

6-5-2020

## Flight Support Service Time Estimation of Hub Airport

Zhiwei Xing

*1. R&D Base of Special Ground Equipment, CAUC, Tianjin 300300, China;;2. College of Electronic Information and Automation, CAUC, Tianjin 300300, China;*

Yunxiao Tang

*2. College of Electronic Information and Automation, CAUC, Tianjin 300300, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Flight Support Service Time Estimation of Hub Airport

### Abstract

**Abstract:** For the convenience of airport to publish the accurate information about flight status to passengers in time, *estimating the service time of airport flight support is needed*. Because the flight support service is a mixed procedure of job shop and fixed site, and has characteristics of time window constrains and resource demand difference, *a model of flight support service procedure based on vehicle routing problem with time windows (VRPTW) was built*. For the strong NP nature of vehicle routing problems, a two phase hybrid heuristic algorithm based on greedy algorithm and tabu search was proposed. It was applied to the actual operation data of a large domestic hub airport *and the support service time estimation under the conditions of flight density change, vehicle number change and flight model change is achieved*. The accuracy test demonstrated that the proposed model and algorithm could estimate the flight support service time of hub airport as well as flight status, effectively.

### Keywords

flight support, service time estimate, vehicle routing problem, hybrid heuristic algorithm, time window

### Recommended Citation

Xing Zhiwei, Tang Yunxiao. Flight Support Service Time Estimation of Hub Airport[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2856-2865.

# 枢纽机场航班保障服务时间估计

邢志伟<sup>1,2</sup>, 唐云霄<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学航空地面特种设备民航研究基地, 天津 300300; 2. 中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

**摘要:** 为便于机场向旅客及时发布准确的航班状态信息, 需对机场航班保障服务时间进行估计。考虑到航班保障服务流程是零工型与定位型的混合流程, 且具有时间窗约束以及资源需求量差异等特点, 建立了基于带有时间窗车辆路径问题(VRPTW)的航班保障服务流程模型。针对车辆路径问题的强 NP 性, 设计了基于贪婪算法和禁忌搜索的两阶段混合启发式算法, 并应用于国内某大型枢纽机场实际运行数据, 实现了航班密度变化、保障车辆数变化、航班机型变化等情形下的保障服务时间估计。准确性测试表明, 所建模型和算法能有效估计枢纽机场航班保障服务时间并预测航班状态。

**关键词:** 航班保障; 服务时间估计; 车辆路径问题; 混合启发式算法; 时间窗

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2017)11-2856-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711035

## Flight Support Service Time Estimation of Hub Airport

Xing Zhiwei<sup>1,2</sup>, Tang Yunxiao<sup>2</sup>

(1. R&D Base of Special Ground Equipment, CAUC, Tianjin 300300, China;

2. College of Electronic Information and Automation, CAUC, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** For the convenience of airport to publish the accurate information about flight status to passengers in time, *estimating the service time of airport flight support is needed*. Because the flight support service is a mixed procedure of job shop and fixed site, and has characteristics of time window constrains and resource demand difference, *a model of flight support service procedure based on vehicle routing problem with time windows (VRPTW) was built*. For the strong NP nature of vehicle routing problems, a two phase hybrid heuristic algorithm based on greedy algorithm and tabu search was proposed. It was applied to the actual operation data of a large domestic hub airport *and the support service time estimation under the conditions of flight density change, vehicle number change and flight model change is achieved*. The accuracy test demonstrated that the proposed model and algorithm could estimate the flight support service time of hub airport as well as flight status, effectively.

**Keywords:** flight support; service time estimate; vehicle routing problem; hybrid heuristic algorithm; time window

## 引言

航班延误一直是困扰民航发展的瓶颈问题。



收稿日期: 2016-05-16 修回日期: 2016-07-08;  
基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国民用航空局联合研究基金项目(U1533203), 中央高校基本科研业务费基金项目(3122014P003);

作者简介: 邢志伟(1970-), 男, 辽宁沈阳, 博士, 教授, 研究方向为民航装备与系统、机场交通信息与控制。

据统计, 航班保障服务是影响航班延误的主要因素, 约占枢纽机场所有航班延误的 15.45%<sup>[1]</sup>, 之前应对延误的研究, 多集中在航班延误发生后, 进行调度优化以减少延误带来损失。而在航班发生延误之前对航班状态预测的研究有待深入研究, 基于此, 本文重点研究对航班地面保障服务时间的估计, 以便于相关单位合理配置资源, 提高航

班保障效率, 从而减少延误。鉴于航班保障服务过程的特殊性与复杂性, 本文建立了基于带有时间窗车辆路径问题(Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW)的航班保障服务流程模型, 采用两阶段混合启发式算法求解模型, 第一阶段在已知的航班信息下通过设计贪婪算法快速寻找初始解和服务航班序列, 第二阶段通过设计禁忌搜索算法对初始解优化。最后将各种情形下的航班保障服务时间的估计值与实际值进行比较分析并进行准确度测试。本方法能为机场及其相关部门的应急指挥管理提供及时的预警信息, 从而减少因保障环节引起的负面影响, 降低旅客极端事件的发生率。

## 1 航班保障服务环节相关研究现状

对于航班保障服务环节, 目前国内外的研究成果多集中在仿真分析、流程优化、设备调度及优化以及对航班过站时间的估计等方面, 而对航班保障服务时间估计的研究极少涉及。

在仿真分析方面, 郝静麒等用改进的离散事件仿真策略与动态分配法研究平台车资源分配问题。在仿真平台 Service model 上实现了平台车资源的货物装卸流程仿真<sup>[2]</sup>。黄鹂诗等对机坪车辆进行仿真研究, 使用 SIMIO 软件实现了保障设备的仿真<sup>[3]</sup>, 但是其研究不是针对枢纽机场且未考虑车辆的损坏率。在流程优化方面, Wu 等把航班地面保障服务作业分成货邮行李和旅客服务两个方面, 采用马尔可夫过程分析并优化保障作业的流程<sup>[4]</sup>, 但其研究未考虑机场系统调度的可实现性。孙宏等运用网络计划技术中的计划评审法(PERT)优化飞机地面过站流程<sup>[5]</sup>, 而孙瑞山等则使用关键路径法(CPM)找出航班保障服务的关键路径<sup>[6]</sup>, 他们的定性分析多于定量分析。在设备调度及优化方面, Angus Cheung 等提出了航班过站保障设备调度的遗传算法并用此算法优化了清水车与拖车的调度<sup>[7]</sup>, 但此算法未考虑保障设备的容量约束。Garcia Ansola P 等提出了基于 Agent 的航班地面保

障服务调度分布式控制方法, 优化了调度过程<sup>[8]</sup>。Andreatta G 等提出了一种快速启发式方法对航班保障设备和人员进行优化分配, 提高了保障服务的效率<sup>[9]</sup>。姚韵等提出了一种设备能力差分配法来优化航班地面服务, 效果优于先到先服务调度算法<sup>[10]</sup>。在航班过站时间的估计方面, 丁建立等选取航班过站实际运行的历史数据, 采用最大似然估计进行贝叶斯网参数学习来估计航班过站时间。取得了不错的效果<sup>[11]</sup>, 但此方式仅对完备数据集效果明显, 处理机场运行这种容易产生缺失或部分稀疏的数据时会产生较大偏差。

基于以上分析, 本文着眼于航班保障服务时间估计这一国内外学者极少涉及但又具有实际研究意义的课题, 以更小的尺度对航班过站的细节进行研究, 以提高航班保障效率减少因航班保障引起的延误。其次, 在研究方法上, 本文将经典的带有时间窗车辆路径(VRPTW)问题引入到航班保障服务流程中, 建立基于 VRPTW 的航班保障服务流程模型, 使得模型更贴近实际情况, 从而提高估计的准确性。

## 2 航班保障服务流程模型建立

### 2.1 航班保障服务流程特性分析

单个航班过站地面保障服务作业流程可以大致抽象为图 1 所示, 根据对作业流程的分析, 可以将保障作业分为航食服务、客舱清洁服务、货舱服务、加油服务、机务巡检 5 个并行工作流程, 某些并行工作流中又包含串行子工作流。各项服务工作间不仅有一定的先后关系而且还存在逻辑次序, 共同构成了航班保障服务作业流程。在航班保障服务过程中, 保障服务车辆都应该及时到位且按规定次序进行服务作业, 如果某种特种车辆到位不及时, 将造成某项服务的延误, 进而波及后续服务作业, 产生传播效应<sup>[12]</sup>。保障调度人员进行调度特种设备时, 需要考虑飞机对机场特种设备占用的排它性和航班过站时间的约束性。

参与服务的特种车辆需要考虑航班时刻、机型、数量数以及保障服务车辆的行驶路径等因素。因此，航班保障服务作业会受到资源数量的限制。总之，

航班保障服务作业一个多种设备动态协作、服务流程串行与并行共存、对资源的时间与空间要求严格的问题。

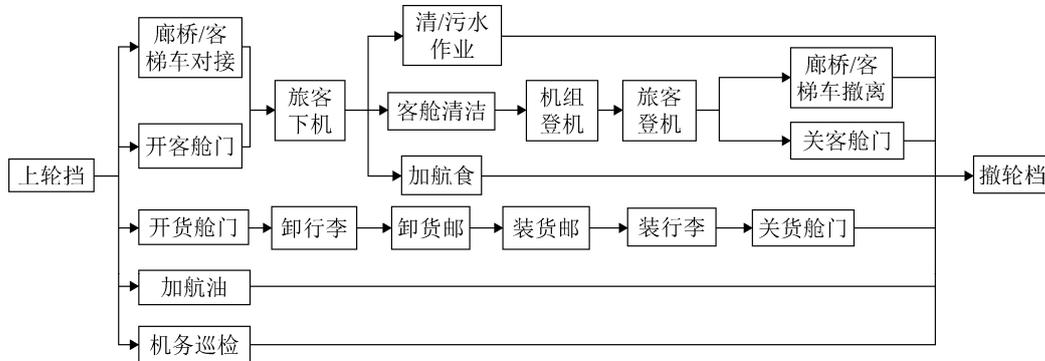


图1 航班保障作业流程

Fig.1 Flight assurance operations process

## 2.2 航班保障服务流程问题的数学模型

本文将航班抽象成接受服务的用户，航班资源需求量作为需求，保障服务车辆的车库或者停靠站点作为站点，保障车辆的行车路线作为路径，将航班保障总服务时间抽象为成本。考虑保障服务车辆的容量、时间以及空间约束等条件建立航班保障服务流程模型。本文假设在航班波内到港的所有航班均有唯一指定停机坪相对应，假设用有向图  $G = \langle V, E \rangle$  来表示航班地面服务保障网络， $V = \{0, 1, 2, 3, \dots, N\}$  表示网络中的节点集，其中节点 0 表示车库或者临时停靠点， $V \setminus \{0\}$  表示计划周期  $P$  内需要接受服务的航班， $E = \{\langle i, j \rangle \mid i, j \in V; i \neq j\}$  表示需要接受服务航班所在停机坪之间的路径。参数与变量如下：

$M, m$ : 航班保障服务车辆种类数、服务项目编号  $\forall m = 1, 2, \dots, M$ ;

$K_m, k$ : 服务  $m$  的保障车辆总数、保障车辆编号且  $\forall k = 1, 2, \dots, K_m$ ;

$C_i, C_m, C_{imk}$ : 航班  $i$  对各项服务资源的需求量、服务  $m$  对应车辆的资源装载量、保障车辆  $k$  服务结束后的资源剩余;

$at_i^m, wt_i^m$ : 服务  $m$  所对应保障车辆抵达服务位时刻、等待服务点的等待时间;

$e_i^m, l_i^m$ : 航班  $i$  的服务  $m$  最早开始时刻、最晚开始时刻;

$t_i^m$ : 航班  $i$  服务  $m$  开始时刻;

$J_i^m$ : 航班  $i$  的服务  $m$  结束时刻;

$t_{ij}^m$ : 服务  $m$  的保障车辆在航班  $i$  和航班  $j$  所在停机位间的行驶时间;

$T_i$ : 航班预计离港时刻;

$s_{im}^h$ :  $h$  类机型服务  $m$  的平均用时且  $\forall h = 1, 2, 3, 4, 5$ ;

$d_i$ : 航班  $i$  延误时间;

决策变量:

$$y_{ik}^m = \begin{cases} 1, & \text{如果第} m \text{种服务项目的第} k \text{辆车为} \\ & \text{航班} i \text{服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$x_{ijk}^m = \begin{cases} 1, & \text{如果服务} m \text{的第} k \text{辆车完成航班} i \text{服务后} \\ & \text{继续为航班} j \text{服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

## 2.3 目标函数与约束条件

本文考虑在最少延误情形下估计航班保障服务时间。所有在选取目标函数时把航班保障服务时间  $t$  短作为第一目标，把减少航班延误数量作为第二目标，使得因航班保障服务环节引起的延误量最小。目标函数如式(1)、(2)所示。其中  $\forall m = 1, 2, \dots, M$ ,

$t_i$  表示机务给出允许作业指令, 保障服务开始时刻。

$$\min t = \max\{J_i^1, J_i^2, \dots, J_i^m\} - t_i \quad (1)$$

$$\min \sum_{i=1}^N \text{sgn}(d_i) \quad (2)$$

约束函数:

1) 访问唯一性: 式(3)、(4)保障航班的同一项服务需求不会同时安排给两个保障车辆。

$$\sum_{k=1}^{K_m} \sum_{i=0}^N x_{ijk}^m = 1, \forall j \in V \setminus \{0\}, m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{K_m} \sum_{j=0}^N x_{ijk}^m = 1, \forall i \in V \setminus \{0\}, m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

2) 站点约束: 服务的保障车辆从临时停靠点或车库出发, 完成服务作业后返回出发点, 即从保障车辆的发出量等于返回量, 等于所需车辆数。

$$\sum_{k=1}^{K_m} \sum_{i=1}^N x_{i0k}^m = \sum_{k=1}^{K_m} \sum_{j=1}^N x_{0jk}^m = K_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

3) 容积约束: 式(6)表示当某一保障车辆连续服务两个航班时, 则此保障车辆完成之前航班服务作业后的资源剩余量需满足之后航班需求; 式(7)表示保障车辆返回到车库添加资源后, 其剩余量与装载量相等。

$$x_{ijk}^m (C_{imk} - C_i) \geq 0, \forall i, j \in V \setminus \{0\}, m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$C_{0mk} = C_m, \forall k = 1, 2, \dots, K_m \quad (7)$$

4) 时间窗约束: 式(8)表示同一保障车辆连续服务两个航班时, 后一航班的服务开始时间不能早于抵达后一航班服务位的时间。式(9)表示服务  $m$  对应的保障车辆抵达服务位时间不应大于其最晚开始服务时间。式(10)、(11)分别表示服务  $m$  保障车辆等待时间条件, 服务时间逻辑关系。

$$x_{ijk}^m (t_i^m + s_{im}^h + t_{ij}^m - t_j^m) \leq 0, \forall i, j \in V \setminus \{0\}, i \neq j \quad (8)$$

$$at_i^m \leq l_i^m, \forall i \in V \setminus \{0\}, m = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

$$wt_i^m = \max\{0, e_i^m - at_i^m\} \quad (10)$$

$$e_i^m \leq (at_i^m + wt_i^m) \leq l_i^m \quad (11)$$

5) 其它约束: 式(12)表示服务  $m$  服务结束时刻, 式(13)表示航班的延误时间。式(14)表示单个航班的服务  $m$  仅需一台保障车辆一次服务完成。航班需要服务  $m$  时,  $u_i^m$  等于 1, 不需要时为 0。

$$J_i^m = at_i^m + wt_i^m + s_{im}^h, m = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

$$d_i = \max\{t_i^m + wt_i^m + s_{im}^h - T_i, 0\} \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^{K_m} y_{ik}^m = u_i^m, \forall i \in V \setminus \{0\}, m = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

### 3 模型求解

模型建立在 VRPTW 基础上, 而 VRPTW 及其扩展问题均已被证明属于 NP-Hard 问题<sup>[13]</sup>, 此类问题在大规模情形下很难得到最优解。文献<sup>[14-17]</sup>研究表明, 小规模情形求最优解可使用精确算法, 然而大规模 VRPTW 的求解主流是启发式算法。因此为有效求解模型, 获得航班保障服务时间的可行解, 本文设计了基于贪婪算法及禁忌搜索算法的两阶段混合启发式算法, 第一阶段在已知的航班信息和机场保障车辆资源信息下使用贪婪算法快速寻找初始解和特种车辆服务序列, 第二阶段通过设计禁忌搜索算法对初始解优化。

#### 3.1 约束处理方法

##### 3.1.1 容积约束处理

Step 1: 计算当前服务路径总需求, 把此服务路径设为  $R=(v_1 \dots v_n)$ , 对应航班节点集为  $V_R$ ,  $C_i$  表示航班  $i$  的资源需求量, 则当前服务路径上总需求  $sumc_R = \sum_{i=1}^n c_{v_i}$ 。

Step 2: 计算插入新的待服务航班节点后的路径总需求, 判断其容积是否满足约束条件, 设等待服务航班节点为  $i$ 。车辆满载量为  $C_m$ , 则插入服务路径  $R$  后总需求  $sumc_R^* = \sum_{i=1}^n c_{v_i} + c_k$  若  $sumc_R^* < C_m$  则满足约束条件, 否则, 不满足条件。

##### 3.1.2 时间窗约束条件处理

因为航班节点插入位关系到时间窗约束条件是否适合, 所以处理时间窗条件时需要逐次对比保障服务过程中试插位, 直到发现可行位或所有位置均被检测为止。

Step 1: 初始化, 把从车库或者停靠点出发的

第一条弧设置成当前试插位;

Step 2: 如果全部节点插入位都检测结束, 则转到 Step 7;

Step 3: 计算新的航班节点插入后服务车辆的抵达时间, 此服务路径为  $R$ , 对应航班节点集是  $V_R$ , 待服务航班  $i$ , 由模型可知  $l_i^m$  为第  $m$  种服务的最晚开始时间, 航班节点插入当前位置后服务车辆的抵达时间为  $at_i^m$ 。因此, 如果  $at_i^m > l_i^m$ , 则不能满足时间窗约束, 转到 Step 6;

Step 4: 计算新的航班节点插入后的延迟时间, 把此服务路径设为  $R=(v_1 \cdots v_i, v_{i+1} \cdots v_n)$ , 对应航班节点集为  $V_R$ , 待服务航班  $i$ 。假如当前试插位为  $\langle v_i, v_{i+1} \rangle$ ,  $t_{ij}^m$  和  $t_{ji+1}^m$  分别表示  $\langle v_i, j \rangle$  和  $\langle j, v_{i+1} \rangle$  行驶时间,  $wt_i^m$  表示服务车辆在航班  $i$  的等待时间, 则插入新航班导致的延迟时间为  $d' = t_{ij}^m + t_{ji+1}^m + wt_i^m - t_{ij}$ ;

Step 5: 计算插入新的航班节点后未来航班节点的服务时间参数, 在处理此类时间窗约束时, 可以对延误时间进行最小化限制。将此服务路径设为  $R=(v_1 \cdots v_i, v_{i+1} \cdots v_n)$ , 待服务航班  $i$ , 此时的试插位是  $\langle v_i, v_{i+1} \rangle$ , 则紧邻航班节点的最大延迟  $d_{max} = \min\{l_j^m - at_j^m \mid j \in \{v_{i+1} \cdots v_n\}\}$ ;

Step 6: 假如此插入位不满足要求, 把下一条弧当作新的试插位, 转到 Step2, 否则, 转到 Step7;

Step 7: 假如所选位置可行, 即条件满足。否则, 不满足。

### 3.2 邻域构造技术

邻域构造在启发式算法实施过程中至关重要, 主流的邻域构造技术有点的交换与弧的交换。移出(remove)操作和插入(insertion)操作是这两种交换技术均有的变换方式, 前者能将航班移出服务路径, 而后者将航班添加到服务路径中, 在这两种基本操作的基础上, 使用一种简单技术对邻域进行构造, 仅包含两种邻域变换操作, 即交换(swap)操作和插入(insert)操作。

图 2(a)给出交换(swap)操作方式:从航班服务

路径 A 和 B 中各选一个航班节点进行交换, 如果满足条件, 则在节点交换后调整航班服务路径 A 和 B 的各航班节点的时间参数。

图 2(b)给出插入(insert)操作方式: 从航班服务路径 A 中选取 1 个航班节点插入到 B 中, 如果满足条件则选择 B 的最短时间插入位插入, 如果不满足, 航班节点被插回原路径。

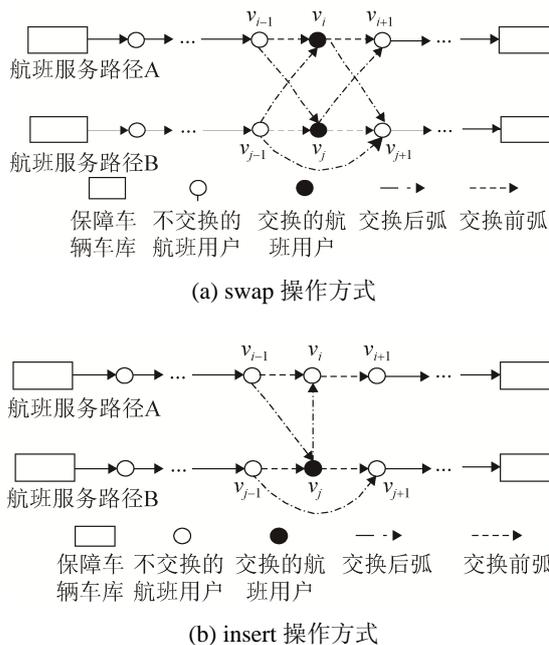


图 2 两种邻域变换操作

Fig.2 Two neighborhood transformation operations

本文通过交替利用插入(insert)操作和交换(swap)操作来对邻域进行构造:首先, 使用 insert 操作以减少服务路径数, 然后, 使用 swap 操作减少保障服务总时间。

### 3.3 两阶段混合启发式算法

#### 3.3.1 第一阶段: 贪婪算法流程

令  $D$  表示时段  $H$  内机场所有需要某种保障服务的航班集合, 将集合  $D$  内所有等待服务的航班队列按照最早可以开始接受服务项目  $m$  的时间  $e_i^m$  进行升序排列。对于任意  $m = 1, 2, 3 \cdots M - 1$ , 令  $N_m$  表示服务项目  $m$  中当前可用的保障车辆集合, 则算法具体流程如图 3。

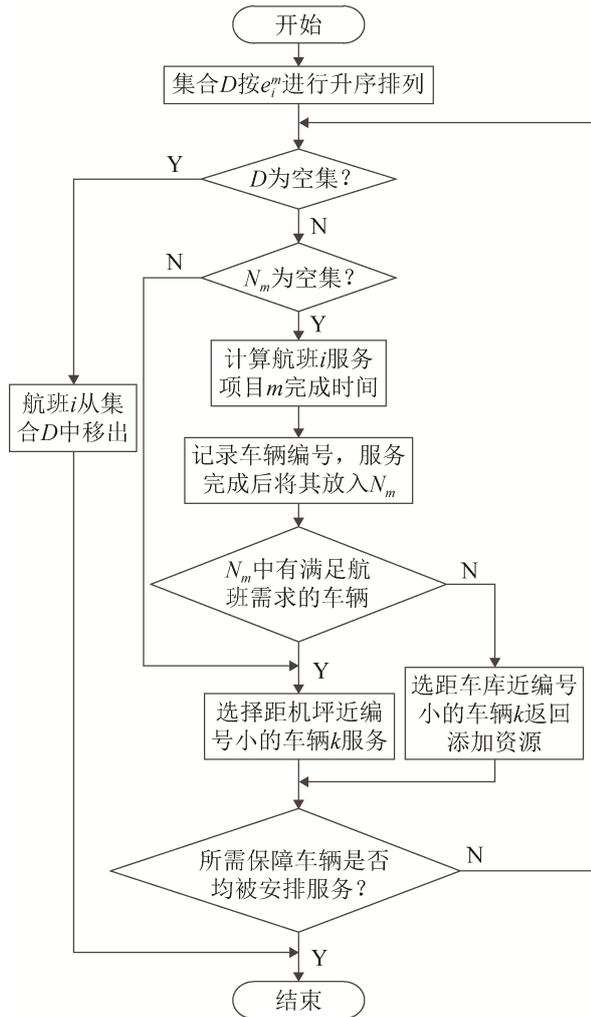


图 3 贪婪算法流程图

Fig.3 Greedy algorithm flow chart

贪婪算法属于传统启发式算法,它采用局部搜索技术快速获取满意解,算法简单且容易实现,却易于陷入局部最优。禁忌搜索算法属于亚启发式算法,采用全局搜索技术获取满意解,从而可以摆脱局部最优,但需要提供初始解,因此,在第一阶段使用贪婪算法求得初始解后,使用设计第二阶段禁忌搜索算法以改进初始解的质量。

### 3.3.2 第二阶段: 禁忌搜索算法流程

本文禁忌搜索算法的禁忌对象为目标函数值并固定禁忌表长度。设定连续未改进次数的最大值,用  $\max$  表示,当算法的连续未改进次数达到所设定最大值时,算法终止并且输出满意解。则禁忌搜索算法的基本流程如图 4。

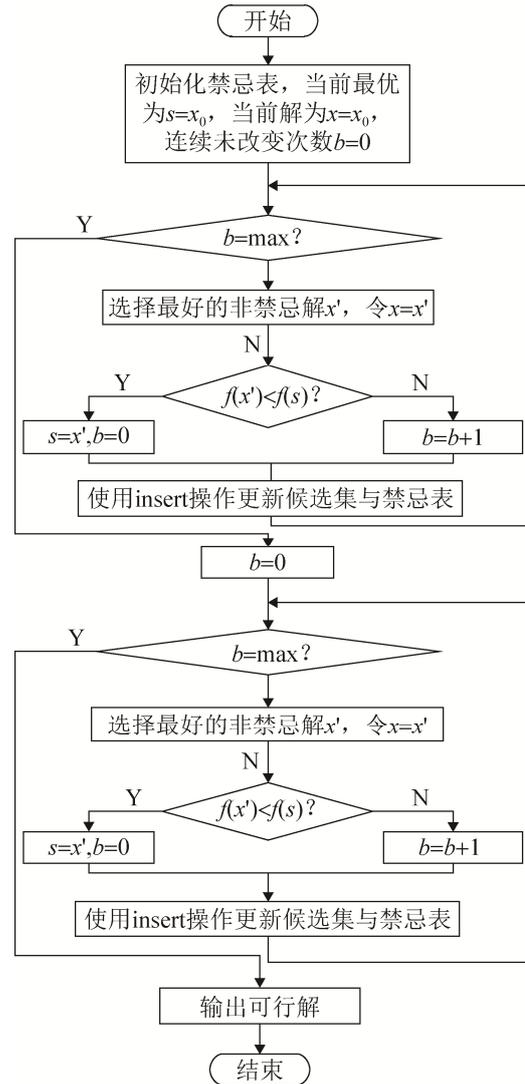


图 4 带时间窗的禁忌搜索算法流程图

Fig.4 Tabu search algorithm with time window flow chart

## 4 算例分析

数据来源于国内某大型枢纽机场,该机场有停机位 218 个,登机桥 70 座,日均起降航班达 800 架次左右。为体现本文设计的算法的有效性,选取了该机场某天 8:00—10:00 时段内所有到港航班数据进行分析计算。在此时段内,共有到港航班 104 架次。假设所有航班准点抵港,在此算例中,主要考虑航食服务、客舱清洁服务、行李与货邮服务、加油服务、加清水等主要服务项目。其它项目按标准时间计算,各种服务项目所需车辆的数量及容量如表 1 所示。

表 1 机场各种服务车辆数量及容量

参数	加油车/t	行李车/t	食品车/kg	清洁车/m <sup>3</sup>	清水车/L
数量/辆	30	35	20	21	18
容量	150	20	3 000	7	5 000

需要说明的是,不同型号航班对于不同服务的需求不同,但与飞机类型和尺寸大小有关。因此,我们在采集数据时,将所有的飞机按照座位数分为五种类型,其中,1型飞机为60座以下,2型飞机61~150座,3型飞机151~250座,4型飞机251~350座,5型飞机为350以上座位。本文采用各种型号中具有代表性的飞机相关数据进行计算,则不同型号飞机对不同服务的需求量如表2所示。

表 2 各种型号飞机不同服务的需求量  
Tab. 2 Different types of aircraft service demand

机型	加油 服务/t	行李 货邮/t	食品 服务/kg	清洁 服务/m <sup>3</sup>	清水 服务/L
1	10	1	100	1	1 000
2	20	2	150	1.5	1 500
3	30	3	200	2	2 000
4	40	4	250	2.5	2 500
5	50	5	300	3	3 000

另外,《机场航班运行保障标准》(81号文)规定不同机型在航班运行保障过程中不能超过标准服务时间,这样就不会发生因保障作业引起的航班延误。各类机型保障作业时间要求如表3所示。

表 3 各类机型保障作业时间要求

时间	机型 1	机型 2	机型 3	机型 4	机型 5
舱门时间/min	≤18	≤37	≤46	≤56	≤86
轮挡时间/min	≤34	≤49	≤62	≤69	≤99

## 4.1 结果分析

本文应用两阶段混合启发式算法,并将该机场的实际运行数据导入计算程序,通过改变相关参数,分别实现了航班密度变化、保障车辆数变化、航班机型变化三种情形下的航班保障服务时间的估计分析。得到了在各种情形下计算结果。最后统一对估计结果进行了准确度测试。

### 1) 航班密度变化

对该机场某天 8:00-10:00 时段内航班实际运行数据初步分析发现,从 8:00-8:30 时段内到港航班数为 18 架次,而 8:30-9:00 时段内到港航班 38 架次,航班密度比上一时段增加一倍,因此对这两个时段内航班保障服务对比分析。图 5 给出不同航班密度下的各参数值对比图,通过对比图 5(a)与 5(b)发现,在较低航班密度下,航班的保障服务均在其计划离港前顺利完成,而在高航班密度下,部分航班(50 号, 54 号)未能在计划离港前顺利完成保障服务。说明在机场资源设备确定条件下航班密度的增加将导致部分航班不能准时完成保障服务,进而产生航班延误。图 5(c)给出这两个时段内航班保障服务时间估计值与实际值对比,结果显示两条曲线有较高的吻合度。

### 2) 保障车辆数目变化

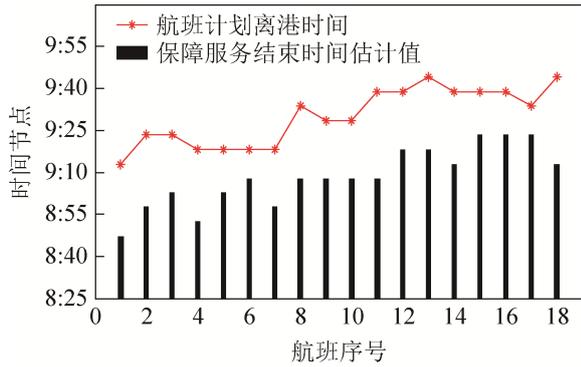
由之前分析可知,8:30-9:00 时段航班密度较高,为深入分析航班保障服务,假设此时段内有两台保障车辆因损坏而不能参与保障服务,通过改变计算程序中相关参数,得到此种情形下的各参数值对比图,如图 6 所示。通过对比图 6(a)与图 5(b)可知,航班密度一定时,机场内的保障车辆数目小规模减少也将对航班保障服务产生较大影响,无法准时完成保障服务的航班(33 号, 45 号, 50 号, 54 号)数目增加且更早出现。

将图 6(b)与图 5(c)后半时段曲线对比分析,可知虽然曲线的趋势大体一致,但是大部分航班保障服务时间延长,原因就是保障车辆减少导致航班在等待接受某种服务的时间过长。说明机场保障资源对航班保障服务至关重要。

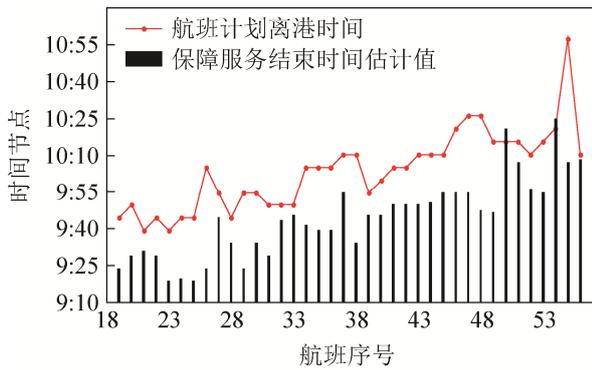
### 3) 机型变化

原始数据分析发现,8:00-8:30 时段与 9:30-10:00 时段航班密度基本一致,然而这两个时段内到港航班机型差异较大,8:00-8:30 时段内的 75% 以上到港航班属于 3 型飞机,9:30-10:00 时段内到港航班 4 型飞机超过 80%。因此,将两个时段内航班保障服务对比分析。图 7 给出机型差异下航

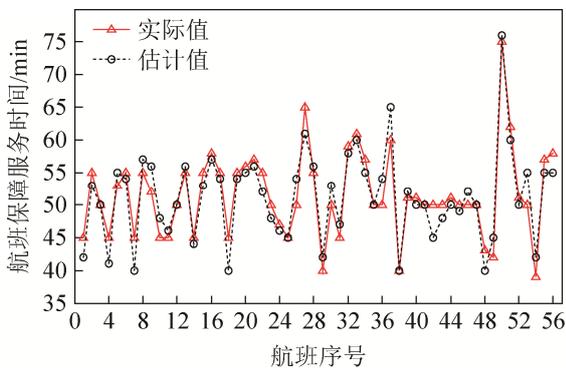
班各参数对比图, 比较图 7(a)与图 5(a)发现, 9:30:10:00 时段内航班(90 号, 95 号, 100 号)保障服务出现延误现象, 8:00-8:30 时段内航班保障服务按要求完成, 说明在航班密度一致情况下, 大型飞机高频次的到来, 将对保障服务产生极大影响, 航班延误率增加。图 7(b)给出机型变化情形下航班保障服务时间估计值与实际值对比。



(a) 低密度下航班计划离港时间与服务结束时间对比图



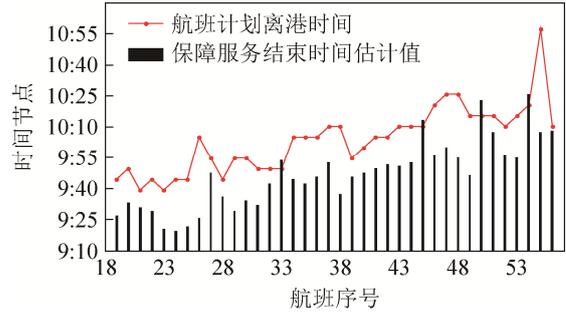
(b) 高密度下航班计划离港时间与服务结束时间对比图



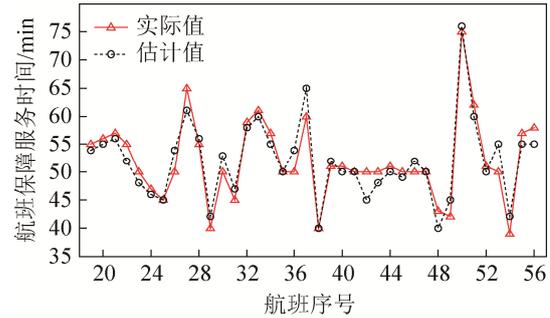
(c) 航班保障服务时间估计值与实际值对比图

图 5 不同航班密度下的各参数值对比图

Fig.5 Comparison of various parameter values under different flight densities



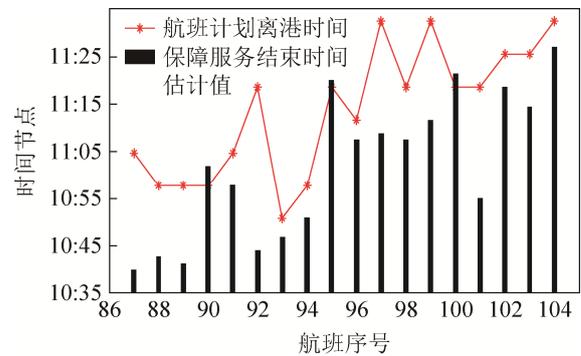
(a) 航班计划离港时间与与服务结束时间对比图



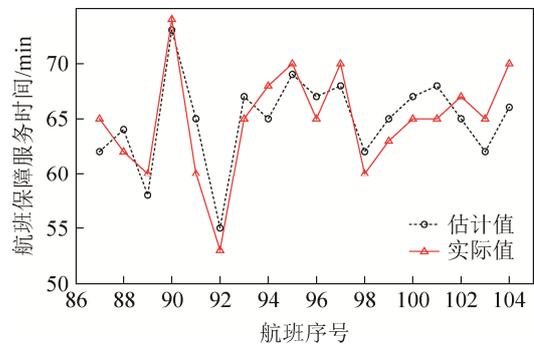
(b) 航班保障服务时间估计值与实际值对比图

图 6 保障车辆数减少时各参数对比图

Fig.6 Guarantee the number of vehicles to reduce the parameters of each comparison chart



(a) 航班计划离港时间与与服务结束时间对比



(b) 航班保障服务时间估计值与实际值对比图

图 7 机型差异下航班各参数对比图

Fig.7 Model differences in the flight parameters comparison chart

## 4.2 准确度测试

图 5(c)、图 6(b)、图 7(b)给出了在不同情形下的航班保障服务时间估计值与实际值对比, 结果显示各种情形下的估计值曲线与实际值曲线吻合度较高, 为了将估计值与实际值之间的误差进行量化, 即对估计效果进行准确度测试, 本文以平均绝对误差作为评价估计效果的标准。如式(15)所示:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Y - Y^*|}{N} \quad (15)$$

其中,  $Y$  表示实际值,  $Y^*$  表示估计值。将各种情形下估计值和实际值代入式(15)可得估计误差分别为 2.01 min, 1.94 min, 2.38 min。通过以上分析, 所建模型和算法能有效估计枢纽机场航班保障服务时间并预测航班状态。

## 5 结论

本文针对枢纽机场航班保障服务时间问题, 将复杂的航班保障流程描述成为经典的 VRPTW 问题, 建立了基于 VRPTW 的航班保障服务流程模型, 提出了两阶段混合启发式算法。结合国内某枢纽机场实际运行数据对各种情形下的航班保障时间估计分析, 结果表明采用的方法能有效估计航班保障服务时间。应用该方法可以对计划周期内航班保障服务时间估计, 进而分析和预测因航班保障环节可能的延误, 为机场及其相关部门的应急指挥管理提供及时的预警信息, 减少因保障环节引起的负面影响, 从而提升机场服务的质量和乘客满意度。进一步研究方向包括考虑航班提前和延误到港, 建立动态模型。改善两阶段混合算法性能, 提高航班保障时间估计准确率。

### 参考文献:

- [1] 马正平, 崔德光. 机场航班延误优化模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(4): 474-477.  
MA Z P, CUI D G. Optimizing airport flight delays[J]. Tsinghua Univ(Sci&Tech), 2004, 44(4): 474-477.
- [2] 郝静麒, 杨文东, 唐小卫. 枢纽机场停机坪平台车资源分配仿真研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(12): 85-91.

- HAO J Q, YANG W D, TANG X W. Simulation for platform truck resource allocation in hub airport apron[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(12):85-91.
- [3] 黄鹂诗. 基于SIMIO的机坪车辆调度仿真研究[D]. 南京航空航天大学, 2013: : 11-14.  
HUANG L S. Simulation study of vehicle scheduling on ramp based on SIMIO[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013
- [4] Wu C L, Caves R E. Modelling of Aircraft Rotation in a Multiple Airport Environment[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review (S1366-5545), 2002, 38(38): 265-277.
- [5] 孙宏, 李勇. 应用网络计划技术优化飞机地面过站作业流程[J]. 交通运输工程与信息学报, 2004, 2(1): 45-49.  
SUN H, LI Y. Application of network planning technology to optimize the operation process of aircraft ground crossing station[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2004, 2(1): 45-49.
- [6] 孙瑞山, 张子全. 基于CPM的停机坪航班保障工作研究方法研究[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(5): 23-26.  
SUN R S, ZHANG Z T. Study on apron flight service work method based on CPM [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(5):23-26.
- [7] Angus Cheung, W H Ip, Dawei Lu. An Aircraft Service Scheduling Model Using Genetic Algorithms[J]. Journal of Manufacturing Technology Management(S1741-038X), 2004, 16(1): 109-119.
- [8] Garcia Ansola P, Garcia Higuera A, Otamendi F J, et al. Agent-Based Distributed Control for Improving Complex Resource Scheduling: Application to Airport Ground Handling Operations[J]. IEEE Systems Journal (S1932-8184), 2014, 8(4): 1145-1157
- [9] Andreatta G, Giovanni L D, Monaci M. A Fast Heuristic for Airport Ground-Service Equipment-and-Staff Allocation [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences (S1877-0428), 2014, 108: 26-36.
- [10] 姚韵, 朱金福, 柏明国. 航班过站地面服务的优化调度算法[J]. 信息与控制, 2007, 36(4): 486-492.  
YAO Y, ZHU J F, BAI M G. An Optimization Scheduling Algorithm for Flight Turnaround Ground Service[J]. Information and Control, 2007, 36(4): 486-492.
- [11] 丁建立, 赵键涛, 曹卫东. 基于贝叶斯网的航班过站时间动态估计[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(4): 517-524.  
DING J L, ZHAO J T, CAO W D. Dynamic estimation about turnaround time of flight based on Bayesian network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(4):517-524.

(下转第 2874 页)