

机场保障资源配置优化建模

崔珊珊*, 崔玉玮

中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094

摘要 通过梳理多批次多架次飞机在机场同时进行保障作业的基本流程, 针对保障作业过程中的各种影响因素, 明确了机场保障资源配置优化问题的约束条件和优化目标, 并依据约束条件的特征对其进行分类, 构造了机场保障资源配置的数学优化模型。

关键词 机场保障; 资源配置; 数学模型

机场保障^[1-3]指挥调度是指在各种保障资源、保障流程的约束下, 对多批次、多架次飞机同时保障进行规划, 从而快速形成作战能力。目前的机场保障资源调度大多基于人工经验, 随着保障机型的增加、保障飞机数量的增加、保障过程愈加复杂, 对调度的实时性、鲁棒性要求提高, 人工调度在实际机群保障中面临着越来越多的瓶颈和挑战。人工调度很难科学、合理地实现在有限时间、有限空间、有限资源条件下的机场保障指挥调度, 任务的多样性、复杂性、紧迫性以及较大的调度规模也使得人工调度很难保证调度方案的可行性。具体而言, 缺乏在前期接收任务时对调度问题的整体评估, 无法了解某资源在某个时段是否会产生瓶颈, 无法为计划安排、计划协调提供决策依据。基于当前存在的问题, 拟通过建立数学模型, 将机场调度的过程数学化、模型化。

机场保障指挥调度的模型, 主要是在飞机降落后至起飞前阶段在机场需要进行一系列保障工作。在飞机数量多, 空间、车辆、人员等保障资源有限的情况下, 开展机场保障工作的指挥调度, 保障飞机机群按照任务需求(最短的保障时间、最小总延迟等)完成准备工作。

模型和算法的研究, 可以全面提升机场指挥调度能力, 具体体现为以下5个方面。

1) 实现机场调度的自动化, 避免人工调度造成的

低效率和潜在冲突, 有效提高指挥调度的效率。

2) 实现面向作战任务的多波次、多机型、多模式的统筹协调调度。

3) 精细化地管理各个保障资源(保障资源的数量、使用时间、地点、资源使用的均衡性)及整个保障过程, 指挥能精确到每个保障单元、辅助指挥员作出决策, 为指挥员提供更大的主动性。

4) 对于飞机故障、保障资源短缺、起火特情等动态调整的情况, 系统可以自适应地进行指挥调度的调整, 并保证调整方案的高效性和鲁棒性。

5) 通过对保障过程的精细掌握, 发现机场的指挥调度瓶颈环节, 从而为提高机场保障能力提供有力的依据。

1 物理模型

1.1 问题描述

机场保障指挥调度优化问题可大致描述为: 飞机在降落后至起飞前需要完成从初始位置调运至进行作业保障的停机位, 然后进行加油、检修、供养等一系列地面保障作业, 最后根据起飞任务的优先次序调运至各起飞位。

飞机降落后至起飞前阶段需要对飞机进行一系列

收稿日期: 2018-10-18, 修回日期: 2019-05-30

作者简介: 崔珊珊, 高级工程师, 研究方向为指挥信息系统, 电子信箱: matlabcuiss@126.com

引用格式: 崔珊珊, 崔玉玮. 机场保障资源配置优化建模[J]. 科技导报, 2019, 37(13): 66-69; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.13.009

地面保障作业,此时存在多架飞机争夺有限的空间资源及保障资源。然而,有限的空间、固定资源和可移动资源不能同时满足大批量飞机的需要,机场保障指挥调度优化问题^[4-10]就是为了在有限的资源约束下减少机群的地面保障时间,合理地机群分配有限的资源,并规划管理各飞机的地面作业进度。该问题的主要优化目标是在满足各类约束的前提下,使整个保障流程的总时间最短,具体目标要视具体的任务要求而定。

缩短飞机调运及保障时间不仅有助于提高飞机保障作业的效率,而且还能提高各类资源的利用率。对该问题的研究和求解能够更加合理地利用各类资源以提高保障系统的效率。

1.2 飞机保障主要工序

1) 首次出动。飞机的保障作业主要为:机务检查、冲氧、冲氮、加油、加电、吊舱加水、暖机、滑跑、起飞、挂弹、惯性导航、参数加载。

2) 再次出动。飞机的保障作业主要为:滑行、冲氧、冲氮、加油、加电、吊舱加水、滑跑起飞;当再次出动是新任务时,保障工序增加参数加载。

1.3 机务保障的考虑因素

1) 机务外观检查首次出动30 min、再次出动10 min。

2) 冲氧、冲氮。训练时1次加够3、4个架次,有少量显示。

3) 挂干扰吊舱、空调车不影响出动时间(空调车的使用加电超过15 min后降温使用)。

4) 1架飞机需要1个机械师、1个机械员。

1.4 影响因素分析

影响因素包括以下8个方面。

- 1) 飞机的类型。
- 2) 任务类型。
- 3) 停机位与飞机类型的匹配。
- 4) 保障工序与任务类型、飞机类型的匹配。
- 5) 人员类型、数量与保障工序、飞机类型的匹配。
- 6) 保障车辆类型与保障工序、飞机类型的匹配。
- 7) 保障模式与机型匹配。
- 8) 保障工序的逻辑关系。

2 机场保障资源配置调度数学模型

2.1 已知条件

1) 飞机。飞机是整个系统的主体,整个资源的调

度过程都以飞机的保障和起飞任务为中心进行,与飞机相关的已知条件包括:(1) 飞机数量;(2) 飞机的类型数量及飞机类型集合;(3) 飞机的初始停机位;(4) 飞机的预计起飞时间;(5) 飞机某道保障工作的保障时间长度;(6) 飞机某道保障工作所需的资源集合。

2) 停机位。停机位是停放飞机以及对飞机进行保障作业的场所,是飞机活动的主要空间。与停机位相关的已知条件为:(1) 停机位数目;(2) 停机位集合;(3) 停机位的具体坐标位置,用来计算各停机位与起飞位的距离;(4) 任意两个停机位之间的距离;(5) 停机位是否可用。

3) 移动式设备。移动式设备可以在不同的停机位之间进行自由移动,为不同的飞机提供保障服务。与移动式设备相关的已知条件为:(1) 移动式设备的数量;(2) 移动式设备集合;(3) 移动式设备是否可用;(4) 移动式设备的类型;(5) 移动式设备的初始位置;(6) 移动式设备的移动速度。

4) 保障人员。包括:(1) 人员的类型;(2) 人员的数量;(3) 人员是否可用;(4) 人员具备的技能。人员具备保障工序所需技能即可。

5) 起飞跑道位。起飞跑道位是飞机保障作业完成后准备起飞的位置,完成保障作业的各飞机按一定次序在起飞位等待,准备起飞。与起飞跑道位有关的已知条件为:(1) 起飞位数目;(2) 起飞位集合;(3) 起飞位的具体坐标位置,用来计算各停机位与起飞位的距离和飞机移动时间;(4) 起飞位是否可用;(5) 任意两架飞机起飞的时间间隔。

2.2 决策变量

机场保障指挥调度优化问题的决策变量可以表示为飞机和各保障资源调度的集合。求解任一飞机在什么时刻、什么地点开始执行什么保障作业,使用哪些固定资源或移动设备,各个移动设备在什么时刻到达什么位置、执行哪道保障作业。这样各飞机和各保障资源的调度方案就是整个问题的解,即决策变量。

x_j^i : 飞机*i*是否使用停机位*j*;

y_{ij}^k : 飞机*i*在第*j*道工序是否使用移动设备*k*;

z_{ij}^k : 飞机*i*在第*j*道工序是否使用人员*k*。

tx_i^j : 飞机*i*开始使用停机位*j*的时间。

2.3 约束条件

按约束的主体分类,该问题的约束条件主要包括飞机约束、停机位约束、保障设备约束、移动式设备约

束、起飞位约束。按照约束性质来分,可将其划分为:时间约束、空间约束和资源匹配约束,这些不同类型的约束之间相互影响、相互制约,因此相互之间的协调变得非常困难。以下按约束的性质对各约束分别进行描述,以便于对问题的理解。

2.3.1 时间约束

时间约束指与时间相关的约束,主要包括飞机和移动式设备两大主体。

1) 飞机保障工序连续性约束:任一飞机的任一保障工序一旦开始加工,中间不能间断,飞机任一保障工序的完工时间与开工时间之差即为该工序的加工时长。

2) 飞机保障工序前后继约束:任一飞机的后一道工序必须在其所有前序工序都完成之后才能开始加工,即工序的开工时间 \geq 其前序工序的完工时间。

3) 移动式设备停机位转移时间约束:任一移动式设备连续加工的两道工序若在不同的停机位上,则在下一道工序的最早开工时间 \geq (前一道工序的完工时间+移动式设备在两个停机位之间的移动时间)。

4) 飞机到达起飞位时间约束:任一飞机到达起飞位的时间为飞机完成所有工序的时刻+飞机从停机位移动到起飞位的时间。

5) 飞机起飞时刻间隔约束:在同一起飞位,飞机的起飞时间间隔 \geq 某个给定的值。

2.3.2 空间约束

涉及空间的主体主要有停机位和起飞位。与空间相关的约束主要包括以下3点。(1) 停机位可行性约束。只有当前可行的停机位才能允许飞机停放。(2) 起飞位可行性约束:只有当前可行的起飞位才能进行飞机的起飞。(3) 停机位独占性约束。一个停机位在同一时间只能放一架飞机。

2.3.3 资源匹配约束

1) 工序移动式设备时间匹配约束:飞机的任一保障工序若需要某个移动式设备,则该工序的开工时间与移动式设备的服务开始时间一致。

2) 移动式设备可行性约束:只有可行的移动式设备才能对飞机提供服务。

2.4 目标函数

1) 机场保障指挥调度优化问题的目标函数是使得调度方案在满足上述所有约束的前提下使总的保障作业时间最短。

2) 如果考虑各飞机的预计起飞时间,可以将各飞

机的真实起飞时间与预计起飞时间之间的偏差之和作为目标函数。

2.5 符号描述

I : 飞机集合。

$m = |I|$: 飞机数量。

J_i : 第 i 架飞机所需进行的保障工序总数。

J_i^* : 第 i 架飞机包含保障开始和结束的两个虚任务的集合。

P : 停机位集合。

$n = |P|$: 停机位数量。

d_{ij} : 第 i 架飞机第 j 道工序的工期。

$$T = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i^*} d_{ij}。$$

P_{ij} : 第 i 架飞机第 j 道工序的前驱任务集合。

S_{ij} : 第 i 架飞机第 j 道工序的后继任务集合。

$J(t)$: 在时刻 t 处于执行状态的工序集合。

N_R : 资源的种类数。

N_{R_k} : 资源 k 的数量。

r_{ijk} : 第 i 架飞机、第 j 道工序所需可更新资源 k 的数量。

$x_{ijt} = 1$, 第 i 架飞机、第 j 道工序在时刻 t 完成; 否则, 为 0。

2.6 机场保障资源配置数学模型

$$\min \left\{ \max \{ t_{S_{ij}} \}, i \in I \right\} \quad (1)$$

s.t

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J(i)} r_{ijk} \leq r_k, \quad t \in [0, T], \quad \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^T x_{ijt} = 1, \quad \forall i \in I, \quad j \in J_i^* \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^T t \cdot x_{iht} \leq \sum_{i=0}^T (t - d_{ij}) \cdot x_{ijt}, \quad \forall i \in I, \quad j \in J_i^*, \quad h \in P_j \quad (4)$$

$$x_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad j \in J_i^* \quad (5)$$

公式(1)为目标函数,即最小化最大保障完成时间;公式(2)表示资源在每个时刻的供应量是有限的;公式(3)表示每架飞机的每道保障工序只能执行1次;公式(4)表示飞机的前后继工序约束;公式(5)表示变量 x_{ijt} 的取值范围。

3 结论

对机场保障资源配置优化问题进行了深入研究,

剖析了保障过程中的各类影响因素,明确了机场保障资源配置的各类约束条件和优化目标,构造了机场保障资源配置的数学优化模型。本研究对机场多批次多架飞机的保障全工艺流程进行了建模。由于机场保障资源配置优化问题为典型的多项式难问题,今后将重点针对机场保障资源配置优化问题,设计高效的启发式原则,进而形成一种高效的启发式求解算法。

参考文献 (References)

- [1] 王凌, 刘波. 微粒群优化与调度算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] 方晨, 王凌. 资源约束项目调度研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 641-650.
- [3] Kolisch R, Hartmann S. Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 174(1): 23-37.
- [4] Hartmann S. A self-adapting genetic algorithm for project scheduling under resource constraints[J]. *Naval Research Logistics*, 2002, 49(5): 433-448.
- [5] 冯强, 曾声奎, 康锐. 基于多主体的舰载机综合保障过程建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 211-216.
- [6] 林华, 占明锋, 周丰. 舰载机回收任务的优化调度算法及仿真[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(1): 50-54.
- [7] 杨炳恒, 毕玉泉, 徐伟勤. 一种舰载机调运作业流程优化模型[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(1): 118-121.
- [8] 杨炳恒, 王海东, 韩峰, 等. 舰载机调运作业流程优化研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(22): 5602-5605.
- [9] 孙蛟, 翟庆刚, 虞健飞. 基于离散事件仿真的军用飞机保障能力评估[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 1051-1055.
- [10] Wang W, Hu T, Yang J J. Research on mathematical model of urgency ordnance transport on single requirement point[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(2): 257-262.

Optimization modeling of airport security resource allocation

CUI Shanshan*, CUI Yuwei

Systems Engineering Research Institute, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100094, China

Abstract The paper sorts out the basic process of multiple batches and multiple flights in the airport. In view of all kinds of influence factors of the safeguard work process, the paper defines the constraint conditions and optimization objectives for the optimization of airport security resource allocation, classifies the constraint conditions according to their characteristics, and constructs a mathematical model of airport security resource allocation.

Keywords airport security; resource allocation; mathematical model ●



(责任编辑 王志敏)