



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308605

引用格式:易奎,张雨乐,庄夏,等.民航车辆调度现状分析及发展趋势综述[J].科学技术与工程,2024,24(36):15321-15333.

Yi Kui, Zhang Yule, Zhuang Xia, et al. Review of the analysis of current situation and research on development trends of civil aviation vehicle dispatch[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(36): 15321-15333.

## 交通运输

# 民航车辆调度现状分析及发展趋势综述

易奎<sup>1</sup>, 张雨乐<sup>1,2</sup>, 庄夏<sup>2\*</sup>, 付文<sup>1</sup>, 王泽潭<sup>2</sup>

(1. 中国民用航空局第二研究所, 成都 610000; 2. 中国民航飞行学院计算机学院, 广汉 618307)

**摘要** 随着机场航班流量的持续攀升,航班正点率成为社会各界广泛关注的焦点,而机场地勤特种车辆的高效调度在其中扮演着举足轻重的角色。鉴于机场独有的复杂环境和动态变化的航班需求,民航车辆调度面临着前所未有的挑战:动态航班信息的不确定性要求调度系统具备极高的灵活应变与实时响应能力;同时,面对多样化的地勤作业任务与特种车辆类型,如何实现这些车辆之间的精准协调与高效配置,成为亟待解决的问题。将全面分析总结近年发表的关于车辆调度的文献,针对公共交通中的车辆调度和机场特种车的调度,从调度模型构建以及算法优化两方面展开综述,并对其中存在的关键问题和未来发展趋势进行分析与展望。随着人工智能和大数据技术的快速发展,未来的机场地勤特种车辆调度将更趋向于智能化和自动化。

**关键词** 机场特种车辆; 车辆调度; 调度模型; 未来发展趋势

中图分类号 U491;

文献标志码 A

## Review of the Analysis of Current Situation and Research on Development Trends of Civil Aviation Vehicle Dispatch

YI Kui<sup>1</sup>, ZHANG Yu-le<sup>1,2</sup>, ZHUANG Xia<sup>2\*</sup>, FU Wen<sup>1</sup>, WANG Ze-tan<sup>2</sup>

(1. Second Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610000, China;

2. School of Computer Science, Civil Aviation Flight School of China, Guanghan 618307, China)

**[Abstract]** As airport flight traffic continues to rise, on-time performance has been identified as a focal point of widespread attention. The efficient scheduling of airport ground support vehicles has a crucial in this regard. Due to the unique and complex environment of airports and the dynamically changing flight demands, unprecedented challenges are faced in ground vehicle scheduling; the uncertainty of dynamic flight information necessitates that the scheduling system possesses a high degree of flexibility and real-time responsiveness. Additionally, given the diversity of ground support tasks and vehicle types, the achievement of precise coordination and efficient allocation of these vehicles has become a pressing issue. A comprehensive review of recent literature on vehicle scheduling was provided, with a focus on both public transportation and airport ground vehicle scheduling. The construction of scheduling models and optimization algorithms was explored, while key challenges were analyzed and future development trends in this field were discussed. With the rapid development of artificial intelligence and big data technologies, the scheduling of airport ground support special vehicles in the future will increasingly trend towards intelligence and automation.

**[Keywords]** airport specialized vehicles; vehicle scheduling; dispatch algorithms; development trends

航班正点率、航空安全、航班延误处理机制、航班的载运率等是衡量民航运输质量的重要指标<sup>[1]</sup>,随着日益增长的航空运输需求,航班延误现象变得越来越普遍,导致航班正点率降低<sup>[2]</sup>。而根据民航相关部门统计数据表明,地勤特种车辆的调度失误是导致飞机航班延误的一个重要原因。合理调度地勤保障特种车辆,尽量避免因地勤特种车辆调度

失误造成航班延误是机场地勤保障工作的重要目标之一<sup>[3]</sup>。机场调度是机场管理的核心组成部分,因此,优化地面服务车辆调度对于提高航空运输服务质量和保障航班正点率极为重要,机场车辆调度优化也受到越来越研究人员的关注。

现有普通车辆路径问题的研究成果,不能直接用来解决机场特种车辆调度问题,需要针对机场环境特

收稿日期: 2023-11-03; 修订日期: 2024-10-15

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1600500); 四川省科技项目(2023YFG0171)

第一作者: 易奎(1992—),男,汉族,四川宜宾人,博士(后),副研究员。研究方向: 民航无人系统建模与控制。E-mail: yikui@caacsri.com。

\* 通信作者: 庄夏(1980—),男,汉族,四川广汉人,硕士,教授。研究方向: 计算机网络。E-mail: zhuangxia@cafuc.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

点进行改进与优化<sup>[4-6]</sup>。因为与公共交通中的车辆调度相比,机场特种车调度存在航班动态性、特种车辆种类繁多、机场航班密集等问题。航班动态性指航班到达和离开机场的不确定性,航班计划可能会因天气、航班调整等原因而发生变化。这种动态性要求特种车辆调度系统具有高度的灵活性,能够随时调整特种车辆的调度方案,以适应航班计划的变化。

公共交通系统通常涉及多种交通工具(如公交车、地铁、轻轨等)<sup>[7-10]</sup>,而机场特种车调度主要涉及多种特种车辆类型,如物流车、摆渡车、油罐车等。这些特种车辆具有特定的功能和服务需求,需要针对其特点进行合理调度,调度方式不合理极易影响航班的正常运行,甚至造成大面积航班延误。此外,机场特种车调度任务主要依赖人工操作,随着民航的快速发展,基于人工经验的低效调度模式成为许多机场的瓶颈。导致了飞行延误并增加燃料消耗,容易因人为因素引发调度事故<sup>[11]</sup>。随着智能交通和智慧网联技术的快速发展,无人驾驶技术及自动化管理的引入,对无人驾驶汽车智能调度也成为当前的研究热点<sup>[12-14]</sup>。此外,在提倡绿色环保城市的理念下,零污染、低噪声的纯电动汽车也引起众多学者的关注,电动汽车的调度问题<sup>[15-19]</sup>也成为当前该领域的又一个热点问题。

基于车辆调度的特点,现有研究主要从研究对象、调度模型<sup>[20-23]</sup>、优化方法<sup>[24-26]</sup>、实现方法<sup>[27-29]</sup>等方面进行改进优化。基于车辆调度的相关文献,针对调度模型构建以及算法优化两方面展开综述,对现有研究存在的问题进行总结的基础上,探讨民航车辆的调度的现存问题和未来发展趋势。

## 1 车辆调度现状

车辆调度问题可以分为两大类,一类是车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP),一类是车辆调度问题(vehicle scheduling problem, VSP)。两者的混合就是一种带时间窗约束的车辆路径优化问题<sup>[27-30]</sup>(vehicle routing problems with time windows, VRPTW)。车辆调度问题可以描述为规划组织目标车辆在出发点和一系列任务点之间的行驶路线,使目标车辆能够按照一定的顺序通过这些点,在满足一定约束条件下达到某一优化目标。表1<sup>[4-10, 12-19, 21-29]</sup>为目前开展车辆调度研究的国家和研究机构。

### 1.1 有人驾驶的车辆调度

车辆调度是公共交通规划过程中的关键步骤,它决定了所需的车辆数量,并且与固定成本和劳动力成本直接相关。VRP问题在1959年首次被提出,并通过推广旅行商问题来研究卡车调度<sup>[30]</sup>。此

后,车辆调度开始成为一个研究热点。Clarke等<sup>[31]</sup>在VRP模型的基础上引入新的限制,为问题找到一个新的解决方案。Hassold等<sup>[32]</sup>针对多车型车辆调度问题(multiple vehicle types vehicle scheduling problem, MVT-VSP)提出一种新方法,该方法基于最小成本网络流模型,在车队规模固定的情况下,利用单条公交线路的帕累托最优时刻表集,进行多车型车辆调度。Li<sup>[33]</sup>将基于强化学习的算法(deep Q-network, DQN)集成到基于代理的自动出租车车队模型中,并使用真实世界规模的模拟对DQN算法进行了评估,得出DQN是所有近似调度方法中最有效的调度方法的结论。此外,学者们还对特定城市公共交通系统的车辆调度问题进行了深入研究, Baita等<sup>[34]</sup>研究了梅斯特市(意大利威尼斯)城市公共交通系统的车辆调度问题(VSP)的实例,为解决实际问题提供了有益洞见。这些研究和探索为今后进一步优化车辆调度算法和解决实际交通问题提供了有力的指导和启示。

随着民航业的快速发展,越来越多的学者开始对民航车辆的调度问题进行研究。与公共交通中的车辆调度问题不同的是,机场航班计划是动态变化,存在着一定随机性,因此需要动态的调整机场车辆的调度方案。

### 1.2 无人驾驶车辆调度

近年来,交通事故频频发生,事故背后的原因是缺乏驾驶知识、驾驶和饮酒以及车辆中的娱乐系统等干扰因素<sup>[35-37]</sup>。并且驾驶员失误是道路交通事故常见原因之一,而无人驾驶汽车能较好的解决这类问题。随着全球化和人工智能的发展,现有交通系统中逐渐开始引入无人驾驶技术,无人驾驶汽车也逐渐应用于网约车、货物配送和公交车等一些简单的生活场景<sup>[38-40]</sup>。

Yu等<sup>[41]</sup>研究了电动自动驾驶网约车的运营规划问题,将该问题建模为马尔可夫决策过程(Markov decision process, MDP),考虑车辆调度、搬迁和充电决策,以生成最大化总利润的最优策略,为网约车运营规划问题提供了重要指导方针。Wu等<sup>[42]</sup>研究了无人卡车货运问题,考虑了现有交通网络中无人卡车车道的预留,为每个任务设计了预留路径,并构建了整数线性规划模型,以最小化预留车道的负面影响。Zhang等<sup>[43]</sup>建立露天矿无人车多目标智能调度模型,并使用人工智能算法和基于分解的约束支配原理遗传算法来求解模型,证明了该算法提供了多目标模型的最佳整体性能结果。Lin等<sup>[44]</sup>研究了无人车的应急调度,使用基于Dijkstra算法寻求最短路径,并设计了应急调度模块

表1 中外主要研究机构研究内容汇总<sup>[4-10,12-19,21-29]</sup>Table 1 Summary of research content from major domestic and foreign research institutions<sup>[4-10,12-19,21-29]</sup>

序号	国家	年份	研究机构	研究对象	调度模型	优化方法	实现方法	备注
1	美国	2017	密苏里科技大学 <sup>[17]</sup>	电动汽车	电池退化成本和客户充电成本模型	混合算法	实验	电动汽车多目标优化
		2019	哈尔滨工业大学 <sup>[7]</sup>	高速公路巡逻车	高速公路巡逻车巡逻路径模型	混合算法	实验	高速公路巡逻车巡逻
		2020	北京交通大学 <sup>[16]</sup>	电动汽车	多车型电动汽车调度模型	启发式算法	实验	多车型电动汽车调度
		2020	北京航空航天大学 <sup>[12]</sup>	半自动驾驶公交车	车辆调度优化模型	启发式算法	仿真	公交运营效率
		2021	天津工业大学 <sup>[22]</sup>	机场加油车	机场加油车调度模型	启发式算法	仿真	机场加油车调度
		2022	武汉理工大学 <sup>[5]</sup>	应急配送车辆	应急配送车辆调度模型	精确算法	仿真	应急物资配送路径
		2022	同济大学 <sup>[9]</sup>	多类型班车	混合整数线性规划(MILP)模型	精确算法	实验	公交出行时刻表优化
2	中国	2023	东北大学 <sup>[6]</sup>	多车型车辆	车辆路径模型	混合算法	实验	多需求点间同时集送货
		2023	吉林大学 <sup>[8]</sup>	道路运输系统	模糊双边界网络数据包络分析模型	精确算法	实验	道路运输效率
		2022	北京邮电大学 <sup>[15]</sup>	电动公交车	电动公交车调度模型	启发式算法	仿真	电动公交车调度
		2023	湖南大学 <sup>[13-14]</sup>	自动泊车系统	自动泊车路径搜索模型	启发式算法	仿真	短距离自动泊车
		2023	清华大学 <sup>[4]</sup>	智能汽车	服务层级和服务响应参数模型	启发式算法	仿真	系统软件和信号资源浪费
		2024	北京交通大学 <sup>[27]</sup>	自动驾驶汽车	实时车辆调度模型	混合算法	实验	车辆动态行程分配
		2024	同济大学 <sup>[28]</sup>	异质车辆	预制混凝土构件运输调度模型	启发式算法	实验	异质车辆的最优运输计划
3	新加坡	2021	新加坡国立大学 <sup>[23]</sup>	机场特种车	整数规划模型	启发式算法	实验	机场特种车调度
		2023	南洋理工大学 <sup>[24]</sup>	机场特种车	多故障车辆路径模型	启发式算法	实验	机场地勤服务
4	伊朗	2022	马赞达兰科技大学 <sup>[10]</sup>	绿色车辆	多目标混合整数线性规划模型	混合算法	实验	异构交通网络的路由和调度
5	德国	2022	柏林自由大学 <sup>[18]</sup>	纯电动汽车	充电站的位置规划模型	混合算法	实验	纯电动汽车充电站位置规划
6	印度	2022	国家理工学院 <sup>[19]</sup>	电动汽车	充电/放电调度模型	启发式算法	实验	电动汽车的调度
7	丹麦	2023	丹麦技术大学 <sup>[21]</sup>	公交车	公交车行程时间预测模型	机器学习	实验	公交车行程时间预测
8	加拿大	2023	麦吉尔大学 <sup>[25]</sup>	公交车	贝叶斯概率模型	机器学习	实验	公交车行程时间预测
9	法国	2024	巴黎高科桥梁学院 <sup>[26]</sup>	物流车	动态车辆调度模型	机器学习	实验	动态车辆路径规划
10	瑞士	2024	洛桑联邦理工学院 <sup>[29]</sup>	网约车	车辆重新定位动态模型	混合算法	实验	空车重新定位策略

和最优路径模块,通过相应的实验证明了该方法可以进行良好的调度选择。Song等<sup>[45]</sup>研究无人水面车辆的路径规划,开发了一种基于改进航路点的A\*算法,降低了搜索节点,从而提高了路径搜索效率。

无人驾驶技术不仅应用在公共交通场所运营,在机场内的需求也在不断增加,对无人驾驶汽车智能调度的研究是必要的。部分研究人员对无人驾驶车辆的调度问题也进行了研究。Peng等<sup>[46]</sup>提出了一种机场环境下自动驾驶汽车调度的碳排放模型,应用改进的A\*算法和三次贝塞尔-

螺旋路径平滑算法优化模型,通过测试,得出该方法可以快速获得调度方案。张凤等<sup>[47]</sup>通过无人驾驶清水车服务机场航班的时间规则,将无人驾驶清水车服务航班硬时间窗、梯形模糊隶属度函数和传统Clarke-Wright节约算法相结合,实现了无人驾驶清水车总行驶路程最短以及航班服务水平最高的目标。

上述研究提供了如何优化无人驾驶汽车的调度和路径选择方法,提高了交通系统的效率、安全性和环保性。但未开展对有人和无人驾驶车辆混合调度场景的研究,存在一定的局限性。

### 1.3 有人和无人驾驶车辆混合调度

在可预见的未来,随着自动驾驶技术的不断进步和市场渗透率的逐步提高,自动驾驶车辆有望更广泛地投入运营,尤其在混合流量的交通环境中。这种情况下,交通系统中将同时存在自动驾驶车辆和有人驾驶车辆。这种混合调度对于优化交通效率、降低运营成本和提升乘客服务质量至关重要。目前,已经有部分学者开始对这种混合交通流进行研究。

Li 等<sup>[48]</sup>和 Li 等<sup>[49]</sup>关于自动驾驶汽车 (autonomous vehicles, AV) 和人类驾驶汽车 (human-driven vehicles, HDV) 组成的混合交通流,对交通道路的影响分别进行了研究探讨。Dai 等<sup>[50]</sup>通过整数非线性规划模型 (integer nonlinear programming model, INLP) 联合优化了混合人力驾驶和自动驾驶公交车运行的交通系统模型调度,该模型考虑了公交运营成本、乘客成本以及随机乘客需求和公交车运行时间下的混合公交车运营,能够有效地减少乘客的等待时间和总运营成本,提高了系统的效率和服务质量。随着自动驾驶普及率的提高,学者将逐步深入关于 AV 和 HDV 混合交通流的研究。

尽管目前对于混合调度的研究还相对较少,随着无人驾驶技术的不断发展,混合调度将成为整合无人驾驶车辆到传统交通系统中的关键方法。未来,混合调度将更加注重多模态交通的融合,整合不同交通模式,优化出行体验,降低拥堵和环境污染,实现可持续的城市交通发展。

尤其值得注意的是,机场作为一个特殊的交通场景,也将面临有人和无人驾驶车辆混合调度的情况。虽然目前无人驾驶技术在机场主要集中在某一种特种车辆的初步测试上<sup>[51]</sup>,但随着技术的成熟和应用研究的深入,混合调度将在机场交通管理中扮演越来越重要的角色。混合调度有望优化机场内部交通流,提高运输效率和服务质量,为未来的智慧机场交通奠定基础。

## 2 机场特种车的调度

随着大型机场航班流量逐渐增加,机场地勤特种车辆的调度对航班延误影响不断增大,研究人员对机场特种车辆调度问题也渐渐重视起来。中外对机场特种车的调度,根据研究对象可将其分为单车型独立调度和多车型协同调度问题。

### 2.1 单车型独立调度

目前,大多数机场特种车辆调度方式仍采用单车型独立的调度方式,虽然执行简单,但存在运营成本高、资源利用效率低等缺点。鉴于此,有学者针对加油车、摆渡车、机场班车、除冰车等单车型独

立的调度问题开展了相关研究。

殷龙等<sup>[52]</sup>考虑了机场加油车调度模型,并应用最邻近算法实现对模型的求解,通过实际数据,得出利用该算法可大幅降低服务成本的结论。但该方法只适用于静态调度场景,无法应对动态调度场景。Zhao 等<sup>[53]</sup>构建了某一时段所需摆渡车数量最小化为目标的整数规划模型,通过引入虚拟航班,创新性地构建了轮渡车辆共享网络,将模型转化为网络最大流量问题,并通过北京首都国际机场的飞行数据验证了该方法的有效性和准确性,但该模型未考虑天气、航班延误等对地勤车辆度的影响。Quan 等<sup>[54]</sup>针对机场加油车,建立动态时间窗的车辆路径问题模型,设计一种多策略遗传算法来求解时间窗口调度问题,实验结果表明,该算法可以有效地减少机场所需的路线和车辆数量。Guo 等<sup>[55]</sup>研究了基于改进的遗传算法的机场行李车的调度问题,通过对真实数据的仿真,证明了该算法的有效性。卢飞等<sup>[56]</sup>根据机场拖车对离港飞机服务的特点构建拖车调度模型,使航班延误数减少,有效保障航班运行。Öner 等<sup>[57]</sup>研究了机场班车调度问题,使用混合元启发式算法(结合了多启动、分组、模拟退火和大邻域搜索过程)对调度问题进行优化,并将所得结果与使用 CPLEX 软件解决的结果相比,得出该算法能更短的时间内获得解决方案的结论。Norin 等<sup>[58]</sup>研究了除冰车调度的优化算法,并将其集成到斯德哥尔摩-阿兰达机场周转过程的模拟模型中研究,得出该算法可实现最低的航班延误和最短的等待时间。

总之,每种特种车辆的调度问题存在不同的需求和约束条件,但由于以往对机场特种车辆调度问题的研究主要集中在特定车辆的单独调度,各车型之间缺乏协同优化,资源未能得到有效整合,导致整体调度效率提升有限。此外,上述文献在建模时对约束条件的考虑并不全面,尤其在航班受不可控的恶劣天气或其他相关地勤服务等因素影响时,调度系统难以及时进行动态调整,无法充分反映机场的实际运营情况。

### 2.2 多车型协同调度

多车型协同调度问题是指在物流、运输或其他领域中,需要同时调度和协调多种不同类型的车辆以完成一系列任务或服务的问题。在实际应用中,机场特种车辆的调度存在服务顺序限制,不同作业需遵循一定的先后顺序完成服务,因此通过多车型协同调度,可以整合各类车辆的资源,打破单车型独立调度的局限,进而提高调度系统的灵活性与响应速度。这不仅有助于在复杂的机场运营环境中优化任务分配,还能有效应对突发情况,确保运营

的连续性和效率。

冯霞等<sup>[59]</sup>研究了摆渡车和加油车的协同调度,构建了远机位航班加油服务和上客服务的协同调度模型,使用多目标遗传算法对模型求解,得到一组 Pareto 最优解。王兴隆等<sup>[60]</sup>以最小化除冰车行驶总距离和航空器等待总时间为目标函数,构建了机场除冰车和航空器协同调度模型,并使用改进的遗传算法对模型进行求解,通过对西安机场某天的航班数据的仿真实验,证明所提算法在指导除冰车作业方面的优越性。Zeng 等<sup>[61]</sup>以加油车和摆渡车为研究对象,通过车辆到达时间和最早服务时间之间的时间差来优化车辆调度模型,并使非支配排序的遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)对该模型进行求解,得到一组前沿解和更好的调度方案。高伟等<sup>[62]</sup>通过考虑特种车辆之间的相互约束关系和机型匹配等因素,建立综合调度模型,并应用带精英策略的 NSGA-II 算法对模型进行求解,通过对中国某机场实际运行航班数据进行仿真,得出该模型能有效减少了所需保障车辆总数和开始服务时间差值的结论。Liu 等<sup>[63]</sup>提出了一种双目标混合整数规划模型,以所需专用车辆数量最少和专用车辆总额外时间成本最小为目标,将综合调度问题归结为了若干个具有并行服务和时间约束的子问题。Padrón 等<sup>[64]</sup>将地勤服务建模为一个双目标优化问题,通过最大限度地减少运营等待时间和周转的总完成时间来优化地勤服务,使用约束规划(constraint programming, CP)与大邻域搜索(large neighborhood search, LNS)、可变邻域下降(variable neighborhood descent, VND)和序列迭代法,来改进处理双目标问题的全局解,通过对马略卡岛和巴塞罗那机场的真实数据的测试,得出该方法在改善机场运营和效率方面具有潜在的应用价值。Fink 等<sup>[65]</sup>构建了具有多个同步约束的车辆路径问题模型,应用两种基于时空网络的数学多商品流公式和一种分支和价格启发式算法对模型求解。

综上所述,中外学者通过优化调度流程和资源分配,在机场地勤特种车辆协同调度领域取得了显著的研究成果,不仅有效提升了地勤服务的效率,还显著提高了机场整体运营的质量和效率。但上述研究多集中在理想化或简化的场景,未充分考虑不同机场之间的差异性以及实际操作中的不确定性因素(如突发事件、天气变化、航班延误等)。此外,前人研究主要以静态调度模型为主,关于机场特种车动态调度问题的探讨相对较少。因此,未来的研究方向还需进一步聚焦于更复杂的车辆调度问题,特别是在动态、多变量环境下的调度模型研

究,如何结合人工智能、机器学习等新兴技术,实现对复杂环境下车辆调度的实时优化,是一个值得深入探索的课题。对机场特种车调度模型的相关文献进行系统梳理,按调度方式、研究对象和优化目标进行分类整理,机场特种车调度模型比较如表 2<sup>[52-65]</sup>所示。

表 2 机场特种车调度模型比较<sup>[52-65]</sup>

Table 2 Comparison of airport specialized vehicle scheduling models<sup>[52-65]</sup>

来源	研究年份	调度方式	时间窗	研究对象	优化目标
Norin 等 <sup>[58]</sup>	2009	静态	硬	单	总飞行延迟最低
冯霞等 <sup>[59]</sup>	2016	静态	硬	多	车辆数量和总服务时间最少
Padrón 等 <sup>[64]</sup>	2016	静态	硬	多	客户端等待时间最小
殷龙等 <sup>[52]</sup>	2016	静态	硬	单	总路程最短
Fink 等 <sup>[65]</sup>	2019	静态	硬	多	最小化作业延迟
高伟等 <sup>[62]</sup>	2019	静态	硬	多	车辆总数最少和开始服务时间差最小
Guo 等 <sup>[55]</sup>	2020	静态	硬	单	车辆数量最小
Öner 等 <sup>[57]</sup>	2020	静态	硬	单	总利润最大
Zeng 等 <sup>[61]</sup>	2020	静态	硬	多	加油车和摆渡车数量之和最少
Zhao 等 <sup>[53]</sup>	2021	静态	硬	单	车辆数量最小
Quan 等 <sup>[54]</sup>	2022	动态	软	单	运营成本最小
Liu 等 <sup>[63]</sup>	2022	静态	硬	多	车辆数量和总额外时间成本最小
王兴隆等 <sup>[60]</sup>	2023	静态	硬	多	车辆行驶总距离和航空器等待时间最小
卢飞等 <sup>[56]</sup>	2024	静态	硬	单	拖车行驶总路程和航班延误最小化

### 3 调度算法分析

车辆调度算法是在特定约束条件下,有效地安排和分配车辆以满足特定任务或需求的过程。目前,学者们采用不同的方法来研究车辆调度问题。这些方法可以分为三大类:启发式方法、精确方法和混合方法。其中,对启发式方法和精确方法进行比较,如表 3 所示。

表 3 启发式方法和精确方法的比较

Table 3 Comparison of heuristic and exact methods

优化方法	优点	缺点
启发式方法	求解速度快;适用于大规模问题;能够处理复杂的实际问题;易于实现和应用	不能保证最优解;解的质量不稳定;结果依赖于启发式规则和初始条件
精确方法	可获得全局最优解;适用于小规模问题;具有确定性和可验证性	容易陷入局部最优解;计算复杂度高;扩展性差

(1) 启发式方法特点。①不受严格的数学约束,无需要复杂的数学理论或大量的计算资源,因此适应不同类型的问题且能快速地找到解决方案;②基于经验和启发式规则,能快速找到解决方案,适用于大规模问题,可在短时间内提供可行解,但也容易错过全局最优解<sup>[66]</sup>;③产生解的质量可能不稳定,具体解可能受到初始条件和启发式规则的影响,导致结果不一致。

(2) 精确方法特点。①在求解时引入了严格的数学方法,能够保证找到问题的全局最优解;②对于复杂问题,随着问题规模的增加,精确算法的计算复杂度可能会急剧增加,导致计算时间过长,陷入局部最优解;③精确算法通常是针对某一特定问题设计的,因此在实际应用中适用性较差,主要用于小规模问题或需要确切最优解的情况;④对于大规模或实时决策问题,使用精确方法计算所需的时间和资源可能会非常昂贵,所以这时通常需要考虑其他更高效的算法。

### 3.1 启发式方法

启发式算法是一类用于解决复杂优化问题的计算方法。它们基于启发式规则和策略,不追求找到全局最优解,旨在寻找满意的近似解<sup>[67]</sup>。这些算法在大规模和复杂问题的优化中表现出色,并在许多领域得到广泛应用,如路线规划、机器学习、资源分配和调度等。启发式算法通常包含随机性,以避免陷入局部最优解,并具有多样性。

常见的启发式方法包括:贪婪随机自适应搜索过程(greedy randomized adaptive search procedure, GRASP)、遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法、蚁群算法和禁忌搜索算法等。Shen等<sup>[67]</sup>为了解除冰车除冰延迟问题,GRASP对调度方案进行优化,减少了除冰车调度的排队和延迟时间。Du等<sup>[68]</sup>采用蚁群优化算法(ant colony optimization, ACO)来改进机场地面服务调度,所提出的ACO可以在合理的时间内构造出良好的解。Liu等<sup>[69]</sup>也是建立一个双目标混合整数规划模型,以车辆数和特种车辆额外总时间成本的最小化为目标,采用非支配排序遗传算法求解。Han等<sup>[70]</sup>构建了机场摆渡车的双目标混合整数线性规划模型,设计了3种启发式算法:严格均衡算法、松弛均衡算法和移植算法求解模型,通过北京首都国际机场实际数据的测试,验证了算法的有效性。Wang等<sup>[71]</sup>研究了A\*算法在智能汽车路径规划中的应用,使用一种改进的A\*算法,提高了路径搜索效率。Jiang等<sup>[72]</sup>提出了一种基于鲁棒划分的多种群进化算法,用于解决需求不确定的车辆路径问题,该算法能够在降低出行成本的同

时,提高解的稳健性。Jakobović等<sup>[73]</sup>提出一种改进的遗传算法来解决对车辆路径问题的动态和随机性。

启发式算法是一种灵活且有效的方法,用于解决复杂的优化问题,当精确算法难以应对大规模问题或需要快速找到近似最优解时应用。通过结合问题特性和合适的启发式策略,这些启发算法可以在实际应用中取得很好的效果。

### 3.2 精确方法

精确算法旨在找到全局最优解,通常用于小规模问题或者需要确切最优解的情况。对于大规模或实时决策问题,通常需要考虑其他更高效的算法。常见的精确算法包括:最优路线规划算法、分支定界算法、动态规划算法等。Hadjjar等<sup>[74]</sup>研究了多仓库车辆调度问题,并提出了一种结合列生成、变量固定和切割平面的分枝定界算法来求解该问题。

这些精确求解的算法可以计算出VRP的全局最优解,求解质量较高,但精确算法是用于解决组合优化问题的一类算法,它们在求解时引入严格的数学方法。因此对于复杂问题,精确算法的计算复杂度可能会急剧增加,导致计算时间过长,这称为指数爆炸问题。此外,精确算法通常是针对某一特定问题设计的,而当代的VRP问题实例包含数百或数千个请求,因此通常不适合用精确方法解决。所以目前针对精确算法的研究文献相对较少。

### 3.3 混合方法

车辆调度问题的研究领域涵盖了多种方法,选择适当的方法取决于问题规模和需求,启发式方法适用于大规模和动态调度,而精确方法适用于小规模和需要确切最优解的情况<sup>[75]</sup>。而现有研究为了使模型更符合实际情况,考虑的因素不断增加,如多车型、时间窗等,模型变得更加复杂,求解难度不断提高<sup>[76]</sup>。启发式算法的求解效率较优,且适应于大规模问题求解,在车辆调度问题中占有重要地位,但算法具有易陷入局部最优、求解精度较差等缺点。如遗传算法求解会受到初始种群和迭代规则的影响,具有收敛速度慢、易陷入早熟等缺点<sup>[77]</sup>。为了使求解算法更优,研究者对算法进行了改进,对基础算法进行改进,即同时兼顾各个算法的优点,采用混合算法进行求解,使结果更接近精确解。Wei等<sup>[78]</sup>针对具有时变速度的机场班车,根据用户灵活用车的时间窗口和代替燃料车(alternative fuel vehicles, AFV)的有限燃料容量等,提出多目标混合整数线性规划(multi-objective mixed integer linear programming, MOMILP)模型来减少运营成本和CO<sub>2</sub>

排放,使用 NSGA-II 算法对模型进行优化,获得 Pareto 最优解。Berbeglia 等<sup>[79]</sup>采用精确约束规划算法和禁忌搜索启发式算法相结合的混合算法研究动态乘车拨号问题。Gök 等<sup>[80]</sup>研究了机场飞机稳健的日常调度的问题,通过有效结合项目调度和车辆路由模型,使用约束规划、混合整数规划和基于大邻域搜索的启发式算法,对调度问题进行求解。通过离散事件对方法进行模拟,验证了该方法可作为任何机场的决策支持机制。Xiao 等<sup>[81]</sup>通过提出的动态规划算法和遗传算法等结合的混合优化方法,来得到最优的车辆调度计划,以实现降低 CO<sub>2</sub> 排放和燃油消耗的目标。由于基本 VRP 模型有很多变体,因此必须设计专门的算法来考虑特定的约束和用户定义的目标指标。为了确保方法解的多样性,结合不同调度目标和因素,与其他算法的混合方法将是未来的研究方向<sup>[82-84]</sup>。车辆调度方法比较如表 4<sup>[67-74,78-81]</sup>所示。

表 4 车辆调度方法比较<sup>[67-74,78-81]</sup>Table 4 Comparison of vehicle scheduling methods<sup>[67-74,78-81]</sup>

来源	研究年份	调度方式	结果形式	算法类型	优化算法
Hadjar 等 <sup>[74]</sup>	2006	静态	最优解	精确	分枝定界算法
Du 等 <sup>[68]</sup>	2008	静态	可行解	启发式	蚁群优化算法
Berbeglia 等 <sup>[79]</sup>	2012	动态	可行解	混合	精确约束规划和禁忌搜索算法
Xiao 等 <sup>[81]</sup>	2017	静态	最优解	混合	动态规划算法和混合遗传算法
Shen 等 <sup>[67]</sup>	2019	静态	可行解	启发式	贪婪随机自适应搜索过程
Wei 等 <sup>[78]</sup>	2020	动态	可行解	混合	整数线性规划和 NSGA-II 算法
Gök 等 <sup>[80]</sup>	2020	动态	最优解	混合	约束规划、混合整数规划和基于大邻域搜索算法
Liu 等 <sup>[69]</sup>	2021	静态	可行解	启发式	NSGA-II 算法
Han 等 <sup>[70]</sup>	2022	静态	可行解	启发式	严格均衡算法、松弛均衡算法和移植算法
Wang 等 <sup>[71]</sup>	2022	静态	可行解	启发式	A* 算法
Jakobovic 等 <sup>[73]</sup>	2023	动态	可行解	启发式	遗传算法
Jiang 等 <sup>[72]</sup>	2024	静态	可行解	启发式	多种群进化算法

## 4 现存问题

### 4.1 公共交通中的车辆调度现存问题

(1) 公交车的调度管理。公共交通机构面临着多重挑战,其核心在于如何精妙地平衡公交车的发车间隔,以确保既能有效缓解乘车拥挤现象,又能显著提升线路的运行效率与乘客的满意度和服务

质量。维持一个既稳定又合理的发车间隔,不仅是缓解高峰时段乘客密集度、预防过度拥挤的关键策略,更是提升整体服务质量、增强公共交通吸引力的基石。因此,公共交通机构需不断探索与优化调度策略,精准计算并灵活调整发车间隔,以应对多样化的交通需求,实现高效、舒适、便捷的公共交通服务目标。

(2) 公共交通场所的车辆调度过程。由于公交车需与众多其他交通方式(如私家车、自行车及行人等)共享道路空间,这一复杂的交通环境导致乘客出行时间的显著不确定性。为了提升调度的精准度与效率,亟需对这种不确定性进行深入的建模与量化分析。通过构建精细化的交通流模型,结合大数据分析技术,可以更准确地预测并评估不同时间段、不同路段上的交通拥堵状况,进而为车辆调度提供更加科学、合理的依据。这一过程不仅有助于减少乘客因等待时间过长而产生的不满,还能显著提升公共交通系统的整体运行效率与服务质量。

(3) 车辆调度领域。学者们普遍倾向于构建模型时假设车辆资源无限充足,这一简化设定往往忽略了车辆在执行任务后需返回仓库进行资源补给(如燃料、人员更替或物品装载)的实际需求。然而,现实场景中,车辆数量是严格受限的宝贵资源,它们频繁地往返于任务点与仓库之间以维持运营持续性,这一重要环节对于优化调度策略、提升整体运营效率而言,是不容忽视的关键因素。

针对公共交通领域车辆调度所面临的多重挑战,未来的研究应聚焦于开发能够依据实时数据进行即时优化调整的车辆调度算法。这一创新策略旨在通过动态监测与分析交通流量、乘客需求、车辆状态等实时数据,实现发车间隔的灵活调整,从而在有效避免拥挤现象的同时,确保公共交通系统保持稳定的运营节奏。此举不仅能显著提升运行效率,减少乘客等待时间,还能优化资源配置,提升乘客的整体出行体验与服务质量。因此,深入研究并应用实时数据驱动的即时调度算法,将成为推动公共交通系统智能化、高效化转型的关键力量<sup>[85]</sup>。此外,为了进一步提升调度的精准度,需深入研究并量化乘客出行时间的不确定性,全面评估其与多模式交通环境(如汽车、自行车等)的交互影响,从而构建出更为贴近实际的乘客需求与车辆调度需求预测模型。同时,在资源有限的实际运营环境中,制定科学合理的调度规划与资源分配策略,确保资源的高效利用与优化配置。

### 4.2 机场特种车调度现存问题

(1) 车辆调度的实际应用场景极为复杂多变,

而当前文献往往难以全面覆盖所有实际操作的细致需求。在实际运作中,常涌现出各种特定需求,诸如针对不同机型所需的特种车辆服务差异显著,比如机场摆渡车必须依据飞机的具体停放位置与载客容量进行智能化的精准匹配。这一现实需求凸显了不断改进和优化调度算法以贴合特定问题的重要性。只有通过持续迭代升级,确保其能够精准捕捉并响应各种实际应用中的独特挑战,才能有效提升算法的执行效率和性能表现。这种迭代优化后的优化策略,将使调度算法更加贴合实际作业场景,从而更好地满足多样化、复杂化的实际需求,推动机场运营向更加高效、安全、智能的方向发展。

(2)当前的研究普遍聚焦于单一机场特种车型的独立调度策略,却在一定程度上忽视了机场内多种特种车辆(如传送带车、摆渡车、油罐车、牵引车、客梯车等多样化车型)之间协同作业的重要性,这些车辆甚至可能涉及无人驾驶与有人驾驶两种操作模式的并存<sup>[86-89]</sup>。这种多样性不仅要求调度系统具备高度的灵活性,还需精准匹配每种车辆独特的服务能力和不断变化的服务需求。鉴于机场运营的高效性高度依赖于特种车辆的有效调度,未来的研究方向应当深刻分析构建综合多种类特种车辆的综合调度模型。这一模型需充分考量不同车型间的功能互补性、服务效率差异,以及它们如何协同应对动态变化的航班计划。同时,还需融入对无人驾驶技术潜在影响的评估,以确保调度策略既能适应当前有人驾驶的现状,又能为未来无人驾驶技术的广泛应用预留接口。进而提升机场特种车辆调度的整体效率与适应性,促进机场运营管理的智能化、精细化发展,为旅客提供更加顺畅、高效的出行体验。

(3)机场特种车辆的调度问题相较于传统的车辆路径规划问题,展现出了更为复杂和独特的挑战,这些挑战主要源自于机场航班计划的动态性与时变性<sup>[87]</sup>。具体而言,机场特种车辆的调度不仅需要紧密跟随航班计划的实时变动,还需应对其固有的不确定性,这要求调度系统具备高度的灵活性和即时响应能力。此外,机场内特定道路的通行往往需经过机场塔台的严格审批,这一环节进一步增加了调度过程中的随机性和复杂性。特种车辆在执行任务时,还需严格遵守作业时间限制,这些限制条件往往与航班起降时间紧密相关,且不容有丝毫延误。总之,机场特种车辆的调度问题不仅涉及车辆路径的优化,更需综合考虑航班计划的动态变化、道路通行的审批流程以及车辆作业时间的严格约

束。这些因素相互交织,共同构成了机场特种车辆调度难题的独特性,对调度系统的智能化、精准化水平提出了更高要求。因此,未来的研究应更加聚焦于如何构建适应性强、响应迅速的调度模型,以有效应对机场特种车辆调度中的种种挑战,确保机场运营的高效与顺畅。

针对以上问题,未来的研究可以着重于多种类特种车辆的综合调度模型,包括考虑不同车型的服务能力、服务需求的差异以及适应动态航班计划等因素。这将有助于更贴近实际情况,提高特种车辆调度的效率和适应性。随着航班延误频发,及时对模型进行修改以更好地适应实际的运行情况。这种动态适应性将提高调度系统的应变能力,确保特种车辆调度的高效性和适应性。

### 4.3 问题总结

根据以上描述,可以得出公共交通中的车辆调度和机场特种车调度都强调了智能调度系统和实时数据利用的重要性,但面临的挑战和调度需求有所不同,需要针对特定情景进行定制化的调度解决方案。对于公共交通中的车辆,需要保持稳定的发车间隔和量化乘客的出行时间来调整调度方案,从而避免拥挤,提高服务质量和运行效率。针对以上问题,许多学者研究了新型需求响应式公共交通系统<sup>[89-91]</sup>,即乘客提前预约出行需求,通过对这些需求进行筛选,制定相应的行车计划。但需求响应式公交车辆目前的应用较少,还需要进一步研究。此外,与其他交通方式混合行驶和资源分配等问题,也需要持续的深入研究。对于机场特种车,机场特种车调度需重点解决多种特种车辆的综合调度和适应动态航班计划的挑战。两种场景的对比如表5所示。

表5 公共交通中的车辆和机场特种车调度的问题比较

Table 5 Comparison of problems in scheduling vehicles in public transportation and airport special vehicles

情景	公共交通中的车辆调度	机场特种车调度
挑战	维持稳定的发车间隔;量化乘客的出行时间不确定性;与其他交通方式混合行驶的影响	多样的特种车辆;动态航班计划
解决方案	利用实时数据优化调度方案;优化资源分配	优化调度算法以适应特定服务需求;研究多类型特种车辆的综合调度模型

## 5 发展趋势

在过去几十年里,中外专家学者围绕车辆调度问题取得了大量研究成果,有力推动了车辆调度效率的提升<sup>[92-96]</sup>。目前,车辆调度问题已经有大量的

研究成果,但针对机场特种车辆调度的研究成果较少,未来的研究可以借鉴公共交通中的车辆调度方法,结合机场特种车调度的特殊需求,适应机场特种车辆调度的动态性和复杂性,进而探索新的综合调度模型。未来车辆调度研究方向可以归纳为以下几点。

(1)借鉴公共交通中的车辆调度方法。大部分公共交通中的车辆调度方法通过设计乘客乘车时间表来优化调度<sup>[97]</sup>,机场特种车也可以根据利用实时数据,包括航班到达、乘客流量、行李运输需求等<sup>[98]</sup>。公共交通中的车辆面临的问题是乘客的出行时间不确定性,而机场特种车存在的问题是机场航班存在的动态性,因此针对机场特种车,可以结合航班信息、天气等实时数据,提前预测航班延误或取消情况,调整特种车辆运行计划表,来设计飞机到达的时间表来优化调度方案,从而实现智能化调度。公共交通调度方法可能不直接适用于机场特种车调度,但可以借鉴其解决稳定发车间隔和多模态交通整合的思路,因为机场航班存在动态性,因此调度方案还因结合机场特种车调度的特殊需求,来探索新的综合调度模型。

(2)优化多目标优化模型。目前,车辆调度领域的研究主要聚焦于总成本最小化与总时间最优化两大核心目标,同时,也有学者致力于探索更为复杂的多目标优化问题,以期在多个维度上实现调度效率与效益的提升。然而,多目标优化研究往往面临目标间相互冲突、求解过程复杂等局限性,这促使部分研究采取折衷策略,即通过转化为单目标优化的方式进行处理,如将时间和能量消耗统一量化为成本指标,或将等待时间转换为距离成本、时间延迟转化为惩罚性成本,以此简化问题复杂度。在未来,车辆调度研究将构建能够同时求解成本最低、行驶距离最短以及安全性最佳等多目标优化的模型,以确保在追求经济效益(如成本控制、效率提升)的同时,不牺牲安全性这一至关重要的考量因素。通过引入先进的优化算法,结合大数据分析、人工智能等,更精确地权衡各个目标之间的冲突,找到更为均衡、全局最优的调度方案。

(3)研究混合调度策略。当前,针对无人车辆调度问题的研究已广泛采用启发式算法作为求解策略,并不断探索优化这些算法以提升性能。为了进一步增强解的多样性和质量,学者们开始关注将不同算法进行有机融合,以应对复杂多变的调度目标和因素。在未来,一个显著的研究趋势将是探索启发式算法与其他类型算法的混合方法,特别是与精确算法的结合。这种跨算法的融合策略旨在利

用启发式算法的高效搜索能力和精确算法的严谨求解能力,相互补充,从而在车辆调度问题中生成更多样化、更高质量的解决方案。例如,可以先利用启发式算法快速生成一组候选解,然后采用精确算法对其中部分或全部候选解进行精细化调整,以逼近全局最优解。或者,在启发式搜索过程中,针对特定难点或关键决策点,引入精确算法进行局部深度搜索,以提高解的精度和可靠性。

(4)探索多种类型车的混合调度。当前,车辆调度领域的研究大多聚焦于单一类型的车辆,这一方向虽已取得显著进展,但实际应用场景往往更加复杂多变,涉及多种类型车辆的协同作业。因此,未来可重点关注多种类型车辆的混合调度问题,如同业务场景下的车辆协同、异类业务场景的衔接协同、有人-无人车辆混合协同等,这种协同在性能、操控方式及安全要求等方面存在显著差异,如何高效协调它们的运行成为新的挑战。此外,不同类型车辆(如货车、客车、特种车辆等)在载重能力、行驶速度、服务需求等方面的多样性,也要求调度系统具备更强的灵活性和适应性。因此,未来车辆调度研究可积极响应实际应用需求,深入探索多种类型车辆的混合调度问题。通过构建更加贴近实际的调度模型、开发高效智能的调度算法、以及优化车辆间的协同机制,为复杂多变的民航交通环境提供有力的支持,推动车辆调度技术迈向新的高度。

综上所述,机场特种车辆调度是一个充满挑战的领域,其复杂性在于多元车辆类型的协同作业、航班计划的动态变化以及诸多不可预测的随机因素<sup>[99-100]</sup>。面对这一复杂系统,未来的研究应当致力于探索更为高效、智能的调度优化方法,旨在减少航班延误,提升机场整体运行效率,从而有效应对机场特种车辆调度的动态性与复杂性。

## 6 结论

目前,针对机场特种车辆的调度问题,学者们已采取多种方法以优化特种车辆的运行效率。这些方法主要将特种车辆的调度问题视为带有时间限制的动态调度问题,并致力于最小化关键指标(如特种车辆数量、特种车辆行驶距离以及完成服务所需时间等)。同时,常采用各种启发式算法或精确算法设计多种调度优化模型,并通过仿真实验评估它们的性能。未来,还需要结合机场实际运行场景,引入先进的目标优化算法,结合大数据、人工智能等,进一步协调和优化不同种类服务车辆,以及适应不同机型航班服务条件的限制。这将有助于减少航班在地面服务阶段因民航车辆协调问题

而导致的延误,进而提升航班的正点率与地勤作业的整体效率。

### 参 考 文 献

- [1] 田利军. 社会责任、内部控制与企业绩效——来自民航运输业的证据[J]. 中国注册会计师, 2012(12): 48-55.  
Tian Lijun. Social responsibility, internal control and corporate performance: evidence from the civil aviation transportation industry [J]. China Certified Public Accountants, 2012(12): 48-55.
- [2] 劳欣芸, 沈煜, 杨琳, 等. 机场智慧化地勤服务系统架构与发展探究[C]//2023世界交通运输大会(WTC2023)论文集(下册). 武汉: 中国科学技术协会, 交通运输部, 中国工程院, 湖北省人民政府, 同济大学民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海机场(集团)有限公司科创管理部, 2023; DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.0195.  
Lao Xinyun, Shen Yu, Yang Lin, et al. Exploring the architecture and development of intelligent ground handling service system in airports [C]//Proceedings of the 2023 World Transport Congress (WTC2023) (Volume 2). Wuhan: China Association for Science and Technology, Ministry of Transport, Chinese Academy of Engineering, Hubei Provincial People's Government, Key Laboratory of Durability and Operational Safety of Civil Aviation Flight Zone Facilities at Tongji University, Science and Technology Innovation Management Department of Shanghai Airport (Group) Co., Ltd., 2023; DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.0195.
- [3] 张朝倩, 崔艳雨. 机场特种车辆优化调度问题研究现状及展望[J]. 计算机科学与应用, 2019, 9(5): 1-8.  
Zhang Chaoqian, Cui Yanyu. Research status and prospects of optimal scheduling problem for airport special vehicles [J]. Computer Science and Application, 2019, 9(5): 1-8.
- [4] 郝建平, 苏炎召, 钟志华, 等. 面向智能汽车的SOA架构及服务调度机制研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(9): 1563-1572, 1542.  
Hao Jianping, Su Yanshao, Zhong Zhihua, et al. Research on SOA architecture and service scheduling mechanism for intelligent vehicles [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(9): 1563-1572, 1542.
- [5] 吴珂, 宋英华, 吕伟. 医疗应急物资车辆配送优化调度时间窗模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 11-16.  
Wu Ke, Song Yinghua, Lü Wei. Optimized scheduling time window model for vehicle distribution of medical emergency supplies [J]. China Safety Production Science and Technology, 2022, 18(1): 11-16.
- [6] 王素欣, 熊珺恺, 王雷震, 等. 多需求点间车辆调度模型及优化算法混合求解研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(8): 194-204.  
Wang Suxin, Xiong Junkai, Wang Leizhen, et al. Hybrid solution of vehicle scheduling model and optimization algorithm among multiple demand points [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2023, 50(8): 194-204.
- [7] 孙秀巧, 王健, 巫威眺. 基于改进遗传退火算法的高速公路巡逻车路径优化调度[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 296-302.  
Sun Xiuhao, Wang Jian, Wu Weitao. Optimal scheduling of highway patrol vehicle paths based on improved genetic annealing algo-
- rithm [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21): 296-302.
- [8] 王占中, 蒋婷, 张景海. 基于模糊双边界网络模型的道路运输效率评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(2): 385-395.  
Wang Zhazhong, Jiang Ting, Zhang Jinghai. Evaluation of road transportation efficiency based on fuzzy double boundary network model [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2023, 53(2): 385-395.
- [9] Wu M, Yu C, Ma W, et al. Joint optimization of timetabling, vehicle scheduling, and ride-matching in a flexible multi-type shuttle bus system [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 139: 103657.
- [10] Zarouk Y, Mahdavi I, Rezaeian J, et al. A novel multi-objective green vehicle routing and scheduling model with stochastic demand, supply, and variable travel times [J]. Computers & Operations Research, 2022, 141: 105698.
- [11] Wang B, Peng X, Huang X, et al. The new method for scheduling towing tractors based on distributed strategy [C]//4th International Symposium on Traffic Transportation and Civil Architecture (ISTTCA). New York: IEEE, 2021: 11-17.
- [12] 代壮, 陈汐, 马晓磊. 半自动驾驶公交车辆编组与调度优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2284-2292.  
Dai Zhuang, Chen Xi, Ma Xiaolei. Optimization of grouping and scheduling of semi-autonomous bus vehicles [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(12): 2284-2292.
- [13] 曹彦博, 颜京才, 李旭升, 等. 基于改进混合A\*算法的自动泊车系统路径搜索方法[J]. 汽车技术, 2023(6): 37-41.  
Cao Yanbo, Yan Jingcai, Li Xusheng, et al. Path search method for automatic parking system based on improved hybrid A\* algorithm [J]. Automotive Technology, 2023(6): 37-41.
- [14] 张明海, 丁宁, 曹立波, 等. 基于回旋曲线的垂直泊车路径规划[J]. 汽车技术, 2023(6): 30-36.  
Zhang Minghai, Ding Ning, Cao Libo, et al. Vertical parking path planning based on gyrotory curve [J]. Automotive Technology, 2023(6): 30-36.
- [15] 王春露, 聂少康, 左兴权, 等. 基于文化基因算法的电动公交车辆调度方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 7-12.  
Wang Chunlu, Nie Shaokang, Zuo Xingquan, et al. A scheduling method for electric bus vehicles based on cultural genetic algorithm [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 7-12.
- [16] Yao E, Liu T, Lu T, et al. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 52: 101862.
- [17] Crow M L. Electric vehicle scheduling considering co-optimized customer and system objectives [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(1): 410-419.
- [18] Olsen N, Kliewer N. Location planning of charging stations for electric buses in public transport considering vehicle scheduling: a variable neighborhood search based approach [J]. Applied Sciences, 2022, 12(8): 3855.
- [19] Sank R S, Arananarayanan V. Optimal vehicle-to-grid and grid-to-vehicle scheduling strategy with uncertainty management using im-

- proved marine predator algorithm[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, 100: 107949.
- [20] 冯帅, 刘小明. 需求响应公交及其路径优化研究综述[J]. *智能科学与技术学报*, 2021, 3(2): 161-171.  
Feng Shuai, Liu Xiaoming. A review of demand response public transportation and its path optimization research[J]. *Journal of Intelligent Science and Technology*, 2021, 3(2): 161-171.
- [21] Parslov A, Petersen N C, Rodrigues F. Short-term bus travel time prediction for transfer synchronization with intelligent uncertainty handling[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 232: 120751.
- [22] Wang Y, Sun J, Sun B, et al. Research on application of airport tanker truck scheduling based on particle swarm optimization [C]//6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics(CRC). New York: CRC Press, 2021: 278-282.
- [23] Wang S, Che Y, Zhao H, et al. Accurate tracking, collision detection, and optimal scheduling of airport ground support equipment[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(1): 572-584.
- [24] Wu Y, Zhou J, Xia Y, et al. Neural airport ground handling[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 1(1): 128-135.
- [25] Chen X, Cheng Z, Jin J G, et al. Probabilistic forecasting of bus travel timewith a Bayesian Gaussian mixture model[J]. *Transportation Science*, 2023, 57(6): 1516-1535.
- [26] Baty L, Jungel K, Klein P S, et al. Combinatorial optimization-enriched machine learning to solve the dynamic vehicle routing problem with time windows[J]. *Transportation Science*, 2024, 128(2): 402-408.
- [27] Beojone C V, Zhu P, Sirmatel I I, et al. A hierarchical control framework for vehicle repositioning in ride-hailing systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 8: 104717.
- [28] Liu H, Wang S, Yang T, et al. Optimized transportation scheduling for precast concrete components considering heterogeneous vehicle-size matching[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 62: 102658.
- [29] Beojone C V, Zhu P, Sirmatel I I, et al. A hierarchical control framework for vehicle repositioning in ride-hailing systems[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2024, 10: 104717.
- [30] Dantzig G B, Ramser J H. The truck dispatching problem[J]. *Management Science*, 1959, 6(1): 80-91.
- [31] Clarke G, Wright J W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points[J]. *Operations Research*, 1964, 12(4): 568-581.
- [32] Hassold S, Ceder A. Public transport vehicle scheduling featuring multiple vehicle types[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 67: 129-143.
- [33] Li Z. Integrating reinforcement learning-based vehicle dispatch algorithm into agent-based autonomous taxi fleet system simulation [D]. West Lafayette; Purdue University, 2021.
- [34] Baita F, Pesenti R, Ukovich W, et al. A comparison of different solution approaches to the vehicle scheduling problem in a practical case[J]. *Computers & Operations Research*, 2000, 27(13): 1249-1269.
- [35] Zheng L, Wang J, Zhang Y, et al. Vehicle number optimization approach of autonomous vehicle fleet driven by multi-spatio-temporal distribution task[J]. *Journal of Computer Applications*, 2021, 41(5): 1406-1418.
- [36] Wang N, Guo J. Multi-task dispatch of shared autonomous electric vehicles for mobility-on-demand services: combination of deep reinforcement learning and combinatorial optimization method[J]. *Heliyon*, 2022, 8(11): e11319.
- [37] Lin Y, Xu Y, Zhu J, et al. MLATSO: a method for task scheduling optimization in multi-load AGVs-based systems[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, 79: 102397.
- [38] Chen C, Demir E, Huang Y. An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and delivery robots[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 294(3): 1164-1180.
- [39] Jiang J, Dai Y, Yang F, et al. A multi-visit flexible-docking vehicle routing problem with drones for simultaneous pickup and delivery services[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 312(1): 125-137.
- [40] Ostermeier M, Heimfarth A, Hübner A. Themulti-vehicle truck-and-robot routing problem for last-mile delivery[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 310(2): 680-697.
- [41] Yu G, Liu A, Zhang J, et al. Optimal operations planning of electric autonomous vehicles *via* asynchronous learning in ride-hailing systems[J]. *Omega*, 2021, 103: 102448.
- [42] Wu P, Chu F, Che A, et al. An efficient two-phase exact algorithm for the automated truck freight transportation problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 110: 59-66.
- [43] Zhang S, Lu C, Jiang S, et al. An unmanned intelligent transportation scheduling system for open-pit mine vehicles based on 5G and big data[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 135524-135539.
- [44] Lin H, Chen C, Chen J, et al. Emergency dispatching method of unmanned vehicle basedon shortest path algorithm[C]//3rd International Conference on Applied Mathematics, Modelling, and Intelligent Computing. New York: IEEE, 2023: DOI: 10.1117/12.2686022.
- [45] Song R, Liu Y, Bucknall R. Smoothed A\* algorithm for practical unmanned surface vehicle path planning[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 83: 9-20.
- [46] Peng J, Shanguan W, Zhang L, et al. An optimal scheduling method using multi-agent A for autonomous shuttle bus[C]//Proceedings of the 2021 40th Chinese Control Conference (CCC). New York: IEEE, 2021: 7971-7975.
- [47] 张凤, 汤晓鹏, 刘兵飞. 机场飞行区无人驾驶清水车优化调度方法[J]. *交通信息与安全*, 2022, 40(2): 82-90.  
Zhang Feng, Tang Xiaopeng, Liu Bingfei. Optimized scheduling method for unmanned clear water vehicle in airport flight area[J]. *Transportation Information and Safety*, 2022, 40(2): 82-90.
- [48] Li T, Guo F, Krishnan R, et al. Right-of-way reallocation for mixed flow of autonomous vehicles and human driven vehicles[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 115: 102630.
- [49] Li Y, Zhang S, Pan Y, et al. Exploring the stability and capacity characteristics of mixed traffic flow with autonomous and human-driven vehicles considering aggressive driving[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2023, 2023: DOI: 10.1155/2023/

- 2578690.
- [50] Dai Z, Liu X C, Chen X, et al. Joint optimization of scheduling and capacity for mixed traffic with autonomous and human-driven buses: a dynamic programming approach[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 598-619.
- [51] 刘兵飞, 汤晓鹏, 张凤. 机场飞行区无人驾驶特种车辆的风险评估[J]. *科技导报*, 2021, 39(19): 83-91.  
Liu Bingfei, Tang Xiaopeng, Zhang Feng. Risk assessment of unmanned specialized vehicles in airport flight zones[J]. *Science and Technology Herald*, 2021, 39(19): 83-91.
- [52] 殷龙, 衡红军. 基于最邻近算法的机场特种车辆调度应用研究[J]. *计算机技术与发展*, 2016, 26(7): 151-155.  
Yin Long, Heng Hongjun. Research on the application of airport special vehicle scheduling based on the nearest neighbor algorithm[J]. *Computer Technology and Development*, 2016, 26(7): 151-155.
- [53] Zhao P, Han X, Wan D. Evaluation of the airport ferry vehicle scheduling based on network maximum flow model[J]. *Omega*, 2021, 99; DOI: 10.1016/j.omega.2019.102178.
- [54] Quan W, Chen C, Shao Z, et al. Dynamic scheduling for airport special vehicles based on a multi-strategy hybrid algorithm[C]//*Proceedings of the 41st Chinese Control Conference (CCC)*. New York: IEEE, 2022: 847-857.
- [55] Guo W, Xu P, Zhao Z, et al. Scheduling for airport baggage transport vehicles based on diversity enhancement genetic algorithm[J]. *Natural Computing*, 2018, 19(4): 663-672.
- [56] 卢飞, 宋佳佳. 基于非支配排序的机场特种车辆调度[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(21): 9152-9159.  
Lu Fei, Song Jiajia. Airport special vehicle scheduling based on non-dominated sorting[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(21): 9152-9159.
- [57] Öner N, Gultekin H, Koç Ç. The airport shuttle bus scheduling problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 59(24): 7400-7422.
- [58] Norin A, Granberg T A, Vårbrand P, et al. Integrating optimization and simulation to gain more efficient airport logistics[C]//*Proceedings of the 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar*. New York: IEEE, 2009: 56401154.
- [59] 冯霞, 任子云. 基于遗传算法的加油车和摆渡车协同调度研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(2): 155-163.  
Feng Xia, Ren Ziyun. Research on cooperative scheduling of refueling truck and ferry based on genetic algorithm[J]. *Transportation Systems Engineering and Information*, 2016, 16(2): 155-163.
- [60] 王兴隆, 丁俊峰. 机场飞行区航空器与除冰车协同优化调度方法[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(10): 4440-4447.  
Wang Xinglong, Ding Junfeng. Optimized scheduling method for aircraft and de-icing vehicle in airport flight area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(10): 4440-4447.
- [61] Zeng Z H, Jia L Q. Research on airport special vehicle scheduling problem[C]//*International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems*. New York: IEEE, 2020; DOI: 10.1109/ICVRIS51417. 2020.00262.
- [62] 高伟, 王俊义. 机场特种服务保障车辆优化调度研究[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(4): 17-23.  
Gao Wei, Wang Junyi. Research on optimized scheduling of airport special service support vehicles[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(4): 17-23.
- [63] Liu Y, Wu J, Tang J, et al. Scheduling optimisation of multi-type special vehicles in an airport[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2022, 10(1): 954-970.
- [64] Padrón S, Guimarans D, Ramos J J, et al. A bi-objective approach for scheduling ground-handling vehicles in airports[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 71: 34-53.
- [65] Fink M, Desaulniers G, Frey M, et al. Column generation for vehicle routing problems with multiple synchronization constraints[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 272(2): 699-711.
- [66] Zhao J, Hu H, Han Y, et al. A review of unmanned vehicle distribution optimization models and algorithms[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2023, 10(4): 548-559.
- [67] Shen J, Yang P, Wang H, et al. A heuristics algorithm for centralized deicing scheduling problem[C]//*Proceedings of the 2019 International Conference on Modeling, Simulation and Big Data Analysis (MSBDA 2019)*. New York: IEEE, 2019; DOI: 10.2991/msbda-19.2019.33.
- [68] Du Y, Zhang Q, Chen Q. ACO-IH: an improved ant colony optimization algorithm for airport ground service scheduling[C]//*Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*. New York: IEEE, 2008; DOI: 10.1109/ICIT.2008.4608674.
- [69] Liu Y, Wu J, Tang J, et al. Scheduling optimisation of multi-type special vehicles in an airport[J]. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2021, 10(1): 954-970.
- [70] Han X, Zhao P, Kong D. A bi-objective optimization of airport ferry vehicle scheduling based on heuristic algorithm; a real data case study[J]. *Advances in Production Engineering & Management*, 2022, 17(2): 183-192.
- [71] Wang R, Lu Z, Jin Y, et al. Application of A\* algorithm in intelligent vehicle path planning[J]. *Mathematical Models in Engineering*, 2022, 8(3): 82-90.
- [72] Jiang H, Tong Y, Song B, et al. A robustness division based multi-population evolutionary algorithm for solving vehicle routing problems with uncertain demand[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133; DOI: 10.1016/j.engappai.2024.108004.
- [73] Jakobović D, Đurasević M, Brkić K, et al. Evolving dispatching rules for dynamic vehicle routing with genetic programming[J]. *Algorithms*, 2023, 16(6): 285-291.
- [74] Hadjar A, Marcotte O, Soumis F. A branch-and-cut algorithm for the multiple depot vehicle scheduling problem[J]. *Operations Research*, 2006, 54(1): 130-149.
- [75] Dani V, Sarswat A, Swaroop V, et al. Fast convergence to near optimal solution for job shop scheduling using cat swarm optimization[C]//*International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence*. New York: IEEE, 2017; DOI: 10.1007/978-3-319-69900-4\_36.
- [76] Ha Q M, Deville Y, Pham Q D, et al. On the min-cost traveling salesman problem with drone[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 86: 597-621.

- [77] Hao J, Wang C, Yang M, et al. Hybrid genetic algorithm based dispatch and conflict-free routing method of AGV systems in unmanned underground parking lots[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). New York: IEEE, 2020; DOI: 10.1109/RCAR49640.2020.9303275.
- [78] Wei M, Jing B, Yin J, et al. A green demand-responsive airport shuttle service problem with time-varying speeds[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020: 1-13.
- [79] Berbeglia G, Cordeau J F, Laporte G. A hybrid tabu search and constraint programming algorithm for the dynamic dial-a-ride problem[J]. INFORMS Journal on Computing, 2012, 24(3): 343-55.
- [80] Gök Y S, Tomasella M, Guimarans D, et al. A simheuristic approach for robust scheduling of airport turnaround teams[C]//Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference (WSC). New York: IEEE, 2020; DOI: 10.1109/WSC48552.2020.9383947.
- [81] Xiao Y, Konak A. A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 1450-1463.
- [82] Dani V, Sarswat A, Swaroop V, et al. Fast convergence to near optimal solution for job shop scheduling using cat swarm optimization[C]//Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence. Berlin: Springer International Publishing, 2017; DOI:10.1007/978-3-319-69900-4\_36.
- [83] Tang J, Yang Y, Qi Y. A hybrid algorithm for urban transit schedule optimization[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 512: 745-755.
- [84] Moreno C, Falcón L, Bolaños R, et al. A hybrid algorithm for the multi-depot vehicle scheduling problem arising in public transportation[J]. International Journal of Industrial Engineering Computations, 2019, 10(3): 361-374.
- [85] 孙继洋, 黄建玲, 陈艳艳, 等. 响应动态需求的灵活型公交线路优化调度模型[J]. 北京工业大学学报, 2021, 47(3): 269-279.  
Sun Jiyang, Huang Jianling, Chen Yanyan, et al. Flexible bus route optimization and scheduling model in response to dynamic demand[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(3): 269-279.
- [86] 王意, 武铁军. 民航机场地面保障车辆的现状及发展趋势[J]. 国际航空, 1995(2): 55-57.  
Wang Yi, Wu Tiejun. Current situation and development trend of ground support vehicles at civil aviation airports[J]. International Aviation, 1995(2): 55-57.
- [87] Han X, Zhao P, Meng Q, et al. Optimal scheduling of airport ferry vehicles based on capacity network[J]. Annals of Operations Research, 2020, 295: 163-182.
- [88] Ayadi M, Chabchoub H, Yassine A. A new mathematical formulation for the static demand responsive transport problem[J]. International Journal of Operational Research, 2017, 29(4): 495-507.
- [89] Chen X, Wang Y, Wang Y, et al. Customized bus route design with pickup and delivery and time windows: model, casestudy and comparative analysis[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 168: 114242.
- [90] Li X, Wang T, Xu W, et al. A novel model and algorithm for designing an eco-oriented demand responsive transit (DRT) system[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2022, 157: 102556.
- [91] Ma C, Wang C, Xu X. A multi-objective robust optimization model for customized bus routes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(4): 2359-2370.
- [92] Yu H, Lü W, Liu H, et al. A dynamic line generation and vehicle scheduling method for airport bus line based on multi-source big travel data[J]. Soft Computing, 2019, 24(9): 6329-6344.
- [93] Wang L Q, Zhang J, Wu W. Hyperpath-based vehicle routing and scheduling method in time-varying networks for airport shuttle service[J]. Natural Computing, 2017, 18(4): 769-784.
- [94] 何丹妮. 大型机场航班过站地面服务车辆调度问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
He Danni. Research on scheduling problems of ground service vehicles for flight transit at large airports[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [95] Mulumba T, Najj W, Diabat A. The drone-assisted pickup and delivery problem: an adaptive large neighborhood search metaheuristic[J]. Computers & Operations Research, 2024, 161: 106435.
- [96] Bodaghi B, Shahparvari S, Fadaki M, et al. Multi-resource scheduling and routing for emergency recovery operations[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 50: 101780.
- [97] 郭媛媛. 电动公交车辆和乘务协同调度的双目标优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.  
Guo Yuanyuan. Bi-objective optimization research on cooperative scheduling of electric bus vehicles and crews[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [98] 李猷. 基于多策略的机场地面保障车辆调度问题研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.  
Li You. Research on airport ground support vehicle scheduling problem based on multi-strategy[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [99] Kitjacharoenchai P, Ventresca M, Moshref-Javadi M, et al. Multiple traveling salesman problem with drones: mathematical model and heuristic approach[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 129: 14-30.
- [100] Tan Z, Shao S, Zhang X, et al. Sustainable urban mobility: flexible bus service network design in the post-pandemic era[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 97: 104702.