

# 基于改进蚁群算法的机场清水车优化调度研究

张龙财, 李祉良, 李晓倩, 徐建平, 刘明辉

(中国民用航空飞行学院机场学院, 四川 广汉 618307)

**摘要:** 针对机场清水车调度问题, 考虑多规格载运量的清水车为不同机型航班提供保障服务的情况, 以最小化车辆使用数及航班等待服务时间为目标, 构建机场清水车优化调度模型。通过引入时间窗跨度与服务等待时间作为状态转移规则的关键因素, 并采用阶段性信息素蒸发及路径内 2-opt 和路径间 2-opt\* 优化策略, 对传统蚁群算法进行适用性改进并用于模型求解。最后, 以西南某枢纽机场运行数据为例进行实例验证。相比传统的先到先服务调度方式, 采用改进蚁群算法求解得到的调度方案, 车辆使用数和航班等待服务时间分别降低了 27.3% 和 22.9%。结果表明, 所建模型和算法在机场清水车调度问题上表现出较高的优化效率和实用性。

**关键词:** 机场清水车; 车辆调度; 多规格载运量; 多目标优化; 改进蚁群算法

**中图分类号:** V351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0120-07

随着中国航空运输业的迅速发展, 航班量急剧增加, 对机场特种车辆的保障服务工作带来巨大的压力。如何提升机场特种车辆的保障服务效率, 成为亟须解决的问题。其中, 机场清水车作为专门为出港航班提供饮用水的特种车辆<sup>[1]</sup>, 其合理调度不仅是保障出港航班正常运行的关键环节, 也直接影响机场和航空公司的运营成本及服务质量。然而, 目前多数机场普遍采用先到先服务 (first-come, first-served, FCFS) 的调度方式进行机场清水车调度, 难以达到理想的服务效率。因此, 深入研究机场清水车调度问题并探讨其优化调度方法, 对于提升服务效率、降低运营成本以及提高民航旅客满意度具有重要的现实意义。

近年来, 国内外学者对机场特种车辆调度问题进行了深入研究, 涵盖单车型调度和多车型协同调度。在单车型调度方面, 刘祎<sup>[2]</sup>针对机场高峰时段航班延误频发和摆渡车数量紧张情况, 构建考虑延误因素的摆渡车调度模型, 设计预分配调度算法和动态调度算法以应对不同阶段调度需求。Zampirolli 和 Amaral<sup>[3]</sup>针对机场罐式加油车的燃油加注流程, 构建车辆优化调度模型, 结合模拟退火算法与迭代局部搜索算法求解。张凤等<sup>[4]</sup>研究机场无

人驾驶清水车调度问题, 以最少使用车辆数、最短行驶路程等为目标, 构建车辆调度模型并运用改进 C-W (Clarke-Wright) 节约算法求解。王博<sup>[5]</sup>以机坪牵引车为研究对象, 建立基于多调度策略的优化模型, 并采用改进的非支配排序遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 进行求解。为解决因单车单航班服务调度导致的航班延误, 卢飞和宋佳佳<sup>[6]</sup>基于拖车服务流程特点, 构建拖车行驶总路程和航班延误最小化的调度优化模型, 并采用启发式算法进行求解。在多车型协同调度方面, Zhao 等<sup>[7]</sup>以车辆使用数最少和任务均衡为目标, 构建考虑机场摆渡车与牵引车的协同调度模型, 采用粒子群算法求解该问题。Liu 等<sup>[8]</sup>考虑多种特种车辆的服务约束关系和重复使用性, 以车辆数最少和额外总时间成本最小为目标构建协同调度模型, 并采用改进遗传算法以优化调度。Bao 等<sup>[9]</sup>考虑机场内燃油式和电动式特种车辆混合调度的现状, 以最小化行驶时间、能源消耗和排放成本之和为目标, 构建带时间窗的协同调度模型, 并采用自适应大邻域搜索算法求解。为提升大型机场地面保障效率, 徐晨等<sup>[10]</sup>构建多航班、多车辆、多车场及带容量时间窗的协同调度模型, 采用高维

**收稿日期:** 2024-11-14

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金面上项目 (J2022-041); 大学生创新创业训练计划 (202310624019)

**作者简介:** 张龙财 (1981—), 男, 四川资中人, 博士, 教授, 研究方向为机场运行、机场航站楼应急疏散等; 通信作者李祉良 (1999—), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 研究方向为机场运行管理; 李晓倩 (2000—), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为机场运行与管理; 徐建平 (1998—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向为机场航站楼旅客应急疏散; 刘明辉 (1999—), 男, 辽宁本溪人, 硕士研究生, 研究方向为航站楼火灾模拟与应急疏散。

进化算法优化,并通过 Anylogic 仿真验证,实现资源动态分配与监控。姜伟华等<sup>[11]</sup>在考虑航班延误、提前等情况基础上提出双阶段车辆协同调度模型,并设计双阶段启发式算法求解该问题。综上所述,当前对机场特种车辆调度问题的研究成果较为丰富,但鲜有考虑机场内同一类型不同规格特种车辆的调度问题。

与现有研究不同,本文首次针对多规格载运量的机场清水车调度问题,并考虑不同机型航班的清水需求差异,构建机场清水车优化调度模型,并对蚁群算法进行适用性改进,通过 MATLAB 软件进行实例验证,旨在为机场清水车调度提供一种全新且高效的解决方案。

## 1 模型构建

### 1.1 问题描述

航班在离港前或进港后,需要接受一系列地面保障服务,如加水、加油、排污等,以确保后续飞行任务的正常执行。这些服务由不同类型的特种车辆完成,其中,机场清水车专门负责为出港航班提供饮用水,其调度效率对于整体地面保障服务至关重要。

当前,机场清水车的调度工作面临多重挑战,包括制定合理的多规格载运量的车辆调度方案、考虑车辆数量和容量限制,以及在服务过程中返回车库补水的需求;此外,亟须提升清水车的调度服务效率,以应对日益增长的航班量和紧张的航班服务时间窗口。

为解决上述问题,满足机场实际运行需求,以最小化车辆使用数和航班等待服务时间为优化目标,通过减少车辆使用数,可以提高资源利用率,降低运营成本;同时,缩短航班等待服务时间,有助于提升航班准点率和旅客满意度。综合考虑航班服务时间窗、车辆容量限制、车辆再补水需求及服务流程次序等约束条件,构建机场清水车优化调度模型。

### 1.2 机场清水车优化调度模型构建

#### 1.2.1 模型假设

为便于研究,简化模型,设定以下条件假设:①所有清水车的载运量规格及数量是已知的,且都可以无故障运行;②清水车对出港航班的保障服务一旦开始,直到服务结束不会中断;③当前清水车行驶续航里程足够大,运行时间段内不考虑车辆行驶里程的限制;④任一架次出港航班的清水补给服务只需一辆清水车的一次服务就可以完成。

#### 1.2.2 变量设置

模型基础变量及其对应符号含义见表 1。

表 1 基础变量符号含义

基础变量	符号含义
$F$	待服务出港航班集合, $F = \{1, 2, \dots, i, \dots, j, \dots, n\}$
$O$	机场特种车库
$V$	待服务出港航班与特种车库的集合, $V = O \cup F$
$l$	车辆类型标号
$L$	清水车不同载运量规格类型集合, $L = \{1, 2, \dots, l\}$
$k$	车辆标号
$K_l$	$l$ 类型车辆数量集合, $K_l = \{1, 2, \dots, k\}$
$N_l$	$l$ 类型清水车辆最大可使用数
$v$	车辆行驶速度,规定车辆行驶速度 $v = 30 \text{ km/h}$
$M$	一个极大的数,用于辅助建模
$Q_{\max}^l$	$l$ 类型清水车最大载运量
$\delta_{ki}^l$	$l$ 类型清水车的第 $k$ 辆服务航班 $i$ 时的清水载运量
$e_i$	航班 $i$ 最早允许服务时间
$f_i$	航班 $i$ 最晚允许服务时间
$d_{ij}$	航班 $i$ 所在停机位和航班 $j$ 所在停机位之间的行驶距离
$d_{oi}$	车库 $O$ 到航班 $i$ 所在停机位的行驶距离
$T_{ki}^l$	$l$ 类型清水车的第 $k$ 辆服务航班 $i$ 的实际开始时间
$q_i$	航班 $i$ 所需清水量
$\mu$	清水车的供水流量,设定 $\mu = 180 \text{ L/min}$
$\omega$	清水车返回车库进行再补水时的补水流量,设定 $\omega = 500 \text{ L/min}$

决策变量如下。

$$x_{ki}^l = \begin{cases} 1, & l \text{ 类型清水车第 } k \text{ 辆服务于航班 } i \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$x_{kij}^l = \begin{cases} 1, & l \text{ 类型清水车第 } k \text{ 辆服务于航班 } i \text{ 后} \\ & \text{再服务于航班 } j \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_k^l = \begin{cases} 1, & l \text{ 类型清水车第 } k \text{ 辆被使用过} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$z_{ki}^l = \begin{cases} 1, & l \text{ 类型清水车第 } k \text{ 辆服务于航班 } i \text{ 后返回} \\ & \text{车库补充清水} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

#### 1.2.3 目标函数与约束条件

$$C_1 = \min \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} y_k^l \quad (1)$$

$$C_2 = \min \sum_{i \in F} \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} x_{ki}^l (T_{ki}^l - e_i) \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} x_{ki}^l = 1, \forall i \in F \quad (3)$$

$$0 \leq \delta_{ki}^l \leq Q_{\max}^l, \forall i \in F, \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (4)$$

$$e_i \leq T_{ki}^l \leq f_i - \frac{q_i}{\mu}, \forall i \in F, \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V} x_{kij}^l = \sum_{j \in V} x_{kji}^l, \forall i, j \in F \text{ 且 } i \neq j, \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K_l} y_k^l \leq N_l, \forall l \in L \quad (7)$$

$$y_k^l \geq x_{ki}^l, \forall l \in L, \forall k \in K, \forall i, j \in F \text{ 且 } i \neq j \quad (8)$$

$$y_k^l \geq x_{kij}^l, \forall l \in L, \forall k \in K, \forall i, j \in F \text{ 且 } i \neq j \quad (9)$$

$$T_{kj}^l \geq T_{ki}^l + \frac{q_i}{\mu} + \frac{d_{ij}}{v} + M(1 - x_{kij}^l),$$

$$\forall i, j \in F \text{ 且 } i \neq j, \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (10)$$

$$\delta_{kj}^l \leq \delta_{ki}^l - q_i + M(x_{kij}^l - 1),$$

$$\forall i, j \in F \text{ 且 } i \neq j, \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (11)$$

$$T_{kj}^l \geq T_{ki}^l + \frac{q_i}{\mu} + \frac{d_{oi}}{v} + \frac{Q_{\max}^l}{\omega} + \frac{d_{oj}}{v} + M(1 - z_{ki}^l),$$

$$\forall i, j \in F \text{ 且 } i \neq j, \forall l \in L, \forall k \in K_l \quad (12)$$

式(1)、式(2)为目标函数。式(1)为最小化清水车使用数;式(2)为最小化航班等待服务时间。式(3)~式(12)为约束条件。式(3)为任一架次航班只能由一种类型的一辆清水车提供服务;式(4)为任一清水车的载运量不能超过该类型车辆的最大载运量;式(5)为清水车需在航班允许服务时间窗内进行服务;式(6)为清水车完成服务后会立即驶离;式(7)为不同类型清水车使用数不能超过该类型清水车最大使用数;式(8)、式(9)为清水车使用约束;式(10)为清水车完成上一航班服务后前往下一待服务航班的时间约束;式(11)为清水车完成上一航班服务后前往下一待服务航班的载运量约束;式(12)为清水车完成上一航班服务返回车库进行清水补充后,前往下一待服务航班的时间约束。

## 2 算法设计

### 2.1 模型分析

1.2 节构建的机场清水车优化调度模型为混合整数线性规划模型,该模型所表述的清水车服务调度流程本质是车辆路径规划问题,属于大规模离散组合优化问题,基于群体智能的蚁群算法由于其独特的优化求解机制,较适合求解此类问题<sup>[12-13]</sup>。

### 2.2 算法的改进与设计

鉴于传统蚁群算法易陷入局部最优,且对机场特种车辆的特定运行环境适用性不足,本文借鉴蚁群系统(ant colony system, ACS)和最大最小蚁群系统(max-min ant system, MMAS)的思想,对其进行适当改进,以提高其在机场清水车调度问题上的求解质量和适用性。

#### 2.2.1 可行路径构建

令  $\tau_{ij}$  为信息素浓度,  $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$  为能见度,  $d_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的距离。蚂蚁  $k$  从节点  $i$  出发到达节点  $j$  的时间为  $a_j$ 。若  $a_j < e_j$ , 则需等待,导致运营成本增加;若  $a_j > f_j$ , 则无法满足服务需求。因此,在状态转移概率中引入等待时间因素,令  $a_j \leq f_j$ 。若  $e_j \leq a_j \leq f_j$ , 蚂蚁  $k$  在节点  $j$  的等待时间  $\text{wait}_j = 0$ , 令  $\text{wait}_j$  取一较小正数;若  $a_j < e_j$ , 则  $\text{wait}_j = e_j - a_j$ 。

此外,在状态转移概率中引入时间窗跨度因素。令时间窗跨度  $\text{width}_j = f_j - e_j$ , 当节点  $j_1$  和节点  $j_2$  未被访问过,且蚂蚁在两节点的等待时间相同,若  $j_1$  的时间窗跨度较小,即  $j_1$  比  $j_2$  的服务更具紧迫性,应优先访问  $j_1$ , 以此提高蚂蚁的访问效率。

因此,蚂蚁  $k$  从节点  $i$  移动到节点  $j$  的转移概率  $P_{ij}^k$ , 根据随机变量  $r$  和阈值  $r_0$  的比较,分为以下两种情况。

(1)若  $r < r_0$ , 则选择节点  $j$  使得下面的表达式最大化:

$$\max_{j \in N_i^k} \{ [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta [1/\text{width}_j]^\gamma [1/\text{wait}_j]^\varphi \} \quad (13)$$

(2)若  $r \geq r_0$ , 则按照下面的概率进行选择:

$$P_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta [1/\text{width}_j]^\gamma [1/\text{wait}_j]^\varphi}{\sum_{s \in N_i^k} [\tau_{is}]^\alpha [\eta_{is}]^\beta [1/\text{width}_s]^\gamma [1/\text{wait}_s]^\varphi} \quad (14)$$

式中:  $\alpha$  为信息素启发式因子;  $\beta$  为距离启发式因子;  $\gamma$  为时间窗跨度启发式因子;  $\varphi$  为等待时间启发式因子;  $r$  为在  $[0, 1]$  上服从均匀分布的随机变量;  $r_0$  ( $0 \leq r_0 \leq 1$ ) 为控制转移规则的参数;  $N_i^k$  为蚂蚁  $k$  从节点  $i$  出发可以访问的所有节点  $j$  的集合。

令蚂蚁从配送中心出发,采用顺序构建策略并按照转移规则式(13)和式(14),结合确定性和随机选择策略访问节点。当该蚂蚁无节点可访问,即返回配送中心,另派蚂蚁重复上述步骤。当所有节点都被访问过时,一条可行路径  $R$  构造完毕。

#### 2.2.2 信息素调整策略

当一条可行路径  $R$  构建完成,将其与全局最优路径  $R^*$  进行如下比较。

(1)若  $R$  的用车数  $V_R$  大于  $R^*$  的用车数  $V_{R^*}$ , 则将  $R$  所有边上的信息素进行大量蒸发,令  $\tau_{ij}^{\text{nw}} = (1 - \rho)^3 \tau_{ij}^{\text{old}}, \forall (i, j) \in R$ 。其中,  $\rho$  为信息素蒸发率,  $0 \leq \rho \leq 1$ 。

(2)若  $V_R = V_{R^*}$ , 但  $R$  的时间  $T_R$  大于或等于

$R^*$  的时间  $T_{R^*}$ , 则将  $R$  所有边上的信息素进行少量蒸发, 令  $\tau_{ij}^{new} = (1 - \rho)\tau_{ij}^{old}, \forall (i, j) \in R$ 。

(3) 若  $V_R = V_{R^*}$ , 且  $T_R < T_{R^*}$ , 或  $V_R < V_{R^*}$ , 则  $R$  优于  $R^*$ , 更新全局最优解, 令  $R^* = R$ 。

### 2.2.3 解的局部优化

为进一步提高解的质量, 对当前全局最优解  $R^*$ , 使用路径内 2-opt 及路径间 2-opt\* 优化方法进行局部优化。若全局最优解  $R^*$  存在改进空间, 则更新全局最优解。同时, 对于  $R^*$  所有的边更新信息素, 令  $\tau_{ij}^{new} = \rho\tau_{ij}^{old} + \Delta\tau_{ij}, \forall (i, j) \in R^*$ 。其中,  $\Delta\tau_{ij} = S/T_{R^*}$ ,  $S$  为一常数。

### 2.3 算法具体步骤

**步骤 1:** 设置迭代步数  $nc=0$ , 初始化参数, 读取实验数据, 将所有蚂蚁置于配送中心。

**步骤 2:** 令蚂蚁从配送中心出发, 遵循转移规则式(13)和式(14)访问节点, 按 2.2.1 节所述步骤构建可行路径  $R$  并与全局最优路径  $R^*$  比较。

**步骤 3:** 若  $V_R > V_{R^*}$ , 令  $\tau_{ij}^{new} = (1 - \rho)^3\tau_{ij}^{old}, \forall (i, j) \in R$ , 转步骤 6。

**步骤 4:** 若  $V_R = V_{R^*}, T_R \geq T_{R^*}$ , 令  $\tau_{ij}^{new} = (1 - \rho)\tau_{ij}^{old}, \forall (i, j) \in R$ , 转步骤 6。

**步骤 5:** 若  $V_R = V_{R^*}, T_R < T_{R^*}$ , 或  $V_R < V_{R^*}$ , 则令  $R^* = R$ 。

**步骤 6:** 以 2-opt、2-opt\* 优化  $R^*$ , 得到更新的全局最优路径  $R'^*$ 。

**步骤 7:** 令  $R^* = R'^*$ , 更新全局优化最优路径  $R^*$  的信息素,  $\tau_{ij}^{new} = \rho\tau_{ij}^{old} + \Delta\tau_{ij}, \forall (i, j) \in R^*$ 。

**步骤 8:** 若  $\tau_{ij}^{new} > \tau_{max}$ , 令  $\tau_{ij}^{new} = \tau_{max}$ ; 若  $\tau_{ij}^{new} < \tau_{min}$ , 令  $\tau_{ij}^{new} = \tau_{min}$ 。

**步骤 9:** 若  $nc \leq max\_nc$ , 令  $nc = nc + 1$ , 转步骤 2; 否则, 流程结束, 输出最终结果。

## 3 实例验证

### 3.1 实验数据

以中国西南某枢纽机场为研究对象。2023 年该机场年旅客吞吐量达 4 478.6 万人次, 年航班起降量达 32.9 万架次以上。选取该枢纽机场 2023 年 11 月 16 日 12:00—19:00 时间段内的 192 个出港航班数据, 结合该机场内存在多规格载运量的清水车及其为不同机型航班提供保障服务的调度需求进行实例仿真, 以验证本文所构建模型及改进算法的有效性。

#### 3.1.1 机型分类

根据《航班安全运行保障标准》中关于民航客机机型的分类<sup>[14]</sup>, 结合各机型清水箱容积数据, 为

便于研究, 对当前在中国民航旅客运输市场运营的客机机型及其相应清水需求量数据进行系统整理、归纳和分类, 见表 2。

#### 3.1.2 距离矩阵

该机场飞行区内共有 246 个停机位。已知各停机位和车库的位置, 根据车辆行驶路线, 可确定任意两个停机位之间及停机位与车库之间的行驶距离。表 3 为行驶距离邻接矩阵, 单位为 m。

表 2 民航客机机型分类及相应清水需求量

机型分类	座位数	民航客机机型	清水需求量/L
C	61~150	A319-100、ARJ21、CRJ-900 等	150
D	151~250	A320-200、A320neo、A321-200、A321neo、B737-700、B737-800、B737MAX、C919 等	200
E	251~500	A330-200、A330-300、A350-900、B747-400、B747-8、B777-300 等	1 000
F	500 以上	A380-800	2 000

表 3 飞行区停机位之间及与车库之间行驶距离邻接矩阵(部分)

停机位	222	223	224R	车库 O	601	602	603
222	0	52	116	325	947	1 013	1 120
223	52	0	64	382	999	1 065	1 172
224R	116	64	0	446	1 063	1 129	1 236
车库 O	325	382	446	0	1 035	1 101	1 208
601	947	999	1 063	1 035	0	66	173
602	1 013	1 065	1 129	1 101	66	0	107
603	1 120	1 172	1 236	1 208	173	107	0

#### 3.1.3 出港航班服务时间窗的确定

出港航班分为始发航班和经停航班。根据《航班安全运行保障标准》可知, 无论是对于始发航班还是经停航班, 清水车应在廊桥或客梯车对接完毕后开始进行保障服务, 并应在航班计划离港时间前 15 min 完成服务。对于始发航班, 应在航班计划离港时间前 90 min 完成廊桥对接工作; 对于经停航班, 应在航班计划到港前 10 min 做好廊桥检查及准备工作, 并且廊桥对接操作时间平均不能超过 5 min<sup>[13]</sup>。

因此, 可确定出港航班允许服务时间窗如下。

始发航班允许服务时间窗为

$$e_i = T_i - 90 \quad (15)$$

$$f_i = T_i - 15 \quad (16)$$

经停航班允许服务时间窗为

$$e_i = T_a + 5 \quad (17)$$

$$f_i = T_i - 15 \quad (18)$$

式中:  $T_i$  为出港航班计划离港时间, min;  $T_a$  为经停

航班计划到港时间, min.

3.1.4 车辆数据

目前该枢纽机场共有 14 辆清水车, 分属于 3 个不同单位, 具备 4 种不同的载运量规格, 均可执行出港航班的清水补给保障服务任务。具体车辆情况见表 4。

表 4 西南某枢纽机场清水车数据

编号	车牌号	清水载运量/L	所属单位
1	民航 DA2* 8	3 000	四川航空公司
2	民航 DA5* 1	4 000	四川航空公司
3	民航 DA6* 9	4 000	四川航空公司
4	民航 DA1* 8	5 000	四川航空公司
5	民航 DA5* 0	5 000	四川航空公司
6	民航 DA1* 4	3 000	中国国际航空公司
7	民航 DA1* 5	3 000	中国国际航空公司
8	民航 DA1* 7	3 000	中国国际航空公司
9	民航 D91* 9	4 500	中国国际航空公司
10	民航 D21* 2	4 500	中国国际航空公司
11	民航 DA2* 0	4 000	机场地服
12	民航 DA2* 3	4 000	机场地服
13	民航 DA2* 2	5 000	机场地服
14	民航 DA2* 1	5 000	机场地服

3.2 结果分析

使用 MATLAB 软件对机场清水车服务出港航班调度进行仿真实验, 为得到最佳调度方案, 经过多次调试, 算法参数设置如下: 蚂蚁数量为 20, 最大迭代次数 max\_nc 为 100, 初始信息素浓度为 1, 每次迭代中 2-opt 及 2-opt\* 使用次数为 5, 控制转移规则的  $r_0$  为 0.1, 蒸发率  $\rho$  为 0.2, 信息素启发式因子  $\alpha$  为 3, 距离启发式因子  $\beta$  为 1, 时间窗跨度启发式因子  $\gamma$  为 1, 等待时间启发式因子  $\varphi$  为 3。

选用的西南某枢纽机场出港航班详细数据见表 5。通过 MATLAB 软件进行 20 次仿真实验, 选取最佳调度方案。图 1 为清水车服务出港航班序列图, 图 2 为清水车服务出港航班时间示意图, 表 6 为清水车服务出港航班的详细序列。

将采用改进蚁群算法求解得到的调度方案结果与采用传统先到先服务 (FCFS) 调度方式得到的调度方案结果进行对比, 结果见表 7。

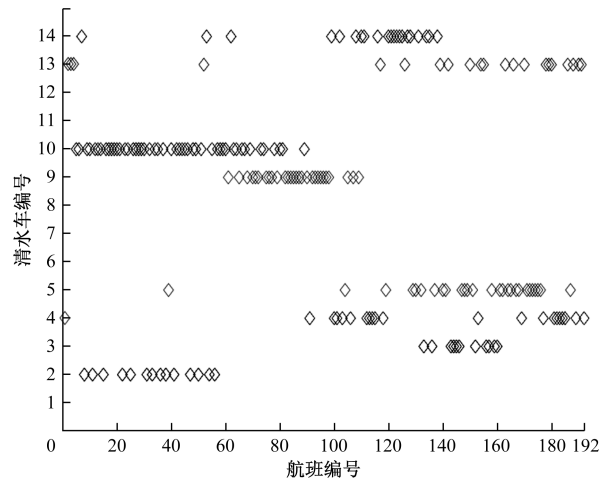


图 1 清水车服务出港航班序列图

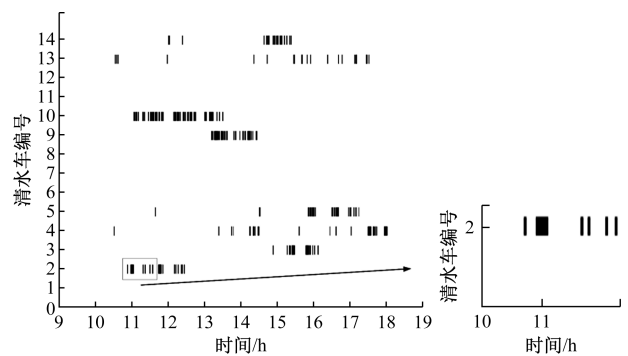


图 2 清水车服务出港航班时间示意图

表 5 待服务出港航班相关数据(部分)

编号	航班号	停机位	最早允许服务时间 $e_i$	最晚允许服务时间 $f_i$	客机机型	机型分类	清水需求量/L
1	MF8436	224R	10:30	11:45	B737MAX	D	200
2	JD5560	233R	10:32	11:47	A320-200	D	200
3	EU1859	269	10:32	11:47	ARJ21	C	150
	...		...		...		...
92	3U3931	142	13:23	14:38	A321neo	D	200
93	MU573	144	13:26	14:41	A320-200	D	200
94	CZ6256	203	13:32	14:47	A320-200	D	200
95	8L9667	232	13:32	14:47	A330-300	E	1 000
	...		...		...		...
189	CA2633	241R	17:18	18:33	A320neo	D	200
190	HU7376	224R	17:25	18:40	B737-800	D	200
191	CZ3242	212R	17:27	18:42	B737-800	D	200
192	TG619	127	17:30	18:45	B777-300	E	1 000

表6 清水车服务出港航班调度方案

清水车编号	服务出港航班序列
2	O→8→11→25→15→33→31→36→38→50→54→47→41→56→22→O
3	O→133→145→143→146→136→160→144→156→159→157→152→O
4	O→1→91→101→100→112→103→106→113→114→118→115→153→169→177→184→192→183→189→182→181→185→O
5	O→39→119→104→162→141→161→140→132→147→129→137→130→172→158→148→149→174→151→171→165→O→176→175→173→164→167→168→187→O
9	O→85→72→76→79→65→82→90→75→70→68→77→61→94→71→88→O→96→83→84→86→107→98→92→93→95→87→97→109→105→O
10	O→14→5→13→6→16→10→19→9→28→27→24→18→32→34→30→40→12→26→20→44→17→35→O→23→21→49→37→45→29→59→55→46→60→51→43→66→58→48→42→57→69→73→O→67→64→74→81→80→78→89→63→O
13	O→2→3→4→52→117→126→150→142→155→154→O→139→163→166→178→180→186→170→179→191→188→190→O
14	O→53→7→62→123→99→116→111→125→127→110→124→102→121→108→131→135→120→128→122→134→138→O
1、6、7、8、11、12	未使用

表7 采用改进蚁群算法的调度方案结果与传统 FCFS 调度方案结果对比

调度方式	车辆使用数量/辆	航班等待服务时间/h
FCFS	11	96.56
改进蚁群算法	8	74.38

由表6可知,相较于传统先到先服务(FCFS)调度方式,采用改进蚁群算法求解得到的机场清水车调度方案,清水车使用数减少了3辆,降低了27.3%;航班等待服务时间减少了22.18 h,降低了22.9%。这一结果表明,改进蚁群算法可以有效地解决机场清水车调度问题。为机场地面保障服务部门提供科学有效的决策支持。

此外,在求解过程中,会优先使用载运量较大的清水车为出港航班提供服务,从而达到提升服务效率的目的。因此,对于航班量较大的枢纽机场,配置高载运量规格的清水车将能有效提高运行效率、节约运营成本。

#### 4 结论

基于机场内多规格载运量的清水车为不同机

型航班提供保障服务,构建了机场清水车优化调度模型,并采用改进的蚁群算法对模型进行求解。以西南某枢纽机场的实际运行数据为例,通过MATLAB软件进行仿真实验,验证了模型的可行性和改进算法的有效性。相比传统先到先服务的调度方式,本文所提出的模型和算法可以为机场清水车调度提供更高效率的解决方案,为机场地面服务保障部门提供科学的决策支持。

#### 参考文献

- [1] 中国民用航空总局机场司. 飞机清水车: MH/T 6014-1999[S]. 北京: 中国民航出版社, 2000.
- [2] 刘祎. 机场高峰时段摆渡车调度建模研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [3] ZAMPIROLI K A, AMARAL A R S. Simulated Annealing and iterated local search approaches to the aircraft refueling problem[C]//International Conference on Computational Science and Its Applications. Sanya: Springer, Cham, 2021: 422-438.
- [4] 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.
- [5] 王博. 机场协同决策下机坪牵引车调度优化研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [6] 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.
- [7] ZHAO P X, GAO W Q, HAN X, et al. Bi-objective collaborative scheduling optimization of airport ferry vehicle and tractor [J]. International Journal of Simulation Modeling, 2019, 18(2): 355-365.
- [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] 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.
- [10] 徐晨, 王笑天, 刘博. 机场地面保障服务车辆协同调度和仿真优化[J]. 科技和产业, 2023, 23(14): 215-222.
- [11] 姜伟华, 张文静, 袁琪, 等. 基于时间窗的机场地面保障车辆动态调度[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(3): 1283-1291.
- [12] NIU L, XIONG L. Optimisation and application research of ant colony algorithm in vehicle routing problem [J]. International Journal of Computing Science and Mathematics, 2021, 13(2): 177-193.
- [13] 雷金美, 孙宇, 朱洪杰. 改进蚁群算法在带时间窗车辆路径规划问题中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(11): 3535-3544.
- [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: 民航局综合司, 2020.

## Optimization Study of Airport Clear Water Vehicle Scheduling Based on Improved Ant Colony Algorithm

ZHANG Longcai, LI Zhiliang, LI Xiaoqian, XU Jianping, LIU Minghui

(Airport College, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

**Abstract:** Aiming at the airport clear water vehicle scheduling problem, considering the situation that clear water vehicles with multi-specification load capacity provide guarantee services for flights of different aircraft types, an optimal airport clear water vehicle scheduling model was constructed to minimize the number of vehicles in use and the waiting service time for flights. By introducing time window span and service waiting time as the key factors of the state transfer rule, and adopting stage pheromone evaporation and intra-path 2-opt and inter-path 2-opt<sup>\*</sup> optimization strategies, the traditional ant colony algorithm is improved in terms of applicability and used for model solving. Finally, the operational data of a hub airport in Southwest China was used as an example for validation. Compared with the traditional first-come-first-served scheduling, the number of vehicles in use and the flight waiting service time are reduced by 27.3% and 22.9%, respectively, for the scheduling scheme obtained by solving the improved ant colony algorithm. The results show that the constructed model and algorithm demonstrate high optimization efficiency and practicality in the airport clear water vehicle scheduling problem.

**Keywords:** airport clear water vehicles; vehicle scheduling; multi-specification load capacity; multi-objective optimization; improved ant colony algorithm