

考虑双时间窗特性的机场多车型摆渡车调度优化

张文义, 唐雨拉尔, 王旭兰, 周静, 边可, 刘志硕*

(北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘 要: 为提升摆渡车运行的灵活性、增强车辆调度方案的能效和实践可操作性, 综合考虑多车型和机场摆渡车运输服务的双时间窗特性, 从任务点视角构建机场摆渡车调度问题的混合整数线性规划模型。该模型可视为一个考虑多车型和双时间窗且需求可拆分的车辆路径问题, 是一个复杂的 NP-hard 问题, 为此, 提出一种改进的自适应大邻域搜索 (ALNS) 算法。以北京首都国际机场东飞行区为背景的案例仿真结果表明: 所提算法具有良好的稳定性和优化效果, 200 次迭代下 10 轮次计算实验结果的标准差与平均值之比仅为 5.6%, 优化前后对应的最优目标函数值下降达 54%; 多车型调度方案显著优于人工和单一车型调度方案, 在车辆容量利用能效上较人工、大车型和小车型方案分别提升了 98.3%、31.3% 和 22.2%, 在运行总成本上较人工、大车型和小车型方案则分别下降了 48.3%、23.4% 和 23.5%。

关 键 词: 航空运输; 机场; 摆渡车调度; 多车型; 双时间窗; 自适应大邻域搜索

中图分类号: U268.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)10-3345-09

国内民航运输需求的迅速攀升给有关系统的保障能力和效率提出了新的更高要求, 然而, 中国民航运输机场的摆渡车等稀缺资源调度目前仍主要依靠人工, 难以有效应对大规模复杂运行场景, 且无法满足管理科学化、智能化和精细化的发展要求, 严重制约了机场管理效能的进一步提升。鉴于此, 研发科学高效、适应能力更强的机场摆渡车智能化调度方法和系统是中国民航领域目前亟待解决的关键问题, 具有重要的理论和实践价值。

国内外有关机场摆渡车调度问题的研究近年来快速增长。Kuhn 等^[1]采用融入分支定界程序的遗传算法研究了单车型摆渡车调度问题; 杨文东等^[2]应用仿真优化方法探讨了多目标摆渡车调度问题; 冯霞等^[3]探讨了加油车和摆渡车的协同调度问题; 何丹妮^[4]设计一种两阶段启发式算法来优化摆渡车调度, 以减少用车数量和行驶距离; Han 等^[5]基于

虚拟航班和摆渡车场为节点构建摆渡车运力网络, 构建了混合整数规划模型, 以最小化摆渡车数量; Zhao 等^[6]引入虚拟航班, 经过简化将问题转化为可有效求解的网络最大流问题; Han 等^[7]则利用遗传算法来求解双目标摆渡车调度问题; Liu 等^[8]提出一种双目标混合整数规划模型, 并设计了改进的非支配排序遗传算法对模型进行求解; Zhu 等^[9]探讨了航班到达时间不确定条件下机场场面摆渡车和加油车的协同调度问题; 冯明端等^[10]面向机场地面特种设备车辆, 构建了带有容量限制和时间窗的联合调度模型; Han 等^[11]提出一种两阶段优化方法来提升航班不确定下的摆渡车调度准点率; Bao 等^[12]研究了以最小化用车规模目标的机场燃油和电动特种车辆混合调度问题, 并提出一种改进的自适应大邻域搜索 (adaptive large neighborhood search, ALNS) 算法来求解。

收稿日期: 2023-09-12; 录用日期: 2023-10-13; 网络出版时间: 2023-11-06 11:13

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20231103.1634.001

基金项目: 国家自然科学基金 (72271018); 北京首都国际机场股份有限公司资助项目 (T20L00690)

*通信作者. E-mail: zhslu@bjtu.edu.cn

引用格式: 张文义, 唐雨拉尔, 王旭兰, 等. 考虑双时间窗特性的机场多车型摆渡车调度优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (10): 3345-3353. ZHANG W Y, TANG Y L E, WANG X L, et al. Optimization of multi-type airport ferry vehicles schedules with double service time windows characteristic [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (10): 3345-3353 (in Chinese).

现有有关机场摆渡车调度问题的研究大多只关注单车型问题;此外,为简化问题建模和求解,相关约束也未考虑机场摆渡车运输服务的双时间窗特性,从而使得研究问题与实际不尽相符。本文在现有研究基础上,进一步考虑多类型摆渡车和摆渡车运输的双服务时间窗要求,构建了更符合中国实际且适应场景更广的机场摆渡车调度优化模型,并提出改进的自适应大邻域搜索算法,基于北京首都国际机场的案例研究结果表明,本文算法稳定有效,并且多车型调度方案显著优于人工和单车型调度方案。本文可为机场摆渡车调度提供辅助决策支持,助力机场降本增效,同时提升其管理的科学化和智能化水平。

1 问题描述

机场摆渡车调度问题旨在给未来一定时间内要进/离港的远机位航班调派摆渡车,使得各航班及时被服务且用车数量(或包含空驶距离)最小。现有研究一般只讨论同一类型(按载客容量划分)摆渡车的调度问题,并且假定每个航班只有一个服务时间窗。在此场景下,单一航班的摆渡运输任务可直接被拆分为固定数量的任务单元(即车辆往返航班停机位和航站楼间的一次“上客-行驶-卸客”作业过程)。例如,假定某一进港航班载有乘客 340 人,而摆渡车载客容量为 100 人,那么服务该航班将需要 4 辆车,对应于 4 个独立任务单元。如此一来,原问题即可转化为带单一时间窗约束的标准车辆路径问题^[13]。

本文的摆渡车调度问题与现有研究有 2 个显著区别:①本文考虑不同种类车型;②本文还考虑了摆渡车运输服务的双时间窗特性。前者可减少单一车型调度因“大车小用”导致的资源浪费,进而节约成本;后者使得问题更符合实际,所得方案的可操作性更强。然而,考虑二者也将使得研究问题的复杂性明显提升。考虑多车型使得单一航班的用车方案不再固定,问题将转变为需求可拆分这一更复杂情形,并且各航班本身的运输成本(即往返航班与航站楼间的摆渡车运行成本)也将因此转为可变。摆渡车服务的双时间窗特性源于中国民用航空局颁布的《航班安全运行保障标准》中的有关规定^[14]:“对于进港摆渡车,首车应在航班计划/预计到港时间前 5 min 到达机位或指定等待区域,其他摆渡车应在前车驶离后 2 min 内到位;对于出港摆渡车,首车不应晚于相应时间点(随机型不同而变化)前到达登机口或指定等待区域,其他摆渡车应在前车驶离后 2 min 内到位”。规定对于首辆

摆渡车与后续车辆的到达时间要求明显不同,并且无法用单一服务时间窗来刻画。因此,本文为各航班(注:过站航班被定义为一个进港航班和一个离港航班)定义了 2 个服务时间窗,即前置时间窗 $[0, T_{\text{begin}} - \mu]$ 和后置时间窗 $[T_{\text{begin}}, T_{\text{end}}]$, 其中: T_{begin} 对于进港航班表示其计划/预计到港时间,对于离港航班则表示规定中要求的时间点; μ 为时间提前量,对于进港和离港航班分别取值为 5 min 和 0; $T_{\text{end}} - T_{\text{begin}}$ 表示航班后置服务时间窗长度,本文假定其值随航班乘客数量梯次递增,如每增加 100 人,其值增加 2 min。规定中要求后续车辆的到发间隔不超过 2 min,无折扣处置该规定将给问题建模和求解带来较大挑战,后置时间窗可视为在不显著影响服务水平下对该规定的简化近似处理。由此,对于任一航班,必须有一辆摆渡车在前置时间窗内到达,其他车辆只需在前置和后置时间窗内选择其一到达即可,因此,理论上允许后置时间窗内无车辆到达,这也符合管理规定要求。考虑双服务时间窗使得车辆的到访时间决策变得更加灵活,将增加研究难度。

如上所述,若将航班摆渡运输任务(一个航班任务可包括多个任务单元,取决于航班载客量和用车方案)视为客户点,本文的摆渡车调度问题将可视为一个考虑多车型和双时间窗且需求可拆分的车辆路径问题,其目的是寻找可行且总成本最低的车辆调度方案(含车辆数量、类型、服务航班次序和时间)。

图 1 为本文摆渡车调度问题的一个示例,图中包含 2 种摆渡车、10 个待服务航班(如图中各飞机图标所示,每个图标对应一个航班摆渡运输任务)。图 1 采用不同线型的线段来标示不同车辆服务(或访问)相邻航班的顺序,车辆到访某航班代表执行

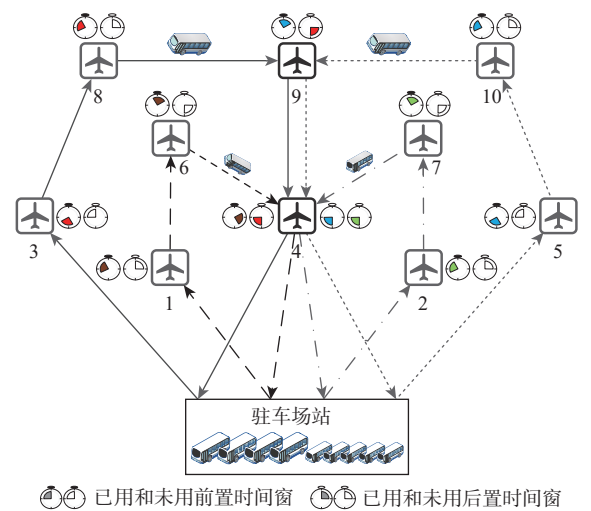


图 1 本文摆渡车调度问题示例

Fig. 1 An illustrative example for the ferry vehicle scheduling problem

该航班的一个摆渡任务单元(即一次“上客-行驶-卸客”作业过程), 同线型线段依次相连形成一辆摆渡车的完整服务路径, 路径数量、用车类型、航班组成及访问次序的不同将对应不同的摆渡车调度方案。如图 1 所示的方案共启用了 4 辆摆渡车, 其中, 大型车和小型车各 2 辆; 受航班载客量、位置和系统总成本等的影响, 航班 4 和航班 9 被分派多辆车进行服务(前者用到 2 种车型, 后者只用到大车), 其他航班只被分派一辆大型或小型车进行服务; 受有关运行保障规定约束^[14], 所有航班的前置时间窗内都有车辆到访服务。

2 数学建模

本文问题建模时考虑的主要假设有: ①各航班的机位位置和航站楼接驳口、载客量、计划/预计到/离港时刻等信息固定且已知; ②机场场面上任意两点(含机位、航站楼接驳口等)间的摆渡车行驶路线固定且已知, 相应时长和距离将作为参数纳入本文模型中; ③摆渡车按容量划分为多种类型, 不同类型车辆的行驶速度相同且已知; ④同类车辆的上客(和下客)时长相同, 不受旅客数量的影响; ⑤摆渡车场站只有一个, 并且车辆中途无需返回场站补能。

基于上述假设, 本文考虑双服务时间窗特性的机场多车型摆渡车调度问题可表示为如下的混合整数线性规划模型:

$$\begin{aligned} \text{ming}(x) = & \sum_{v \in V} \sum_{f \in F} \sum_{k \in K} c_{\text{fix}}^k \delta_k^v x_{o,f}^v + \\ & \sum_{v \in V} \sum_{i \in F_o} \sum_{j \in F_d} \sum_{k \in K} e_k \delta_k^v (l_{\text{deadHD}}^{i,j} + \lambda_k l_{\text{move}}^i) x_{i,j}^v \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{f \in F} x_{o,f}^v \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in F_o} x_{i,f}^v \leq 1 \quad \forall v \in V, f \in F \quad (3)$$

$$\sum_{f \in F} x_{o,f}^v = \sum_{f \in F} x_{f,d}^v \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in F_o} x_{i,f}^v = \sum_{j \in F_d} x_{f,j}^v \quad \forall v \in V, f \in F \quad (5)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in F_o} \sum_{k \in K} R_k \delta_k^v x_{i,f}^v \geq q_f \quad \forall f \in F \quad (6)$$

$$\sum_{v \in V} y_{f,1}^v \geq 1 \quad \forall f \in F \quad (7)$$

$$y_{f,1}^v + y_{f,2}^v = \sum_{i \in F_o} x_{i,f}^v \quad \forall v \in V, f \in F \quad (8)$$

$$T_f^v \leq T_{\text{begin}}^f - u_f + M(1 - y_{f,1}^v) \quad \forall v \in V, f \in F \quad (9)$$

$$T_f^v \geq T_{\text{begin}}^f - M(1 - y_{f,2}^v) \quad \forall v \in V, f \in F \quad (10)$$

$$T_f^v \leq T_{\text{end}}^f + M(1 - y_{f,2}^v) \quad \forall v \in V, f \in F \quad (11)$$

$$T_f^v \geq T_o^v + T_{\text{move}}^{o,f} - M(1 - x_{o,f}^v) \quad \forall v \in V, f \in F \quad (12)$$

$$T_f^v \leq T_o^v + T_{\text{move}}^{o,f} + M(1 - x_{o,f}^v) \quad \forall v \in V, f \in F \quad (13)$$

$$\begin{aligned} T_{f'}^v & \geq T_{\text{begin}}^f + s_f + T_{\text{move}}^{f,f'} - \\ & M(2 - x_{f,f'}^v - y_{f,1}^v) \quad \forall v \in V, f, f' \in F \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} T_{f'}^v & \geq T_f^v + s_f + T_{\text{move}}^{f,f'} - \\ & M(2 - x_{f,f'}^v - y_{f,2}^v) \quad \forall v \in V, f, f' \in F \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} T_d^v & \geq T_{\text{begin}}^f + s_f + T_{\text{move}}^{f,d} - \\ & M(2 - x_{f,d}^v - y_{f,1}^v) \quad \forall v \in V, f \in F \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} T_d^v & \geq T_f^v + s_f + T_{\text{move}}^{f,d} - \\ & M(2 - x_{f,d}^v - y_{f,2}^v) \quad \forall v \in V, f \in F \end{aligned} \quad (17)$$

$$\sum_{f \in F} x_{o,f}^v = 0 \Rightarrow T_o^v = W \quad \forall v \in V \quad (18)$$

$$\sum_{f \in F_o} x_{i,f}^v = 0 \Rightarrow T_f^v = W \quad \forall v \in V, f \in F \quad (19)$$

$$x_{i,j}^v = \{0, 1\} \quad \forall v \in V, i \in F_o, j \in F_d, i \neq j \quad (20)$$

$$y_{f,1}^v, y_{f,2}^v = \{0, 1\} \quad \forall v \in V, f \in F \quad (21)$$

$$\begin{cases} T_f^v \geq 0 & \forall v \in V, f \in F \\ T_d^v \geq T_o^v & \forall v \in V \end{cases} \quad (22)$$

式中: F 为待服务航班集合; f, f' 为航班索引; o 和 d 分别为摆渡车的逻辑起始和终到场站, 两者对应于同一个物理场站; F_o 为 F 与 o 点的并集, 索引为 i 或 j ; F_d 为 F 与 d 点的并集, 索引为 i 或 j ; V 为可用的摆渡车集合, 索引为 v 或 v' ; K 为车型的集合, 索引为 k ; q_f 为航班 f 的乘客数; T_{begin}^f 、 T_{end}^f 为航班 f 的后置到达服务时间窗的起、止时间, 其对于进港航班表示航班计划/预计到港时间, 对于离港航班则表示规定^[14]中要求的时间点; $[0, T_{\text{begin}}^f - \mu]$ 表示航班 f 的前置到达服务时间窗, μ 为时间提前量, 进港航班取值为 5 min、离港航班取值为 0; s_f 为服务航班 f 的作业时长, 包括上客、行驶至下车点和下客耗时 3 部分; δ_k^v 为车辆是否为 k 型摆渡车, 是则取 1, 否则取 0; c_{fix}^k 为 k 型车的固定启用成本; e_k 为 k 型车行驶单位里程所需开支(如能源耗费等); R_k 为 k 型车的载客容量; l_{move}^i 为摆渡车往返 $i \in F_o$ 与航站楼接驳口的标准行驶里程, 并且令 $l_{\text{move}}^o = 0$; $l_{\text{deadHD}}^{i,j}$ 为车辆从节点 i 结束位置到节点 j 开始位置的行驶距离; $T_{\text{move}}^{i,j}$ 为摆渡车从节点 i 结束位置行驶至节点 j 开始位置的行驶时长; λ_k 为 k 型车载客行驶时的单位里程费用增

益因子; M 、 W 为大的正实数,前者用于模型约束线性化,后者用于给变量赋初值; $y_{f,1}^v$ 、 $y_{f,2}^v$ 为 $0\sim 1$ 变量,分别表示车辆 v 是否在前置时间窗和后置时间窗内服务航班 f ,是则取 1、否则取 0; $x_{i,j}^v$ 为 $0\sim 1$ 变量,表示车辆 v 是否连续访问节点 i 和 j ,是则取值为 1,否则取 0, $\mathbf{x}$ 为其向量形式,另令 $x_{o,d}^v=0$; T_f^v 为车辆 v 到达航班 f 作业起点的时刻,若车辆 v 不服务航班 f ,其值为 W ; T_o^v 、 T_d^v 为非负实数,分别表示摆渡车 v 离开和返回驻车场的时刻,若车辆 v 不服务任何航班,其取值为 W 。

目标函数 (1) 表示运营总成本: 等号右侧第 1 项表示车辆启用成本,其值取决于不同类型车辆的启用数量; 等号右侧第 2 项表示车辆总行驶成本,具体包括空驶成本和车辆往返航班与航站楼间的摆渡运输成本 2 部分。在既有研究中,由于只考虑一种车型,各航班的用车数量固定不变,各航班的摆渡运输成本因此成为一个固定值,故而不必列于目标函数中。考虑多车型后,航班的用车数量和类型将不再固定不变,而不同类型摆渡车的单位行驶里程耗费又不相同,这就使得各航班的摆渡运输成本存在进一步优化的空间,因此,必须列于目标函数中。考虑到载客前后车身质量的明显变化会影响车辆单位里程能耗,因此,目标函数 (1) 中的航班摆渡运输成本是基于载客情形来计算的,以更准确地反映车辆行驶成本。

式 (2)~ 式 (23) 为模型的约束条件: 式 (2) 表示可启用的车辆数目有限,并且没有车辆必须要被启用; 式 (3) 表示任一辆摆渡车至多服务同一航班一次; 式 (4) 和式 (5) 分别表示车辆在场站和航班节点上的流量守恒约束; 式 (6) 表示调派的摆渡车总装载容量不能低于被服务航班的乘客总数; 式 (7)~ 式 (11) 反映了机场摆渡车运输服务的双时间窗特性和要求,式 (7) 表示必须有车辆在前置时间窗内到达航班服务地点,式 (8) 表示服务某航班的车辆只能在前置和后置时间窗中选其一对该航班进行服务,式 (9) 表示前置服务车辆须在目标航班的前置时间窗内到达,式 (10) 和式 (11) 共同表示后置服务车辆须在目标航班的前置时间窗内到达; 式 (12)~ 式 (17) 表示车辆的连续行为活动(车辆的行为获得包括离开场站、服务航班和返回场站 3 种)在时间上必须满足可接续,式 (12) 和式 (13) 表示车辆离开场站继而服务首个航班,式 (14) 和式 (15) 表示车辆相继服务 2 个航班,式 (16) 和式 (17) 表示车辆服务完最后一个航班继而返回场站; 式 (18) 和式 (19) 给特殊条件下的部分决策变量赋值,以降低变量数目; 式 (20)~ 式 (22) 给出了离散和连续决策变量的

基本取值范围。

由以上数学模型可见,考虑多车型,使得所有决策变量需要增加角标 v ,这意味着决策变量的数量将大大增加; 考虑双服务时间窗,使得问题需要另行增设两类决策变量(即 $y_{f,1}^v$ 和 $y_{f,2}^v$),用以刻画车辆拟选择到访的时间窗。除决策变量增加和扩维以外,考虑多车型和双时间窗还将使得问题数学模型的约束数量增加,进而急剧加大问题的研究难度。

3 求解算法

众所周知,标准的带时间窗约束的车辆路径问题是一个 NP-hard 问题,目前尚缺乏可求解此类较大规模问题的精确算法^[13]。本文的摆渡车调度问题相当于在标准带时间窗车辆路径问题基础上进一步考虑多车型、双时间窗与需求可拆分等复杂因素,这使得问题决策维度、变量数和约束数量均急剧增加,由此问题的计算复杂度将剧烈上升,可精确求解的问题规模将急速下降。因此,对于实际中或具有一定规模的问题而言,可行的解法只能是启发式算法,而在众多此类算法中,本文选择了相对较新的 ALNS 算法,ALNS 算法在大邻域搜索基础上构造了一套自适应机制来动态选用更适宜的邻域算子来生成新解,从而提升算法效果^[15]。相比于禁忌搜索、模拟退火算法等小邻域搜索算法,ALNS 算法所有破坏和修复算子可显著扩大解空间的搜索范围,从而增强算法的全局寻优能力; 较之遗传算法和一般邻域搜索算法盲目无差别选择邻域算子,ALNS 算法根据历史表现和使用频次等信息来选择邻域算子,这种相互竞争的自适应选择机制有利于生成更好的邻域结构,从而让算法有更大概率找到更好的解; 此外,这种动态算子选择机制可以限制无效或低效邻域算子的执行,从而允许 ALNS 算法引入更多的邻域算子(而不必担心无效搜索浪费计算资源),此举可进一步增强搜索的多样性和算法跳出局部最优的能力。因为这些突出优点,ALNS 算法已被成功应用于车辆调度、资源分派等一系列复杂组合优化问题的求解中^[16]。本文结合问题的自身特点对标准 ALNS 算法进行适当改进,得到了求解本文摆渡车调度问题的 ALNS 算法,本文算法流程如图 2 所示。

初始解的质量对于算法效果通常具有重要影响,本文采用一种贪婪启发式规则来构造 ALNS 算法初始解,该规则遵循“先大后小”原则,首先,将待服务航班按最早可服务时间按升序排列,然后,依此顺序为各航班安排符合时间约束的摆渡车,且优先选用大车。为提高车辆利用效率,安排大车时

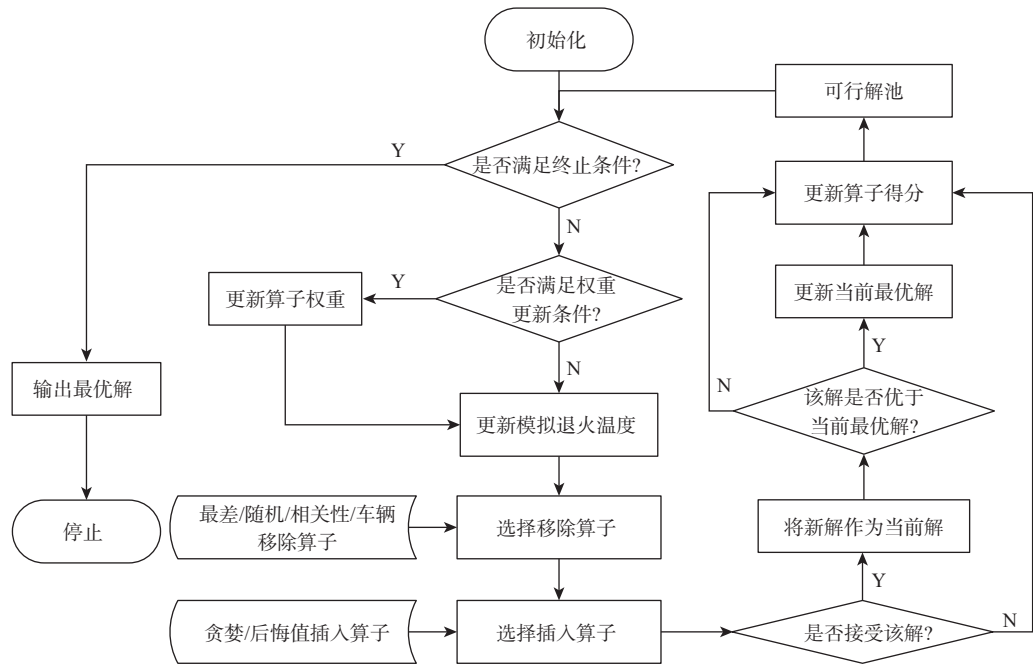


图 2 本文算法流程

Fig. 2 Flow of the proposed algorithm

还需考虑其满载率,即当大、小车均可用时,若某航班剩余乘客数量小车即可容纳,则弃大车、选小车;若场面上无现车可用,则从场站派用新车。破坏算子方面,本文在传统随机移除、最坏移除和相关性移除基础上增设了车辆移除算子,用以降低高成本车辆解的生存机率;修复算子方面,本文采用贪婪插入和后悔插入 2 种。需要指出:本文 ALNS 算法邻域操作生成的解只有满足模型所有约束条件时才可能得以保留,因此,本文算法最终得到的解必定是正确可行的。

4 实例分析

4.1 案例

本文实例选取北京首都国际机场 T3 航站楼所在东飞行区 2018 年 9 月 1 日 6: 00—12: 00 之间的远机位进/离港航班数据对本文模型和算法进行测试

算分析,该时段共包括 7 个进港航班和 28 个出港航班,数据给出了各远机位航班的机型、停机位编号、到港时间、离港时间等信息。由于数据未提供各航班的载客数量信息,本文案例研究中将按照平均值取 80% 在区间 [70%, 90%] 内随机生成各航班的客座率。图 3 为首都国际机场东飞行区的远机位分布,其中, No. 1~No. 10 为远机位位置机口。

本文案例设置大、小 2 种类型的摆渡车,其中,大型车和小型车的单车固定启用成本分别为 1 500 元和 800 元、单车载客容量分别为 120 人和 50 人、单位行驶里程成本分别为 3 元/km 和 1.6 元/km。摆渡车在场面上的平均行驶速度设为 20 km/h,不同类型车辆的载客行驶单位成本增益系数 λ 均取值为 1.2。ALNS 算法参数设置如下:初始温度设为 0.8,停止温度为 0.1,温度下降系数设为 0.995,给定温度下的算法迭代次数设为 5 次。

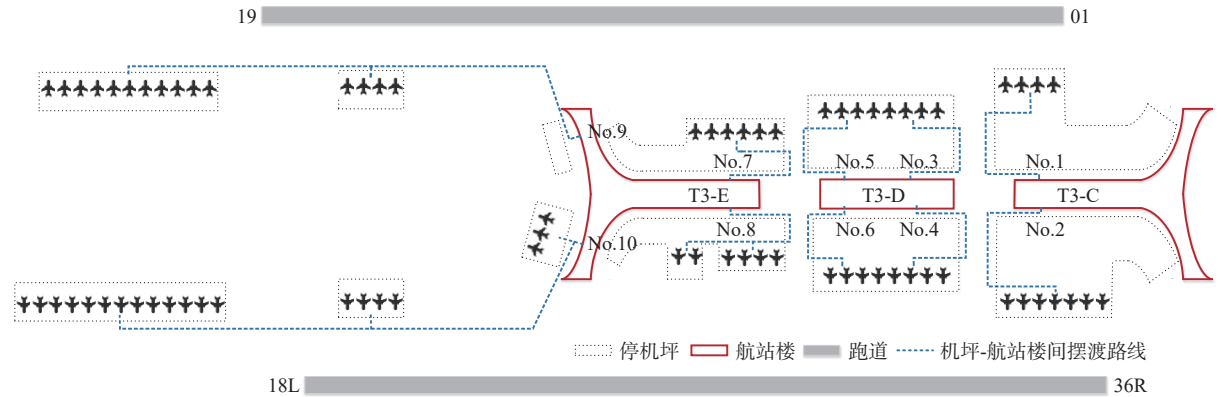


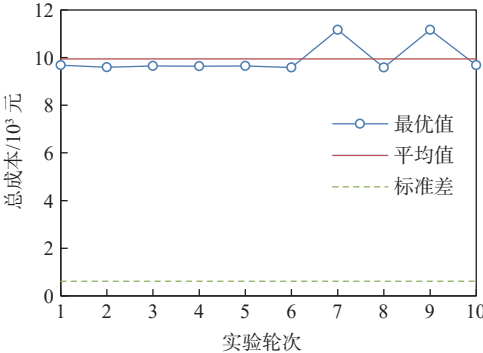
图 3 首都机场东区远机位分布与摆渡路线

Fig. 3 Layout and running routes of far stands in eastern airfield of BCIA

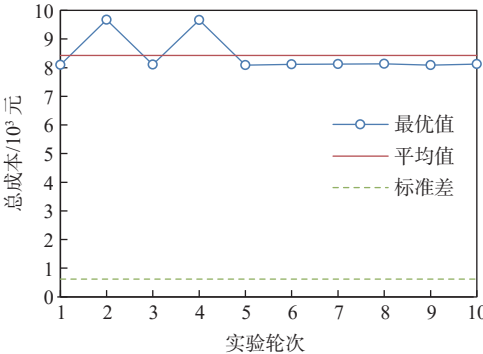
4.2 本文算法求解效果分析

本节针对不同终止迭代次数各自开展 10 轮计算实验，以检验本文 ALNS 算法的求解效果。图 4(a)、4(c) 和 4(e) 分别给出了终止迭代次数为

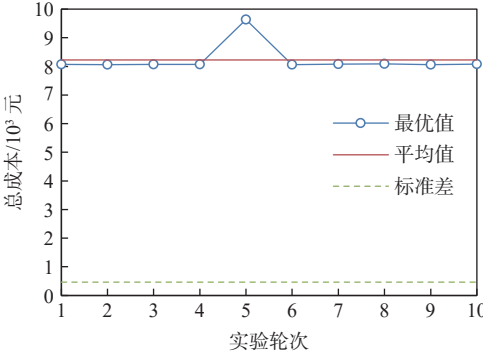
100、150 和 200 时 10 轮实验得到的最优解及其有关统计指标；图 4(b)、4(d) 和 4(f) 分别给出了终止迭代次数为 100、150 和 200 时最优实验对应目标函数值的下降过程。



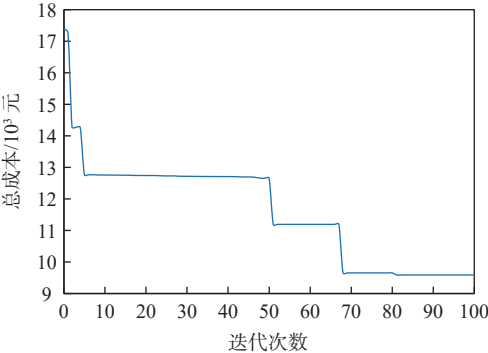
(a) 100次迭代下10轮实验的求解结果统计



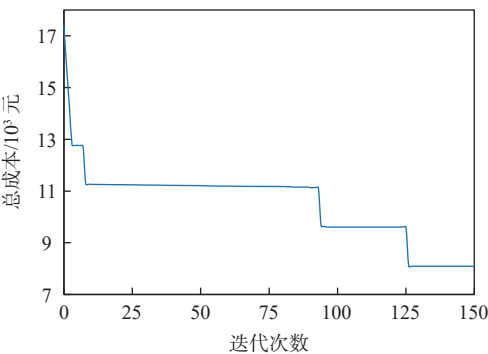
(c) 150次迭代下10轮实验的求解结果统计



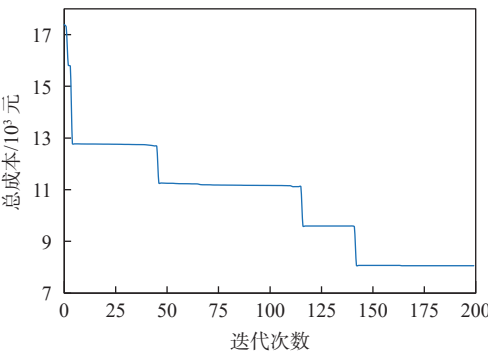
(e) 200次迭代下10轮实验的求解结果统计



(b) 100次迭代下最优轮次实验的目标总成本演化



(d) 150次迭代下最优轮次实验的目标总成本演化



(f) 200次迭代下最优轮次实验的目标总成本演化

图 4 不同终止迭代次数下的实验结果统计(左列)与最优目标函数值下降过程(右列)

Fig. 4 Experimental result statistics (left column) and evolution of optimal objective function values (right column) under different iterative tolerances

由图 4 可得，当终止迭代次数取 100、150 和 200 时，10 轮实验所得最优解的标准差与平均值比值分别仅为 6.2%、7.4% 和 5.6%，波幅较小，表明本文算法稳定性较好；最优实验所得最优解的目标函数值较初始解降幅随迭代次数增加而上升，分别达 45%、53% 和 54%，表明本文算法对本文案例问题的优化效果较好。

4.3 调度方案对比

表 1 与表 2 分别给出了不同车辆调度方案的计算结果及多车型调度方案跟人工调度与单一车型

调度方案的目标函数对比。此处人工调度用于模拟现实情况，其调度方法与本文算法的初始解生成过程类似，不同点在于这里只使用大车(因为现实情况就是如此)；单一车型调度则可视本文算法的一种特例，相当于第 2 节所示模型中只有一种车型。

由表 1 和表 2 可以看出，本文多车型调度方案的各项子目标(即用车成本与行驶费用)均明显小于人工调度和单一车型调度结果，对应的总成本较之人工调度、大车型和小车型调度方案改进(即下

表 1 不同调度方案的计算结果

调度方案	用车数量/辆		用车成本/ 元	行驶费用/ 元	总成本/ 元
	大车	小车			
人工调度	9		13 500	656	14 156
单一大车型调度	6		9 000	546	9 546
单一小车型调度		11	8 800	750	9 550
多车型联合调度	3	3	6 900	410	7 310

表 2 多车型调度方案与其他 3 种方案的结果对比

对比调度策略	改进幅度/%		
	用车成本	行驶费用	总成本
人工调度	48.9	37.5	48.3
单一大车型调度	23.3	24.9	23.4
单一小车型调度	21.6	45.3	23.5

降)分别达到 48.3%、23.4% 和 23.5%, 这表明人工调度方案尚存在较大的成本节约空间, 采用混合车型比单一车型更更有助节约运营成本。

从车辆利用效能角度来分析导致各方案性能差异的更深层次原因。图 5 为不同调度方案的车辆满载率热力图。图中: 列表示航班标号, 共有

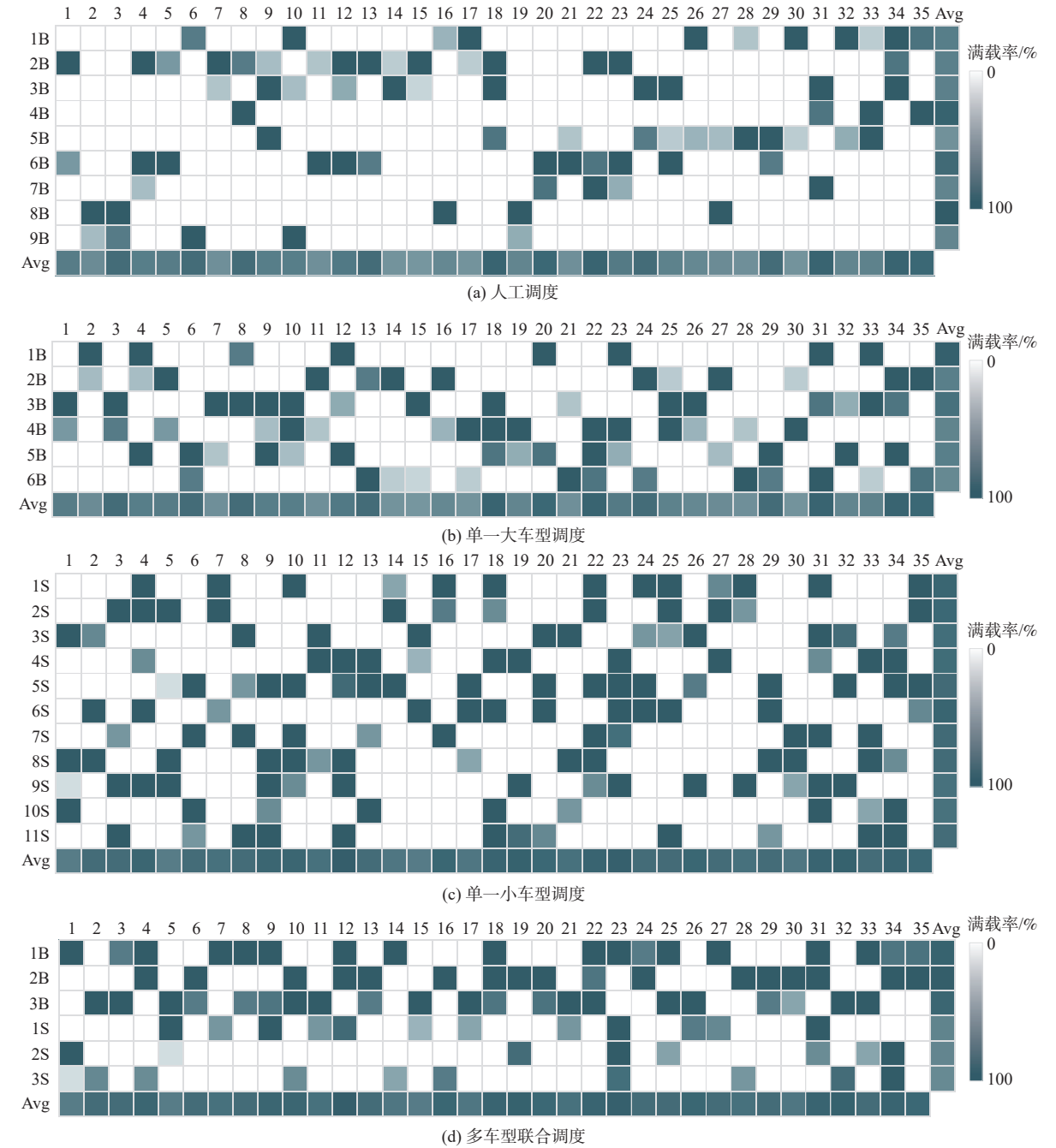


图 5 不同调度方案的满载率热力图

Fig. 5 Thermodynamic chart of vehicle full-load ratios for different scheduling strategies

35 个航班;行表示分派的车型(xB 表示编号为 x 的大型车;xS 表示编号为 x 的小型车);Avg 表示平均满载率,具体包括车辆级平均满载率和航班级平均满载率,有关计算方式定义如下:

- 1) “车辆单次满载率”等于“车辆在某航班的载客人数”与“车辆容量”之比;
- 2) “车辆平均满载率”等于车辆服务航班的单次满载率的算术平均值,设某车共服务 3 个航班,对应满载率分别为 80%、70% 和 60%,那么该车的平均满载率为 70%;
- 3) “航班级平均满载率”等于“航班载客人数”与“服务航班的车辆总容量”之比,如某航班载客 180 人,服务该航班的 3 辆车的容量分别为 100, 50, 50 人,那么该航班的平均车辆满载率为 $180/(100+50+50)=90\%$ 。

由图 5 可见,相比于单一小车型和多车型调度方案,只使用大车的人工调度和单一大车型调度方案的淡色格子(意味着车辆单次满载率较低)数量更多,对应车辆满载率的平均值也更低;此外,较之 3 种经优化得到的方案,人工调度方案的空格率明显更高,这意味着其车辆复用效果可能不太理想。

表 3 给出了各方案的车辆总体平均满载率和车辆平均容量服务率,前者等于“航班总人数”与“所有航班的车辆总容量”之比(假设需要服务 5 个航班,总载客数为 1 000 人,某方案给各航班分派的车辆总容量分别为 200, 250, 250, 250, 150 人,该方案的车辆总体平均满载率则为 $1\,000/(200+250\times3+150)=95.24\%$),后者等于“航班总人数”与“启用车辆容量之和”之比(比如,假定需服务 5 个航班,总载客人数为 1 000,某方案共启用了 3 辆车且其容量分别为 100、100 和 50,那么该方案的车辆平均容量服务率为 $1\,000/(100+100+50)=4$),这 2 个指标分别反映了机场摆渡车的利用率和复用率,两者互为补充、综合反映了各调度方案的车辆利用能效。由表 3 可知,利用小车型的后 2 种方案的车辆利用率更高;对于车辆容量服务率,优化过的方案的效果比人工调度好,单一小车型方案比单一大车型的效果更好,而多车型方案中小车的合理利用使得大车的优势得到更充分的发挥,使其总体效果最好。由表 3 可计算出,多车型联合调度方案的车辆容量服务率(集中反映车辆容量利用能效)相较于人工、单一大车和单一小车调度方案分别提升 98.3%、31.3% 和 22.2%,改进效果显著。综合本节结果及分析,采用混合车型可以有效避免人工或单一车型调度方案存在的“大车小用”或“小车多用”问题,从而助力企业进一步降本增效。

表 3 不同调度方案的车辆利用能效对比

Table 3 Vehicle utilization efficiency comparison between different scheduling schemes

调度方式	车辆总体平均 满载率/%	车辆平均容量服务率/ (人·单位容量 ⁻¹)		
		大车	小车	总体
人工调度	82.05	7.17		7.17
单一大车型调度	82.05	10.83		10.83
单一小车型调度	90.78		11.64	11.64
多车型联合调度	90.78	18.33	10.33	14.22

5 结 论

本文综合考虑多车型和摆渡车运输服务的双时间窗特性,从任务点视角构建了机场摆渡车调度问题的混合整数线性规划模型,并以北京首都国际机场东区为背景开展了数值实验研究,所得主要研究结论如下:

- 1) 研究考虑多类型摆渡车调度问题,实例结果表明多车型调度方案在车辆利用效能方面显著优于人工调度和单一车型方案,可以有效降低或避免单一车型调度方案中存在的“大车小用”或“小车多用”问题,可为相关企业降本增效提供更大潜力。
- 2) 模型约束建模纳入更多民航行业管理规定、目标计算考虑空驶/载客车重差异,使得目标函数的费用计算更准确,本文方案的实效和可操作性将更强。
- 3) 贪婪式人工调度仍存在较大的降本提效空间,不管采取何种车型,本文优化所得方案总能带来明显的成本节约和能效提升,而其中尤以多车型方案的效果最好。

参考文献 (References)

[1] KUHN K, LOTH S. Airport service vehicle scheduling[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 2010, 18(1): 63-83.

[2] 杨文东,陶婧婧,贾玉平. 机坪摆渡车实时调度系统仿真[J]. *南京航空航天大学学报*, 2013, 45(6): 854-858.
YANG W D, TAO J J, JIA Y P. Simulation of real-time scheduling of airport ferry bus[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(6): 854-858(in Chinese).

[3] 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 X, REN Z Y. Collaborative scheduling of fuelling vehicle and ferry vehicle based on genetic algorithm[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(2): 155-163(in Chinese).

[4] 何丹妮. 大型机场航班过站地面服务车辆调度问题研究:以摆渡车为例[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
HE D N. Research on the scheduling problem of ground service vehicles for large airport flights: taking car ferry as an example[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018(in Chinese).

[5] HAN X, ZHAO P X, MENG Q C, et al. Optimal scheduling of air-

- port ferry vehicles based on capacity network[J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 295(1): 163-182.
- [6] ZHAO P X, HAN X, WAN D. Evaluation of the airport ferry vehicle scheduling based on network maximum flow model[J]. *Omega*, 2021, 99: 102178.
- [7] HAN X, ZHAO P X, KONG D X. 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.
- [8] LIU Y H, WU J 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.
- [9] ZHU S R, SUN H J, GUO X. Cooperative scheduling optimization for ground-handling vehicles by considering flights' uncertainty[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 169: 108092.
- [10] 冯明端, 肖雪, 周航. 机场地面保障多车型车辆联合调度模型研究[J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2023, 47(1): 67-72.
- FENG M D, XIAO X, ZHOU H. Research on the multi-type joint scheduling model of airport ground support vehicles[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2023, 47(1): 67-72(in Chinese).
- [11] HAN X, ZHAO P X, KONG D X. Two-stage optimization of airport ferry service delay considering flight uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 307(3): 1103-1116.
- [12] BAO D W, ZHOU J Y, ZHANG Z Q, et al. Mixed fleet scheduling method for airport ground service vehicles under the trend of electrification[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2023, 108: 102379.
- [13] BRÄYSY O, GENDREAU M. Vehicle routing problem with time windows, part I: route construction and local search algorithms[J]. *Transportation Science*, 2005, 39(1): 104-118.
- [14] 中国民用航空局. 航班安全运行保障标准: 民航发[2020]4号[S]. 北京: 中国民用航空局, 2020.
- Civil Aviation Administration of China. Flight safety operation guarantee standards: CAAC[2020] No. 4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2020(in Chinese).
- [15] ROPKE S, PISINGER D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows[J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4): 455-472.
- [16] WINDRAS MARA S T, NORCAHYO R, JODIAWAN P, et al. A survey of adaptive large neighborhood search algorithms and applications[J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 146: 105903.

Optimization of multi-type airport ferry vehicles schedules with double service time windows characteristic

ZHANG Wenyi, TANG Yulaer, WANG Xulan, ZHOU Jing, BIAN Ke, LIU Zhishuo*

(Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A mixed-integer linear programming model is developed for the airport ferry vehicle scheduling problem from the perspective of task units, taking into account both the double time windows characteristics of the airdrome ferry vehicle transport service and multi-type vehicles in order to increase the flexibility of airport ferry vehicle operation and the efficiency and practicality of the vehicle scheduling schemes. The resultant model can be viewed as a split-delivery vehicle routing problem with multi-type vehicles and double service time windows, which is a complex NP-hard problem. To solve such a challenging problem, a tailored adaptive large neighborhood search (ALNS) algorithm is proposed. Computational experiments are conducted on the eastern airfield of the Beijing Capital International Airport. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm shows excellent stability and effectiveness. The ratio of the standard deviation to the average value of the calculation results for 10 iterations under 200 iterations is only 5.6%, and the optimal objective function value decreases by 54% before and after optimization. In addition, the multi-type vehicle schedule performs much better than both the man-made and the single-type schedules, which produces 98.3%, 31.3% and 22.2% of vehicle capacity efficiency increase and creates 48.3%, 23.4% and 23.5% of total operation cost saving in comparison to the man-made, single-big-type, and single-small-type schedules, respectively.

Keywords: air transportation; airport; ferry vehicle scheduling; multi-type vehicles; double time windows; adaptive large neighborhood search

Received: 2023-09-12; Accepted: 2023-10-13; Published Online: 2023-11-06 11:13

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20231103.1634.001

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (72271018); Research Foundation of Beijing Capital International Airport Co., Ltd. (T20L00690)

* Corresponding author. E-mail: zhslu@bjtu.edu.cn