策模型，实现分钟级的方案动态调整，显著提升复杂运输环境下的系统适应性。

参考文献：

[1] CRAINIC T G. Service Network Design in Freight Transportation[J]. European Journal of Operational Research，2000，122(2)：272-288.

[2] MISRA S C. Linear Programmings of Empty Wagon Disposition[J]. Rail International，1972，3(3)：151-180.

[3] DEJAX P J，CRAINIC T G. Survey Paper：A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation[J]. Transportation Science，1987，21(4)：227-248.

[4] 汤代炎. 空车调配方案的确定：匈牙利法的一个应用[J]. 长沙铁道学院学报，1991(4)：20-25.
TANG Daiyan. Determination of the Empty Wagon Deployment

Scheme: An Application of Hungary Method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 1991(4): 20-25.

[5] ZHANG Z W, LI X H. An Optimization Model of Railway Empty Container Allocation Based on Customer Satisfaction[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 308: 04001.

[6] BOJOVIC N. Application of Optimization Techniques to the Railroad Empty Car Distribution Process: A Survey[J]. Yugoslav journal of operations research, 2000, 10(1): 63-74.

[7] MALOVETSKAYA E V, BOLSHAKOV R S, DIMOV A V, et al. Planning of Qualitative Indexes of Railroad Operational Work in Polygon Technologies[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 760(1): 012041.

[8] 钟庆伟，庾映雪，田金玉，等. 严重干扰下考虑空车调拨的动车组运用计划实时调整方法[J]. 铁道运输与经济，2025，47(1)：82-91，101.
ZHONG Qingwei, YU Yingxue, TIAN Jinyu, et al. Real-Time Train Set Operation Adjustment Considering Empty Car Scheduling under Severe Disturbances[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(1): 82-91, 101.

[9] 郑可心，宋　瑞，李光晔. 基于时空网络的铁路空车调配动态优化模型[J]. 交通信息与安全，2021，39(2)：145-152.
ZHENG Kexin, SONG Rui, LI Guangye. An Optimization Model of Dynamic Allocation of Empty Railway Cars Based on Time-Space Network[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(2): 145-152.

[10] 罗　霞，胡剑鹏，甘易玄. 基于鲁棒接续时间的铁路空车调运优化[J]. 西南交通大学学报，2022，57(1)：55-64，82.
LUO Xia, HU Jianpeng, GAN Yixuan. Optimization on Railway Empty Wagon Allocation Based on Robust Connecting Time[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(1): 55-64, 82.

[11] DAI Q, YANG J Q. A Distributionally Robust Chance-Constrained Approach for Modeling Demand Uncertainty in Green Port-Hinterland Transportation Network Optimization[J]. Symmetry, 2020, 12(9): 1492.

[12] 李文权，杜　文. 优化空车调配问题的数学模型[J]. 系统工程理论与实践，1998，18(10)：109-112.

[13] 梁　栋，林柏梁. 铁路空车调配的多阶段策略优化模型研究[J]. 铁道学报，2007，29(1)：1-6.
LIANG Dong, LIN Boliang. Research on the Multi-Stage Optimization Model of Empty Railcar Distribution[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(1): 1-6.

[14] 雷中林，何世伟，宋　瑞，等. 铁路空车调配问题的随机机会约束模型及遗传算法[J]. 铁道学报，2005，27(5)：1-5.
LEI Zhonglin, HE Shiwei, SONG Rui, et al. Stochastic Chance-Constrained Model and Genetic Algorithm for Empty Car Distribution in Railway Transportation[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(5): 1-5.

[15] 熊红云，鲁五一，温红艳. 铁路空车调配问题的遗传启发算法[J]. 中国铁道科学，2002，23(4)：118-121.
XIONG Hongyun, LU Wuyi, WEN Hongyan. Hereditary Heuristic Algorithm for Empty Car Distribution in Railway Transportation[J]. China Railway Science, 2002, 23(4): 118-121.

[16] GONG D Q, TANG M C, XUE G, et al. Multi-Objective Cluster Intelligent Algorithms for Railway Door-to-Door Transportation Routing Design[J]. IEEE Access, 2019, 7: 146702-146723.

[17] 朱宇婷，余明月，杨　扬，等. “公转铁”政策背景下考虑经济和环境效益的铁路差异化补贴决策研究[J]. 北京交通大学学报，2025，49(1)：80-89.
ZHU Yuting, YU Mingyue, YANG Yang, et al. Decision-Making on Differentiated Railway Subsidies Considering Economic and Environmental Benefits in the Context of the “Road to Rail” policy[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(1): 80-89.

[18] DING Y, BAI Y, ZHOU F M, et al. Energy-Efficient Freight Train Operation Guide System for Diesel Locomotives[C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics. July 10-12, 2011. Beijing, China. IEEE, 2011: 548-553.

[19] HAGHANI A E. Formulation and Solution of a Combined Train Routing and Makeup, and Empty Car Distribution Model[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1989, 23(6): 433-452.

[20] POWELL W, RUSZCZYŃSKI A, TOPALOGLU H. Learning Algorithms for Separable Approximations of Discrete Stochastic Optimization Problems[J]. Mathematics of Operations Research, 2004, 29(4): 814-836.

[21] 张进川，杨　浩，魏玉光. 重载铁路装车端空车配送模型[J]. 中国铁道科学，2009，30(4)：113-117.
ZHANG Jinchuan, YANG Hao, WEI Yuguang. Model of Empty Car Distribution in the Loading End of Heavy Haul Railway[J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 113-117.

[22] 景　云，何世伟，宋　瑞，等. 基于云免疫克隆算法的空车动态优化问题[J]. 吉林大学学报(工学版)，2012，42(S1)：261-265.

[23] PALANDER T. Applying Dynamic Multiple-Objective Optimization in Inter-Enterprise Collaboration to Improve the Efficiency of Energy Wood Transportation and Storage[J]. Scandinavian Journal of Forest Research，2015，30(4)：346-356.

[24] 吕苗苗，王一博，耿敬春，等. 群组运行模式下双线重载铁路空车调配方法研究[J]. 铁道学报，2025，47(9)：14-22.
LYU Miaomiao，WANG Yibo，GENG Jingchun，et al. Research on Empty Train Allocation Methods in Double-Track Heavy-Haul Railways under Group Operation Mode[J]. Journal of the China Railway Society，2025，47(9)：14-22.

[25] 路贞贞. 列车分解情形下重载铁路回空列车运行调整研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(9)：66-74.
LU Zhenzhen. Empty Train Operation Adjustment of Heavy-Haul Railway under Train Decomposition Scenario[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(9)：66-74.

[26] ZHANG C T，XU Z，YANG L X，et al. Robust Train Carriage Planning for Mixed Transportation of Passengers and Uncertain Freights in a High Speed Railway Network[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2025，196：103216.

[27] 袁志聪，李海鹰，张　娜，等. 基于多层服务网络的铁路商品车空重混编班列开行方案优化方法[J]. 铁道学报，2025，47(5)：12-21.
YUAN Zhicong，LI Haiying，ZHANG Na，et al. Route and Schedule Optimization Method for JSQ Empty-Loaded Mixed Trains with Multilevel Service Network[J]. Journal of the China Railway Society，2025，47(5)：12-21.

[28] LI H D，HE S W，SONG R. Synthetic Optimization of Train Formation Plan and Layout of Technical Service Station[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2010，34(6)：30-34，39.

[29] 梁　栋，林柏梁，严贺祥，等. 车种代用情况下的铁路空车调配研究[J]. 铁道学报，2005，27(4)：1-5.
LIANG Dong，LIN Boliang，YAN Hexiang，et al. Study of Railway Empty Car Distribution with Substitution of Empty Car Types[J]. Journal of the China Railway Society，2005，27(4)：1-5.

[30] 李宗平，夏剑锋. 基于时间约束的铁路空车调配模型与算法[J]. 西南交通大学学报，2005，40(3)：361-365.

[31] 范振平，梁　栋，林柏梁，等. 车种代用情况下的空车调配模型的改进[J]. 中国铁道科学，2007，28(6)：109-112.
FAN Zhenping，LIANG Dong，LIN Boliang，et al. Improvement of the Empty Car Distribution Model with Substitution of Car Types[J]. China Railway Science，2007，28(6)：109-112.

[32] 果鹏文，林柏梁，余　洋. 大规模路网上空车调配的区段中心优化法[J]. 中国铁道科学，2001，22(2)：122-128.
GUO Pengwen，LIN Boliang，YU Yang. The Section Center Optimization Method of Empty Car Adjustment on Large-Scale Railway Network[J]. China Railway Science，2001，22(2)：122-128.

[33] 王　龙，马建军，林柏梁，等. 铁路网重空车流径路整体优化模型[J]. 北京交通大学学报，2014，38(6)：12-18.
WANG Long，MA Jianjun，LIN Boliang，et al. Optimal Route Choice Model for Loaded and Empty Car Flows in Railway Network[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2014，38(6)：12-18.

[34] 刘星材，何世伟，孙　杨，等. 基于时间满意度的铁路枢纽空车调配随机机会约束模型及算法研究[J]. 铁道学报，2013，35(9)：1-6.
LIU Xingcai，HE Shiwei，SUN Yang，et al. Stochastic Chance-Constrained Model and Algorithm for Empty Car Distribution at Railway Terminals in Consideration of Time Satisfaction[J]. Journal of the China Railway Society，2013，35(9)：1-6.

[35] 徐　能，徐文丞，李艳英，等. 基于数据驱动的铁路集装箱空箱调配优化框架设计[J]. 铁道运输与经济，2025，47(2)：6-14.
XU Neng，XU Wencheng，LI Yanying，et al. Data-Driven Optimization Framework of Empty Railway Container Repositioning[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(2)：6-14.

[36] 段　刚，陈　莉，李引珍，等. 基于时间窗的铁路重载运输空车回送优化[J]. 中国管理科学，2015，23(S1)：285-290.

[37] 王利华，张占军. 铁路空车调整综合优化模型[J]. 铁道运输与经济，2005，27(8)：69-71.
WANG Lihua，ZHANG Zhanjun. Comprehensively Optimized Model for Railway Empty Wagon Adjustment[J]. Railway Transport and Economy，2005，27(8)：69-71.

[38] CHEN X，ZHU X N，ZHOU Q J，et al. Game-Theoretic

Comparison Approach for Intercontinental Container Transportation: A Case between China and Europe with the B&R Initiative[J]. Journal of Advanced Transportation, 2017, 2017(1): 3128372.

[39] YE Y P, WANG H, ZHANG X N, et al. Joint Optimization of Road Classification and Road Capacity for Urban Freight Transportation Networks[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146(10): 04020122.

[40] LI S Y, ZHANG D Z, LIU X H, et al. Research on Multiple-Mode Freight Transport Flow Assignment Optimization with Consideration of Carbon Emissions Cost[C]//CICTP 2014. Changsha, China: American Society of Civil Engineers, 2014: 2883-2893.

[41] 任福民, 黄定仪, 杨月芳, 等. 铁路运输业碳排放的评定方法[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(3): 62-69.
REN Fumin, HUANG Dingyi, YANG Yuefang, et al. Carbon Emission Assessment in Railway Transportation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(3): 62-69.

[42] 纪嘉伦, 林柏梁, 李福志, 等. 用重心优化方法求解铁路网上空车调配问题[J]. 铁道学报, 2001, 23(3): 109-113.
JI Jialun, LIN Boliang, LI Fuzhi, et al. Distribution of Empty Wagons on Railway Network by Using the Center-of-Gravity-Optimization Method[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(3): 109-113.

[43] 程学庆. 铁路空车调配综合优化模型及求解[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(6): 115-119.
CHENG Xueqing. Integrated Optimization Model and Solution for Railway Empty Car Allocation[J]. China Railway Science, 2012, 33(6): 115-119.

[44] SHERALI H D, TUNCBILEK C H. Static and Dynamic Time-Space Strategic Models and Algorithms for Multilevel Rail-Car Fleet Management[J]. Management Science, 1997, 43(2): 235-250.

[45] 曹学明, 王喜富, 林柏梁. 重空车流径路及多车种空车调配协同优化模型[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 114-118.
CAO Xueming, WANG Xifu, LIN Boliang. Collaborative Optimization Model of the Loaded & Empty Car Flow Routing and the Empty Car Distribution of Multiple Car Types[J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 114-118.

[46] 纪丽君, 林柏梁, 乔国会. 基于路网的多车种空车调配优化方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2008, 30(7): 85-87, 91.
JI Lijun, LIN Boliang, QIAO Guohui. Research on Optimization of Multi-Type Empty Car Distribution Based on Railway Network[J]. Railway Transport and Economy, 2008, 30(7): 85-87, 91.

[47] 程学庆, 蒲　云. 基于货主满意度的模糊空车调配模型的研究[J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(11): 71-73.

[48] LI S D, LV H X, WANG Y Y, et al. Empty Car Distribution Considering Timeliness Requirement at Chinese Railways[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2021, 147(10): 04021069.

[49] 王　龙, 马建军, 林柏梁, 等. 全路空车动态调配及路网分界口排空流量测算方法[J]. 铁道学报, 2015, 37(6): 1-9.
WANG Long, MA Jianjun, LIN Boliang, et al. Dynamic Empty Car Distribution for the Whole Rail System and Calculation for Empty Car Flow Discharged over Network Boundaries[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(6): 1-9.

[50] ZHANG J C, YANG H, WEI Y G, et al. The Empty Wagons Adjustment Algorithm of Chinese Heavy-Haul Railway[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2016, 89: 91-99.

[51] 张红斌, 董宝田, 孙远运. 基于能力约束的多车种空车动态调整方法[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(6): 50-56.
ZHANG Hongbin, DONG Baotian, SUN Yuanyun. Multi-Type Empty Car Dynamic Distribution Method Based on Capacity Constraints[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(6): 50-56.

[52] JING Y, ZHANG Z H. RETRACTED ARTICLE: A Study on Car Flow Organization in the Loading End of Heavy Haul Railway Based on Immune Clonal Selection Algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(5): 1455-1465.

[53] ZHAO C, YANG L X, LI S K. Allocating Freight Empty Cars in Railway Networks with Dynamic Demands[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014, 2014(1): 349341.

[54] 陈胜波, 何世伟, 刘星材, 等. "实货制" 下铁路空车动态调配两阶段优化模型与算法研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 1-8.
CHEN Shengbo, HE Shiwei, LIU Xingcai, et al. Study on Two-Phase Optimization Models and Algorithms for Empty Railcar Dynamic Distribution Based on "Real Freight System"[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(5): 1-8.

[55] 张　喜, 张全寿. 基于知识约束的空车调整优化方法研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(6): 14-20.
ZHANG Xi, ZHANG Quanshou. Study on the Optimization

Method of Empty Wagon Distribution Based on Knowledge Constraints[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(6): 14-20.

[56] 白鹏斌，魏玉光，刘柄全. 基于车种代用的铁路网空重车调配优化研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(3)：38-43.
BAI Pengbin, WEI Yuguang, LIU Bingquan. Research on Optimal Adjustment of Empty and Loaded Cars in Railway Network Based on Car Type Substitution[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(3): 38-43.

[57] 曹学明，林柏梁. 基于滞留费用的空车调配优化方法[J]. 铁道学报，2007，29(4)：18-22.
CAO Xueming, LIN Boliang. An Optimization Method for Distribution of Empty Cars Based on Stock Cost[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(4): 18-22.

[58] 林柏梁，王振宇，钟文健，等. 铁路空车动态调配优化[J]. 铁道学报，2024，46(12)：22-29.
LIN Boliang, WANG Zhenyu, ZHONG Wenjian, et al. Optimization of Dynamic Distribution of Empty Railcars[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(12): 22-29.

[59] 杜艳平，尹晓峰，刘春煌. 采用蚁群算法求解铁路空车调整问题[J]. 中国铁道科学，2006，27(4)：119-122.
DU Yanping, YIN Xiaofeng, LIU Chunhuang. Solving Railway Empty Cars Adjustment Problem by Ant Colony System Algorithm[J]. China Railway Science, 2006, 27(4): 119-122.

[60] 常　琦，崔　莉，解兴申，等. 混沌蚁群算法在空车调整问题中的应用[J]. 铁路计算机应用，2009，18(4)：8-10.
CHANG Qi, CUI Li, XIE Xingshen, et al. Application of Chaos Ant Colony Optimization Algorithm in Railway Empty Wagon Adjustment Problem[J]. Railway Computer Application, 2009, 18(4): 8-10.

[61] 朱健梅，谭云江，闫海峰. 铁路空车调整优化模型及其蚁群算法[J]. 交通运输工程与信息学报，2006，4(3)：8-15.
ZHU Jianmei, TAN Yunjiang, YAN Haifeng. Model and Ant Colony Optimization Algorithms for Railway Empty Wagon Distribution[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2006, 4(3): 8-15.

[62] 陈　煜，张　喜. 带时间窗空车调整问题的遗传算法研究[J]. 铁路计算机应用，2007，16(2)：4-7.
CHEN Yu, ZHANG Xi. Stand on Hereditary Algorithm of Railway Empty Wagons Distribution with Time Windows[J]. Railway Computer Application, 2007, 16(2): 4-7.

(责任编辑　汪沁萱)

(上接第14页)

Railway-Track Renewal Operations at a Network Level[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2016, 22(2): 04016002.

[76] BUURMAN B, GKIOTSALITIS K, VAN BERKUM E C. Railway Maintenance Reservation Scheduling Considering Detouring Delays and Maintenance Demand[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2023, 25: 100359.

[77] D'ARIANO A, MENG L Y, CENTULIO G, et al. Integrated Stochastic Optimization Approaches for Tactical Scheduling of Trains and Railway Infrastructure Maintenance[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 127: 1315-1335.

[78] ARENAS D, PELLEGRINI P, HANAFI S, et al. Timetable Rearrangement to Cope with Railway Maintenance Activities[J]. Computers & Operations Research, 2018, 95: 123-138.

[79] 皮雪清，赵　军，郑　可，等. 200 km/h客货共线铁路列车结构与天窗设置策略研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(9)：75-86.
PI Xueqing, ZHAO Jun, ZHENG Ke, et al. Train Structure and Maintenance Window Setting Strategies for 200 km/h Mixed Passenger and Freight Railway Lines[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(9): 75-86.

[80] 廖延婷，陈钉均，邓洪波，等. 基于天窗基本单元的编组站天窗方案优化研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(4)：1-8，18.
LIAO Yanting, CHEN Dingjun, DENG Hongbo, et al. Optimization Model for Maintenance Window Design of Marshalling Yard Based on Basic Maintenance Window Unit[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(4): 1-8, 18.

[81] LIU G H, LIU L, LI Q, et al. Reliability-Centered Maintenance Scheduling Optimization for High Speed Railway Facilities with Multi-Level Tasks[C]//The Proceedings of the 11th International Conference on Traffic and Transportation Studies. Singapore: Springer, 2025: 51-60.

(责任编辑　金　晶)