

文章编号: 2095-2163(2024)02-0055-07

中图分类号: TP301.6;V355

文献标志码: A

# 基于改进启发式算法的机组优化排班问题研究

宋启航, 张丽

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201600)

**摘要:** 机组排班问题是航空公司运营规划中较为复杂的问题之一。基于极其复杂的航空运营组织大环境, 航空公司为提高运输效率、降低运营成本也在不停的寻求合理的分配方案。航空公司机组人员大多数工作时间不够统一, 在一定程度上比较分散, 如果没有妥善进行排班工作可能会导致浪费人力资源而增加成本, 或者影响工作人员的休息时间。本文主要考虑航班运营过程中的航线规划、人员分配和运营成本等因素, 并提出了一种基于改进的贪婪算法、局部搜索法和模拟退火算法结合使用的求解方法, 创新性地提出了机组人员“组合”与“分解”的编码过程。求得结果后, 对最终解中的机组人员分配情况进行了实例分析测试。结果说明, 改良后的启发式算法可在机组人员指派问题中得到更高质量的解, 以达到对人力充分分配和降低成本的目的。

**关键词:** 混合整数规划; 贪婪算法; 模拟退火算法; 局部搜索算法; 机组排班

## Research on unit optimization scheduling problem based on improved heuristic algorithm

SONG Qihang, ZHANG Li

(School of Air Transport, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** The crew scheduling problem is one of the more complex issues in the operational planning of airlines. In the context of the exceedingly complex organizational environment of aviation operations, airlines continuously seek reasonable allocation schemes to improve transport efficiency and reduce operational costs. The majority of airline crew members have rather inconsistent working hours, which are quite dispersed to some extent. Improper scheduling may lead to the wastage of human resources and increased costs, or it could affect the crew's rest time. This paper primarily considers factors such as flight operation routing, personnel distribution, and operational costs, and proposes a solution method that combines an improved greedy algorithm, local search, and simulated annealing. It innovatively proposes the coding process of "combination" and "decomposition" for crew members. After obtaining the results, an empirical analysis of the crew allocation in the final solution was conducted. The trial results indicate that the improved heuristic algorithm can yield higher quality solutions to the crew assignment problem, achieving the objectives of full human resource allocation and cost reduction.

**Key words:** mixed integer programming; greedy algorithms; simulated annealing algorithm; local search method; crew scheduling

## 0 引言

随着中国经济的迅速发展, 民航大众化程度越来越深, 国内民航业也迎来了一个飞速发展的时代, 尤其是自2020年党中央提出了“以国内大循环为主体, 形成国际国内双循环的新发展格局”理念以来, 中国民航业的发展也面临着诸如合理分配机组人员、规划和分配航线, 合理扩建以承受更大客流量等更多的挑战。民航业系统的运行包含制定航班计

划、制定飞机排班计划、制定机组排班计划等复杂步骤, 其中机组排班计划是这些步骤中最重要的一步。机组人工成本是仅次于燃料成本的航空公司运营成本第二大组成部分, 而且相较占比最大的燃料成本具有更好的可控性。由于人力成本的上升, 机组人员的收入水平提高, 机组排班的结果直接决定航空公司的实际机组成本支出, 从而影响航空公司的运营收益。因此, 在满足相关约束条件下保障飞行安全的同时, 设计一个良好高效的算法来完成机组排班计划的编排, 对于航空公司提高运营效率和增加

**作者简介:** 宋启航(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。

**通讯作者:** 张丽(1980-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 交通运输规划与管理。Email: zhanglisues@163.com

收稿日期: 2023-03-01

收益有着重要的现实意义<sup>[1]</sup>。

机组排班主要内容通常可以分为任务环配对(Crew Pairing Problem, CPP)与机组人员指派(Crew Rostering Problem, CRP)。针对此类问题,向杜兵<sup>[2]</sup>就航班机组人员分配提出了一体化研究的思想;陈肯<sup>[3]</sup>提出了一种基于遗传算法的简单迭代变异(SIMA)方法,在排班的质量与时间上均取得较好结果;张米<sup>[4]</sup>系统分析后提出了机组排班问题模型,并考虑了延误因素,同时在计算方面使用列生成法取得了较好的优化结果;吴苏阳<sup>[5]</sup>考虑机组排班中,设计航班任务环的效益和质量,分别从航空公司的整体航班环运营成本、机组人员分配时其自身执勤时间相互之间的平衡性,以及生产计划的稳定性和质量等角度,对飞行任务的航班分配和机组人员指派组合进行优化,采用了遗传算法求解。Martín Fernández Susana<sup>[6]</sup>提出了一种启发式模拟退火算法,解决带有语言限制的复杂航空机组排班问题。

基于上述分析研究,本文提出了一种基于改进的贪婪算法,对中型航空公司机组人员排班问题进行优化的求解方法,其目的是找到成本最低的航班和机组人员配对,尽可能达到对机组资源的合理分配。

## 1 问题描述

航空公司的运营管理十分复杂,很多过程都需要经过长期-中期-短期等多层次的往复循环。

关于机组排班问题,假设航班规划阶段以及机型分配已经完成,对机组人员数量及资格的需求已经明确,而且可用机组人员也已经确定。机组排班问题中存在的若干变量如下<sup>[7]</sup>:

(1) 机场:航班的起飞和到达以及机组人员的出发和到达,都是以机场为节点。

(2) 机组人员:现在民航飞机驾驶通常需要两种资格的驾驶员(正、副机长)。每个机组人员都有且仅有一个主要资格,但也可具备其它的替补资格。机组排班过程中往往优先安排主要资格,当主要资格不足时,可以安排替补资格。本文中规定具备正机长资格的飞行员其主要资格是正机长,否则其主要资格是副机长。部分正机长可以替补副机长执行飞行任务<sup>[8]</sup>。机组人员按主要资格或替补资格执行的任务都称为飞行任务。

(3) 航班:也可称为航段,指飞机的一次起飞和降落。

(4) 执勤:由一连串的航段和间隔连接时间组

成,相当于一次上班。

(5) 任务环:由一连串的执勤和休息时间组成,从本人基地出发并最终返回基地<sup>[9]</sup>。

在进行机组任务的编排时,依据民航局制定的飞行运行手册以及各航空公司所制定的排班规则,将机场排班问题抽象出一个网络结构,如图1所示。其中,机组人员在规划初始时均位于基地(如图中基地1、基地2等);机组人员之间进行任意组合,对任意可行航班环(如图中1-3-4-5-1)进行服务;最终航班规划结束后,所有机组人员均要回到基地<sup>[10]</sup>。

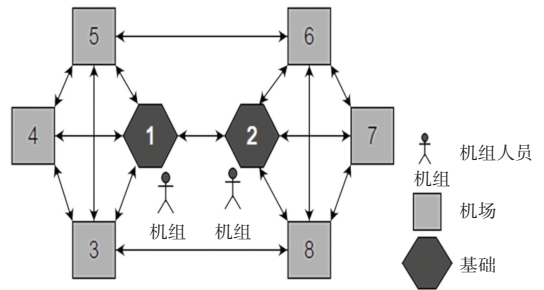


图1 机场排班网络图

Fig. 1 Diagram of airport scheduling network

本文需要解决的问题,是在满足以上约束条件的情况下,建立线性优化模型,明确表达飞行时间、执勤时间、休息时间等约束;并依照次序,依次满足下列优化目标<sup>[11]</sup>:

- (1) 满足机组最低配置的航班尽可能多;
- (2) 机组人员的总执勤成本最低;
- (3) 机组人员总体乘机次数最少;
- (4) 机组人员之间的执勤时长尽可能平衡;
- (5) 机组人员尽可能少用替补资格。

根据上述要求构建排班优化模型,设计算法并编写程序按所给数据运行,输出求解结果,以达到对机组资源进行合理分配的目的。

## 2 模型建立

### 2.1 模型假设

在建立优化模型之前,针对上述的排班问题作出如下假设:

(1) 假设每个机组人员都有其自身所属固定基地;

(2) 假设每个机组人员有且仅有一个主要资格,也可以具有替补资格。即:具备正机长资格的飞行员其主要资格便是正机长,否则其主要资格为副机长;

(3)假设每个航班都有规定好的最低机组人员配置,可用  $C < \text{数} >、F < \text{数} >$  表示。其中,  $C < \text{数} >$  表示单个航班的机组人员配置组合中正机长的人数,  $F < \text{数} >$  表示副机长的人数,只有在满足最低机组配置的情况下飞机才能起飞。按照规定,最低机组人员配置为 C1F1,即正、副机长分别至少有一位,实际机组配置可以超过此要求,但不能低于此要求<sup>[12]</sup>;

(4)所有机组人员的执勤起点和执勤终点都是其所属基地;

(5)机组人员可以乘机摆渡至自己需要服务航班所在机场或返回基地。此时,乘机机组人员的航班时间计入执勤时间,但不计入飞行时间;

(6)不满足最低机组配置的航班不能起飞,且不能配置任何机组人员。

### 2.2 数学模型

针对问题描述中所要解决的5个问题,按照次序依次列出目标函数如下:

函数1:最大化满足机组配置的航班

$$\text{Max} \sum_{j \in F} X_j$$

函数2:最小化机组人员的总执勤成本

$$\text{min} \sum_{i \in E} DT_i \cdot DC_i$$

函数3:最小化整体乘机次数

$$\text{Min} \sum_{i \in E} \sum_{j \in F} \sum_{l \in \text{Leave}P_j} \sum_{a \in \text{Arrive}P_j} Y_{i,j,l,a}$$

函数4:机组人员的执勤时间尽可能平衡;为了这一优化目标进行量化处理,本文引入方差的概念,使得机组人员间的执勤时间的波动幅度最小,将该目标函数转换成满足所有机组人员的执勤时间方差最小化这一目标。

$$\text{min} \frac{\sum_{i \in E} (DT_i - \bar{DT})^2}{M}$$

函数5:最小化替补次数

$$\text{Min} \sum_{i \in E} \sum_{j \in F} \sum_{l \in \text{Leave}P_j} \sum_{a \in \text{Arrive}P_j} Z_{i,j,l,a}$$

上述目标函数中,  $E$  为员工集合;  $F$  为航班集合;  $P$  为机场集合;  $\text{Leave}P_j$  为航班  $j$  的出发机场;  $\text{Arrive}P_j$  为航班  $j$  的到达机场;  $X_j$  表示  $j$  航班是否满足最低机组配置;  $Y_{i,j,l,a}$  表示员工  $i$  是否乘坐航班  $j$  从  $l$  机场出发至  $a$  机场乘机;  $Z_{i,j,l,a}$  表示员工  $i$  乘坐航班  $j$  从  $l$  机场至  $a$  机场是否使用替补资格。

约束条件如下:

条件1:  $j$  航班应满足机组人员配置的最低标

准;

$$\sum_{i_1, i_2 \in E, i_1 \neq i_2} (CY_{i_1} * K_{i_1j_1a} + FY_{i_2} * K_{i_2j_2a} + CY_{i_2} * Z_{i_2j_2a}) = 2$$

条件2:保证员工  $i$  初始出发点为基地  $B_i$ , 最终到达机场也为基地  $B_i$ ;

$$\sum_{j \in F} \sum_{a \in \text{Arrive}P_j} TY_i * (Y_{ij_11a} + Z_{ij_11a} + K_{ij_11a}) =$$

$$\sum_{j \in F} \sum_{l \in \text{Leave}P_j} TY_i * (Y_{ij_1l1} + Z_{ij_1l1} + K_{ij_1l1})$$

条件3:航班满足正机长配置;

$$\sum_{i \in E} CY_i * K_{ij_1a} + (1 - X_j) = 1$$

条件4:航班满足副机长配置;

$$\sum_{i \in E} (FY_i * K_{ij_2a} + CY_i * Z_{ij_2a}) + (1 - X_j) = 1$$

条件5:保证每个机组人员相邻两个航段起飞与到达机场一致;

$$TY_i * (Y_{ij_111a} + Z_{ij_111a} + K_{ij_111a}) =$$

$$TY_i * (Y_{ij_21a2} + Z_{ij_21a2} + K_{ij_21a2})$$

条件6:保证每个机组相邻两个航段的连接时间不小于  $\text{MinCT}$ ;

$$TY_i * (Y_{ij_212a} + Z_{ij_212a} + K_{ij_212a}) * \text{Arrivetime}_j -$$

$$TY_i * (Y_{ij_111a} + Z_{ij_111a} + K_{ij_111a}) * \text{Leavetime}_j$$

条件7:每个机组人员每天至多只能执行一个执勤任务;

$$\lceil T_{i,j+1} \rceil - \lfloor A_{ij} \rfloor \geq 0, i \in E, j \in G$$

条件8:每次执勤的飞行时间最多不超过  $\text{MaxBlk}$  分钟;

$$Ft_{ij} \leq \text{MaxBlk}, i \in E, j \in G$$

条件9:每次执勤时长最多不超过  $\text{MaxDP}$  分钟;

$$A_{ij} - T_{ij} \leq \text{MaxDP}, i \in E, j \in G$$

条件10:每个机组人员的相邻两个执勤之间的休息时间不小于  $\text{MinRest}$  分钟;

$$T_{i,j+1} - A_{ij}, i \in E, j \in G$$

上述约束条件等式中,  $CY_{i_1}$  表示机组员工  $i_1$  的主要资格是否为主机长,1是0否;  $FY_{i_2}$  表示机组员工  $i_2$  的主要资格是否为副机长,1是0否;  $T_{ij}$  表示员工  $i$  第  $j$  次执勤开始的时间,  $A_{ij}$  表示员工  $i$  第  $j$  次执勤结束的时间。(注:机组人员应至少具备担任副机长的资格)。约束条件7中,涉及到在同一天内,不能同时出现第  $j$  次执勤的结束和第  $j+1$  次执勤的开始。为满足该约束条件,本文采用“ $\lfloor$ ”和“ $\lceil$ ”符号分别表示对日期时间进行向下和向上取整运算。例如:某一执勤的开始时间为8月20日7:30,向上取整后得到20,向下取整后得到21。对日期时间经过

此类运算,可以保证得到整数值。

### 3 算法设计

#### 3.1 目标数据缩放和线性加权处理

上述建立的机组排班模型共有3个目标函数,属于多目标决策问题,此类问题是目前数学建模中较为普遍存在的一类问题,要求在满足多个目标函数最优,且决策变量的线性约束条件或非线性约束条件下进行求解,本文采用线性加权法求解。线性加权法的特点为:将多个目标函数通过线性加权的方式集成到单个目标函数,则问题转化为一般的线性规划类问题,从而降低模型复杂度,达到提高模型求解效率的目的<sup>[13]</sup>。

对于目标函数1-5的权重分配按照4、2、2、1、1的顺序进行分配,之后将上述增加权重之后的目标函数进行相加,整合为一个新的混合目标函数,从而将多目标函数问题转化为单目标函数问题进行求解。

根据现有的通用方法,可选择采取两阶段法来进行机组排班问题求解。第一阶段使用枚举法列举出所有可行的航班环集合,第二阶段再将机组人员分别逐个加入航班环中<sup>[14]</sup>。该方法虽然简单易行,但缺点较为明显,即某些机组人员可能出现闲置情况,不能充分利用机组资源,缩小了寻优空间,缺少灵活性。因此,本文设计了以下启发式算法进行求解。

#### 3.2 贪婪算法构造初始解

贪婪算法是在对问题进行求解时,总是做出在当前看来是最优的选择。也就是说,其不从整体最优上加以考虑,所做出的仅仅是在某种意义上的局部最优解,是最自然智慧的算法<sup>[15]</sup>。贪婪算法用一种局部最功利的标准,做出当前最好选择,难点在于证明局部最优解最功利的标准可以得到全局最优解。

本文所使用的贪心策略具体流程为:

(1)首先,在构造初始解之前,将所有机组人员按照其所在基地的位置进行划分;然后按照最低机组配置要求划分出最大的机组人员组合数。在划分结束时,会剩余一部分没有被分配的机组人员,则将这些机组人员全部划分到最后一组机组人员中。

(2)对每一个由机组人员组成的小组进行构造航班环。

贪婪算法构造初始解的思路为:先从当前机场可以出发的航班集合中进行选择,将到达机场中剩

余航班次数最多的航班作为机组人员服务的航班,接着继续搜索集合中的航班,当搜索到某机场的某航班可以返回机组人员所属基地则记录该机场,继续向后搜索至最后一个可以返回机组人员基地的机场<sup>[16]</sup>。

(3)当机组人员服务到某个机场后,如果没有后续航班需要服务时,则首先判断从当前机场是否可以乘机返回基地;若不能,则筛选出之前记录的最后一个可以乘机回到基地的机场,机组人员从该机场出发返回基地。以上就是基于贪婪算法思想的一个最低配置机组人员航班环的构造过程。

(4)构建完一个航班环之后,将此航班环中所服务的全部航班进行记录,在后续航班环的构建过程中,机组人员只能去服务之前未服务过的航班。这样一来,将所有的机组人员均进行上述贪婪构建之后形成初始解。

在使用以上思想为航班分配机组人员时,会出现某个航班环中没有航班可供机组人员返回基地的情况,这时先将机组人员安置最后一个完成服务的航班所在机场耐心等待,至所有航班环全部构建完成后,将无法返回基地的机组人员安排至其他已经构建完成的能够乘机返回基地的航班环,由这些航班环的航班提供乘机,将其带回所属基地。

如图2所示,航班环1为基地→机场1→机场2→机场3→基地。即机组人员从基地出发先服务航班到达机场1,再服务航班到达机场2,接着服务航班到达机场3,完成所有航班的服务工作,且在当前机场可以返回基地。当机场3不能返回基地时(航班环3),则把该机组人员安排到另一个已构建好的航班环2中,即该机组人员只能乘坐另一个航班环2的飞机返回基地。

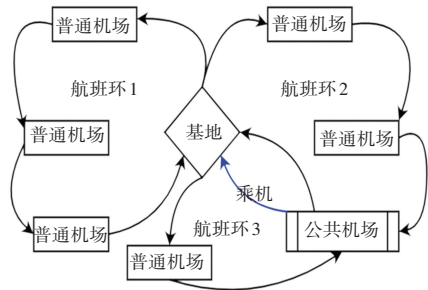


图2 贪婪构造思想

Fig. 2 Greedy constructors

#### 3.3 局部搜索算法与模拟退火算法结合优化

本文基于带禁忌规则的局部搜索(Local Search)算法和模拟退火(Simulated Annealing)算法

来设计初始解的优化思路。

局部搜索是解决最优化问题的一种启发式算法<sup>[17]</sup>。对于计算起来非常复杂的最优化问题,要找到最优解需要的时间随问题规模呈指数增长,因此诞生了各种启发式算法寻找次优解,其是一种近似算法(Approximate Algorithms)<sup>[18]</sup>。以最小化函数值目标为例,局部搜索算法的基本思想是在当前点的邻域内搜索,找到邻域内的最优解。将当前函数值与邻域内最优解的函数值作比较,如果当前函数值更小,则停止搜索,输出当前解作为局部最优解;否则将取到的邻域内最优解设为当前点解,重复进行邻域搜索。标记已经解得的局部最优解或求解过程,并在进一步的迭代中避开这些局部最优解或求解过程<sup>[19]</sup>。

为顺利应用局部搜索思想来求解机场排班问题,本文提出航班环机组人员“组合”过程和“分解”过程两个新概念。

### 3.3.1 机组人员“组合”过程

**步骤 1** 在初始解航班环中随机选择两个航班环 A、B;

**步骤 2** 若航班环 A、B 有共同机场,则选择两个航班环中到达时间最早的公共机场 T,在 T 机场进行两航班环机组人员的“组合”,“分解”规则为:选择航班总数少的航班环 A,将 A 航班环中的多余机组人员安排至 B 航班环;若 A 航班环中的机组人员为最低配置,则直接将 A 环中公共机场之后的航段取消,让 A 航班环的机组人员从公共机场开始即和 B 航班环进行“组合”;若 A 航班环中有多余的机组人员,则不取消 A 航班环后续航段;相应地,将 A 航班环公共机场前的航段复制一份作为新航班环 C,航班环 C 为 A 航班环多余机组人员的航班环,其中在 A、B 公共机场前的航段为“乘机”航段,之后为飞行服务航段。有公共机场时的机组人员组合与分解过程如图 3 所示:

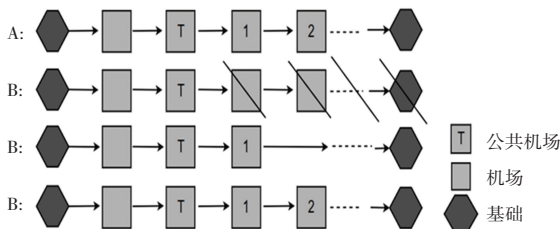


图 3 有公共机场时的情况说明

Fig. 3 Illustration of the case when public airport exists

**步骤 3** 若 A、B 没有共同机场,则判断 A、B 是否具有相同的基地,若有相同的基地,则选择基地为

公共机场;否则,重新选择用于机组人员混编的航班环。如图 4 所示:

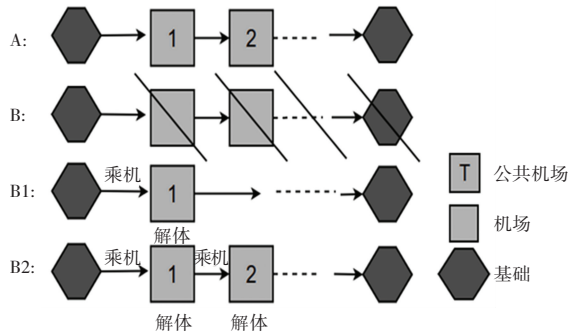


图 4 无公共机场但有共同基地的情况说明

Fig. 4 Illustration on the case when there is no public airport but there exists a common base

### 3.3.2 机组人员“分解”过程

对于进行机组人员组编的航班环 A 或者新建的航班环 C,从 A、B“组合”的位置开始(基地\公共机场)向后遍历 B 航班环中的每一个机场,计算在 B 航班环之后的每一个机场,将新“组合”的机组人员进行“分解”之后,操作独立服务所能增加的效益  $H_i$  (增加的航班数/增加的乘机次数/增加的使用替补资格的次数均要考虑)。图 5 为有公共机场 T 且航班环 B 有多余机组人员时的组合分解过程:

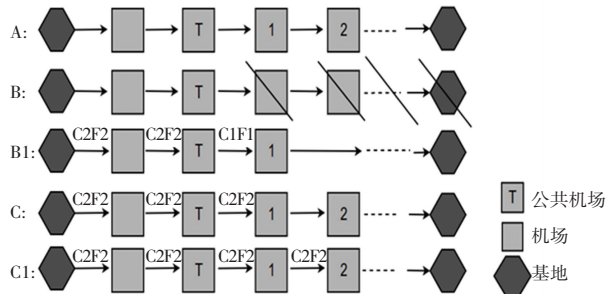


图 5 有公共机场 T 且航班环 B 有多余机组人员的情况说明

Fig. 5 Illustration on the case when there exists public airport T and flight schedule B has excess crew

机组人员“组合”之后需要计算减少的效益  $W_i$  (减少的航班数和其他成本),在  $W_i$  确定的情况下,  $H_i$  的值越大,则此次优化的效果越明显。所以,根据完全贪婪的思想,选择效益  $H_i$  最大的“分解”机场位置,将航班环 B 新增的机组人员进行“分解”。“分解”之后,对于航班环 A/C 中的机组人员,从组编机场开始到当前解编机场的航段都为“乘机”航段,从分解位置之后的航段为服务航段。为了避免陷入局部最优解,依概率 50%选择效益  $H_i$  最大的位置进行“分解”操作。

经上述步骤后,需要根据执勤约束来对航班环进一步进行筛选。同时,本文采用模拟退火的方式来选择次优解进行后续的优化,从而跳出局部最优解。当迭代后的解对应目标函数值相较于之前的更优时,则选择该解继续迭代,否则用模拟退火机制来接受退化解方案。

模拟退火算法思路,是对所求初始解中若干航班环的机组进行交换<sup>[20]</sup>。例如:已知航班环1和航班环2均已满足最低机组配置,此时可以交换服务两个航班环的机组,以优化替补资格使用次数最少为目标,进行模拟退火迭代。

局部搜索算法和基于模拟退火算法的伪代码如下:

基于局部搜索和模拟退火相结合的优化算法

输入初始解  $S_0$

初始化外部循环迭代次数  $outNum$ , 外循环计数变量  $i$ , 内循环迭代次数  $inNum$ , 内循环计数变量  $j$ , 全局最优解  $bestSol = S_0$ , 局部最优解  $locSol = S_0$ , 次优解  $wosSol = S_0$

while  $i++ < outNum$ , do

$j = 0$ ;

while  $j++ < inNum$ , do

随机选择  $locSol$  中的任意两个航班环

A、B

if A、B 有公共机场 T, then

以 T 为机组人员重组点对 A、B

进行一次组合和分解优化操作

else if A、B 有公共基地 D, then

以 D 为机组人员重组点对 A、B

进行一次组合和分解优化操作

else

重新选择用于优化的航班环 A、B

continue;

end If

if  $f(locSol) > f(bestSol)$ , then

更新  $bestSol = locSol$

end If

if 达到退火接受标准, then

$locSol = wosSol$ ;

else

$localSol = bestSol$ ;

end If

end while

更新模拟退火参数相关参数

end while

输出最优解的目标函数值  $f(bestSol)$

## 4 结果与分析

根据上述算法编写程序对问题模型进行求解。以初始温度  $T_0$  为  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , 温度降低速率  $r = 0.98$ , 结束温度为  $T_{end} = 10^{-8}\text{ }^\circ\text{C}$ , 限制迭代次数 1 000 次为例; 分别运行“2021 年‘华为杯’F 题”中 A 数据, 经过贪婪构造得到未经优化的初始解结果, 以及经模拟退火算法优化后的最终解的可视化结果如图 6 所示。

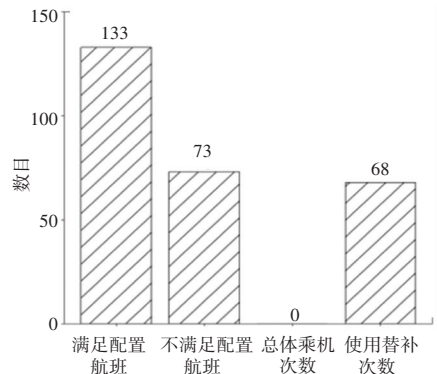


图6 机组人员指派结果

Fig. 6 Results of crew assignment

图6表明,不满足机组配置航班数、满足机组配置航班数、机组人员总体乘机次数、替补资格使用次数分别为73、133、0和68。从该结果可以看出,不满足机组人员配置的航班较多,已超过50%;机组利用率为96.57%。从图7中可见,机组人员的最大、平均和最小执勤天数分别为1.83、1.08和1.58;并计算得到总体执勤成本为28.51万元。本组数据的程序运行时间较短,仅为0.01 min。

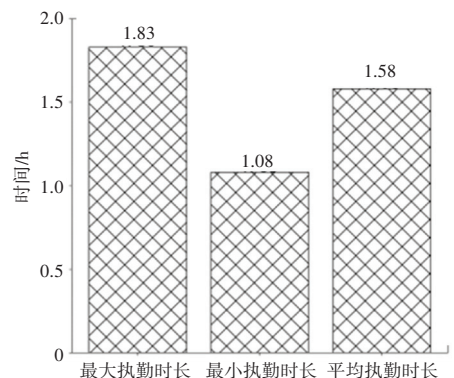


图7 机组人员执勤结果

Fig. 7 Results of crew duty

最终方案共计8个航班环,第8个航班环的结

果见表1。

表1 第8个航班环  
Table 1 Schedule of the 8<sup>th</sup> Flight

日期	起飞时间	起飞机场	日期	到达时间	到达机场
8/14	7:30	NKX	8/14	9:50	XGS
8/14	10:30	XGS	8/14	12:50	NKX
8/16	7:30	NKX	8/16	9:50	XGS
8/16	10:30	XGS	8/16	12:50	NKX
8/17	7:30	NKX	8/17	9:50	XGS
8/17	10:30	XGS	8/17	12:50	NKX
8/18	7:30	NKX	8/18	9:50	XGS
8/18	10:30	XGS	8/18	12:50	NKX

## 5 结束语

本文通过使用启发式优化算法,对于复杂的航空机组排班问题进行了求解;其中先对数据进行清洗、处理和分析,然后对要求的目标函数通过缩放权重进行整合,形成一个混合整数规划问题以求解。根据题中所给的约束条件设计算法;首先使用贪婪算法构造初始航班环集合,然后将初始解代入模拟退火算法中对解进行优化,达到终止迭代的条件后退出循环,从而得到一个最优解的近似解。

本文所使用的算法框架较为简单,实用性较强。但是考虑到最后的航班任务交换构建更为复杂,且在多元函数的权重确定中,主观因素的影响较大,而且就所求解的精确度和求解质量而言,此算法还是有较大的改进空间。

## 参考文献

[1] 刘锡鹏,陈寅. 基于SMT的机组排班问题优化求解[J]. 计算机系统应用,2021,30(12):279-287.  
[2] 向杜兵. 航空机组排班计划一体化优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.

[3] 陈肯,张广伟. 基于文化基因算法的机组排班问题研究[J]. 网络安全技术与应用,2021(5):48-51.  
[4] 张米. 航空公司机组排班模型研究[D]. 北京:清华大学,2014.  
[5] 吴苏阳. 航空公司飞行任务的自动组环优化算法研究与实现[D]. 上海:复旦大学,2014.  
[6] MARTÍN-FERNÁNDEZ S, MARTÍNEZ-FALERO E, PERIBÁÑEZ J R, et al. GIS-based simulated annealing algorithm for the optimum location of fire stations in the madrid region, Spain: monitoring the collapse index[J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8414.  
[7] 马弘,沈倪,朱靖,等. 带有一致性规范约束的航空机组排班问题研究[J]. 管理工程学报,2022,36(6):1-14.  
[8] 张广伟. 航空公司机组排班问题算法研究[D]. 四川广汉:中国民用航空飞行学院,2021.  
[9] 李春霖,王赫,牛海晴,等. 基于并行模拟退火的多目标航空器着陆问题的TOPSIS分析[J]. 科学技术创新,2022(12):7-10.  
[10] ZEIGHAMI V, SADDOUNE M, SOUMIS F. Alternating lagrangian decomposition for integrated airline crew scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2020, 287(1): 211-224.  
[11] AMBIKAVATHI C, SRIVATSA S K. Tuning random forest parameters using simulated annealing for intrusion detection[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2020, 9(9): 2278-3075.  
[12] 张文成. 基于启发式算法的机组排班优化研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2021.  
[13] 赵天洋. 航班机组自动排班系统研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2016.  
[14] 吕建飞. 航空公司飞行机组人员分配问题研究[D]. 四川广汉:中国民用航空飞行学院,2015.  
[15] 潘海洋. 无初始解的大规模机组排班问题建模与求解优化[D]. 北京:清华大学,2014.  
[16] 张硕. 航空公司飞行机组指派问题研究[D]. 四川广汉:中国民用航空飞行学院,2013.  
[17] 肖真真. 基于任务均衡的航空公司机组人员指派问题研究[D]. 四川广汉:中国民用航空飞行学院,2012.  
[18] 汪臻,刘磊. 航空公司中的飞行员配置研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(10): 1-5.  
[19] 胡成. 基于安全考虑的海航机组排班管理改进研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
[20] 张青,马永秀,杨正全,等. 基于BP方程算法的多机型机组恢复时空网络模型[J]. 中国民航大学学报,2017,35(5):30-35.