

# 面向通用航空器运行排班及维修的策略优化



陈玉涛<sup>1</sup> 许文超<sup>1</sup> 赵召娜<sup>1</sup> 刘洪恩<sup>2</sup> 王浩<sup>3</sup>

1 国网通用航空有限公司运行调度控制中心 北京 102209

2 中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300

3 中国民航大学工程技术训练中心 天津 300300

(1213583731@qq.com)

**摘要** 通用航空公司电力作业存在任务类型多样、作业地点分散、不确定性扰动较多等特点,为使执行任务的机组及维修人员可以实现高质量的机务保障和维修能力,针对通用航空器实际运行中需要综合考虑安全优先的作业性能等控制目标,文中分析了通用航空器作业的运行与维修计划特性,结合通航运行控制与调度的实际经验和工作流程等强约束条件,提出了兼容运行排班与安全保障的公平性及均匀性策略,建立了通用航空器运行排班及维修任务的优化模型,利用禁忌搜索设计了适应通用航空器维修计划的优化算法,对航空器及任务集合的对映构建了领域移动规则并使用实际数据仿真。在任务量、任务分配及排班结果方面,优化后的策略较实际分配结果的公平性及均匀性分别提高了 71.02% 和 19.07%。

**关键词:** 通用航空器;排班匹配;维修计划;优化建模;禁忌搜索算法

中图分类号 TP391

## Optimization of Scheduling and Maintenance Strategy for Navigation Aircraft Operation

CHEN Yu-tao<sup>1</sup>, XU Wen-chao<sup>1</sup>, ZHAO Zhao-na<sup>1</sup>, LIU Hong-en<sup>2</sup> and WANG Hao<sup>3</sup>

1 Operation Dispatching Control Center, National Network General Aviation Co., Ltd., Beijing 102209, China

2 College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

3 Engineer Technology Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

**Abstract** Owing to the power grid maintenance of navigation aircraft company with characters of diverse task types, scattered operation locations and uncertain disturbances, crews and maintenance personnel who perform tasks can achieve high-quality maintenance and repair capabilities need to be integrated in the actual operation of navigation aircraft. Considering the control objectives such as operational performance under safety priority, the characteristics of navigation aircraft operations and maintenance planning are analyzed. Combining the practical experience of navigation aviation operation control and scheduling and the constraints of operation process, the fairness and uniformity strategies which are compatible with operation process and safety standard are proposed. The model for general aircraft operation and maintenance scheduling tasks is established, and an optimization algorithm adapted to the navigation aircraft maintenance schedule based on the tabu search algorithm is designed constructing domain movement rules for aircraft and task sets. As a result of actual data simulation, after the strategy optimization, the fairness and uniformity of the actual allocation results have increased by 71.02% and 19.07% respectively in terms of task capacity and scheduling results compared with actual schedules.

**Keywords** Navigation aircraft, Scheduling matching, Maintenance plan, Optimization modeling, Tabu search algorithm

在通用航空运营中,飞行安全是根本,而机务维修是飞行安全的基础。由于通航公司作业类型多样、作业地点分散,这对其机务保障和维修能力提出了很高的要求。同时,机务维修涉及的专业面广,工种复杂,技术难度大,质量要求高,因此这也是一个高风险、高技术、高投入的技术密集型领域<sup>[1]</sup>。随着通用航空器机队规模的扩大及运力的供不应求,在航空器机务维修工作中,科学管理、合理配置人力资源对及时完成维修任务保障生产运力需求至关重要。

目前对于通用航空来说,并未形成针对维修计划的标准体系<sup>[2-3]</sup>,相对于民用航空来说,其研究的深度和广度都存在差距。目前民用航空器维修计划优化及调度的相关理论研究主要集中于线性规划、智能体理论和启发式算法<sup>[4]</sup> 3 个方面。在线性规划方面,文献<sup>[5]</sup>将航空器计划安排问题看作一个带有“时间窗”的时间线性优化问题,并建立了想应的数学模型;文献<sup>[6]</sup>将航空器排班问题视为一个动态线性规划问题,并结合模糊理论得出了新的航空器生产和维修计划安排及调度模

本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国网通航 2018 年科技项目(52950017000G);中央高校基本科研业务费项目中国民航大学专项(3122019094)

This work was supported by the Science Technology Project of State Grid General Aviation 2018(52950017000G) and Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China(Civil Aviation University of China) (3122019094).

通信作者:刘洪恩(13700516512@163.com)

型。对于智能体理论来说,文献[7-8]将机组人员的维修计划看作一个 Multi-Agent 问题,设计了相应的模型合并得出了相应的求解模型,并在多任务的情况下实现通信和调度的协同运行;文献[9]从典型的航空维修生产出发,提出了基于智能计算的计划优化控制系统,取得了不错的效果。而从启发式算法的角度,文献[10]针对遗传算法在航空器排班优化问题上做了大量的研究工作,在遗传算法的基础上进行改进,并采用一体化的方法设计相应的优化方法;文献[11]在蚁群算法的基础上加入了专家规则,充分考虑了市场的需求和民航业的特点,设计了相应的约束条件,建立了相应的优化模型和启发式方法。

客观合理的航空器维修计划不仅能节省通用航空公司的成本,更可以最大限度地提升航空器在生产任务作业中的安全系数。本文根据国内某大型通用航空公司的实际运行情况,通过分析通用航空器维修的主要特点和内部规律,结合通用航空器实际维修流程给出更加客观的数学模型,并基于实际流程禁忌搜索算法解决飞行维修计划及优化的求解问题。仿真验证分析表明,经优化的维修计划能够实现提升航空器利用率、增加航空器的安全系数、节省公司运营成本的目标。

## 1 通用航空器的维修性质及计划建模

### 1.1 通用航空器维修特点

与拥有独立维修单位的运输航空相比,通用航空的维修体系虽然结构相似,但因通用航空运行方式的特殊性,其维修流程具有以下特点。

#### (1) 维修地点不固定

由于通航电力作业地点都处在远离主基地或野外地点,分布较为广泛,但每个机组都会配置相应的机务人员保障航空器的正常运行,除了定检等大修必须回到主基地进行,其他维护和维修工作是随着航空器工作的地点而移动,所以航空器的维修地点不固定,且维修条件较为恶劣,为正常的航空器维修造成了一定的困难。

#### (2) 维修计划有不确定性

运输航空企业航班飞行作业因市场需求各异,通航电力作业的生产计划是由市场部门接到各电力单位的巡线任务决定的,虽然有对应的年度计划,但是时常会出现临时任务打乱原有的计划,因此维修计划存在一定的不确定性;同时航空器的定检要求会对计划产生一定的限制作用,因此在制定维修计划时一定要考虑安全性和鲁棒性,在此基础上追求经济效益。

#### (3) 生产保障线长

由于航空电力作业任务的特殊性,机组工作周期一般是以月为单位,从而降低了航空器直接回基地维修的可能性,需要机组做好相应的保障需求,最大限度地保障航空器安全高效地在巡线过程中平稳运行,因此保障线较长。

#### (4) 维修工作项目繁杂

由于通航电力作业过程中需要搭载激光红外等航检设备,同时对航空器和高压线的距离有一定的要求,必须在塔干附近进行悬停,这些都会增加作业时间,也会增加维修人员每次维护的项目,因此航空器每次巡线出发前都需进行大量的航前检查工作。

#### (5) 管理体系约束力有限

由于航空电力作业的环境较为恶劣,因此运行控制对其的约束大大较低,导致机组作业质量评价等无法制定类似民

航运输的标准,这导致整个管理体系较为松散,无法最大化地发挥公司的最大产能,运力资源和生产任务无法良好的匹配。

### 1.2 通用航空器维修计划流程

根据通航公司实际的运行流程及相关标准,本文总结出了维修计划的大致流程如图 1 所示,其基本步骤可描述为:1)市场部向调度部门提出客户任务需求及任务量;2)调度部门根据客户需求制定公司全年生产任务计划及运力布局;3)调度部门结合航空器适航情况及到检前可运行时间制定每月航空器运行计划;4)机务部门根据调度部门用机需求及调配计划,确定航空器定检维修计划。

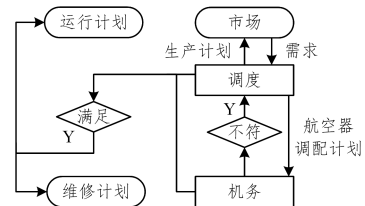


图 1 通航飞机维修计划确定流程

Fig. 1 Navigation aircraft maintenance plan determination process

### 1.3 维修计划特性分析

飞行维修计划的制定主要围绕满足生产任务需求开展,机务部门根据运控部门对航空器的调度需求,结合航空器维修定检间隔制定飞行维护计划,通过按时完成航空器的定检维修计划,保障公司运力的平稳,表 1 为某通用航空公司自有航空器运行时间情况。

表 1 2017 年自有航空器运行时间分类统计

Table 1 Statistics of 2017 self-owned aircraft running time classification

任务类型	时间	百分比/%
电力生产	7909:16	87.73
试飞、试车	463:55	5.15
训练	318:31	3.53
调机	199:16	2.21
其他	124:54	1.39
合计	9015:52	100.00

在以往的任务执行过程中,受专业人员数量限制,机组任务的主体与机号相对应,按照公司手册规定制度,机组连续两次排班的最小时间间隔(小于或等于 24h)、每周最大工作天数(小于或等于 4 天)、机组最大连续作业天数(小于或等于 45 天)及飞行人员飞行时间(每个月小于或等于 120h)均对航空器每月的最大运转时间有限制<sup>[12]</sup>,在限制期间,只能安排机组调休航空器原地封存待命,而航空器的定检维修监控须以天数和空中飞行时间同时进行监控并以先到先服务为原则,这可能造成航空器实际运转时间较少而必须返回主基地进行定检,极大地浪费了公司的运力资源。

业务量的不断增加导致航空器、机务专业人员的人数增长,必须逐渐推进换班机组,其本质是通过飞行、机务等保障人员的换班来确保航空器在未到期前持续运行,从而提升航空器的利用率。因此,更加科学地调配航空器及安排航空器维修计划就显得尤为重要,确保最大化地使用航空器是提高公司整体运行效率的关键因素。

### 1.4 问题定义

面向机组人员资质的航空器排班是指在给定排班任务集合、机组人员集合、航空器集合和维修计划集合的前提下,满

足各种约束条件,将合适的机组人员安排到航空器,生成以“机组-航空器-维修”为单位的排班方案。建立以下模型假设:

$\Psi = \{(\Omega_{ij}, t_{ij}), i=1, \dots, n; j=1, \dots, M\}$  表示机组集合,其中  $(\Omega_{ij}, t_{ij}) \subset \Omega \times Q$  描述第  $i$  天第  $j$  个机组,  $\Omega_{ij}$  表示对应排班任务,  $t_{ij}$  表示机组所需人员数量。

$\Pi = \{(\Omega_{ik}, r_{ik}, t_{ik}, \rho_{ik}, \Phi_{ik}), k=1, \dots, N\}$  表示航空器集合,其中  $(\Omega_{ik}, r_{ik}, t_{ik}, \rho_{ik}, \Phi_{ik}) \subset \Omega \times Q \times Q \times Q \times \Phi$  描述第  $i$  天第  $k$  个航空器。  $\Omega_{ik}$  表示对应排班任务;  $r_{ik}$  表示航空器类型;  $t_{ik}$  表示航空器所需机组数量;  $\rho_{ik}$  表示航空器状态,  $\rho_{ik} \in \{0, 1\}$ , 取值为 1 表示航空器需要维修;  $\Phi_{ik}$  表示对应维修任务。

$\Omega = \{(s_{iv}, e_{iv}, \gamma_{iv}, M_{iv}), v=1, \dots, T\}$  表示排班任务集合,其中  $(s_{iv}, e_{iv}, \gamma_{iv}, M_{iv}) \subset R \times R \times \Omega \times Q$  描述第  $i$  天第  $v$  个排班任务,  $s_{iv}$  表示航空器工作开始时间,  $e_{iv}$  表示航空器工作停止时间,  $\gamma_{iv}$  表示任务所需航空器类型,  $M_{iv}$  表示任务所需机组数量。

$\Sigma = \{(\omega'_{lv}, \varphi'_{lv}), l=1, \dots, d\}$  表示人员集合,其中  $(\omega'_{lv}, \varphi'_{lv}) \subset \Omega \times \Psi$  描述第  $l$  个人第  $j$  个机组第  $v$  个任务,  $\omega'_{lv}$  表示加入任务,  $\varphi'_{lv}$  表示加入机组。

$\Phi = \{(\alpha_{iv}, \beta_{iv}, \tau_{iv}), i=1, \dots, R\}$  表示维修任务集合,其中  $(\alpha_{iv}, \beta_{iv}, \tau_{iv}) \subset R \times R \times Q$  描述第  $i$  天第  $w$  个维修任务,  $\alpha_{iv}$  表示维修开始时间,  $\beta_{iv}$  表示维修结束时间,  $\tau_{iv}$  表示所需维修人员数量。

假设逻辑变量  $x_{ik}^v$  表示第  $i$  天的第  $v$  个任务是否由第  $k$  个航空器执行,  $x_{ik}^v \in \{0, 1\}$ , 取值为 1 表示执行;  $x_{ik}^j$  表示机组  $j$  是否加入第  $i$  天第  $k$  个航空器,  $x_{ik}^j \in \{0, 1\}$ , 取值为 1 表示加入;  $x_{ij}^l$  表示人员  $l$  是否加入第  $i$  天第  $j$  个机组,  $x_{ij}^l \in \{0, 1\}$ , 取值为 1 表示加入。

### 1.5 问题建模

航空器维修计划优化问题就是在综合考虑航空器的各种约束条件及民航总局对于航空器任务适航性的审定基础上,以保证航班安全正常地完成任为前,对资源进行优化配置。由于禁忌搜索算法可以较好地解决组合优化问题,又具有很强的鲁棒性,所以考虑将其应用于航空器维修计划优化求解问题中。结合通航排班的实际业务,面向通用航空器排班及维修策略优化问题建模如下,以相应的计划空间确定航空器计划  $Z$ :

$$Z = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_i \quad \dots \quad z_n]^T \quad (1)$$

$$z_i = \begin{bmatrix} A_{i11} & A_{i12} & \dots & A_{i1M} \\ A_{i21} & A_{i22} & \dots & A_{i2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{iN1} & A_{iN2} & \dots & A_{iNM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $n$  表示排班空间的维数,  $z_i$  表示第  $i$  天的计划方式,  $A_{ijk}$  表示第  $i$  种维修计划对应第  $j$  机组及第  $k$  架航空器,  $A_{ijk} \in \{0, 1\}$ 。维修计划需要满足机组和航空器的数量限制:

$$\sum_{j=1}^M |A_{ij}| \leq M, \forall i \in n \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N |A_{ik}| \leq N, \forall i \in n \quad (4)$$

$$A_{ij} \cap A_{ik} = \emptyset \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^M x_{ik}^v \cdot x_{ik}^j = M_{iv}, \forall i, v \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^N x_{ik}^j = M_{iv}, \forall i, j \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik}^j = D_{\max}, \forall k, j \quad (8)$$

$$|x_{ik}^j \cdot s_{ik} - x_{ik'}^j \cdot e_{ik'}| \geq T_{\min}, \forall i, j, k, k'; k \neq k' \quad (9)$$

式(3)为任务计划满足机组数量约束;式(4)为任务计划满足航空器数量约束;式(5)为机组与航空器关联性约束;式(6)为机组数量满足任务需要;式(7)表示每个机组 1 天最多加入 1 个航空器;式(8)表示每个机组不超过最大工作天数  $D_{\max}$ ;式(9)表示机组连续两次工作的时间间隔要大于  $T_{\min}$ 。

计划空间中有航空器与匹配机组的所有可能方案,在保障航空器安全的前提下设置运行成本的最小化目标。通航运行成本涉及航油成本、飞行运维成本、人员成本和建设成本,应合理规划排班计划以降低运行成本。运行成本的数学描述如下:

$$f(\dot{Z}) = \max(f(Z)) \quad (10)$$

其中,  $f(Z)$  为  $Z$  排班方式航空器运行总时间,  $\dot{Z} \in Z$ ,  $\dot{Z}$  为满足式(10)的排班计划最优解(排班计划的最优解有时不止一个)。  $f(Z)$  用来衡量排班航空器运行时间与需求任务所需航空器时间的匹配度。尽量满足机组任务需求的前提下,每架航空器的任务执行时间尽量逼近检修周期。衡量人员与航空器任务时间的数学描述如下:

$$h^l = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{k=1}^N x_{ij}^l \cdot x_{ik}^j \cdot x_{ik}^v (e_{iv} - s_{iv}) \right] \quad (11)$$

$$h_k = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{l=1}^d x_{ij}^l \cdot x_{ik}^j \cdot x_{ik}^v (e_{iv} - s_{iv}) \right] \quad (12)$$

其中,  $h^l$  表示机组人员  $l$  的任务时间,  $h_k$  表示第  $k$  个航空器的任务时间。

$$h_k^d = \sum_{i=1}^n \left[ \| x_{ij}^l h^l + x_{ik}^j h_k \| - \bar{t} \right] \quad (13)$$

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^n \sum_{v=1}^T (e_{iv} - s_{iv}) / d \quad (14)$$

任务计划集合的数学描述如下:

$$H(Z) = \begin{bmatrix} h_1^1 & h_1^2 & \dots & h_1^d \\ h_2^1 & h_2^2 & \dots & h_2^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_k^1 & h_k^2 & \dots & h_k^d \end{bmatrix} \quad (15)$$

充分考虑到在安排航空器和机组人员的运行生产与维修计划时各自的特殊性,进行统一的合理优化安排,发挥航空器和人员的最大效能,保证最终的整体经济利益和作业质量。因此对于航空器计划安排有许多约束条件,例如机型、运行时间、任务量、定检情况等。

## 2 算法设计

考虑到禁忌搜索算法具有灵活的记忆功能和藐视准则,在搜索过程中可以接受劣质解,能够跳出局部最优解,转向解空间的其他区域,增大获得全局最优解的概率,因此本文基于禁忌搜索算法对模型进行求解。

### 2.1 初始解快速生成

初始解是算法搜索的起点,好的初始解可快速收敛到最优目标解。下面引入若干定义方便求解。

**定义 1(候选机组)** 如果机组  $j$  与排班任务  $v$  匹配,那么机组  $j$  就称为任务  $v$  的候选人员。

**定义 2(候选任务)** 如果机组  $j$  是任务  $v$  的候选机组,相应地任务  $v$  称为机组  $j$  的候选任务。

**定义 3(候选航空器)** 如果  $k$  航空器与排班任务  $v$  匹

配,那么航空器  $k$  就称为任务  $v$  的候选航空器。

**定义 4**(候选人员) 如果人员  $l$  加入航空器  $k$ ,那么人员  $l$  就称为航空器  $k$  的候选人员。

初始解生成的算法如算法 1 所示。

#### 算法 1 初始解生成算法描述

Input: 机组集合  $\Psi$ , 航空器集合  $\Pi$ , 排班任务集合  $\Omega$

Output: 排班方案  $\{x_{ik}^v, x_{ik}^j\}$

1. 排班任务集合  $\Omega$  按照候选航空器需求数量从小到大排序
2. 航空器集合  $\Pi$  按照候选机组需求数量从小到大排序
3. for 排班任务  $v, v \in \Omega$
4. while (!checkAircraftMatched( $v, \{x_{ik}^v, x_{ik}^j\}$ )) //不满足式(6)的约束
5. for 航空器  $k, k \in \Pi$
6. if (checkTaskWork( $k, v$ ) && checkNumberLimit( $k, v$ ) && checkTimeLimit()) //检查式(3) - 式(5)、式(7)和式(8)的约束
7. then  $x_{ik}^v \cdot x_{ik}^j = 1$ ; break; //航空器  $k$  排班任务  $v$
8. end if
9. if(l.Type  $\geq \Omega$ .Limit) //遍历完所有机组都没有找到满足需要的机组
10. then return“机组资源不足,生成初始解失败”
11. end if
12. end for
13. end while
14. end for
15. return  $\{x_{ik}^v, x_{ik}^j\}$  //初始解生成完成,返回排班方案

算法 1 中通过步骤 1 将候选航空器需求数量进行排序,步骤 2 将候选机组需求数量从小到大排序,优先满足候选航空器需求数量较少的排班任务和候选机组需求较少的航空器,从而提高资源紧缺的情况下生成有效初始解的概率。

## 2.2 邻域结构设置

本文设计了针对航空器与排班任务相匹配及机组与航空器相匹配的两种邻域移动方式:插入移动和交换移动,并以航空器和任务集合举例说明。

(1)插入移动:如图 2(a)所示,从航空器  $k_1$  服务的任务计划集合  $\Omega_1$  中选择任务  $\omega_1$  插入航空器  $k_2$  服务的任务计划集合  $\Omega_2$  的任务  $\omega_2$  中,1 次分发移动的结果为航空器  $k_1$  的工作天数减少 1,航空器  $k_2$  的工作天数增加 1。

(2)交换移动:如图 2(b)所示,从航空器  $k_1$  服务的任务计划集合  $\Omega_1$  中选择任务  $\omega_1$ ,从航空器  $k_2$  服务的任务计划集合  $\Omega_2$  中选择任务  $\omega_2$ ,然后将  $\omega_1$  和  $\omega_2$  交换,1 次交换移动的结果为航空器  $k_1$  和航空器  $k_2$  的工作天数交换。

在执行插入和交换移动时都需满足模型中的约束条件。

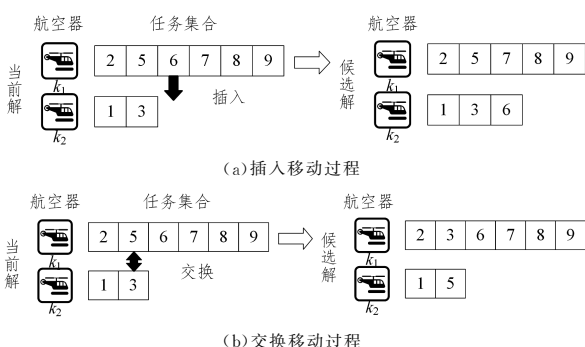


图 2 邻域移动示意图

Fig. 2 Neighbor domain mobile diagram

## 2.3 适应值函数选择

适配值函数在算法搜索过程中对搜索结果进行评价。为了快速生成初始解,在生成时没有考虑式(9)的约束条件,所以在设置适配值函数时需要不满足约束条件的解进行惩罚,惩罚函数如式(16)所示。

$$f = \lambda \cdot \max\{S, 0\} \quad (16)$$

其中,  $S = |x_{ik}^l \cdot s_{ik} - x_{ik}^j \cdot e_{ik}^l| - T_{\min}, k \neq k'$ ;  $\lambda$  为惩罚因子,取较大正数。结合优化目标,适应值函数为:

$$g = \sum_{i=1}^n (\sum_{k=1}^m x_{ik}^l \cdot (e_{ik} - s_{ik}) - \bar{t})^2 + f \quad (16)$$

## 2.4 禁忌表、视准则及终止条件设置

禁忌表中记录了每次进行插入或交换移动的节点,禁忌表的长度为固定长度。选取基于评价的规则作为藐视准则,即当前解的适应值优于最优值,则满足特赦准则,更新最优值为当前值。终止准则采用固定步长的方式,达到设定的最大步长次数就终止计算。

## 2.5 基于禁忌搜索算法的模型求解

基于禁忌搜索对 1.5 节中的模型进行求解,具体如算法 2 所示。

#### 算法 2 面向通用航空器的排班及维修优化算法

Input: 机组集合  $\Psi$ , 航空器集合  $\Pi$ , 排班任务集合  $\Omega$ , 迭代次数 niter,

禁忌表 T, 候选解大小 R, 候选解集 C

Output: 人员排班方案  $\{x_{ik}^v, x_{ik}^j\}$

1. 采用 2.1 节中算法 1 生成初始解  $\{x_{ik}^v, x_{ik}^j\}$ , 令当前解 = 初始解, nowcost =  $g(\{x_{ik}^v, x_{ik}^j\})$
2. for iter1 = 1, ..., niter //终止准则,迭代搜索
3. for iter2 = 1, ..., R //候选候选解集
4. 采用 2.2 节中的插入或交换移动构造候选解 c
5. cost =  $g(c)$  //采用式(8)计算候选解的适应值
6. C.add(c) //将候选解放入候选解集中
7. end for
8. 将候选解 C 按照 cost 从小到大进行排序
9. for 候选解 c, c  $\in$  C: //寻找当前最优解
10. if (c.cost < nowcost) //满足藐视准则
11. then 当前解 = c; update(T); break //更新当前解,更新禁忌表
12. end if
13. else if (!isInTabuTable(c)) //不在禁忌表中的最优解作为当前解
14. then 当前解 = c; update(T); break //更新当前解,更新禁忌表
15. end if
16. end for
17. end for

## 3 仿真与分析

### 3.1 算法仿真分析

基于国内某大型通航公司 2018 年实际运行数据开展算法的仿真实验,该公司现共有航空器 27 架,本文选取了其中 6 架 BELL206 的实际运行数据作为仿真依据,具体数据如表 2 所列。为提高航空器的平均可利用率,同时保证航空器的运行绝对安全,由历史数据分析可知航空器检修时间呈阶梯状分布特性,空客系列航空器(9 架)都至少执行一次停场定检的时间跨度为 6 个月,贝尔系列航空器(13 架)定检周期为 3 个月。

表2 BELL206 飞机实际运行情况

Table 2 Actual operation of BELL206 aircraft

机型	机号	投运 天数	运转 天数	运行 时间	单机利用率 /(h/d)
BELL206	B-7711	330	114	346:03	1.05
	B-7716	330	52	124:10	0.38
	B-7721	330	157	667:56	2.02
	B-7732	330	145	493:01	1.49
	B-7733	330	174	710:20	2.15
	B-7735	330	143	611:27	1.85

本节对该公司 2018 年 6 月 26 日至 7 月 2 日的 6 架 BELL206 的维修计划进行优化,算法的参数设置如下:迭代次数为 200,候选解大小为 200,禁忌表长度为 15。根据外航服务的业务需求,算法使用参数设置如下:机组连续两次排班的最小时间间隔  $T_{\min} = 24$  h,每周最大工作天数  $D_{\max} = 4$ ,惩罚因子  $\lambda = 1000$ 。基于禁忌搜索算法的通航航空器维修计划结果如表 3 所列。

表3 排班任务运行及维修计划

Table 3 Scheduling task operation and maintenance

机号	可运行时间/h	本月计划运行时间/h	日期 6.26—7.6
B-7711	87	87	SG1102
B-7721	201	140	SG1108
B-7722	300	140	SG1111
B-7732	64	64	SG1106
B-7733	129	129	SG1118
B-7735	55	55	定检

由历史数据可知,航空器调配编排的周期是一个月,结合实际工作中的经验,将维修计划优化的过程归纳为以下 3 个步骤:1)生产计划滚动调整表,修订机组运行计划;2)结合航空器的已飞时间和定检时间,为每架航空器指定空中飞行时间;3)将航空器与机组匹配,制定航空器维修计划。

在上述 3 个过程中,生产任务滚动计划表每个月滚动调整,由调度部门计划管理岗进行汇总;航空器的定检后可飞行时间通常在该航空器上一次定检后,由航空器维修部门指定,调度部门根据机务给出的时间,调整航空器的运力,反馈机务修订定检工作计划;航空器的已飞小时数可由飞行调度指挥系统查询获得。调度部门航空器调配人员根据以上所有数据制定出一份可行的,或比较能满足要求的结果,发布次月航空器运行计划,要求相关生产部门提供保障人员。

### 3.2 对比分析

图 3 为根据作业需求计划以及实际运行能力,得出的基于禁忌搜索算法的航空器月度运行作业计划,其中横轴代表月份,纵轴代表各机型在当月的作业时间。由图 3 可知,该方法能够保证各航空器电力作业任务的均衡性。

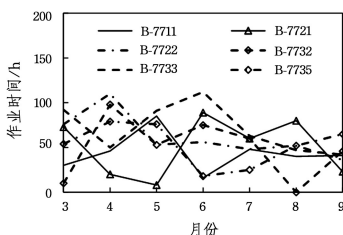


图3 航空器仿真运行计划结果

Fig. 3 Aircraft simulation operation plan results

任务量分布更加均匀,且充分考虑了维修定检对于航空器作业的影响。对比两个图中的计划情况可知,人工运行计划结果中各架航空器的飞行时间起伏较大,平均飞行时间约为 47h,而算法的运行计划中各架航空器的总飞行时间比较平均,约为 52h。算法的运行计划中,每架航空器每月的飞行时间比人工排班结果分布得更加均匀,相对起伏变小。

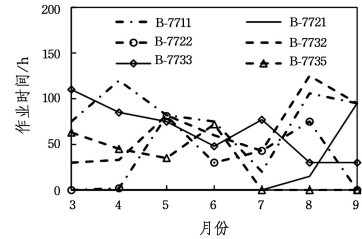


图4 航空器实际运行计划结果

Fig. 4 Aircraft actual operation plan results

图 5 为对不同机号航空器的分析结果,其中遗传算法与贪心算法的迭代次数与禁忌搜索相同。禁忌搜索算法和人工分配的平均值分别为 57.5 和 48.5,平均绝对偏差分别为 7.5 和 21.83,相对偏差缩小 71.02%。遗传算法与贪心算法的均值均为 58.33,其平均绝对偏差分别为 17.56 与 36.33,相对偏差较禁忌搜索分别增加了 56.68% 和 79.06%。实际结果中 B-7721 和 B-7735 的平均月度任务量相对较少,而 B-7711 的任务量增加,总任务量增加。而设计的禁忌搜索算法结果中,不同机号执行的的任务量最为均匀。

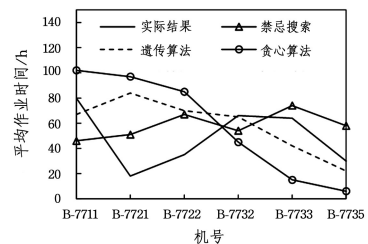


图5 不同机号平均任务的对比

Fig. 5 Comparison of average tasks of different machines

月度任务量的仿真结果如图 6 所示。禁忌搜索算法与人工分配的平均值分别为 59 和 51.29,平均绝对偏差分别为 7.14 和 7.67,相对偏差缩小 19.07%。遗传算法与贪心算法的平均值均为 61.43,其平均绝对偏差分别为 19.80 和 35.80,相对偏差较禁忌搜索分别增加了 62.46% 和 79.24%。在任务量分配量相近的情况下,禁忌搜索算法的任务量结果比其他方式分配得更加均匀。在避免结果陷入局部最优的情况下,禁忌搜索算法运算速度较快,结果较好。

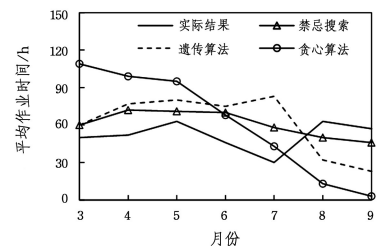


图6 不同月度任务量分布的对比

Fig. 6 Comparison of different monthly task distributions

图 4 为人工排班的运行计划结果。可知仿真计划结果的

结束语 本文以通用航空公司作业任务问题为例,考虑

多任务场景下航空器与人员排班及维修计划问题,以均衡作业时间为目标,建立了面向维修计划优化的航空器人员排班模型,并设计了基于禁忌搜索算法的模型求解策略。本文在国内某大型通航公司的实际数据集上进行的实验,结果表明,在数据规模和运算速度大致相近的情况下,本文设计的禁忌搜索算法相较于遗传算法和贪心算法结果较优,同时相较于人工排班方案,本文模型得到的排班方案在严格满足所有约束条件的前提下,排班的公平性及均匀性分别提高了71.02%和19.07%。我们下一步主要的研究方向是从历史数据出发,结合相应启发式算法和元启发式算法进行改进。

## 参 考 文 献

- [1] JOHNSON, BILL. FAA-Industry Workshop Ponders Event Reports for Maintenance SMS[J]. Aircraft Maintenance Technology, 2014(3):38-39.
- [2] VASSILIS T, DIMITRIS N, NICOLAS M. A pragmatic mapping of factors behind deviating acts in aircraft maintenance[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014(10):106-114.
- [3] GAO P J. Analysis of Civil Aviation Safety Management System (SMS)[J]. Science and Technology Information, 2009(20):165-167.
- [4] YIN H L. Design and implementation of aircraft scheduling system based on multi-task scheduling[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [5] PETER W R. Develop a model flight safety program for small air carriers and operators[D]. Cincinnati: Union Institute and University, 2004.
- [6] YANG Y. Research on typical general aviation maintenance production control system based on intelligent calculation[D]. Guanhuan: China Civil Aviation Flight Academy, 2016.
- [7] QIN H Q, XU K J, JIANG L P G. MTBF Calculation of a Certain Engine Based on Weibull Distribution Method[J]. Gas Turbine Technology, 2006, 19(3):40-43.
- [8] TAN N, LI Y H. Research on Unit Assignment Optimization Method Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Control En-

gineering, 2015, 22(4):674-678.

- [9] LI Y H, TAN N. Optimization Method of Aircraft Integrated Scheduling Based on Genetic Algorithm[J]. Control Engineering, 2017, 24(2):435-440.
- [10] LIU W, JIA B H. Aircraft Assignment Optimization Model and Algorithm Based on Heuristic Algorithm[J]. System Simulation Technology, 2016, 12(2):79-82.
- [11] SMETP, WAUTERST, MIHAYLOVM, et al. The shift minimization personnel task scheduling problem: A new hybrid approach and computational insights[J]. Omega, 2014(46):64-73.
- [12] FENG X, TANG L, LU M. Hierarchical Skills Personnel Scheduling of Foreign Airline Service[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(2):231-237.
- [13] WANG Y K. Design and implementation of large airline fleet scheduling system based on ant colony algorithm[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2007.
- [14] BAI X C, ZHU Y. Process Mining Approach Based on Tabu Search Algorithm[J]. Computer Science, 2016, 43(4):214-218, 240.
- [15] GE L. A General Aviation Aircraft Maintenance Safety Management System[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.



**CHEN Yu-tao**, born in 1975, master, engineer. His main research interests include navigation processing and control.



**LIU Hong-en**, born in 1995, postgraduate. His main research interests include airport transportation information and control.

(上接第 627 页)

- [19] LIN S, XIE Z. A Jacobi\_PCG solver for sparse linear systems on multi-GPU cluster[J]. The Journal of Supercomputing, 2017, 73(1):433-454.
- [20] SANDERS J, KANDROT E. CUDA By Example An Introduction To General-Purpose GPU Programming[M]. Addison-Wesley Professional, 2010:38-46.
- [21] GEORGE A V, MANOJ S, GUPTE S R, et al. Thrust++: Extending Thrust Framework for Better Abstraction and Performance[C]// 2017 IEEE 24th International Conference on High Performance Computing (HIPC). IEEE, 2017.
- [22] REAÑO C, SILLA F. On the support of inter-node P2P GPU memory copies in rCUDA[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2019, 127(5):28-43.
- [23] FANG Y, CHEN Q. A real-time and reliable dynamic migration

model for concurrent taskflow in a GPU cluster[J]. Cluster Computing, 2019, 22(2):585-599.



**XU Xin-peng**, M. S. His main research interests include flight dynamics, missile guidance and control system.



**HU Bin-xing**, Ph.D. His main research interests include flight dynamics, software framework, parallel programming and applications.