

一种有限空间区域的机群调度优化算法

苏建, 黄百乔, 张鹏翼

国防科技工业海洋安全体系创新中心, 北京 100094

摘要 基于有限空间区域调度优化问题, 针对机群调度具体问题, 先将机群保障流程整体抽象建模, 再把物理模型转化为典型调度问题模型, 设计启发式规则提出优化算法。算法分为上、下两层次, 上层负责在有限区域内选择合适的停机位和起飞位, 下层负责对单机各作业进行调度, 下层把调度结果返回给上层算法, 上层根据该调度结果自适应调节某架机的停机位和起飞位, 重新调用下层算法以验证该调整是否能改善解的质量。以典型出动任务作为输入算例, 求解出有限空间区域的机群调度方案结果。相比之前人工排布的方式, 本方法在求解时间和结果优劣两方面更具优越性, 该方法使得机群调度指挥方式向智能化过渡, 对提升机群出动架次率有重要意义。

关键词 空间受限; 调度建模; 资源受限; 流水线调度; 优化算法

无论民用还是军用领域, 在有限空间区域内实现高效率机群调度都非常有必要。在有限区域内为机群提供高效准确的保障调度方案, 对提高出动架次率有重大意义^[1]。中国在这方面的研究尚在摸索, 未见到较为系统化的解决方案^[2]。因此对机群调度过程进行分析和建模, 设计有针对性的求解算法来优化整个机群保障调度过程, 以提高各类保障资源及设备使用率, 从而保证机群更高强度出动回收任务需求^[3]。

为提高航空作业管理自动化程度, 美国海军开发了航空数据管理和控制系统^[4], 将工作移交给计算机, 提供布列调运的意见和方案, 由此可见, 在军用领域调度指挥方式向智能化过渡, 已成为不可阻挡的发展趋势。中国在机群调度管理方面的研究还处在初步阶段, 研究还不够具体细化, 还停留在模型论证和方法研究层面^[5]。

本研究通过对机群调度问题的具体分析, 首先梳

理出机群调度过程所涉及到的物理背景、时间和空间限制、各类干涉和约束条件、各类资源需求等底层要素, 整合出机群调度过程的底层模型描述, 进而根据生产调度理论, 将该问题抽象成资源与空间受限的多目标并行流水线调度问题模型; 设计了一种新的启发式优化算法, 以典型出动任务作为输入算例, 求解出机群调度方案结果。相比之前人工排布的方式, 本方法在求解时间和结果优劣两方面更优。

1 问题模型转化

1.1 DAPFSP 模型

分布式的带有装配阶段的排列顺序流水车间问题 (distributed assembly permutation flow-shop problem, DAPFSP) 模型的衍生过程如图 1^[6]所示, 简称 DAPFSP 模型。

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-12

作者简介: 苏建, 助理工程师, 研究方向为联合作战任务规划, 电子信箱: 13581836754@163.com; 黄百乔 (通信作者), 高级工程师, 研究方向为系统工程、体系工程, 电子信箱: seafury@buaa.edu.cn

引用格式: 苏建, 黄百乔, 张鹏翼. 一种有限空间区域的机群调度优化算法[J]. 科技导报, 2018, 36(24): 73-78; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.24.011

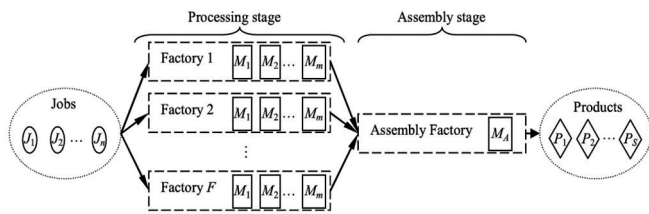


图1 DAPFSP问题模型

Fig. 1 Problem model of DAPFSP

该模型中有 n 个 job, 表示为集合 $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$, 经过加工和接下来的装配阶段, 它们被生产为最终的产品集合 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 。每一个 product 包含若干确定的 jobs, 每一个 jobs 归属于一个确定的目标成品。其中目标成品生产过程包含两个阶段: 加工阶段和装配阶段。

Processing stage 是加工阶段, 共有 F 个工厂, 每个工厂内又有 m 台机器, 记做集合 $\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 。对应来看, 每一个工作 J_i 需要一系列的 m 项操作, 记为集合 $\{O_{i,1}, O_{i,2}, O_{i,m}\}$, 这些步骤在一个所在工厂内依次进行操作。作业 $O_{i,j}$ 在 M_j 上的执行时间记为 $t_{i,j}$, 特别强调下, job 的操作是不能转移到另外一个工厂进行加工的。

Assembly stage 是装配阶段, 在此过程是对产品出厂前或者货物出库前的最后装配阶段, 这个步骤完成后整个 job 的操作流程结束。

通过以上描述, 可以理解该模型的具体定义。在排列流水车间的模型基础上, 待加工的 job 集合中的 n 个 job 要被分配到 F 个工厂进行加工, 这样看来调度问题模型是具有分布式特点的, 再加之最后的装配阶段, 从而衍变成成为 DAPFSP 调度模型。

1.2 实际问题建模

有限空间区域内的机群调度问题是一类复杂多目

标多约束调度优化问题, 需要根据保障作业的时序流程、各停机位和保障资源的空间、数量和逻辑约束来合理调度各类资源, 确定飞机从初始状态到起飞、降落的整个调度过程^[6-9]。多目标多约束调度优化问题是组合优化问题中最为困难的一种, 其难点主要在于问题设计的约束多, 构造一个合法解比较困难; 在对解优化的时候还要考虑多个优化目标之间的关系。在军用领域, 一个智能调度系统对提升整个战斗群的作战能力都大有裨益^[10]。中国在此领域起步相对较晚, 迫切需要一套智能化机群调度系统, 这很有挑战性, 也具有重大的军事战略意义^[11]。

机群调度是根据实际出动任务分批次进行的, 每个批次又分为 4 个阶段: 1) 每一批次的开始处理上批次的机降落返回; 2) 根据任务要求的飞机类型和对应的数量, 具体到选择某一架飞机; 3) 为所选飞机选择机务站位完成保障作业; 4) 保障完成后为飞机选择合适起飞位, 该批次任务结束。

机群调度方案是对这 4 个阶段中的各个选择做出决策, 包括了从飞机降落后到下一波次飞机起飞的整个流程, 其中主要涉及到飞机从初始停机位到加工停机位的移动, 再到起飞位起飞。在再次出动准备期间, 飞机需要根据保障工序, 选择合适的固定资源设备和移动辅助设备为其提供服务, 这是一个复杂的大规模调度问题。将机调度问题抽象转化为 DAPFSP 问题模型, 如图 2 和图 3 所示。

根据图 2 和图 3 做出简要的解释, 前者中的 jobs 转化为实际问题中的若干飞机主体。前者中每一个作业 job 在 factory 流水车间加工过程则转化为飞机选择机务站位进行保障作业的过程, 其中的每一道工序即为飞机的若干保障作业。之后的装配过程转化为分配和选

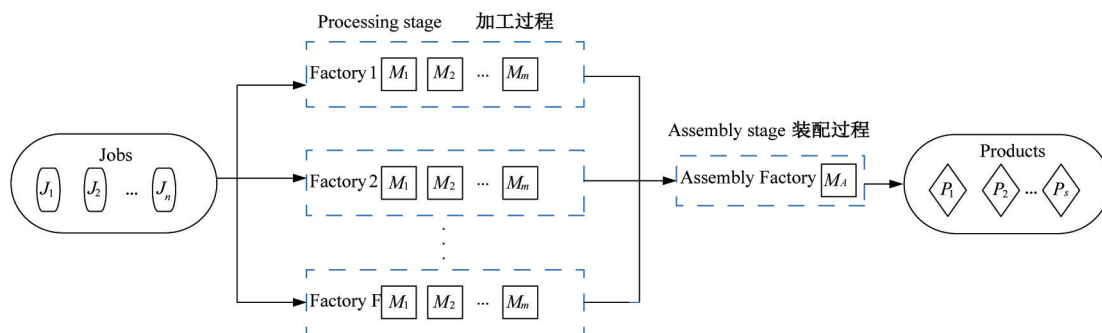


图2 DAPFSP模型

Fig. 2 Model of DAPFSP

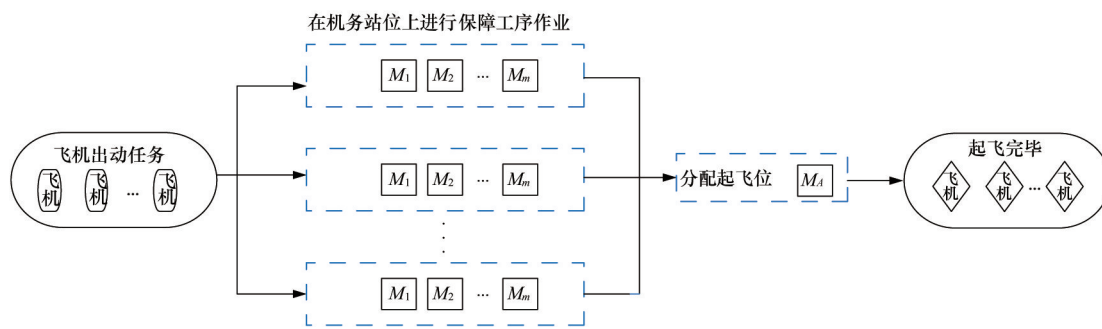


图3 调度问题转化建模

Fig. 3 Scheduling problem transformation modeling

择起飞位,最后每一架飞机的起飞完毕意味着飞机离开调度系统,调度任务结束。

2 调度优化算法设计

2.1 求解目标函数设定

在进行算法设计时,主要难点集中在以下几个方面。

1) 多站式保障增加了选择停机位的复杂度:在有限空间区域内,一站式保障对站位周围的资源配置要求极高,很难满足这个要求。多站式会增加选择保障位的复杂度:一方面,一站式是从 \$N\$ 个站位中选取一个即可,多站式是从 \$N\$ 个站位中选择 \$M\$ 个,复杂度大大增加达到了 \$O(N^M)\$,这对算法整体的搜索效率有很大影响;另一方面,多站式保障如何对作业工序进行划分也是要考虑的问题,这也增加了求解复杂度。

2) 站位干涉情况复杂:在机群调度问题求解时,飞机站位干涉是需要着重考虑的一种冲突约束,举例来说,机翼是否展开造成多种干涉站位类型:展开-展开干涉、展开-停放干涉以及停放-停放干涉等。既要考虑飞机进入到停机位的时候是否会和周围的站位产生干涉,也要考虑本站位飞机和周围站位是否会在站位上展开机翼,处理情况复杂,造成了算法设计的难度。

3) 保障站位存在可用性约束:在问题模型中,机务站位在某个时间段有可用性约束,飞机有可用时间段和每日最大飞行次数限制,固定资源也有可用时间段限制,这几个因素都可能会中断保障作业的进行,所以设计算法时要能对这种情况做出处理。

4) 长占工序引发死锁:有些固定资源需要移动资源的辅助,有些移动资源也可能需要固定资源辅助。

如果某两个长占工序在某种情况下使用移动资源来进行保障,而这个移动资源又需要固定资源来辅助,其中一个长占工序抢占了站位周围唯一辅助资源,但由于另一个长占工序没有进行,后序工序不能保障,辅助资源不能释放,引起死锁等待,所以求解时要防止此类情况发生。

根据两个优化目标:一是单个波次所有机完成保障时间最短;二是单波次所有机起飞作业时间最短。首要考虑再次出动准备和起飞时间最短,次要考虑资源使用是否平衡和飞机转运用次数。因此在机群调度问题中,要达到的优化目标是使得总调度时间最短,使总延迟尽量小。提出以下几个算法目标函数,其中 $priority$ 表示飞机优先级即重要程度, t_{depart} 表示飞机预计起飞时间, t_{yet} 表示实际起飞时间; p_s_score 表示飞机对停机位的偏好值; $perf_ds$ 表示停机位对起飞位的偏好值。

$$\min f_1 = \sum_i priority \times \max\{0, t_{yet} - t_{depart}\} \quad (1)$$

$$\min f_2 = \sum_i p_s_score \quad (2)$$

$$\min f_3 = \sum_i perf_ds \quad (3)$$

考虑几个因素的内在联系和制约关系,求解该问题的总目标函数可表示为

$$\min F = w_1 \times f_1 - w_2 \times f_2 - w_3 \times f_3 \quad (4)$$

其中,式(1)表示了飞机调度保障时间最短,并且实际起飞时间与预计起飞时间延迟量最小;式(2)表示了选择其偏好性最好的站位;式(3)表示了选择其偏好性最好的起飞位;式(4)对前面3个公式联结起来,可根据实际情况求解最佳的调度方案。该总目标函数会让算法的求解结果朝着飞机起飞延迟越小越好、飞机等待越小越好、飞机对站位的偏好性越高越好的方向,考虑到

不同作业工序的重要程度, 设定 w_1, w_2, w_3 为固定参数表示工序权重值。

2.2 整体求解方案

机群调度问题可理解为一个上层的分配问题和下层的复杂调度问题相结合的综合调度问题。上层调度问题, 即飞机选择保障作业停机位和起飞位的过程, 停机位选择不同, 最终调度方案则不同, 在这一阶段是在不同的出动任务下, 以批次为单位进行处理。下层调度问题, 即飞机在停机位上进行保障作业的细化过程, 包括各项保障资源调度和工序匹配优化, 在这一阶段是以单机为对象进行不断迭代优化的, 如图 4 是该问题的整体求解框架。这两个层次的问题相互影响, 因此可用层次化的算法来迭代优化求解, 即双层反馈优化算法, 如图 5 所示。

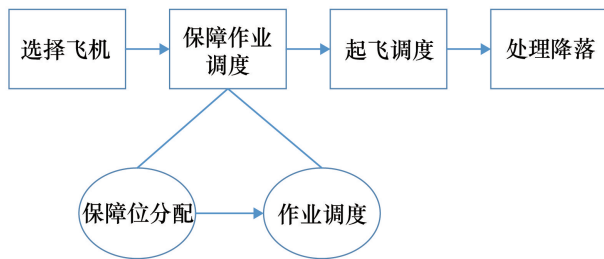


图4 问题求解框架

Fig. 4 Problem solution framework

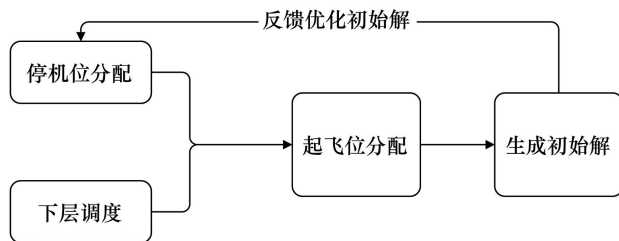


图5 优化算法求解框架

Fig. 5 Optimization algorithm solution framework

算法分为上、下两层次, 上层算法负责选择合适的停机位和起飞位, 下层算法负责对单机的各作业进行保障调度。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调节某飞机的停机位和起飞位, 重新调用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, 则重新试探其他的分

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。针对每一层求解算法, 再结合约束条件, 采用基于多种启发式策略规则, 来引导算法逐渐找到更优方案。

3 算法求解与实验对比

通过以上分析, 将该调度问题分成 3 个模块, 即停机位分配模块, 起飞位分配模块, 下层调度模块。优化调整终止条件是: 当前每架机都无法让目标函数值再减小。求解算法的 3 个模块的关系如图 6 所示, 并给出算法部分伪代码。

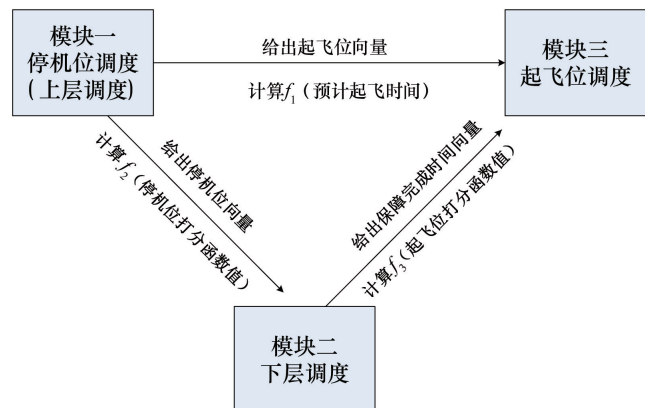


图6 算法各模块关系图

Fig. 6 Illustration of algorithm module relationship

通过 3 个模块计算可以得出调度方案的初始解, 但是效果较差, 需要进行调整优化。对解表中结果较差的飞机进行局部搜索, 更换保障站位, 这样将交换的信息再次传给下层调度, 会得到一个新解, 直到目标函数不能再优化为止。下面给出初始解迭代优化调整的伪代码描述。

Input: 初始解 S_0

Output: 调整优化后的解 S_{min}

- 1 $S_{min} \leftarrow S_0$;
- 2 While 迭代次数 < 阈值 do
- 3 找出调度结果最差的飞机;
- 4 if 有限区域还存在空站位 then
- 5 将飞机的保障位换成该空站位;
- 6 else 将飞机和本批次用到的飞机互换站

位;

```

7 用交换后的结果更新传给下层调度模块;
8 ManagelowerSchedule();/*更新的站位和时间信息再次传给下层供其调度*/
9 SolAdjust(); /*调整解方案*/
10 if f(S)<f(Smin) then
11 Smin←S; /*解方案进行优化*/
12 end

```

在本小节, 将把调度算法求解方案与同样初始条件下的人工排布方案进行对比分析。选定的初始布列是8架机情况下, 停放站位代号: C1, C2, C3, A2, A3, A5, A7和A13。

算法求解保障流程和调度时间如下所示。

过渡停机位: D2, D6, C2; 最后一架飞机降落后拖入A13。

J→D2(停留)→A12(全保障)→C3(起飞)

J→D6(停留)→F1(全保障)→C1(起飞)

J→C2(停留)→A7(全保障)→C2(起飞)

J→A13(全保障)→C3(起飞)

计算可得, 第3波次的再次出动准备时间为46 min。

在同种情况下, 人工排布调度保障流程和调度时间如下所示。

过渡停机位: D3、D5、C1; 最后一架飞机降落后拖入A10。

J→D3(加燃油)→A8(其他保障)→C1(起飞)

J→D5(加燃油)→A13(其他保障)→C3(起飞)

J→C1(停留)→A12(全保障)→C3(起飞)

J→A10(全保障)→C2(起飞)

计算可得, 第3波次的再次出动准备时间为58 min。

实验部分, 对4种任务进行了调度求解: 有限空间区域内初始布列为空与不空情况下的4×8波次任务, 初始布列为空与不空情况下的8×8波次任务。4种典型任务下的算法调度结果如图7所示, 相对人工排布计算结果在求解时间和结果方案优劣两方面都有显著提高。

依据以上内容, 该调度算法执行4×8波次出动任务的再次出动准备时间为46 min, 据统计当前人工排布最优方案为58 min; 执行8×8波次出动任务的再次出动准备时间为58 min, 而当前人工排布最优方案为59 min。调度算法运算时间不超过5 min, 不但在计算时

间上少于人工排布计算时间, 而且在调度保障时间消耗方面也有显著的提高。

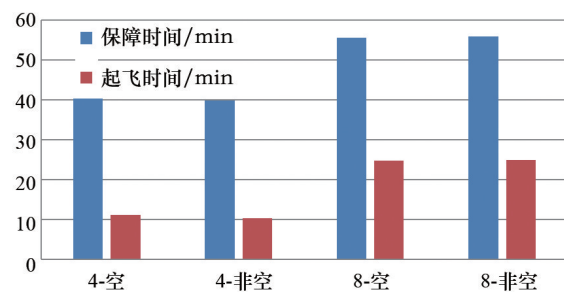


图7 4种任务调度结果

Fig. 7 Four task scheduling results

4 结论

通过对机群调度问题的具体分析, 梳理出机群保障作业整个流程, 整合出机群调度模型描述, 将问题抽象转化为资源与空间受限的多目标并行流水线调度问题模型, 并提出应用了DAPFSP调度模型; 在此基础上, 设计了多种启发式规则, 设计提出了求解该问题的优化算法, 并进行了编程实现。该方法的提出不仅实现了机器算法高效求解调度方案, 还有助于实现调度指挥方式从人工排布向智能化调度转变, 具有探索意义。

参考文献 (References)

- [1] 杨炳恒, 王海东, 韩峰, 等. 机调运作业流程优化研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(22): 5602-5605.
- [2] 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(1): 118-121.
- [3] 朱齐丹, 吕开东, 李新飞. 舰载机航空保障资源优化配置的循环网络模型[J]. 计算机应用, 2013(11): 3276-3279.
- [4] 卞大鹏, 黄祥钊, 代丽红, 等. 甲板机动态调度研究方法综述[J]. 电子科技, 2016, 29(1): 169-172.
- [5] 李耀宇, 朱一凡, 齐鸣, 等. 舰载机甲板布列调运优化方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(2): 125-131.
- [6] Wang S Y, Wang L. An estimation of distribution algorithm-based memetic algorithm for the distributed assembly permutation flow-shop scheduling problem[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2016, 46(1): 139-149.
- [7] 金锋, 吴澄. 大规模生产调度问题的研究现状与展望[J]. 计算机集成制造系统, 2006(2): 161-168.
- [8] 寿涌毅. 资源受限多项目调度的模型与方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010.

- [9] 王军强, 张松飞, 陈剑, 等. 一种求解资源受限多项目调度问题的分解算法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 83-96.
- [10] 张松. 资源受限项目调度若干问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [11] 贾艳. 资源受限项目调度问题的仿真优化方法及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

Algorithm for aircraft cluster scheduling in limited space area

SU Jian, HUANG Baiqiao, ZHANG Pengyi

Marine Safety System Innovation Center, Science and Technology for National Defense, Beijing 100094, China

Abstract For the aircraft cluster scheduling problem in a limited space, the paper models the overall operation process first, then converts the model to a typical scheduling model, for which heuristic rules and an optimization algorithm are presented. The algorithm is divided into upper and lower levels. The upper layer is responsible for selecting parking space and take-off position in the limited area. The lower layer is responsible for the scheduling work of each single aircraft and returns the scheduling result to the upper layer, which adaptively adjusts the result accordingly. Then, the lower layer algorithm is recalled to verify whether the adjustments of stand and takeoff position can improve the quality of the solution. The result of the scheduling scheme is demonstrated. Compared with manual arrangement, the method is more advantageous in both solving-time and solution quality. This method is of great significance to improve the efficiency of aircraft sorties.

Keywords space restriction; scheduling modeling; resource restriction; flow-shop schedule; optimization algorithm ●



(责任编辑 田恬)