

doi: 10.7690/bgzdh.2019.02.014

# 舰载机进近模型及优化算法研究

李泽雪

(中国人民解放军 91404 部队, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 针对海上航母平台飞机着舰调度排序的问题, 利用交叉熵法对舰载机进近排序进行研究。根据航母平台单一跑道的情况建立舰载机进近排序模型, 并采用交叉熵法求解舰载机进近排序序列, 最后通过数据仿真的方式进行模型算法的验证。仿真结果表明: 该优化算法可在改变较少架次飞机及较少总延误时间的情况下完成对舰载机进近的排序, 能够减少飞机的延误时间, 具有较强实用性。

**关键词:** 进近排序; 交叉熵法; 飞机优先级; 舰载机

**中图分类号:** TP86 **文献标志码:** A

## Research on Shipborne Aircraft Approach Model and Optimization Algorithm

Li Zexue

(No. 91404 Unit of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** In order to solve the aircraft scheduling problem on aircraft carrier platform, the cross entropy method is used to research on approach sequencing of shipboard aircraft. The approach sequencing model based on single runway of aircraft carrier is established, cross entropy method is applied to solve approach sequencing, and finally, the model algorithm is verified by data simulation. The simulation results show that the optimization algorithm can solve approach shipboard aircraft sequencing with changing fewer sorties and less total delay time, and it can reduce the delay time of aircraft, and has strong practicability.

**Keywords:** approach sequencing; cross entropy method; priorities of aircraft; shipboard aircraft

## 0 引言

飞机着陆调度 (aircraft landing scheduling, ALS) 是一种多目标多约束的组合优化问题<sup>[1]</sup>。飞机着舰调度是飞机着陆调度的一种特殊情况, 其中优化的目标主要有: 1) 减少飞机的空中等待时间; 2) 减少要调整的飞机架次; 3) 减少因飞机延误而造成的损失。这种优化问题不一定具有最优解, 因为处于进近阶段飞机情况是动态变化的, 在某一时刻求得的最优解可能在下一时刻就变成非优解, 或者求得的理论上最优解对于空中管制人员来说不具备可操作性, 不能实施; 所以最具有工程意义的优化算法是不再以最优为搜寻目标, 而是在有限的时间内找寻一个近似于最优的可行解。

海上航母平台是单一跑道的移动平台, 相对于陆上机场对飞机降落的条件有着更高的要求。影响飞机进近排序的决定因素是飞机之间的间隔, 其与天气、航空管制人员的能力、飞机的类型等因素密切相关<sup>[2]</sup>。与其他不可控因素相比, 优化飞机的进近顺序, 缩短飞机之间的间隔, 对提高跑道的利用率, 减小由飞机延误造成的损失具有更强的可操作性。国内外学者对飞机进近排序已有一定的研究,

冯心玲等<sup>[3]</sup>采用遗传算法解决 ALS 问题, 杨秋辉等<sup>[4]</sup>采用插入空闲时间消除冲突的方法完成飞机的调度, 但其研究大都基于陆上固定跑道, 未考虑航空母舰这类移动平台单一跑道的飞机进近情况。笔者针对航母平台单一跑道情况综合分析不同的约束条件及优化目标, 用交叉熵法动态的求解航母移动平台单一跑道舰载机进近的排序问题。

## 1 飞机进近模型建立

### 1.1 问题描述

在飞机进入起始进近点后, 进近飞机等待空管命令准备排队降落, 空中管制人员会根据机场的流量及进近飞机的状态安排进近飞机的降落顺序和降落时间。飞行进近序列如果发生较大变化, 会对起降秩序造成较大影响, 而海上飞行又有较大的不确定性, 所以对于单一跑道的航母平台, 在满足舰载机最小尾流间隔的基础上, 对舰载机进行进近排序的原则是使所有舰载机的总延误时间最小<sup>[5]</sup>。

### 1.2 变量定义

1) 某一时段内总共有  $N$  架飞机进行进近;

收稿日期: 2018-11-02; 修回日期: 2018-12-05

作者简介: 李泽雪(1991—), 男, 河北人, 硕士, 助理工程师, 从事水面舰艇试验研究。

- 2) 飞机的进近序列为  $F$ ;
- 3) 每架飞机的预计到达时刻为  $E_i (1 \leq i \leq N)$ ;
- 4) 每架飞机的降落分配时刻为  $S_i (1 \leq i \leq N)$ ;
- 5) 飞机相对位置矩阵

$$M_{i,j} = \begin{cases} \text{飞机 } i \text{ 在飞机 } j \text{ 前面} \\ \text{飞机 } i \text{ 在飞机 } j \text{ 后面}, (1 \leq i, j \leq N); \\ i = j \end{cases}$$

- 6) 每架飞机的优先级为  $P_i (1 \leq i \leq N)$ ;
- 7) 每架飞机的延误时间  $D_i (1 \leq i \leq N)$ ;
- 8) 每架飞机因延误而造成的单位时间经济损失  $C_i (1 \leq i \leq N)$ 。

### 1.3 约束条件

1) 飞机的安全间隔约束  $|S_i - S_j| \leq s_{i,j}$ , 其中  $s_{i,j}$  为  $i$  飞机与  $j$  飞机的最小安全间隔;

2) 受飞机性能限制, 飞机的速度只能在一定范围变化, 每架飞机都有一个最早降落时间  $S_{\text{early}}$ ; 受飞机油量的限制, 每架飞机都有一个最晚降落时间  $S_{\text{late}}$ , 所以每架飞机降落的时间约束为  $S_{\text{early}} \leq S_i \leq S_{\text{late}}$ 。

### 1.4 目标函数

排序的目的是合理安排进近时间, 减少飞机总的延误时间, 降低总的延误成本。根据不同的情况, 可设置不同的目标函数, 当延误成本主要由飞机延误时间造成时, 设置的目标函数为使所有飞机总的延误成本最小, 目标函数可以表示为:

$$J_{\omega} = \min \sum_{i=1}^N |S_i - E_i| \quad (1)$$

其中  $\omega$  为最优的飞机进近排序序列。

## 2 模型优化求解

### 2.1 模型求解步骤

对于进近序列  $F$  中第  $k$  架飞机  $F(k)$  的选择遵循以下步骤:

- 1)  $S_1 = E_1$ ;
- 2) 根据每架飞机的选择概率选择进近序列  $F$  中第  $k$  架飞机  $F(k)$ ;
- 3) 如果  $E_k - S_{k-1} \geq s_{k,k-1}$ , 那么  $S_k = E_k$ ;
- 4) 如果  $E_k - S_{k-1} < s_{k,k-1}$ , 调整进近序列  $F$  中第  $k-1$  架飞机  $F(k-1)$  的降落时间, 若能满足

$E_k - S'_{k-1} \geq s_{k,k-1}$  且  $S'_{k-1} - S_{k-2} \geq s_{k-1,k-2}$ , 那么  $S_k = E_k$ ; 否, 则分配第  $k$  架飞机  $F(k)$  降落时间  $S_k$  满足  $S_k - S_{k-1} < s_{k,k-1}$ 。

### 2.2 优先级的确定

优先级可以分为固定优先级和可变优先级。固定优先级是指在整个排序过程中, 每架飞机的优先级不发生变化; 可变优先级是指在整个排序过程中, 每架飞机的优先级随着排序的进行而发生变化。若采取固定优先级, 有可能某架优先级较低的飞机在多次排序后仍不能分配降落时间, 从而造成较大的延误, 不符合实际情况。一般在空中管制过程中, 通常采用先来先服务原则 (first come first service, FCFS)<sup>[6]</sup>, 即先进入进近排序的飞机具有较高的优先级, 并随着进近的过程优先级发生变化。笔者采用可变优先级, 每架飞机的优先级由飞机的初始优先级和延迟时间优先级确定:

$$Q_i = Q_{is} + Q_{id} \quad (2)$$

其中:  $Q_{is}$  为每架飞机的初始优先级;  $Q_{id}$  为每架飞机由延误时间所产生的优先级增量。

### 2.3 优化求解算法

交叉熵法是一种基于模拟理论的优化学习算法。De Boer 等<sup>[7]</sup>采用交叉熵法求解了旅行商问题。Alon 等<sup>[8]</sup>在缓冲区分配问题中运用了交叉熵法。交叉熵法也被用于对最大割问题<sup>[9]</sup>的求解。交叉熵法的一个特点是定义了一个对算法进行快速引导的数学框架。

用  $F = (F(1), F(2), \dots, F(N))$  表示进近飞机按某个排序选择概率生成的进近排序序列集合。其中随机变量  $F(i), i = 1, 2, \dots, N$  按照进近排序规则进行选取, 用  $p_{ij}$  表示在序列中第  $i$  架飞机选择飞机  $j$  的概率,  $\mathbf{P} = (p_{ij})_{N \times N}$  是进近排序概率矩阵。定义  $\gamma^*$  为采用排序概率  $\omega$  生成不同的进近序列时所产生成本  $J_{\omega}$  的最小值, 即

$$\gamma^* = \min J_{\omega} \quad (3)$$

用  $f$  表示进近序列  $F$  的联合概率分布, 由概率矩阵  $\mathbf{P} = (p_{ij})_{N \times N}$  唯一确定, 那么进近排序问题则转化为式(3)取优的问题。定义  $I_{(J_{\omega} \leq \gamma)}$  为近排序序列集  $F$  上不同  $\gamma \in R$  值的示性函数的集合, 那么进近排序中对每架飞机的选择概率确定问题可转换为概率估计问题来求解:

$$l(\gamma) = P_u(J_\omega \leq \gamma) = E_u[I_{(J_\omega \leq \gamma)}] = \sum_F I_{(J_\omega \leq \gamma)} f. \quad (4)$$

其中  $P_u$  和  $E_u$  分别是概率分布  $f$  的概率测度和期望。

当  $\gamma = \gamma^*$  时, 估计  $l(\gamma)$  最直接的方法是采用重要抽样法: 根据所有进近飞机的概率分布  $g$ , 模拟生成进近排序序列  $F(1), F(2), \dots, F(N)$ , 则  $l(\gamma)$  的估计为

$$\hat{l}(\gamma) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{(J_\omega \leq \gamma)} \frac{f}{g}. \quad (5)$$

显然, 当概率分布  $g$  取  $g^* = \frac{I_{(J_\omega \leq \gamma)} f}{l}$  时, 只需要抽取一个样本, 即  $N=1$  就能得到  $l$  的一个无偏估计形式:

$$\frac{I_{(J_\omega \leq \gamma)} f}{g^*} = 1. \quad (6)$$

由式(6)可以看出:  $g^*$  的选取依赖于未知参数  $l$ , 而  $l$  难以确定, 所以采用在概率分布  $f$  的概率分布簇  $f(\nu)$  中选取概率分布  $g$  的方法来解决这个问题, 即选择参数  $\nu$ , 使得概率分布簇  $f(\nu)$  与概率分布  $g^*$  之间差别最小。衡量 2 个概率分布差别大小的常用测度是 Kullback-leibler 距离或交叉熵。定义 Kullback-leibler 距离为:

$$D(g \parallel f) = \sum g(F) \ln \frac{g(F)}{f(F)} = \int g(F) \ln g(F) dF - \int g(F) \ln f(F) dF. \quad (7)$$

这样, 最优抽样分布的确定问题就转化成确定推断参数  $\nu$ , 使得概率分布簇  $f(\nu)$  与概率分布  $g^*$  交叉熵最小的问题, 即

$$\nu^* = \arg \min - \int g^*(F) \ln f(\nu) dF, \quad (8)$$

然后有

$$\nu^* = \arg \max E_u[I_{(J_\omega \leq \gamma)} \ln f(\nu)]. \quad (9)$$

由于飞机进近序列  $F$  是根据概率矩阵  $\mathbf{P} = (p_{ij})_{N \times N}$  生成的, 概率矩阵  $\mathbf{P} = (p_{ij})_{N \times N}$  就是推断参数  $\nu$ , 而飞机进近序列  $F$  的联合概率  $f$  分布为

$$f = \prod_i p_{ij}, \quad (10)$$

满足

$$\sum_j p_{ij} = 1. \quad (11)$$

其中:  $i$  为飞机进近序列  $F$  中的次序号;  $j$  为飞机进近序列  $F$  中在第  $i$  架飞机时选取编号为  $j$  的飞机。

由拉格朗日乘法, 建立方程如下:

$$L = \sum_F I_{(J_\omega \leq \gamma)} \prod_i p_{ij} + \sum_i \lambda_i (\sum_j p_{ij} - 1); \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_{ij}} = 0. \quad (13)$$

由拉格朗日乘法可得飞机进近排序的排序概率为:

$$p_{ij} = \frac{E_p[I_{(J_\omega \leq \gamma)} \sum_i I_{(F_{ij})}]}{E_p[I_{(J_\omega \leq \gamma)} \sum_i I_{(F_i)}]}. \quad (14)$$

排序概率估计为

$$p_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N I_{(J_\omega \leq \gamma)} \sum_i I_{(F_{ij})}}{\sum_{k=1}^N I_{(J_\omega \leq \gamma)} \sum_i I_{(F_i)}}. \quad (15)$$

其中  $I_{(F_{ij})}$  表示模拟的飞机进近序列中在进近排序第  $i$  架飞机选择编号为  $j$  的飞机次数,  $\sum_i I_{(F_i)} = \sum_j I_{(F_{ij})}$ ,

这样就得到了算法的修正公式。式(15)的含义为: 当选择进近排序序列第  $i$  架飞机时, 选择编号为  $j$  的飞机概率是在总成本不大于  $\lambda$  的飞机进近排序序列中, 编号为  $j$  的飞机选取的次数与总共选择编号为  $j$  的飞机次数之比。排序序列中每架飞机的选取概率的修正都是选用最接近最优目标的“精英”样本。这样, 修正后使得下一次生成的飞机进近序列更接近于最优的进近排序序列。

在应用交叉熵法时, 关键的问题是参数怎么在迭代中被修正。通常参数的修正在一个 2 步迭代过程中实现:

1) 适应性修正  $\gamma_t$ 。

对于固定的  $\nu_{t-1}$ , 在参数为  $\nu_{t-1}$  的情况下, 定义  $\gamma_t$  是飞机进近序列  $J_\omega$  的  $\rho \times 100\%$  分位数。即  $P_{\nu_{t-1}}(J_\omega \geq \gamma_t) \geq 1 - \rho$ , 同时  $P_{\nu_{t-1}}(J_\omega \geq \gamma_t) \geq \rho$ 。对  $\hat{\gamma}_t$  最简单的估计方法是根据  $f(\nu_t)$  模拟生成飞机进近序列  $F$ , 计算每个进近序列的成本  $J_\omega$ , 并对其进行排列:  $J_{\omega(1)} \leq J_{\omega(2)} \leq \dots \leq J_{\omega(N)}$ 。然后通过计算样本测试代价值的  $\rho \times 100\%$  分位数来估计  $\hat{\gamma}_t = J_{\omega[\rho \cdot N]}$ 。

2) 适应性修正  $\nu_t$ 。

对于固定的  $\gamma_t$  和  $\nu_{t-1}$ , 由式(16)得到  $\tilde{\nu}_t$  的修正值, 采用平滑技术得到  $\nu_t$  的修正值:

$$\hat{\nu}_t = \alpha \tilde{\nu}_t + (1 - \alpha) \tilde{\nu}_{t-1}. \quad (16)$$

算法如下:

Begin

Update( $p$ ) //更新每架飞机的选择概率

$$p_{ij} = \frac{D_j \cdot E_j / Q_j}{\sum_i D_i \cdot E_i / Q_i} //初始化为优先级分布$$

While( $\gamma_t \neq \gamma_{t-1}$ )//中止条件

```
{
get(X); //模拟生成飞机进近序列
 $\hat{\gamma}_t$  = calculate(X) //对飞机进近序列成本排序得
```

到估计值

Updata( $p_{ij}$ )//更新飞机进近排序选择概率

t++

}

End.

### 3 仿真实验

为验证文中提出的进近排序算法，笔者采用文献[10]中的飞机计划降落时间模拟某一任务结束舰载机集中返场的场景来进行仿真实验，飞机机型及计划降落时间如表 1 所示。

表 1 飞机机型及计划降落时间

原始序号	机型	计划降落时刻	原始序号	机型	计划降落时刻
1	M	16:00:00	12	M	16:34:00
2	M	16:05:00	13	M	16:39:00
3	M	16:12:00	14	M	16:42:00
4	L	16:12:30	15	M	16:44:00
5	H	16:16:00	16	M	16:46:00
6	M	16:16:30	17	M	16:50:00
7	H	16:21:00	18	H	16:51:00
8	M	16:26:30	19	H	16:54:00
9	M	16:28:00	20	M	16:55:00
10	H	16:29:00	21	H	16:59:00
11	M	16:30:00	22	M	17:05:00

在文中，飞机延误造成的损失主要为飞机在空中等待耗费的燃油，不同飞机的空中等待费用如表 2 所示，不同机型之间的尾流安全间隔如表 3 所示。

表 2 不同机型的空中等待费用 元/s

机型	空中等待费用
H	38
M	20
L	14

表 3 不同机型的尾流间隔标准 s

前机类型	后机类型		
	H	M	L
H	113	135	170
M	89	89	110
L	83	83	94

采用笔者提出的优化算法得到最终排序结果如表 4 所示。仿真得到的飞机进近排序结果并没有改变原始的飞机进近顺序，其中 6 架飞机的排序降落时间晚于计划降落时间，最大的延误时间为 105 s，

总的延迟时间为 422 s。仿真实验结果表明，可以在改变较少架次飞机及较少总延误时间的情况下完成对舰载机进近的排序。

表 4 排序降落时间

原始序号	降落时刻	延误时间/s
1	16:00:00	0
2	16:05:00	0
3	16:12:00	0
4	16:13:50	80
5	16:16:00	0
6	16:18:15	105
7	16:21:00	0
8	16:26:30	0
9	16:28:00	0
10	16:29:29	29
11	16:31:54	104

### 4 结论

笔者针对飞机着陆调度 ALS 问题，建立了一个基于航母移动平台单一跑道的舰载机进近排序模型，并采用交叉熵法求解舰载机进近排序模型的优化解。仿真实验结果表明：该方法具有一定的优越性，可为航空管制人员对舰载机进近排序提供参考。

### 参考文献：

- [1] 冯兴杰, 陈素敏. 进近阶段飞机着陆调度优化[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(3): 1023-1028.
- [2] 孙佳, 田勇. 近距平行跑道基于相关平行进近模式排序研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(6): 763-768.
- [3] 冯心玲, 龚月娇, 林映霞. 用遗传算法优化航班规划问题[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(19): 4468-4471.
- [4] 杨秋辉, 游志胜, 冯子亮. 一种改进的基于遗传算法的多跑道到达飞机调度[J]. 四川大学学报, 2006, 38(2): 141-145.
- [5] 张天赫, 彭绍雄, 罗亚民, 等. 基于蚁群算法的舰载机避障路线分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 71-74.
- [6] 焦潇冰, 费向东, 谢泽辉. 基于改进的遗传算法航班进港排序模型研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(2): 246-249.
- [7] BOER D P T, KROESE D P, MANNOR S, et al. A tutorial on the Cross-Entropy Method[J]. Annals of operations Research, 2005, 134(1): 19-67.
- [8] ALON G, KROESE D P, RAVIV T, et al. Application of the Cross-Entropy Method to the Buffer Allocation Problem in a Simulation-Based Environment[J]. Annals of Operations Research, 2005, 134(1): 137-151.
- [9] RUBINSTEIN R Y. Cross-Entropy and Rara-Events for Maximal Cut and Bipartition Problems[Z]. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 27-53.
- [10] 刘洪, 杨红雨, 刘宇, 等. 基于单一移动平台的飞机进近排序模型研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014, 51(6): 1149-1155.