

刘翱. 基于教与学优化的舰载机起飞出动动态调度[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(4):45-51. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.240406

基于教与学优化的舰载机起飞出动动态调度

刘翱

(武汉科技大学 管理学院, 武汉 430065)

摘要: 本文针对弹射器故障情形下的舰载机起飞出动调度,建立了舰载机起飞出动的多约束分布式流水线调度模型;结合基于扩展随机序解的编码和解码策略、动态调整策略,设计了基于教与学优化的舰载机起飞出动动态调度算法;最后,通过对仿真案例分析、故障预测精度对动态调度的影响分析,及动态调度算法的运行时间分析,结果验证了所设计的算法对舰载机起飞出动动态调度的可行性和有效性。

关键词: 舰载机; 动态调度; 教与学优化

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)04-0045-07

On the dynamic scheduling of carrier-based aircraft take-off phase using teaching learning based optimization

LIU Ao

(School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: In order to solve the carrier-based aircrafts take-off scheduling problem under the catapult failure, a multi-constraint distributed flow shop scheduling model is established. Further, combining the extended rank of values (EROV) solution coding and decoding scheme and dynamic scheduling strategies, a teaching learning optimization based (TLBO) dynamic scheduling algorithm is designed. Finally, by the analysis result of simulation case, the impact of failure prediction accuracy on dynamic scheduling, and the response time of the dynamic scheduling algorithm, the feasibility and effectiveness of the designed algorithm for dynamic take-off scheduling of carrier-based aircrafts are verified.

Key words: carrier-based aircrafts; dynamic scheduling; teaching learning based optimization

0 引言

舰载机是航母搭载的核心装备,而舰载机出动架次率是衡量航母战斗力的重要指标,提高舰载机出动架次率是舰载机调度的关键目标^[1]。研究表明:舰载机起飞出动是影响舰载机出动架次率的重要因素^[2]。

舰载机起飞出动调度,是指对多型多架舰载机分配有限的起飞跑道,安排舰载机的起飞顺序,实现在最短时间内快速出动舰载机的目标,且需实时响应弹射器故障、设备故障等突发事件,这使得舰载机起飞出动具有动态调度的特点。

目前,国内外学者对舰载机调度的研究取得了较多的成果。例如,MIT的学者采用逆强化学习^[3]、

混合整数规划^[4]等方法,开发了舰载机甲板作业规划系统 DCAP。Liu 等^[5]研究了舰载机群的路径规划与跟踪控制。崔荣伟等^[6]研究了舰载机甲板机务勤务保障作业调度与资源配置的集成优化。王文鹏等^[7]研究了基于遗传算法的舰载机保障调度。

由于实际舰载机作业是在开放、复杂环境下进行的,当任务变化、设备故障、作业时间延长等突发事件发生时,这都会使得舰载机调度不能按预先计划执行,需要对原调度方案进行动态调整。因此,部分学者研究了设备故障^[8]、作业时间不确定^[9]等情形下舰载机动态调度,采用的方法包括逆向强化学习^[10]、变邻域算法^[11]等。

但是,目前单独研究舰载机起飞出动调度,尤其是动态调度的成果较少。例如,万兵等^[12]研究了舰

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(21YJAZH050)。

作者简介: 刘翱(1987-),男,博士,副教授,主要研究方向:优化调度。Email:liuao@amss.ac.cn

收稿日期: 2023-10-16

载机出动离场问题,设计了结合引导启发式搜索与约束规划的迭代算法。Liu等^[13]建立了舰载机起飞出动问题的混合柔性流水车间调度模型。

实际上,弹射器故障下的舰载机起飞出动调度可看作故障干扰情形下的分布式动态调度。而动态调度最早出现在生产制造领域,目前研究成果大都集中在车间动态调度^[14],关于分布式动态调度并不多。例如,Chiu等^[15]使用启发式调度规则,优化了双机流水线调度问题。Li等^[16]使用离散教与学优化和混合果蝇算法,求解了流水车间的动态调度问题。

动态调度的求解算法通常包括精确算法、近似算法、启发式规则、人工智能方法和智能优化算法等。其中,精确算法耗时过长,难以满足调度的实时性要求;近似算法、启发式规则和人工智能方法需要基于大量的经验数据,结合问题特征具体设计调度方法。而智能优化算法不依赖具体问题,可以在较短时间内得到满意结果,具有较强的通用性和较好的优化效果。

教与学优化(Teaching Learning Based Optimization, TLBO)^[17]是一种智能优化算法,具有不需参数调整、适应能力强的优点,已被用于求解流水车间调度^[18]、飞行器参数设计^[19]等实际问题中。

鉴于此,本文针对舰载机起飞调度问题,分别建立正常和故障情况下的舰载机起飞出动调度模型,结合起飞出动调度的不确定性较强、快速响应等特点和要求,使用教与学优化生成初始的舰载机起飞出动调度方案,在故障情况下进行动态调度,并通过仿真案例验证所提模型和算法的有效性。

1 舰载机起飞出动动态调度问题

1.1 问题描述

以弹射起飞为例,舰载机起飞出动作业包括:

- (1) 舰载机在保障位进行起飞前准备;
- (2) 舰载机滑行到起飞待命位;
- (3) 舰载机在起飞待命位进行起飞前检查;
- (4) 舰载机从待命位滑行到起飞位;
- (5) 舰载机在起飞位对应的起飞跑道起飞;
- (6) 偏流板冷却、弹射器复位等。

其中,起飞待命位、起飞位和起飞跑道一一对应,即舰载机选择在某条跑道起飞,则必须在该跑道对应的起飞待命位做起飞前检查。

1.2 问题分析

舰载机起飞出动调度需要确定每架舰载机的起

飞跑道、每条起飞跑道的舰载机起飞顺序以及起飞作业的时间,其调度目标是 minimized 所有舰载机的起飞工序的最大完成时间 C_{\max} 。

舰载机起飞需考虑以下约束:

(1) 执行不同任务的舰载机起飞阶段,各工序工期不同 (p_{ij} : 工期约束);

(2) 舰载机只能在满足其起飞要求的起飞跑道上起飞 (M_j : 机器可用性约束);

(3) 使用相同起飞位的舰载机,在前继舰载机离开起飞待命位之前,下一架舰载机不能进入起飞待命位 (No buffer; 无缓冲区约束);

(4) 同一起飞跑道相继起飞的舰载机之间有安全时间间隔;

(5) 起飞待命位、起飞位、起飞跑道是一一对应的。并且,考虑起飞作业的安全性,对于使用相同跑道的不同舰载机,其所有起飞作业顺序都是一样的。换句话说,舰载机起飞出动作业环境可看作多条置换流水线,舰载机起飞出动调度问题可被归结为带特殊约束的分布式置换流水线调度问题 DPFSP。

因此,根据调度问题的 $\alpha | \beta | \gamma$ 三参数方式,舰载机起飞出动调度问题可被归结为一类多约束分布式流水线调度问题 DPFSP | $p_{ij}, M_j, \text{No buffer}, S_{jk} | C_{\max}$ 。

此外,实际舰载机起飞出动时存在设备故障、外部环境变化等随机因素,尤其是弹射器发生故障时对舰载机起飞出动调度影响较大。在弹射器发生故障时,在故障弹射器对应的起飞跑道起飞的舰载机可以转移到未发生故障的弹射器对应的起飞跑道起飞,这就导致原调度方案会发生改变,未起飞的舰载机可开始作业的准备时刻不同 (r_j : 释放时间约束)。因此,弹射器故障情况下舰载机起飞出动调度是一类典型的动态重调度问题,可被归结为 DPFSP | $p_{ij}, M_j, \text{No buffer}, r_j, \text{brk} | C_{\max}$ 。

2 舰载机起飞出动动态调度模型

2.1 正常情况下舰载机起飞出动调度模型

记 N 为待起飞的舰载机总数量, Q 为起飞跑道的总数量, n_q 是在跑道 q ($q = 1, 2, \dots, Q$) 起飞的舰载机数量,决策变量是所有舰载机起飞的总顺序 $\pi = (\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(i), \dots, \pi(N))$ 和分配的起飞跑道 $(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_N)$ 。在跑道 q 起飞的舰载机顺序 $\pi_q = (\pi_q(1), \pi_q(2), \dots, \pi_q(n_q))$, 与总顺序 π 相同。也就是说,如果舰载机 i 在总顺序 π 的第 J 个起飞,且在跑道 q_i 上第 j 个起飞,那么 $i =$

$$\pi_{q_i}(j) = \pi(J).$$

s_i^{bz} 为舰载机 i 初始停放保障位的位置, s_q^{dm} 为起飞跑道 q 对应的起飞待命位的位置, s_q^{af} 为起飞跑道 q 的位置, $td(s_1, s_2)$ 为舰载机在位置 s_1, s_2 间的移动时间, $C_{i,1}, C_{i,2}, C_{i,3}, C_{i,4}, C_{i,5}$ 分别代表舰载机 i 起飞前准备工序的结束时间、舰载机 i 移动到起飞待命位结束时间、舰载机 i 起飞前检查工序的结束时间、 $C_{i,4}$ 为舰载机 i 移动到起飞跑道的结束时间、 $C_{i,5}$ 为舰载机 i 起飞工序的结束时间。 $p_{i,1}, p_{i,3}, p_{i,5}$ 分别为舰载机 i 起飞前准备工序的时间、起飞前检查工序的时间、起飞工序的时间, t_q^{fw} 为弹射器 q 的复位时间, t_q^{pl} 为偏流板 q 的冷却时间, t^{st} 为连续起飞的安全时间间隔。

正常情况下舰载机起飞出动调度模型为:

$$\min(C_{\max}) \quad (1)$$

$$C_{\pi(0),k} = 0, k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (2)$$

$$C_{\pi_q(0),k} = 0, k = 1, 2, 3, 4, 5, q = 1, 2, \dots, Q \quad (3)$$

$$C_{i,1} = p_{i,1} \quad (4)$$

$$C_{i,2} = \max(C_{\pi_{q_i}(j-1),4} - td(s_{q_i}^{dm}, s_{q_i}^{af}), C_{i,1} + td(s_i^{bz}, s_{q_i}^{dm})) \quad (5)$$

$$C_{i,3} = C_{i,2} + p_{i,3} \quad (6)$$

$$C_{i,4} = \max(C_{\pi_{q_i}(j-1),5} + \max(t_{q_i}^{fw}, t_{q_i}^{pl}), C_{i,3}) + td(s_{q_i}^{dm}, s_{q_i}^{af}) \quad (7)$$

$$C_{i,5} = \max(C_{i,4}, C_{\pi(j-1),5} + t^{st}) + p_{i,5} \quad (8)$$

$$C_{\max} = \max(C_{i,5}), i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

其中:式(1)表示优化目标为最小化所有舰载机起飞作业总时间;式(3)表示所有舰载机具有的虚拟前继舰载机编号为0,且其所有工序的结束时间为0;式(4)表示起飞前准备工序可以在0时刻开始;式(5)表示所有舰载机必须在起飞前准备工序做完后才能前往起飞待命位,且必须在前继舰载机离开后才能到达起飞待命位;式(6)表示在舰载机到达起飞待命位后,开始进行起飞前检查工序;式(7)表示所有舰载机必须完成起飞前检查工序后才能前往起飞跑道,且必须在前继飞机起飞、弹射器复位、偏流板冷却后才能前往起飞跑道;式(8)表示两架相继起飞的舰载机之间要有安全时间间隔;式(9)表示所有舰载机起飞作业总时间为最后一架舰载机起飞工序的结束时间。

2.2 故障情况下舰载机起飞出动重调度模型

弹射器存在故障时,设与起飞跑道 q 对应的弹射器故障时间窗为 $[Bs_q, Be_q]$, 则:

$$C_{i,5} \leq Bs_q \text{ 或 } C_{i,5} - p_{i,5} \geq Be_q, \forall i \in \pi_q \quad (10)$$

表示舰载机在弹射器 q 完成起飞工序的时刻 $C_{i,5}$, 在故障时间窗 $[Bs_q, Be_q]$ 之外。

实际操作中,由于弹射器故障的发生时间和持续时间不确定,因此公式(10)的故障约束不能作为起飞跑道 q 的可用时间窗进行调度。当弹射器故障时,先根据正常情况下舰载机起飞出动调度模型,给出初始方案,无故障时根据初始方案调度舰载机,直到时刻 T 发生故障时,根据故障前舰载机的调度结果和预测的故障持续时间进行重调度。

由于舰载机在不同停机位间移动的复杂性及起飞的安全性要求,在舰载机起飞时,应尽量减少舰载机在不同停机位间的移动。因此,结合故障发生时不同舰载机的位置和工序状态,根据以下规则进行重调度:

(1) 所有已起飞的舰载机不再进行重调度;

(2) 对未前往起飞待命位的舰载机,以起飞前准备工序完成时间为释放时间,初始停靠保障位为起点,重新进行调度;

(3) 对已前往起飞待命位的舰载机,如果原方案中分配给该舰载机的弹射器未发生故障,则维持原方案不变,已完成的工序不再重复进行;

(4) 对已前往但未到达故障弹射器对应的起飞待命位的舰载机,将其返回初始停靠保障位,并以到达原保障位时间为释放时间,初始停靠保障位为起点,重新进行调度;

(5) 对已经到达故障弹射器对应的起飞待命位且尚未离开的舰载机,如果重调度方案中仍有飞机使用相同跑道起飞,则已前往起飞待命位的舰载机在原跑道按原顺序起飞,已完成工序不再重复进行;

(6) 如果重调度方案改变已到达故障弹射器对应的起飞待命位舰载机的跑道安排,则舰载机立即停止未完成工序,以原起飞待命位为起点,故障时刻作为释放时间,重新前往新起飞待命位进行起飞前检查工序;

(7) 对已前往故障弹射器对应的起飞跑道的舰载机,如果重调度方案中仍有飞机使用相同跑道起飞,则已前往起飞待命位的舰载机在原跑道按原顺序起飞,已完成工序不用重复进行;

(8) 如果重调度方案改变已前往故障弹射器对应的起飞跑道的舰载机跑道安排,则在到达起飞跑道后,以故障发生时刻为释放时间,原定起飞跑道为起点,重新前往新起飞待命位进行起飞前检查工序。

根据公式(10)和重调度规则,可确定已完成起飞的舰载机和需要重调度的舰载机,因此不失一般性。假设舰载机 $1, 2, \dots, N - N^r$ 已经完成起飞,其余 N^r 个舰载机需进行重调度。 T 为弹射器的故障发生时刻, r_i 为舰载机 i 的释放时间, Q_i^r 为舰载机 i 重调度的起点位置, $C_{i,k}^r$ 为重调度后舰载机 i 工序 k 的完工时间。

记 N^r 为所有未起飞舰载机的总数量, n_q^r 为重调度方案中在跑道 $q(q = 1, 2, \dots, Q)$ 起飞的舰载机数量。弹射器故障时,调度方案的决策变量是未起飞舰载机的总顺序 $\pi^r = (\pi^r(1), \pi^r(2), \dots, \pi^r(N^r))$,以及每架未起飞舰载机 i 的起飞跑道 q_i^r 。重调度方案中,在跑道 q 起飞的舰载机顺序 $\pi_q^r = (\pi_q^r(1), \pi_q^r(2), \dots, \pi_q^r(n_q^r))$ 与总顺序 π^r 相同。也就是说,如果舰载机 i 在总顺序 π^r 的第 J^r 个起飞,且在跑道 q_i^r 上第 j^r 个起飞,那么 $i = \pi_{q_i^r}^r(j^r) = \pi^r(J^r)$ 。

故障情况下舰载机起飞出动调度模型为

$$\min(C_{\max}^r) \quad (11)$$

$$C_{i,k}^r = C_{i,k}, i = 1, 2, \dots, N - N^r, k = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (12)$$

$$C_{i,k}^r = C_{i,k}, \text{ if } C_{i,k} < T, Be_{q_i} < T \text{ or } C_{i,k} < T, q_i^r = q_i \quad (13)$$

$$C_{i,2}^r = \max(C_{\pi_{q_i^r}^r(j^r-1),4}^r - td(s_{q_i^r}^{dm}, s_{q_i^r}^{df}), r_i + td(Q_i^r, s_{q_i^r}^{dm})) \quad (14)$$

$$C_{i,3}^r = C_{i,2}^r + p_{i,3} \quad (15)$$

$$C_{i,4}^r = \max(C_{\pi_{q_i^r}^r(j^r-1),5}^r + \max(t_{q_i^r}^{fio}, t_{q_i^r}^{pl}), C_{i,3}^r) + td(s_{q_i^r}^{dm}, s_{q_i^r}^{df}) \quad (16)$$

$$C_{i,5}^r = \max(C_{i,4}^r, C_{\pi^r(J^r-1),5}^r + t^{sl}, Be_{q_i^r}) + p_{i,5} \quad (17)$$

$$C_{\max}^r = \max(C_{i,5}^r), i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

其中,式(11)表示优化目标为最小化所有舰载机的起飞作业总时间;式(12)表示已起飞的舰载机不再进行重调度;式(13)表示对已前往起飞待命位的舰载机;如果初始分配的弹射器没有故障或重调度方案分配的起飞跑道不变,则已完成工序不用重复进行;式(14)表示所有舰载机必须在释放时间 r_i 后才能前往起飞待命位,且必须在前继舰载机离开后才能到达起飞待命位;式(15)表示舰载机到达起飞待命位后开始进行起飞前检查工序;式(16)表示所有舰载机必须完成起飞前检查工序后才能前往起飞跑道,且必须在前继飞机起飞、弹射器复位、偏流板冷却后才能前往起飞跑道;式(17)表示两架相继起飞的舰载机之间要有安全时间间隔,且只能在弹

射器无故障时起飞;式(18)表示重调度后所有舰载机起飞作业总时间为最后一架舰载机起飞工序的结束时间。

3 基于教与学优化的舰载机起飞出动动态调度算法

3.1 标准教与学优化算法

TLBO算法是一种模仿课堂教学与学习过程的智能优化算法,每代种群最优解被看做老师,其他解被看做学生。其基本实现步骤如下:

(1)在教学过程中,学生 $X_i(t), i = 1, 2, \dots, NP$ 为第 t 代种群的第 i 个解, NP 为种群规模)向老师 $X_{\text{best}}(t)$ 趋近:

$$X_i'(t) = \mathbf{R} \times (X_{\text{best}}(t) - TF \times \text{Mean}(t)) + X_i(t) \quad (19)$$

其中, \mathbf{R} 为一个 $[0, 1]$ 间的 d 维随机向量; d 为解的维度; TF 为教与学算法的学习率(通常为1); $\text{Mean}(t)$ 为种群中所有解的平均位置。

(2)如果新解 $X_i'(t)$ 的适应度值优于 $X_i(t)$,则更新 $X_i(t) = X_i'(t)$ 。

(3)在学习过程中,每个学生通过相互学习的方式向种群中的较优解趋近。

$$X_i'(t) = \begin{cases} \mathbf{R} \times (X_i(t) - X_j(t)) + X_i(t), & f(X_i(t)) < f(X_j(t)) \\ \mathbf{R} \times (X_j(t) - X_i(t)) + X_i(t), & f(X_i(t)) \geq f(X_j(t)) \end{cases} \quad (20)$$

其中, $X_j(t)$ 为除学生 i 外随机选择的另一个学生, f 为目标函数。

(4)比较 $X_i'(t)$ 与 $X_i(t)$ 的适应度值,如果前者优于后者,则更新 $X_i(t) = X_i'(t)$ 。

(5)重复步骤(1)-(4),直到算法终止。

3.2 基于教与学优化的动态调度算法

3.2.1 基于EROV解的编码与解码策略

运用随机键表示法设计基于扩展升序排列规则(Extended-Ranked-Order-Value, EROV),将连续解映射到舰载机的起飞顺序和起飞跑道,以使标准TLBO适用于求解舰载机起飞出动调度问题。

具体来讲,利用EROV规则,将连续解转换为舰载机的起飞跑道和起飞总顺序。对于连续解 $X = [X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{N+1}, \dots, X_{2N}]$,解 X 的前 N 个元素用于确定舰载机的起飞跑道,若 $(q-1)/Q \leq X_i < q/Q$,则 $q_i = QF(q)$ 。其中, QF 和 Q 分别为舰载机 i 可使用的起飞跑道集合和总数量。解 X 的第 $N+1$ 到第 $2N$ 个元素确定舰载机起飞总顺序,对所

有的 $X_i, i = N + 1, \dots, 2N$ 按从小到大顺序排列, 得到的排序即为舰载机起飞的总顺序, 跑道 q 上舰载机起飞的先后顺序和舰载机起飞的总顺序相同。

3.2.2 动态调整策略

弹射器故障时, 由重调度解直接给出的舰载机起飞顺序和跑道可能不符合重调度的移动要求, 需对重调度解进行调整:

(1) 如果舰载机 i 在故障时已经出发前往起飞待命位, 且原方案中 i 被分配在弹射器无故障或故障在本次故障发生前已完毕的跑道起飞, 则保持原方案中 i 的跑道分配和在该跑道起飞顺序中的位置 j 不变, 即 $q'_i = q_i, j = j^*$ 。

(2) 如果舰载机 i 在故障时已经出发前往起飞待命位, 且在原方案中 i 被分配在故障弹射器或故障在本次故障发生前未完毕的跑道起飞, 且重调度方案中有飞机在该跑道起飞, 则维持原方案中 i 的跑道分配和在该跑道顺序中的位置 j 不变, 即 $q'_i = q_i, j = j^*$ 。

3.2.3 算法流程

步骤1 生成初始调度方案

(1) 以 $2N$ 维度随机初始化 NP 个解 X_i , 使用 EROV 规则将解转化为可执行的调度方案。即所有舰载机起飞的总顺序 π 和每架舰载机分配的起飞跑道, 应用式(1)–式(9)计算每个解的目标函数值, 并选出老师和学生, 令进化代数 $g = 1$;

(2) 根据标准教与学算法, 对第 g 代种群执行 TLBO 的进化搜索, 更新各学生 X_i , 使用 EROV 规则将解转化为可执行的调度方案。即所有舰载机起飞总顺序 π 和每架舰载机分配的起飞跑道, 应用式(1)–式(9)计算每个解对应的目标函数值, 并选出老师和学生, 令 $g = g + 1$;

(3) 重复执行上述步骤, 直到满足 TLBO 算法终止条件, 输出初始调度方案, 并使用该初始调度方案调度舰载机。

步骤2 如果故障未发生, 按初始方案调度舰载机; 如果故障发生, 则执行以下步骤进行重调度:

(1) 在每次故障发生时刻, 计算各舰载机状态, 预测故障持续时间, 记录未起飞的舰载机的架数 J' , 以 $2J'$ 维度随机初始化 NP 个解 X_i , 使用 EROV 规则和解的动态调整策略, 将解转化为可执行的初始重调度方案, 包括未起飞舰载机起飞的总顺序 π' 和每架舰载机分配的起飞跑道, 应用式(1)–式(9)计算每个解对应的目标函数值, 并选出老师和学生, 令 $g = 1$ 。

(2) 按照标准 TLBO 算法的基本步骤, 对于各学生执行基于 TLBO 的进化搜索, 更新各 X_i , 使用 EROV 规则与解的动态调整策略, 将解转化为可执行的调度方案, 包括未起飞舰载机的总顺序 π' 和每架舰载机分配的起飞跑道, 应用式(1)–式(9)计算每个解的目标函数值, 并选出老师和学生, 令 $g = g + 1$ 。

(3) 重复执行步骤(2)直到满足 TLBO 算法终止条件, 输出本次故障的最终重调度方案, 并使用该方案调度舰载机。

步骤3 重复执行步骤2直到所有舰载机起飞, 调度完毕后输出动态调度过程。

4 仿真分析

为了验证基于 TLBO 的动态调度算法对舰载机起飞出动的可行性和有效性, 对典型案例和随机案例进行仿真。

TLBO 算法的参数设置如下: 种群规模为 20, 学习率为 1, 函数评价次数为 20 000 次。

仿真环境为: Window 11, Intel (R) Core (TM) i5-10210U CPU, 主频 1.60 GHz, 内存 8 G。

4.1 案例数据

为了说明基于 TLBO 的动态调度算法的可行性和动态调度过程, 考虑 12 个舰载机在 3 个跑道上出动的案例, 表 1~表 3 分别给出了舰载机信息、故障发生和持续时间信息以及工序工期。故障信息随机生成。

表 1 舰载机信息

Table 1 Carrier-based aircraft information

飞机编号	飞机类型	初始保障位	跑道可用性
1	T1	8	3
2	T2	5	1, 2, 3
3	T2	11	1, 2, 3
4	T3	9	3
5	T3	7	3
6	T4	4	1, 2, 3
7	T4	1	1, 2, 3
8	T4	3	1, 2, 3
9	T4	2	1, 2, 3
10	T4	6	1, 2, 3
11	T4	12	1, 2, 3
12	T4	10	1, 2, 3

由于舰载机类型不同, 则 T1 和 T3 类型舰载机需在跑道 3 上起飞, T2 和 T4 类型舰载机可在跑道 1、2 和 3 上起飞。

表2 故障信息

Table 2 Breakdown information

故障开始时间	故障持续时间	故障弹射器
18	9	1
32	71	1

表3 工序工期

Table 3 Processing time of operations

舰载机	起飞前准备	起飞前检查	起飞
1	5	2	5
2	1	1	3
3	1	1	4
4	3	2	5
5	4	2	5
6	2	1	3
7	2	1	2
8	2	2	2
9	2	1	2
10	2	1	2
11	1	2	2
12	2	1	3

表3给出了各个舰载机的起飞前准备、起飞前检查和起飞三道工序的时间。弹射器复位时间、偏流板冷却时间、以及相邻两架舰载机的起飞安全时间间隔分别为3、1、1。

4.2 基于TLBO的动态调度结果分析

图1~图3展示了动态调度过程,在跑道1发生了两次故障,故障时刻分别为18和32,故障持续时间分别为9和71。由图1可以看出,初始调度的时间安排没有考虑弹射器故障;图2对跑道1的第一次故障进行了调整,同时使用TLBO算法对受影响的飞机重新分配跑道;图3对第二次故障进行了调整,将受影响的J2和J11重新安排到跑道2。可以看出,所有飞机的起飞都在故障发生区间之外,也就是所有故障都被处理完毕。

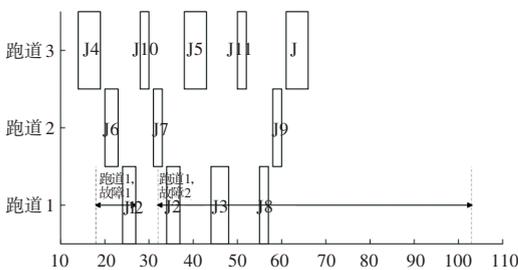


图1 初始调度

Fig. 1 Initial scheduling results

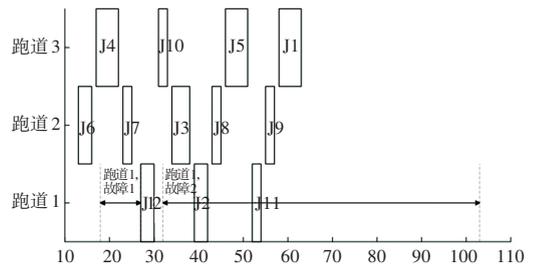


图2 第一次故障调度

Fig. 2 Scheduling results after the first breakdown

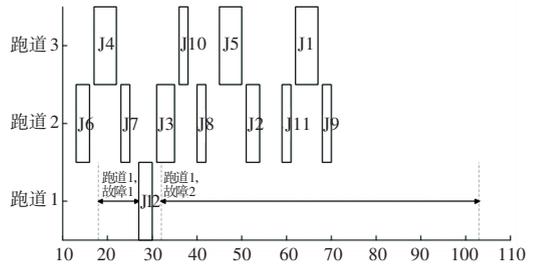


图3 第二次故障调度

Fig. 3 Scheduling results after the second breakdown

4.3 故障预测精度对动态调度的影响分析

为进一步分析故障预测精度对动态调度的影响,针对10%到100%共10种不同的故障预测精度,分别采用基于TLBO的动态调度算法对典型案例独立求解20次,然后计算起飞作业总时间的平均值和标准差,其汇总结果见表4。

表4 故障预测精度和起飞作业总时间的关系

Table 4 Relationship between the breakdown prediction accuracy and the take-off operations makespan

预测精度%	起飞作业总时间的平均值	起飞作业总时间的标准差
10	105.39	11.25
20	101.21	8.70
30	100.02	7.39
40	97.89	9.92
50	95.36	7.52
60	98.71	8.05
70	97.02	9.19
80	93.50	6.15
90	93.28	5.81
100	89.55	2.20

从表4可以看出,随着故障预测精度的增加,起飞作业总时间的平均值整体呈现下降趋势,且其标准差整体呈现越来越小的趋势。这就说明:故障时间的预测精度越高,起飞作业总时间的平均值和标准差整体也越小,调度方案也越稳定。

4.4 动态调度算法的运行时间分析

舰载机起飞出动调度的实际作业环境较复杂,

且要求调度算法能够快速、及时响应由故障引起的调度方案的变化。

为验证本文采用的基于 TLBO 的动态调度算法的求解效率,对比分析了 8 组数据下(飞机数量分别为 8、10、12、18、20、22、28、30)动态调度算法的运行时间。对每组数据集随机生成 20 个测试案例,采用 Matlab 程序的 CPU 运行时间为基准,分别计算动态调度算法在无故障情况和有故障情况下的平均运行时间,汇总结果见表 5。

表 5 动态调度算法的运行时间

Table 5 Run time of dynamic scheduling

飞机数量	无故障情况下运行时间		故障情况下运行时间	
	平均值	标准差	平均值	标准差
8	3.19	0.24	21.85	3.35
10	3.50	0.88	27.83	6.33
12	3.35	0.66	33.24	4.56
18	3.70	0.36	45.58	8.21
20	3.89	0.31	43.50	5.68
22	4.27	0.34	51.14	7.93
28	4.31	0.30	56.94	8.59
30	4.31	0.30	65.60	10.78

从表 5 可以看出,即便是 30 架飞机集中出动,算法的运行时间大约为 1 分钟,而舰载机的实际作业以分钟为单位,且实际计算机的运行速度会更高。因此,从时间粒度来看,所提出的方法可支持舰载机起飞出动的动态调度。本文采用的基于 TLBO 的动态调度算法计算速度快,能够及时响应动态扰动。

5 结束语

本文针对舰载机起飞出动调度问题,以最小化起飞作业总时间为目标,考虑了弹射器故障、停机位占用等约束条件,建立了舰载机起飞出动动态调度模型,提出了一种基于教与学优化 TLBO 的优化方法,来求解舰载机起飞出动动态调度。仿真结果表明该方法可以有效地解决弹射器故障下的舰载机起飞出动动态调度,可及时响应动态扰动变化。

舰载机起飞出动调度是一个存在资源、安全约束和不确定性的动态调度问题,未来可考虑战斗损伤、设备故障、外部环境不确定性等对起飞调度的影响;还可以考虑舰载机起飞出动与航空保障调度、降落回收等其他环节的相结合的调度;也可以考虑 TLBO 在无人车配送、RGV 动态调度等问题中的应用。

参考文献

[1] 刘翱, 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.
- [2] 杨放青, 王超, 姜滨, 等. 舰载机出动回收调度策略生成方法 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 1030-1036.
- [3] RYAN J C, CUMMINGS M, ROY N, et al. Designing an interactive local and global decision support system for aircraft carrier deck scheduling [C]// Proceedings of AIAA Information Technology, Street. Louis, Missouri; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011: 1-12.
- [4] RYAN J C, BANERJEE A G, CUMMINGS M L, et al. Comparing the performance of expert user heuristics and an integer linear program in aircraft carrier deck operations [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(6): 761-773.
- [5] LIU J, HAN W, PENG H, et al. Trajectory planning and tracking control for towed carrier aircraft system [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 84(1): 830-838.
- [6] 崔荣伟, 韩维, 苏析超, 等. 舰载机甲板机务勤务保障作业调度与资源配置集成优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1884-1893.
- [7] 王文鹏, 邹刚, 张珂, 等. 基于自适应遗传算法的舰载机保障调度 [J]. 兵工自动化, 2021, 40(1): 37-42.
- [8] 孟凯阳, 王正, 范加利. 基于禁忌算法对不确定性舰载机保障的调度优化研究 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2363-2371.
- [9] SU X C, HAN W, WU Y, et al. A robust scheduling optimization method for flight deck operations of aircraft carrier with ternary interval durations [J]. IEEE Access, 2018, 6(12): 69918-69936.
- [10] 李耀宇, 朱一凡, 杨峰, 等. 基于逆向强化学习的舰载机甲板调度优化方案生成方法 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(4): 171-175.
- [11] 蒋婷婷, 韩维, 苏析超. 面向故障扰动的舰面保障重调度仿真研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2017(11): 93-98.
- [12] 万兵, 韩维, 梁勇, 等. 舰载机出动离场调度优化算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(12): 3624-3634.
- [13] LIU J, HAN W, LI J, et al. Integration design of sortie scheduling for carrier aircrafts based on hybrid flexible flowshop [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 1503-1511.
- [14] 刘乐. 面向突发干扰情景的生产重调度研究进展 [J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, 1: 18-29, 41.
- [15] CHIU Y, SHIH C J. Rescheduling strategies for integrating rush orders with preventive maintenance in a two-machine flow shop [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(20): 5783-5794.
- [16] LI J Q, PAN Q K, MAO K. A hybrid fruit fly optimization algorithm for the realistic hybrid flowshop rescheduling problem in steelmaking systems [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2): 932-949.
- [17] RAO R V, SAVSANI V J, VAKHARIA D. Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems [J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(3): 303-315.
- [18] LI J Q, PAN Q K, MAO K. A discrete teaching-learning-based optimisation algorithm for realistic flowshop rescheduling problems [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 37: 279-292.
- [19] QU X, ZHANG R, LIU B, et al. An improved TLBO based memetic algorithm for aerodynamic shape optimization [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 57: 1-15.