

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.009

基于自适应遗传算法的舰载机保障调度

王文鹏, 邹刚, 张玘, 马元, 张宇坤
(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘要: 为解决舰载机多机保障作业的调度问题, 设计一种与之相适应的自适应遗传算法。分析舰载机进行保障的流程约束, 得到单个舰载机的简化流程, 以最小化保障时间为目标, 建立问题的数学模型, 根据舰载机保障调度作业的特点, 采用自适应遗传算法进行求解, 通过多机保障任务案例进行验证。结果表明: 使用甘特图的方式, 可直观地表示保障作业的计划流程, 并验证了自适应遗传算法的有效性。

关键词: 舰载机; 遗传算法; 保障调度

中图分类号: V271.4⁺92 **文献标志码:** A

Support Scheduling of Carrier-based Aircraft Based on Adaptive Genetic Algorithm

Wang Wenpeng, Zou Gang, Zhang Ding, Ma Yuan, Zhang Yukun
(Qingdao Branch, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to solve the scheduling problem of carrier-based aircraft multi-machine support operations, an adaptive genetic algorithm is designed to suit it. The process constraints of carrier-based aircraft support are analyzed, and the simplified process of a single carrier-based aircraft is obtained. The goal is to minimize the support time and establish a mathematical model of the problem. According to the characteristics of carrier-based aircraft support scheduling operations, an adaptive genetic algorithm is used to solve the problem, which is verified by the case of multi-machine support tasks. The results show that the Gantt chart can intuitively represent the planning process of the guarantee operation and verify the effectiveness of the adaptive genetic algorithm.

Keywords: carrier-based aircraft; genetic algorithm; support operation scheduling

0 引言

舰载机是航空母舰系统的重要组成部分, 承担着航空母舰几乎全部的作战任务。舰载机的出动能力严重影响着航母的综合作战能力^[1]。在舰载机通过弹射器起飞执行任务之前, 必须严格按照预先制定的甲板作业流程进行舰面保障, 舰载机航空保障作业时间, 不仅关系着舰载机的航空保障效率, 而且制约着舰载机出动架次率^[2]。航空母舰甲板空间固定, 保障资源有限, 作业环境多变, 作业流程复杂, 作业要求高效安全, 这些也决定了舰载机机务保障作业调度是舰载机出动能力的关键影响因素^[3-4]。舰载机的保障作业调度是在有限的甲板空间和保障资源等约束条件下, 为舰载机提供合理的保障资源、保障次序和保障人员, 以缩短舰载机的牵引距离并减少保障作业的总时间, 从而确保在舰载机起飞之前完成保障任务^[5]。

舰载机保障调度问题可以认为是资源约束的优化调度问题, 国外对该问题的研究经历了人工经验调度、计算机辅助调度、智能决策和优化调度 3 个

阶段^[5]。目前, 对舰载机保障问题的研究主要集中在计算仿真和智能优化方法。美国麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室开发了航母甲板作业规划决策支持系统对舰载机保障作业调度进行智能决策^[6-7]。司维超等^[8-9]使用智能粒子群算法对舰载机舰面布放调度方法进行求解, 还利用多种群协作混沌智能算法对舰载机出动调度问题进行研究; 魏昌全等^[10-11]建立了连续和分波出动 2 种方式的舰载机航空保障调度模型, 且认为要考虑航空母舰甲板空间约束的影响; 朱齐丹等^[12]采用循环网络模拟技术对舰载机航空保障资源进行了优化配置; 王保乳等^[13]利用遗传算法设计了出动任务下舰载战斗机舰面布放方案; 吕开东等^[14]对舰载机航空保障的组成和需求进行了分析, 建立了开环排队网络模型, 获得了相应的目标参量; 卞大鹏等^[15]建立了甲板停机位分配模型, 利用贪心算法并结合模拟退火算法进行了求解; 韩维等^[16]提出了一种自适应混合差分进化算法, 用来解决舰载机多机一体化保障调度问题; 苏析超等^[17-18]建立了舰载机多机舰面一站式保

收稿日期: 2020-09-25; 修回日期: 2020-10-29

作者简介: 王文鹏(1991—), 男, 河南人, 硕士, 从事飞机与发动机故障诊断、装备保障研究。E-mail: wwp.happy@163.com。

障调度的数学优化模型,并使用文化基因算法求解;石颢等^[19]建立了一种基于随机网路的保障流程模型,对舰载机航空保障活动逻辑关系与时间的不确定性进行了相关研究;杨炳恒等^[2,20]建立了多机出动甲板作业流程图和舰载机作业流程交通网模型并进行了验证;龙钰洋^[21]使用自适应并行遗传算法对保障人员配置优化进行了研究,并通过案例对算法进行了验证;李梦龙等^[22]使用改进禁忌搜索算法对舰载机保障作业调度模型进行了求解;李经等^[23]建立了保障作业调度系统的数学模型,认为采用遗传算法能够有效地进行求解;宋璟毓等^[24]采用单解的贪婪随机自适应搜索算法,对甲板航空保障作业流程进行了优化;范加利等^[25]使用岛式并行遗传算法研究了双周期出动模式下舰载机再次出动准备的调度,并通过仿真算例进行了验证。

由于舰载机保障作业调度问题的重要性、复杂性和对实际作战的关键性,如何建立调度模型,并求解出可行、高效的调度方案是十分困难的问题,给调度理论和调度实践带来了极大的挑战^[26]。笔者在分析航空母舰舰载机保障作业方式的基础上,建立调度模型,使用基于自适应遗传算法进行求解,以典型多机保障任务进行验证。

1 舰载机保障调度问题描述与分析

“尼米兹”级航空母舰,采用的是传统的多站式保障的方法。一个或多个保障工序有不同的保障区域,在保障过程中,舰载机在不同的保障区域进行移动转运,在不同的保障区间内完成保障工作。在保障过程中,舰载机在多个区域转移的时间不可以忽略不计。保障时间随着转移次数的增加而增加,会导致保障人员的工作效率下降,影响保障工作的整个进程。为了减少保障工作的时间,增加舰载机的出动架次,美国“福特级”航母采用了“一站式保障”方式。“一站式保障”概念最初来自全美赛车联盟^[27],对航空母舰来说,就是使用集成化的方式,在一站式保障区内完成加油、检测等保障内容,减少舰载机在多个区域转移的时间,从而减少保障时间,提高工作效率。采用一站式保障方式要在一个保障区内完成的保障任务比较多,需要的设备和装置相对集中,而航空母舰甲板的空间有限,在保障区内,装置和设备的紧凑使得保障人员的工作区间比较小,影响了保障人员的舒适度和操作的方便度。一站式保障配套的输油管铺设,设备的安装区间,都需要与航空母舰上其他设备间的位置进行协调和

安排。在航空母舰上多个一站式保障区占用了更多的甲板区间,在甲板区间不变的情况下,对甲板调度作业质量的要求更高;因此,与“尼米兹”级航空母舰相比,“福特级”航母增加了甲板面积。

舰载机起飞前的保障作业有飞机的检查、添加润滑油及液压油和挂载导弹等。根据完成保障作业内容的不同,通常将保障人员分为机械、军械、航电、特设 4 个专业。机械专业人员的主要工作内容有检查添加发动机润滑油、添加液压油、填充氮气、添加燃油等;军械专业人员主要负责军械检查、装填炮弹、挂载导弹等;特设专业人员需要进行通电检查、充氧等;航电专业一般负责航电检查、设备通风等。每个保障专业下有一个或多个保障组,根据实际工作情况设置各专业的保障组的数量。每个保障组由可以完成相关专业任务的保障人员和相关的保障设备组成,每个保障组都可以完成所属保障专业的工作。结合保障模型的约束条件,单个舰载机保障流程如图 1 所示。

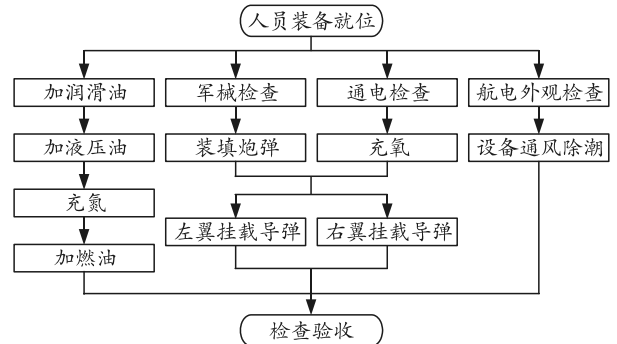


图 1 单个舰载机保障流程

为避免在保障的过程中出现混乱,考虑到安全问题,舰载机的各保障工序有一定的先后顺序。保障过程中,保障人员可能需要在不同的保障区中移动以完成任务,保障组的移动时间不能忽略不计。各保障工序的保障时间如表 1^[28]所示。

表 1 各保障工序作业时间

工序号	工序名称	紧前 工序号	保障专业	保障时间/ min
1	加润滑油	—	机械	4
2	加液压油	1	机械	4
3	充氮	2	机械	3
4	加燃油	3	机械	18
5	军械检查	—	军械	6
6	装填炮弹	5	军械	8
7	左翼挂载导弹	6,10	军械	6
8	右翼挂载导弹	6,10	军械	6
9	通电检查	—	特设	7
10	充氧	9	特设	4
11	飞机外部检查	—	航电	10
12	设备通风除潮	11	航电	3

2 舰载机保障调度模型

为了建立舰载机保障调度模型，假设如下：一个保障组在同一时刻可以多个工序并行保障，一个工序在同一时刻只能接受同一个保障组；在保障组对保障工序进行作业的过程中不能停止；各个舰载机之间相互独立，各工序除流程图中先后工序外互不影响；保障组进行作业的时间是确定的，不考虑随机情况；不考虑突发故障和干扰因素的影响。将保障第一个工序开始的时间到最后所有舰载机工序完成的时间称为完工时间。保障调度的目标是将完工时间最小化，公式如下：

$$C = \max(E_{ij}), 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n. \quad (1)$$

式中： C 为完工时间； m 为舰载机的数量； n 为工序的数量； E_{ij} 为第 i 架舰载机第 j 个工序的完成时间。

$$F = \min(C_{\max}). \quad (2)$$

式中： F 为优化目标； C_{\max} 为最大完工时间。

用 P_{ij} 表示第 i 架舰载机第 j 个保障工序，每个工序在同一时刻只能由一个保障组进行作业，每个工序都有保障组进行作业，公式如下：

$$\sum_{k=1}^M Y_{ijk} = 1, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n. \quad (3)$$

式中： Y_{ijk} 为工序分组标记，当工序 P_{ij} 由第 k 个保障组进行保障时为 1，其他为 0； M 为保障组总数量。

对于保障工序来说，开始时间加上保障作业持续的时间等于保障结束的时间，公式如下：

$$E_{ij} = S_{ij} + \sum_{k=1}^M Y_{ijk} T_{ijk}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n. \quad (4)$$

式中： S_{ij} 为第 i 架舰载机第 j 个工序的开始时间； T_{ijk} 为由第 k 个保障组对工序 P_{ij} 进行作业所需要的时间。

保障组的作业顺序应该按照流程图中的先后约束进行，公式如下：

$$\max(E_{ij}) \leq S_{ij}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n, \forall h \in B_{ij}. \quad (5)$$

式中： B_{ij} 为第 j 个工序的前序工序集； h 为变量。

保障组在不同的保障区间进行转移需要的时间需要考虑，分配在同一保障组的工序要按优先级进行，公式如下：

$$E_{ij} + W_{ie} + R \cdot X_{ijeg} \leq E_{ij} + R, 1 \leq i, e \leq m, 1 \leq j, g \leq n. \quad (6)$$

式中： W_{ie} 为舰载机 i 和舰载机 e 之间保障组转移时间； X_{ijeg} 为工序顺序标记，当工序 P_{ij} 与工序 P_{eg} 由同一保障组作业时， P_{ij} 在 P_{eg} 之前为 1，之后为 0；

R 是大于保障组转移时间的实数。

3 基于自适应遗传算法的问题求解

舰载机多机保障调度作业具有复杂的流程约束、资源约束，保障工序比较多。舰载机的数量越多，问题的规模越大，导致传统的人工调度的效率越低，使用智能算法进行求解是一个值得考虑的途径。遗传算法是通过交叉、变异、选择 3 个操作去除低适应度的个体，从而求得较优解，适合于求解复杂的优化问题，可以全局搜索和并行计算。传统的遗传算法采用了相同概率的交叉和变异操作，自适应遗传算法考虑到搜索和随机性之间的权衡，根据适应度值的不同动态改变交叉和变异的概率，从而实现快速找到最优解，提高算法效率^[29]。

根据舰载机保障调度作业的特点，避免产生非法解，降低编码的冗杂性，采用基于矩阵的实数编码的方式，如下式所示：

$$A_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, a_{ij} \in (1, Q+1). \quad (7)$$

式中： $A_{m \times n}$ 是编码矩阵； Q 是可以对工序 P_{ij} 进行作业的保障组的数量；矩阵元素 a_{ij} 的整数部分是完成工序 P_{ij} 对应的保障专业的第几个保障组。当不同的工序分匹配到同一个保障组时，在满足约束的条件下，根据矩阵元素 a_{ij} 的小数部分大小安排保障工序顺序。为了便于将染色体进行交叉、变异等，将矩阵展平后的列表作为染色体，染色体的形式如 $[a_{11} \ a_{12} \ \cdots \ a_{1n} \ a_{21} \ a_{22} \ \cdots \ a_{2n} \ \cdots \ a_{m1} \ a_{m2} \ \cdots \ a_{mn}]$ 。将每个染色体作为行组合成种群矩阵。

解码过程与编码相反，是将染色体向调度方案进行映射的过程，可以将解码当作是对调度系统进行的仿真。在解码过程中，不单要考虑染色体所携带的信息，还要满足保障工序前后的约束关系。每个保障组都生成一个保障表，根据染色体携带的基因信息，将工序放入到相应保障组的保障表，并将保障表内的工序按基因的小数部分进行排序。采用离散时间仿真的事件调度策略，将保障工序分成正在保障工序集合、已完成保障工序集合和待保障工序集合。通过基于最早发生事件的时钟推进机制，更新 3 个集合，从而获得各工序的相关调度信息。相关步骤如下：1) 将所有工序的保障表编号加入到待保障工序集；2) 对待保障工序集中保障表的工序

进行分析，如果无前序工序或前序工序则称为可进行，将保障表中第一个可进行的工序加入到正在保障工序集；如果该工序和保障表上一个取出的工序是同一架飞机，则将开始时间记为现在时间；如果不是同一架飞机，则将现在时间加上飞机间的转移时间记为开始时间，将该工序的结束时间记为开始时间加上保障时间，将该工序加入正在保障工序集；3) 将现在的时间更新为正在保障工序集中所有工序的最小结束时间，将保障工序集中结束时间早于或等于现在时间的工序加入到已完成工序集，如果该工序所在保障表为空，将保障表从待保障工序集中弹出，重复 2)、3)直到所有工序保障完成。

初始种群随机生成，将目标函数的倒数作为适应度函数。使用轮盘赌策略和精英策略相结合的方式来选择交叉和变异步骤所需的候选染色体。使用单点交叉的方法对染色体每一基因进行处理，生成一个随机数，当该数小于交叉概率时，对染色体随机配对，将随机生成的一个位置后的基因交换。生成一个随机数，当小于变异概率时，染色体进行变异操作，选择一个随机位置，然后对该位置重新随机生成符合编码要求的实数。为了不让遗传算法陷入局部最优解，使低于平均适应度的个体去搜索空间中查找包含最优解的范围，将交叉概率和变异概率设置为适应度相关的函数，如下式所示：

$$P_c = \begin{cases} k_1 (f_{\max} - f') / (f_{\max} - f_{\text{avg}}), & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： P_c 为交叉概率； f_{\max} 为种群适应度最大值； f_{avg} 为种群适应度平均值； k_1, k_2 为参数，根据经验都设置为 1； f' 为交叉父亲母亲染色体适应度最大值。

$$P_m = \begin{cases} k_3 \cdot \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

式中： P_m 为变异的概率； f 为染色体的适应度值； k_3, k_4 为参数，根据经验均设置为 0.5。

4 计算结果分析

为了验证自适应遗传算法对舰载机保障调度模型的求解效果，使用 Python 3.6 对基于自适应遗传算法舰载机保障调度优化进行编程求解，并用实例进行验证。在一次保障作业任务中，有 10 架舰载机在等待进行起飞前的保障，可执行保障任务的有 4 个机械保障组，4 个军械保障组，2 个特设保障组，2 个航电保障组，保障组在保障区之间的移动所需时间为 2 min，保障工序、保障工序之间的约束关系及每个保障工序的时间如上所述。

在进行自适应遗传算法求解的过程中，种群规模比较大，全局搜索能力好，但计算量大，收敛的速度就越慢；种群规模太小，容易收敛到局部最优解。在编程中将种群数量的大小设置成 100，交叉概率和变异概率随适应度变化，迭代次数取 500 次。对实例求解得到的调度方案保障全部完成时间为 79 min，保障组调度计划甘特图如图 2，飞机保障计划甘特图如图 3 所示。

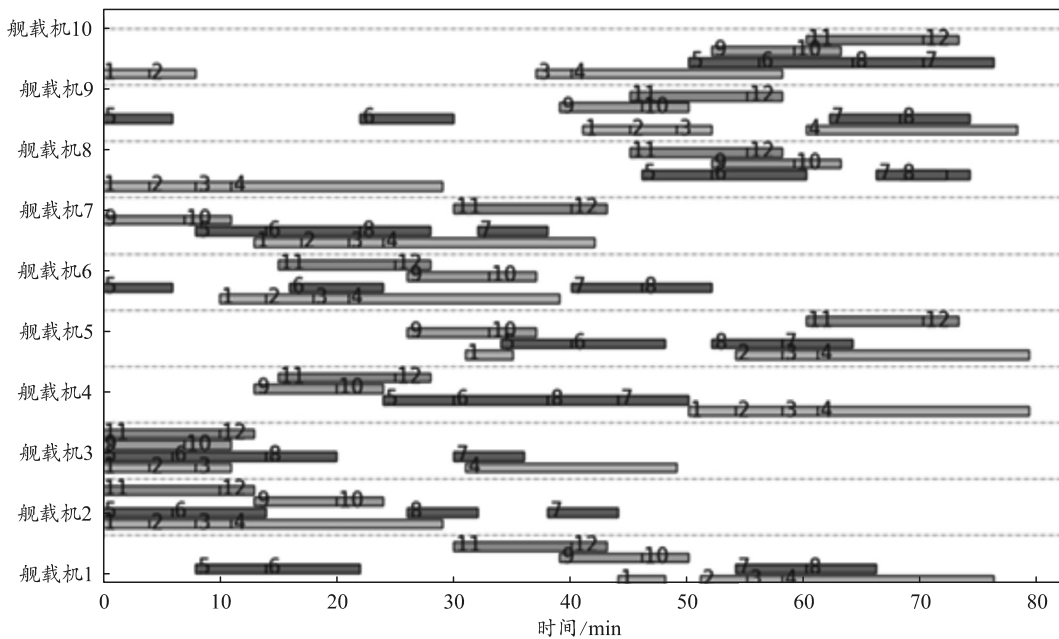


图 2 保障组调度计划甘特

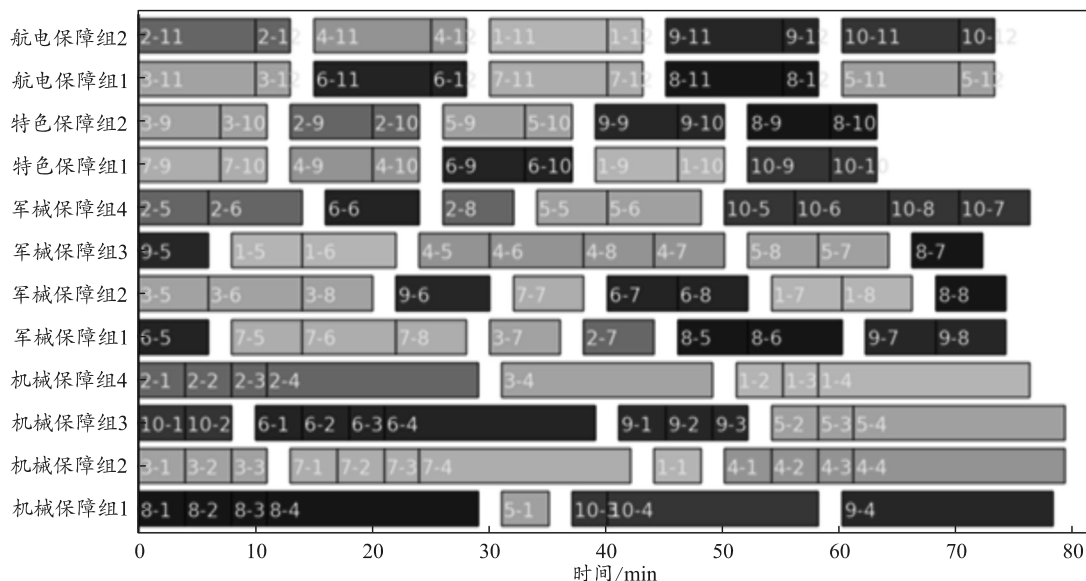


图 3 飞机保障计划甘特

在图 2 中，甘特图上的编号为“舰载机编号-工序编号”，如“9-6”表示舰载机 9 的第 6 号保障工序。从图中可以看到：在该保障任务中，每组保障人员的工作时间相差不大，工作密度安排较合理，保障组在保障区间转移的平均次数为 3.75 次，转移次数较少，各保障组的工作安排可由图中得到。在图 3 中，甘特图中的数字表示舰载机的工序编号。从图中可知：舰载机的保障任务均全部完成，单个舰载机保障完成的时间梯度比较合适，有利于飞机次序进行接下来的起飞等任务。总之，自适应遗传算法获得结果符合设置的约束条件，方案可行。

5 结论

针对舰载机多机保障作业的调度问题，笔者以最小化保障时间为目标，设计一种与之相适应的自适应遗传算法，采用甘特图的方式，直观地表示了保障作业的计划流程，通过对典型的多机保障任务案例进行分析，验证了自适应遗传算法在解决保障调度问题的可行性和有效性。该设计为航空母舰多机保障调度合理规划、快速编制舰载机保障调度方案提供了思路和参考。

参考文献：

[1] 周晓光, 赵仁厚, 王述运, 等. 飞行甲板作业对航母舰载机出动架次影响分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2447-2451.

[2] 杨炳恒, 毕玉泉, 张彪, 等. 航母多机出动甲板作业流程研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(8): 150-152.

[3] US Naval Air Systems Command. CVN flight-hanger deck NATOPS manual[R]. Washington: NACYAIR

00-80T-120, 2008.

[4] JEWELL A, WIGGE M A, GAGNON C M. USS Nimitz and carrier airwing nine surge demonstration[R]. US Navy: Center for Naval Analyses, 1998.

[5] 刘翔, 刘克. 舰载机保障作业调度问题研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(1): 49-60.

[6] RYAN J C, CUMMINGS M L, ROY N. Designing an interactive local and global decision support system for aircraft carrier deck scheduling[C]. Proceedings of AIAA Information Technology, 2011.

[7] MICHINI B, HOW J P. A human-interactive course of action planner for aircraft carrier deck operations[Z]. AIAA, 2011: 1-11.

[8] 司维超, 韩维, 史玮韦. 基于 PSO 算法的舰载机舰面布放调度方法研究[J]. 航空学报, 2012, 33(11): 2048-2056.

[9] 司维超, 韩维, 宋岩, 等. 基于多种群协作混沌智能算法的舰载机出动调度[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(2): 454-457.

[10] 魏昌全, 陈春良, 王保乳. 基于出动方式的舰载机航空保障调度模型[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(1): 111-114.

[11] 魏昌全, 陈春良, 王保乳. 基于空间约束的舰载机航空保障调度研究[J]. 控制工程, 2013, 20(4): 699-702.

[12] 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, 33(11): 3276-3279.

[13] 王保乳, 司维超, 薛建海. 基于 GA 算法的舰载机甲板布列方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2013, 28(5): 571-576.

[14] 吕开东, 朱齐丹, 李新飞. 舰载机航空保障需求及排队网络模型研究[J]. 飞行力学, 2014, 32(1): 88-92.

[15] 卞大鹏, 栾添添, 米青超, 等. 舰载机甲板停机位分配

问题研究[J]. 测控技术, 2014, 33(9): 150-153.

[16] 韩维, 苏析超, 陈俊锋. 舰载机多机一体化机务保障调度方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 809-816.

[17] 苏析超, 韩维, 史玮韦. 舰载机多机一体化机务保障调度研究[J]. 火力与指挥控制, 2015(6): 26-30, 35.

[18] 苏析超, 韩维, 萧卫, 等. 基于 Memetic 算法的舰载机舰面一站式保障调度[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2303-2309.

[19] 石颖, 何丹琪. 基于图示评审技术的舰载机航空保障时间分析[J]. 中国管理信息化, 2016, 19(14): 137-138.

[20] 杨炳恒, 孙婧, 王德心. 舰载机飞行甲板作业流程优化研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 49-51.

[21] 龙钰洋. 基于遗传算法的舰载机保障人员配置优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

[22] 李梦龙, 余明晖. 基于改进禁忌搜索算法的舰载机保障作业调度[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(5): 132-138.

(上接第 26 页)

5 结束语

笔者通过分析美国军事电子信息系统数据建设过程的思想与应用技术, 提出一种网络信息系统的集成架构, 并给出了相应的技术需求。以形成数据的采集、存储、分析、挖掘及安全保障等信息能力为目标, 确保合适人员在合适地点和合适时间获取合适信息, 为获取信息优势、决策优势, 进而为提升联合作战能力提供全局信息支持与保障。

参考文献:

[1] 柯宏发, 黄彦昌, 郑建福. 网络信息体系及其战斗力生成模式[J]. 兵器试验, 2015(3): 46-48.

[2] 钱兴华, 左艳军, 伍江华. 美国海军综合电子信息系统发展趋势及启示[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(6): 7-10.

[3] 童志鹏, 刘兴. 综合电子信息系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 12-15.

[4] 裴晓黎. 信息栅格环境下美军数据策略研究综述[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(7): 11-14, 129.

[23] 李经, 孙哲, 李梦龙, 等. 舰载机保障作业调度决策研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(12): 165-168.

[24] 宋璟毓, 萧卫, 贾建龙, 等. 基于 GRASP 算法的甲板航空保障作业流程优化[J]. 海军航空工程学院学报, 2019, 34(3): 283-289.

[25] 范加利, 朱兴动, 高伟, 等. 基于并行遗传算法的舰载机再次出动作业调度[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(11): 139-143.

[26] PINEDO M L. Scheduling: Theory, algorithms, and systems[G]. New York: Springer Science & Business Media, 2012.

[27] 刘相春. 美国“福特”级航母“一站式保障”技术特征和关键技术分析[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(6): 1-5.

[28] 孙长友. 舰载机保障作业调度计划优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.

[29] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 1994, 4(4): 656-667.

[5] DoD Information Officer Guidance and Policy Memorandum No. 4D8460: Department of Defense Global Information Grid Networks[C]. Washington: DoD, 2000: 5-9.

[6] 张东戈, 张小宁. 美国全球信息栅格(GIG)简介[J]. 军事通信技术, 2003, 24(2): 63-65.

[7] 程建博, 刘德生, 李迎春. 面向能力评估的指挥信息系统本体模型向网络拓扑模型转化的方法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 42-48.

[8] Department of Defense. Charter for the joint information environment management construct[R]. Washington D.C.: Department of Defense, 2012: 3-6.

[9] 梁振兴, 左琳琳, 马雪峰, 等. 联合信息环境: 新世纪美军全球一体化作战的基石[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 1-4.

[10] 计宏亮, 徐山峰, 赵楠. 美军联合信息环境计划[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(1): 131-136.

[11] 张睿, 李新明. 美军联合信息环境建设发展研究[J]. 装备学院学报, 2016, 27(6): 90-94.

[12] 蔡磊, 卢玉川, 杨诚. 网络信息体系结构及其应用研究[J]. 科技创新导报, 2015, 12(18): 44-47.