

机场保障指挥调度分析

崔珊珊, 王明辉, 张晓杰

中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094

摘要 机场保障指挥调度是在各种保障资源、保障流程的约束下, 对多批次、多架次飞机同时保障, 从而快速形成作战能力。在假定机场保障指挥调度数学模型已定的基础上, 系统分析求解算法的复杂度, 基于启发式规则, 有针对性地为该优化问题设计了相应的求解算法, 并以实例验证了该算法的有效性。

关键词 机场保障; 指挥调度; 资源配置

机场保障指挥调度^[1-3]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。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的一系列保障工作, 当飞机数量多, 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(最短保障时间、最小总延迟等)完成准备工作。

开展机场保障指挥调度能力分析, 精细化管理各个保障资源(保障资源的数量、使用时间、地点、资源使用的均衡性)以及整个保障过程, 指挥能精确到每个保障单元、辅助指挥员做出决策, 为指挥员提供更大的主动性, 全面提升机场指挥调度能力。

本研究在假定机场保障指挥调度数学模型已定的基础上, 系统分析了求解算法的复杂度, 有针对性地为该优化问题设计了相应的求解算法, 并以实例验证了该算法的有效性, 对于指导机场运行具有重要的支撑作用。

1 机场保障指挥调度模型

1.1 问题描述

机场保障指挥调度优化问题^[4-5]是一个复杂的系统优化问题, 需要根据飞机执行地面保障作业的流程约束、各停机位和保障资源的空间、数量和逻辑约束合理调度各类资源, 确定任一飞机从初始状态到起飞位的整个调度过程。

1.2 符号描述

I 为飞机集合; $m=|I|$ 为飞机数量; J_i 为第 i 架飞机所需进行的保障工序总数; J_i^* 为第 i 架飞机包含保障开始和结束的 2 个虚任务的集合; P 为停机位集合; $n=|P|$ 为停机位数量; d_{ij} 为第 i 架飞机第 j 道工序的工期; $T = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i^*} d_{ij}$ 为飞机完成所有保障工序的结束时间; P_{ij} 为第 i 架飞机第 j 道工序的前驱任务集合; S_{ij} 为第 i 架飞机第 j 道工序的后继任务集合; $J(t)$ 为在时刻 t 处于执行状态的工序集合; NR 为资源的种类数; NR_k 为资源 k 的数

收稿日期: 2018-10-17; 修回日期: 2018-12-04

作者简介: 崔珊珊(通信作者), 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, 王明辉, 张晓杰. 机场保障指挥调度分析[J]. 科技导报, 2018, 36(24): 66-72; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.24.010

量; r_{ijk} 为第 i 架飞机第 j 道工序所需可更新资源 k 的数量; $x_{ijt}=1$ 为第 i 架飞机第 j 道工序在时刻 t 完成, 否则为 0。

1.3 数学模型

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

满足于

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

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

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

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

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

2 求解算法

2.1 复杂度分析

2.1.1 问题规模

设飞机数量为 m 架, 停机位为 n 个, 起飞位为 k 个, 移动设备为 z 个, 每架飞机的保障工序为 x 个, 每架飞机的保障工序中需要移动设备的工序数为 r 个 ($r \leq x$), 每个工序可选择的固定资源数为 y 个, 每个工序可选择的移动设备数为 s ($s \leq z$) 个。

2.1.2 复杂度分析

对于停机位分配问题, m 架飞机选择 n 个停机位和 k 个起飞位, 选择方案有 $(n \cdot k)^m$ 种。

对于保障资源调度问题, 每架飞机有 x 道保障工序, 而 x 道工序中每个工序有 y 种选择, 则 m 个飞机完成 x 道工序的可能方案有 (不考虑移动设备) $y^{(x \cdot m)}$ 种; 移动设备的移动是根据某个工序是否需要移动设备进行选择的问题, 即每个需要移动设备的工序每次有 s 个选择, 而每个飞机的 r 个需要移动设备的工序, 其总的移动设备选择数为 s^r , 则完成 m 个飞机的保障工序的总的移动设备选择数为 $s^{(r \cdot m)}$; 故同时考虑固定资源和移动设备总的可能方案数为 $y^{(x \cdot m)} \cdot s^{(r \cdot m)}$, 则机场保障指挥调

度优化问题的搜索空间大小为 #搜索空间大小 = $((n \cdot k)^m) (y^{(x \cdot m)} \cdot s^{(r \cdot m)})$

假设 2 个简单的场景的各个具体已知数据如表 1, 其场景数据计算如下。

表 1 2 个简单场景的各个具体已知数据

Table 1 Details of the two scenarios

场景	n	k	m	x	r	y	s
场景 1	3	2	5	5	3	2	3
场景 2	3	2	8	8	3	2	3

场景 1 要考察的方案个数为: #搜索空间大小₁ = $((3 \times 2)^3) (2^{(5 \times 5)} \cdot 3^{(3 \times 5)})$ 。

场景 2 要考察的方案个数为: #搜索空间大小₂ = $((3 \times 2)^3) (2^{(8 \times 8)} \cdot 3^{(3 \times 5)})$ 。

对比场景 1 和场景 2 的时间复杂度增长分析发现, 对于场景 2, 只是将飞机数从原来的 5 个增加到 8 个, 将保障工序数从原来的 5 个增加到 8 个, 其时间复杂度的增加趋势是从分钟数量级增加到千万年数量级。这里的计算是在夸大了计算能力的情况下简单评估其计算时间, 如果考虑到真实场景的全周期的更多的飞机 (几十或上百架), 更多的停机位等参数的系统调度场景, 则整个系统的计算复杂性远远大于目前的估计值。当然这只是最极端的情况, 一般情况下, 实际存在的约束会极大降低解空间的复杂度, 当解的数量也远在人力或者一般求解算法可以完成的可行范围之内。

2.2 选择求解算法

针对非确定性多项式难度的优化问题, 存在 3 种类型的求解算法: 精确算法、近似算法和启发式算法。

精确算法的优点在于它能保证找到问题的全局最优解; 缺点在于算法的时间复杂度一般是指数型的, 对于规模稍大的问题实例, 计算时间长到无法实际应用。精确算法适用于问题规模很小的情形, 或者是问题本身有特殊结构的情形。

近似算法的优点在于它能保证在一个合理的计算时间内找到一个质量有保障的解。它能通过理论证明, 最终找到解的优度与全局最优解的优度在某个范围之内。它的缺点在于, 一般找到解的优度不高, 理论上保障的优度离实际需求相差较远。近似算法适用于必须在合理计算时间内找到有严格质量保障的解的情形。

启发式算法的优点在于它在大多数情形下能够在合理计算时间内找到质量满足实际需求的解方案。

基于机场保障指挥优化问题的复杂度分析,明确该问题的规模非常大,不适宜采用精确算法。同时,近似算法解的优度不高,也是不宜采用的。因而,针对大规模机场保障指挥优化问题,采用启发式算法进行求解。

2.3 设计求解算法

机场保障指挥调度优化问题^[6-10]包括了飞机降落到下一波次飞机起飞的整个流程,其中主要涉及到飞机选择停机位,以及飞机在停机位上执行各项保障作业。飞机选择停机位的过程可以看成是一个分配问题,这是问题的宏观结构。飞机的停机位选择不同,最终的调度方案则不同。飞机在停机位上进行保障作业的过程,需要根据各保障作业的保障需求选择合适的固定资源和移动设备为其提供服务,这是一个复杂的调度问题。因此,该问题是一个分配问题和复杂的调度问题相结合的综合调度问题。根据以上分析,该问题可分为2个层次的问题来求解。飞机选择合适的停机位是分配问题,属于宏观问题。对于飞机已经确定了停机位的作业保障问题是个复杂的多机调度问题,属于微观问题。这2个层次的问题相互影响。具体来说,算法分为上、下两层,上层算法负责对飞机选择合适的停机位,下层算法负责对飞机的各项作业进行保障调度。下层算法将调度结果返回给上层算法,上层算法根据反馈的调度结果自适应地调节某些飞机的停机位,重新调运下层作业调度算法以验证该调整是否能改善解的质量。如果可以,则接受这种新的分配和调度方案。如果不可以,则重新试探其他分配方案。这种过程一直进行,直到上层的分配方案和下层的调度方案均不能再改进为止。这是一个不断自适应学习、不断调整、不断优化的过程(图1)。

通常对于这类复杂的调度问题,找到一个可行解往往非常困难。因此首要任务是找到满足所有约束的可行解。调度算法在搜索过程中始终保持在可行解的范围内进行搜索。通过以上分析,不难发现,在飞机的作业保障调度问题中想要满足解的可行性,则必须满足一系列时间、空间和资源保障众多的约束条件。但实际上,找到一个问题的可行解从纯粹数学的角度求解,是极其困难的,因为找到一个合法解本身就是一个非确定性多项式难度(NP)问题。一般的做法是用一些

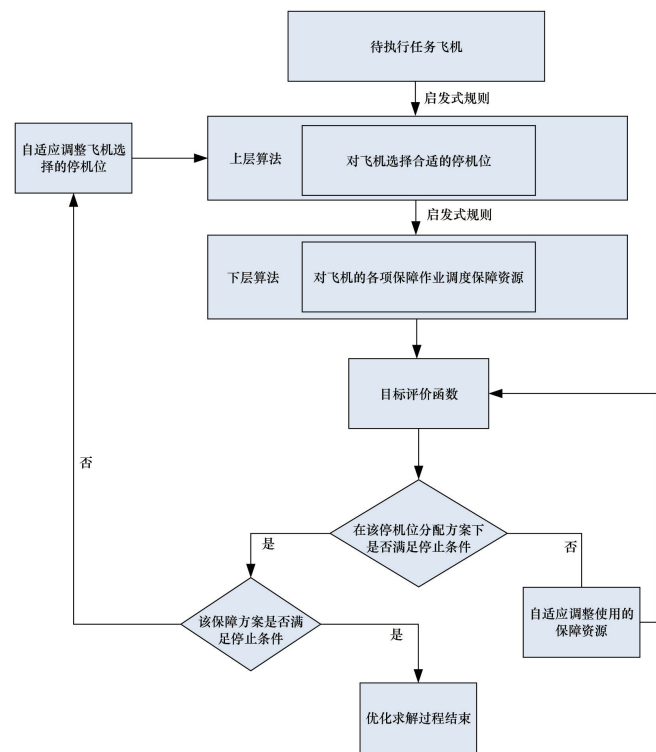


图1 算法求解示意

Fig. 1 Schematic diagram of the algorithm solution

启发式的规则,即将工程师在实践中的一些经验形式化为一定的优先指派规则,按此规则对各飞机的作业选择合适的固定资源和移动设备进行调度。但是,这些有效的启发式规则的应用主要依赖于对问题结构的把握和理解。

下面举例说明,启发式规则对调度方案的影响。

图2中,假设有4架飞机,编号分别为AC01、AC02、AC03、AC04,各架飞机均需要完成2道保障工序,2道保障工序之间是最简单的串行关系。其中第一道保障工序的工期是3个单位时间,其候选资源是G1、G2、G3、G4,第二道保障工序的工期是2个单位时间,其候选资源是Y1、Y2。固定资源G1、G2、G3、G4分别为停机位1、停机位2、停机位3、停机位4服务,各保障资源的数量均为1。

执行下次任务的飞机构成为:编号为AC01的飞机0时刻着陆成功,编号为AC02的飞机 t_1 时刻着陆成功,编号为AC03、AC04的飞机分别位于停机位3、4,规划飞机的保障指挥调度过程,使在满足需求情况下总的任务执行时间最短。

假定飞机起飞顺序为AC01、AC02、AC03、AC04,则在对停机位分配、对保障资源的调度过程中,要优先考

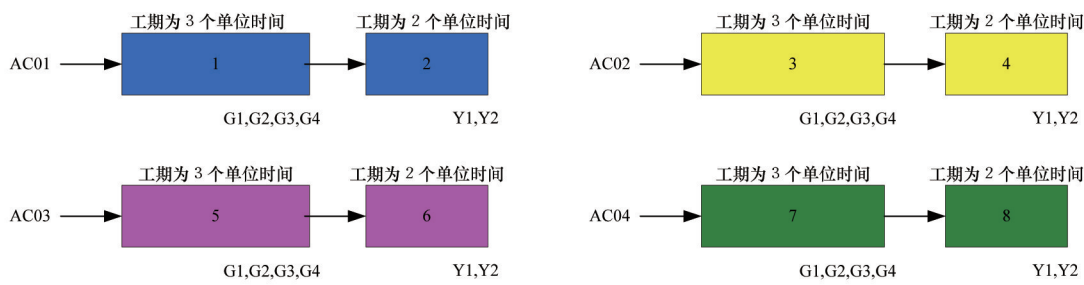


图2 4个飞机的保障作业流程示意
Fig. 2 Schematic diagram of four aircrafts' safeguard operations

考虑飞机的优先级,避免优先级高的飞机处于等待状态。一个可行的调度方案如图3所示。

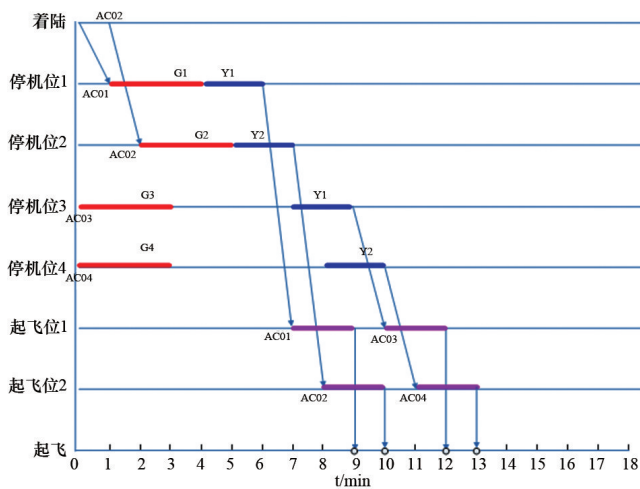


图3 一个全周期指挥调度示意
Fig. 3 A schematic diagram of a full-cycle command and dispatch

图3场景中,编号为AC01的飞机回收后,经过1个单位时间的移动,在停机位1上使用固定保障资源G1,移动设备Y1进行保障作业;编号为AC02的飞机回收后,经过1个单位时间的移动,在停机位2上使用固定保障资源G2,移动设备Y2进行保障作业;编号为AC03的飞机在停机位3上使用固定保障资源G3,移动设备Y1较Y2先空闲,因而经过1个单位时间的移动,为编号为AC03的飞机进行保障;编号为AC04的飞机在停机位4上使用固定保障资源G4,移动设备Y2较Y1先空闲,因而经过1个单位时间的移动,为编号为AC04的飞机进行保障。

假定飞机没有优先级,在寻找可行方案时,只是使得总保障时间尽量短。图4给出了机场保障指挥调度的一种可行方案,由于移动设备Y2较先分配给了编号

为AC03的飞机,使得整个保障作业过程加快了1个单位时间。

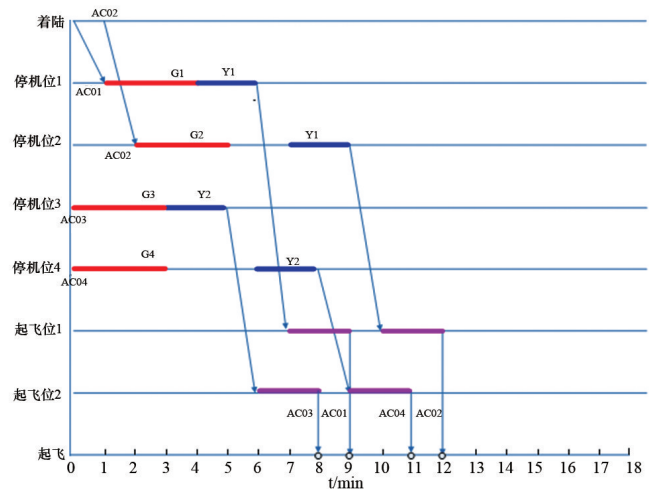


图4 一个全周期指挥调度示意
Fig. 4 A schematic diagram of a full-cycle command and dispatch

实际机场保障指挥调度问题是一个非常复杂的系统,要合理规划任一飞机在什么时刻什么地点开始执行什么保障作业,并且使用哪些固定资源或移动设备。同时,还需要给出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,需要决策的变量非常多,以上是最简单的应用案例,说明启发式规则的运用对调度方案的影响。

3 M型N架机的最短保障时间案例分析

3.1 启发式规则设计

各机型数量已知;各机型的任务类型已知(战斗/预警)——获得各机型保障项目、时间;根据任务类型有

一个理想的保障序列;起飞能力数据:与保障能力的比较(假设起飞1架/1 min,2架/2 min等);一次出动(非循环出动),分为停机位 $>M$ 和停机位 $<M$ 两种情况;机场情况:停机位数量、与机型的匹配关系;资源的限制(人员、车辆)、保障项目与资源的需求关系;启发式规则如下。

1) 选择飞机的规则(算法选择飞机先后的规则,不代表保障开始的时间):飞机起飞的优先级规则(打分,可以控制是否在一个编队,多编队时,若无明确先后顺序、依次往后排);起飞优先级相同时,短作业优先(因为保障时间短,对后续影响比较小)。

2) 选择停机位的规则:停机位最早可用优先。

约束1:停机位与飞机的匹配。

3) 保障资源调度规则(资源不充分的情况):资源最早可用优先(含约束2)。

约束2:资源移动时间约束。

约束3:每次从前沿工序中随机选择1个,获得最早资源可用时间、所有前序完工时间获得最早开工时间,与保障工序时间(已知),算出最早完工时间;(保障资源调度有串行,并行。)

4) 形成初始解可行解。

5) 优化过程:调整瓶颈停机位。

移动:仅从停机位A移动到B。

交换:2个飞机互换调停机。

6) 重复3),获得多个候选邻居解,用目标函数比较,选择一个本停放方案的最优解,作为当前解。

7) 重复5)、6),直到找不到更好的候选邻居解为止。

1)~4)初始解构造过程,基于启发式规则的;5)~7)迭代优化过程,基于搜索策略的。

按第一条规则对飞机排序、然后根据第二条规则进行停机位分配。

3.2 算法流程图设计

飞机按照最长关键路径进行排序,停机位按照最早可用时间排序,为各架飞机选择合适的停机位,然后为各架飞机各项保障作业调度所需的资源,判断该调度方案是否得到改善,若是,则接受这种方案,若否,则重新探索新的方案,直至不再改进为止,算法流程如图5所示。

3.3 结果分析

图6中,每段纵向箭头线的起点表示该舰载机当前

的状态,每段纵向箭头线的终点表示该舰载机到达了某一个状态,每段横向箭头线的起点与终点的时间段表示该舰载机在该状态的持续时间。P字母开头加数字的符号表示某个舰载机。由图6可知某个舰载机的任意时刻的状态信息,如舰载机P6进入系统在第6个时间单位进入系统,经过了3个时间单位到达了4号停机位,在4号停机位上保障了4个时间单位,经过1个时间单位到达了1号起飞位,此时起飞位空,无需等待可以立即起飞,即马上转到 S_3 起飞离开系统状态。再如舰载机P4进入系统后经过1个时间单位到达1号停机位进行保障作业,共耗时4.5个时间单位完成保障作业,然后经过1.5个时间单位到达1号起飞位,此时与处于相同1号起飞位上舰载机P3起飞必须有一定的安全起飞间隔,故P4舰载机在1号起飞位上排队等待2个时间单位后起飞离开系统。其他情况类似。

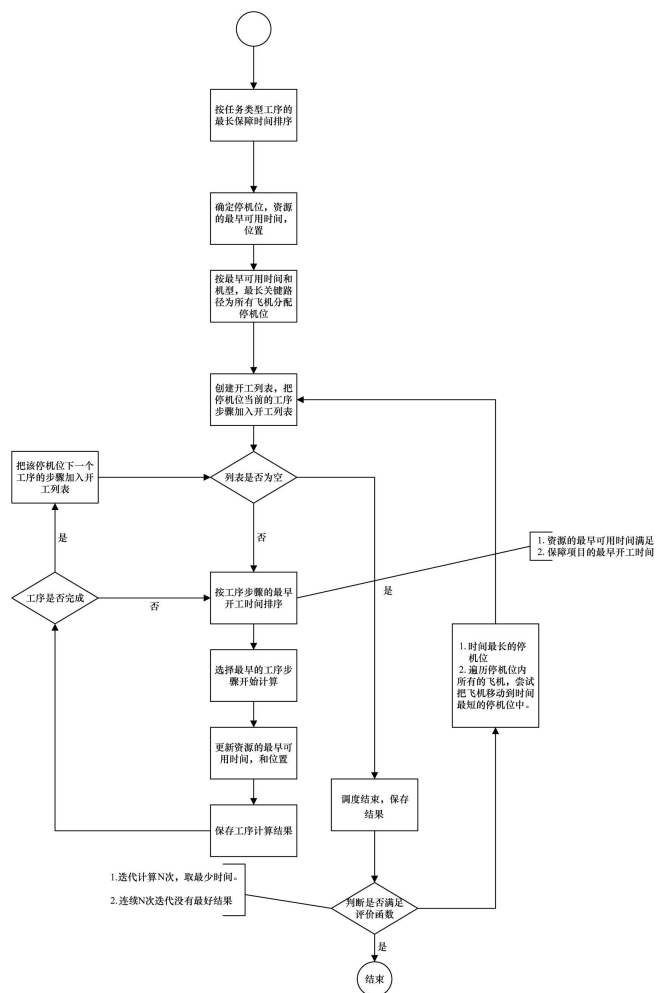


图5 算法流程
Fig. 5 Algorithm flow chart

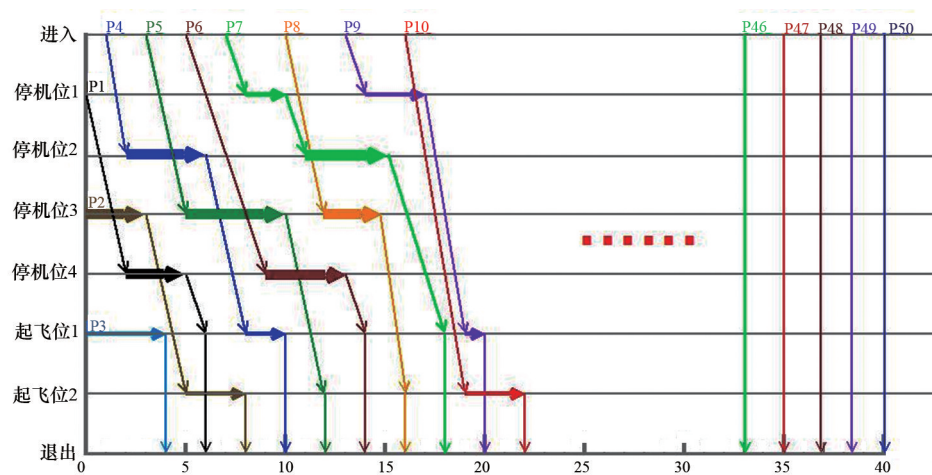


图6 状态转换图

Fig. 6 State transition diagram

4 结论

通过对机场保障指挥调度问题进行深入分析,针对机场保障指挥调度数学优化模型,计算了该求解算法的复杂度,得知该解空间的复杂度大大超过了一般求解算法的计算范围。因而基于启发式规则,将该问题分为2个层次的问题求解,上层算法负责对飞机选择合适的停机位,下层算法负责对飞机的各项作业进行保障调度。下层算法将调度结果返回给上层算法,上层算法根据反馈的调度结果自适应地调节某些飞机的停机位,不断迭代优化,直到上层的分配方案和下层的调度方案均不能再改进为止。这是一个不断自适应学习、不断调整、不断优化的过程。通过典型案例,验证了该算法的有效性,对于评估机场的最大保障能力,指导机场运行具有重要的支撑作用。

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.
Wang Ling, Liu Bo. Particle swarm optimization and scheduling algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 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.
Fang Chen, Wang Ling. Survey on resource-constrained project scheduling[J]. Control and Decision, 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.
Feng Qiang, Zeng Shengkui, Kang Rui. Multiagent-based modeling method for integrated logistic support of the carrier aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 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.
Lin Hua, Zhan Mingfeng, Zhou Feng. Optimization schedule algorithm and simulation to recycle planes on carrier[J]. Journal of Naval University of Engineering, 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.
Yang Bingheng, Bi Yuquan, Xu Weiqin. A model of aircraft handling workflow optimization[J]. Ship Science and Technology, 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.
Yang Bingheng, Wang Haidong, Han Feng, et al. The optimization research on aircraft handling workflow[J]. Science Technology and Engineering, 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.
Sun Jiao, Zhai Qinggang, Yu Jianfei. The evaluation of military aircraft supply ability based on discrete-event simulation[J].

Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(2):1051-1055.
[10] Wang W, Hu T, Yang J. Research on mathematical model of

urgency ordnance transport on single requirement point[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(2): 257-262.

Analysis of airport support command and dispatch capability

CUI Shanshan, WANG Minghui, ZHANG Xiaojie

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

Abstract This paper refers to the constraints of various resources and processes by which the airport support command and dispatch model guarantees multiple aircraft simultaneously. The paper assumes that the mathematical model of airport security command and dispatch is determined. The complexity of the algorithm is systematically analyzed, and based on the heuristic rules, an corresponding algorithm for the optimization problem is designed. The effectiveness of the algorithm is verified by an example, which shows its important role in guiding airport optimization.

Keywords airport security; command and dispatch; resource allocation ●



(责任编辑 傅雪)