

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.04.004

## 航班运控中飞机和机组快速整合优化恢复

乐美龙<sup>1</sup> 马 彬<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016; 2. 上海唯智信息技术有限公司, 上海, 200051)

**摘要:** 由于天气、交通流量、飞机故障等因素影响, 航班推迟甚至取消经常发生。导致航班延误的因素一旦解除, 航班恢复工作必须立即执行, 为此航班优化建模求解方法的高速高效尤其重要。首先系统简要地回顾了航班优化恢复的研究现状。在此基础上, 提出了飞机和机组一体化恢复的数学模型。之后通过构建飞机恢复和机组恢复的可行路径和可行配对作为输入, 对建立的优化模型进行优化求解, 以使其在合理的时间内, 获得整合恢复的优化解。为了获得飞机恢复和机组恢复的可行路径和可行配对, 设计了专门的递归算法和配对存储树方法。为了进一步提高计算速度, 对计算数据进行了预处理, 即将恢复限制在受扰航班中进行。这样不仅提高了求解速度, 同时也最大限度地减少了受扰航班数。计算试验表明, 该方法较之飞机、机组分阶段优化恢复, 优度明显提升, 而且求解速度快, 可用于航空公司中小规模的航班恢复。

**关键词:** 航班恢复; 飞机恢复; 机组恢复; 运作优化; 启发式算法

中图分类号: V355.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2015)04-0487-10

## Aircraft and Crew Integrated Fast Optimal Recovery in Airline Operation and Control

Le Meilong<sup>1</sup>, Ma Bin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Shanghai VTradEx Information Technology Co. Ltd, Shanghai, 200051, China)

**Abstract:** Due to weather, traffic flow, aircraft failure and other influence factors, flight delay and cancellation often happen. As soon as the cause of delay is moved, the flight recovery should be started immediately. Hence, the high efficiency of model building and solving is vital for optimal recovery. After systematically and briefly reviewing the airline recovery researches, the paper presents a aircraft and crew integrated recovery mathematical model. Through constructing feasible aircraft routings and crew pairings used as input, the model is solved in reasonable time. In order to construct feasible aircraft routings and crew pairings, a unique algorithm is designed which is so called recursive algorithm and pairing storage tree. By extending the tree branches, the flight is connected one by one. In order to further shorten solving time, the flight data are preprocessed via recognizing disrupted and undisrupted flights. Only disrupted flights are used in computation. By doing so, the solving speed is increased and the disrupted flights are decreased. Experimental computation result shows that the integrated recovery is better than sequential separate recovery in optimality and computation time, and it can be used in small or medium size airline recovery.

**Key words:** airline recovery; aircraft recovery; crew recovery; operations optimization; heuristic algorithm

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20151479)资助项目。

收稿日期: 2015-07-01; 修订日期: 2015-07-15

作者简介: 乐美龙, 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 航班优化恢复, 舱位控制与营收管理及运输系统优化等。

通信作者: 乐美龙, E-mail: lemeilong@126.com。

由于天气、机场容量、航路交通流量、军事活动、飞机故障、机组人员和旅客缺位等因素影响,航班推迟甚至取消经常发生。据报道,2014年,中国全民航系统航班正常率只有68%,重要机场的航班正常率只有40%左右。每航班的平均延误时间超过1 h。航班一旦发生延误和取消,不仅让航空公司蒙受巨额经济损失,同时对机场、空管等相关方的平稳运作,尤其是对旅客的出行造成不便。有些长延误航班甚至已经影响到了社会的安定。为此,开展航空公司航班的优化恢复研究十分必要。

## 1 研究综述

Jedlinsky<sup>[1]</sup>大概是最早开展航班优化恢复研究的学者。自此之后,从飞机、机组、旅客单一资源恢复到双资源整合恢复,再到飞机、机组、旅客整体恢复,开展了一系列研究。

### 1.1 飞机优化恢复研究

Teodorovic等<sup>[2]</sup>是早期致力于解决飞机恢复问题的学者。文献<sup>[2]</sup>在考虑不增加飞机原有数量的前提下,建立了最小化乘客延误总时间的数学模型,并采用分支定界法进行了求解。但其只考虑航班的交换和延误,没有将航班取消纳入模型。

台湾学者Yan和Yang<sup>[3]</sup>的研究则着眼于在飞机故障情况下为调度员开展飞机恢复建立一个基本模型框架。通过改变目标函数或边界约束来修改模型。该模型与前人最大不同在于引入了调机策略。

Kanafani<sup>[4-5]</sup>首次采用了时空网络。他们将飞机恢复问题转换为一个时空网络模型。时空网络的应用还出现在Bard等<sup>[6]</sup>对飞机短缺情况的研究中。

Arguello等<sup>[7]</sup>是研究飞机恢复的集大成者,其研究开启了应用启发式算法解决该问题的先河。文献<sup>[7]</sup>提出了应用贪婪随机自适应搜索算法(Greedy randomized adaptive search procedure, GRASP)解决在飞机短缺情况下的飞机重指派问题,同时将飞机流量平衡纳入约束考虑范围。2000年,Thengvall等<sup>[8]</sup>提出在目标函数中考虑航空公司调度人员的偏好,在此基础上建立同时考虑延误和取消策略并带边界约束的网络模型。当无法获得整数解时,通过线性松弛得到最优解或次优解。2001年,Thengvall等<sup>[9]</sup>将单一机队扩展到多机队,对在枢纽机场关闭这种航班中断程度较为严重时的飞机恢复问题进行了研究,提出了3个多商品流网络模型。3个模型均考虑延误、取消和调机策

略。前两个为纯网络模型,以最大化航空公司的利润为目标;最后一个为离散时空网络模型,以最小化延误成本和取消成本为目标。通过比较求解时间和解的质量,证明第一个模型明显优于其他两个模型。2003年,Thengvall等<sup>[10]</sup>设计了集束方法来解枢纽机场关闭问题。

Rosenberger<sup>[11]</sup>及Bisailon<sup>[12]</sup>分别提出了飞机选择启发式算法和大规模邻域搜索启发式算法来解决此问题。Rosenberger的贡献还在于将飞机恢复问题视为带有时间窗和时槽的集覆盖问题。最新的研究是Hua和Froyland的研究。Hua等<sup>[13]</sup>在重新安排航班时,考虑了旅客换乘所需时间。Froyland等<sup>[14]</sup>则将恢复研究从“事后”转为“事前”,通过建立易恢复的飞机鲁棒指派来简化飞机恢复。

在中国国内,也有不少学者开展了飞机恢复研究。朱金福在《航空运输规划》里系统阐述了航空运输规划和恢复问题,是目前中国国内少有的详细介绍航空运输规划的著作。与其有异曲同工之妙的是由邵龙等翻译的《航空公司运营规划与管理》一书。后者对航空公司不正常运营中飞机恢复问题作了较为详尽的案例分析。

姚韵<sup>[15]</sup>在其博士论文中,针对航班计划和飞机恢复问题,建立了时空网络模型,并设计了一种基于路径置换的调度算法,文章考虑了单航班、多航班及多机型置换情况。通过算例证明了该算法的有效性、可优性及可控性。唐小卫等<sup>[16]</sup>就飞机恢复问题考虑了飞机流不平衡,设计了贪婪模拟退火算法。赵秀丽等<sup>[17]</sup>提出了逐延误指派算法。白凤等<sup>[18]</sup>则采用列生成算法来解决该问题。笔者课题组也对飞机恢复问题进行了一定的研究<sup>[19-20]</sup>。

### 1.2 机组优化恢复研究

机组优化恢复,简称机组恢复。在该研究领域,Johnson等<sup>[21]</sup>起到了很好的引领作用。文献<sup>[21]</sup>中讨论了解决单一机组恢复问题的数学模型和方法。之后,Wei等<sup>[22]</sup>提出了一个多商品网络流模型,采用深度优先搜索算法求解。为了提高求解效率,算法对修改机组配对的数量、受影响的航班数量进行了限制。该算法更加灵活,更能满足航空公司的需求。

Lettovsky等<sup>[23]</sup>设计并实施了一种全新的机组恢复解决框架。该框架的核心在于应用预处理技术提取原航班计划中的受扰子集,重新指派给机组,并利用“机组配对产生器”枚举可行机组。

Yu等<sup>[24]</sup>为美国大陆航空公司开发了机组优

化器决策支持系统,该系统可产生全局最优或局部最优的机组恢复方案。利用该系统,美国大陆航空公司据称一年可以节约大约4000万美元的运营成本。同样,Abdelghany等<sup>[25]</sup>为采用轴辐式航线网络的航空公司设计了机组恢复决策工具。该决策支持工具按航班出发顺序采用滚动方法指派机组。

Guo等<sup>[26]</sup>设计了机组恢复的遗传算法,将受中断的机组看作进化过程,同时为了提高收敛性,将局部提高方法应用其中。Guo<sup>[27]</sup>在其博士论文中将机组恢复问题视为集分割问题,在目标函数中为机组不按原配对执行任务设定惩罚值,在求解算法加入了列生成算法。

Nissen等<sup>[28]</sup>专门针对欧洲航空公司的需求提出了基于执勤期的机组重调度模型,可应用于不同程度的中断场景。模型采用分枝定价法求解。

国内单纯研究机组问题的较少,赵秀丽等<sup>[29]</sup>建立机组重调度问题的约束规划模型,并用ILOG优化器和模拟退火算法、禁忌搜索算法进行了求解。笔者所在的课题组也从不同的角度开展了一些研究<sup>[30-32]</sup>。

专门的旅客行程恢复的研究相对较少。开展的研究大多是从营收管理的角度出发的。此时,旅客的行程恢复一般视为多商品网络流问题,以最大化旅客行程的恢复。

### 1.3 航班整合优化恢复研究

航班整合优化恢复,简称整合恢复,是同时考虑飞机、机组、旅客中的二者或三者的恢复。其中,以飞机、机组二者的整合恢复研究为多。

Teodorovic等<sup>[33]</sup>是较早开展整合恢复研究的学者。文献<sup>[33]</sup>采用字典式优化技术建立航班计划一体化恢复模型,将飞机航线、飞机维修、机组配对全部纳入考虑范畴。求解时依照目标优先级依次进行优化。优化顺序依次为最小化取消的航班数、最小化乘客的延误时间。

Lettovsky等<sup>[34]</sup>提出的综合恢复模型涉及飞机、机组和乘客三者。文章的重点在于机组的恢复。除了将机组成员作为一个整体看待外,还扩展到机组人员分割情况,即将机组分为飞行人员和乘务人员进行恢复。尽管该文提出了飞机、机组、乘客一体恢复的框架及Benders分解求解方案,但文章没有实际求解。

Abdelghany等<sup>[35]</sup>为航空公司整合恢复提供了一项航班表恢复工具DSTAR,旨在对飞机和机组进行集成恢复操作。DSTAR集成了航班表仿真模型和资源分配优化模型。首先由航班表仿真

模型模拟航班运行,列出受干扰的航班,其次资源分配优化模型测试可能的资源交换和航班重排,以生成使得航班延误和取消最少的恢复计划。

Petersen等<sup>[36]</sup>是综合恢复的集大成者,包括飞机、机组和乘客行程恢复及在此基础上的航班表恢复。文章建立了统一的恢复模型SRM,然后采用Benders分解,将问题分解为3个子问题模型,即ARM,CRM和PRM,形成以SRM主问题及5种类型的Benders分解割,即ARM可行割、CRM可行割、CRM优化割、PRM可行割及PRM优化割。文章开展了缩减规模的实际问题的优化求解。

近期,不少学者开始从计划航班表本身的鲁棒性来考虑航班恢复问题。通过增加航班表的鲁棒性,来达到航班抗干扰能力。如Dunbar等<sup>[37]</sup>提出的基于典型场景的飞机、机组鲁棒调度。

国内对于整合恢复的研究主要有:

周志忠<sup>[38]</sup>在其博士论文中也提出了与Lettovsky<sup>[34]</sup>相同的实时一体化恢复框架,包含航班计划、飞机、机组、旅客行程,并设计了伪并行遗传算法。但文章并没有对具体算例进行分析和验证。

刘德刚<sup>[39]</sup>将资源分配模型和时空离散网络模型结合起来,在求解算法上提出了飞机航班恢复的列生成算法和机组恢复问题的迭代式方法,得到的满意解容易估计与最优解下界的差距。由于所用算例规模较小,也没有利用国内的数据,因此无从知晓该模型和算法是否适合中国航空公司的实际需要。

赵秀丽等<sup>[40]</sup>以航空公司人工恢复为参照,采用最小化航班延误和取消成本为目标,对航班恢复进行了比较系统的研究。由于采用了启发式算法,模型的求解速度大大提高。

笔者所在的课题组对整合恢复也进行了一定的研究<sup>[41-42]</sup>。

本文在上述研究基础上,重点对飞机、机组整合复原进行了进一步探索。模型采用一体化建模。在模型的求解上,采用分解分步策略,即分别采用配对存储树和递归算法在缩减集合内确定机组、飞机指派可行集,再进行优化求解。

## 2 飞机和机组整合优化恢复模型

### 2.1 符号定义

(1)集合

$H$ :飞机集合, $h \in H$ ;

$R$ :可行的飞行路线, $r \in R$ ;

$F$ :航班集合, $f \in F$ ;

$K$ : 机组集合(包括备份机组),  $k \in K$ ;

$P$ : 可行的机组任务,  $p \in P$ ;

$Q$ : 航班衔接集合,  $q \in Q$ ;

$S$ : 机场集合,  $s \in S$ ;

$S^{\text{maint}}$ : 维修机场集合,  $S^{\text{maint}} \in S$ ;

$S^{\text{close}}[t_1, t_2]$ : 在时间窗  $[t_1, t_2]$  内关闭的机场集合,  $S^{\text{close}} \in S$ ;

$\text{TH}^{\text{def}}[t_1, t_2]$ : 飞机故障时间窗;

(2) 参数

$c_{rh}$ : 指派路线  $r$  给飞机  $h$  的成本;

$c_{pk}$ : 指派配对  $p$  给机组  $k$  的成本;

$c_f$ : 取消航班  $f$  的成本;

$d_f$ : 航班  $f$  的加机组成本;

$a_{pf}$ : 当配对  $p$  包含航班  $f$  时等于 1, 否则等于 0;

$b_{rf}$ : 当路线  $r$  包含航班  $f$  时等于 1, 否则等于 0;

$p_f$ : 航班  $f$  上的旅客人数;

$c_{df}$ : 航班  $f$  的延误时间;

$c_{hf}$ : 飞机  $h$  执行航班  $f$  的费用;

$c_{kf}$ : 机组  $k$  执行航班  $f$  费用;

$NB_s$ : 必须在机场  $s$  过夜的飞机数;

$s_f$ : 航班  $f$  的加机组的个数;

(3) 决策变量

$$y_f = \begin{cases} 1 & \text{航班 } f \text{ 被取消} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$x_{pk} = \begin{cases} 1 & \text{配对 } p \text{ 指派给机组 } k \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\omega_{rh} = \begin{cases} 1 & \text{路线 } r \text{ 指派给飞机 } h \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$v_{rs} = \begin{cases} 1 & r \text{ 的尾航班机场为 } s \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\varphi_{r,s} = \begin{cases} 1 & \text{路线 } r \text{ 中包含有航班经过} \\ & \text{维修机场 } s, s \in S^{\text{maint}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\theta_{r,s} = \begin{cases} 1 & \text{路线 } r \text{ 中包含有航班经过} \\ & \text{机场 } s, s \in S^{\text{close}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$\eta_{r,t} = \begin{cases} 1 & \text{如果路线 } r \text{ 中有航班的预计出} \\ & \text{发时间 } t \text{ 在飞机故障时间窗} \\ & \text{TH}^{\text{def}}[t_1, t_2] \text{ 内} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

## 2.2 数学模型

飞机和机组指派成本最小为

$$\begin{aligned} \text{minimize} & \sum_{r \in R} \sum_{h \in H} c_{rh} \omega_{rh} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} c_{pk} x_{pk} + \\ & \sum_{f \in F} c_f y_f + \sum_{f \in F} d_f s_f \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{式中: } c_{rh} = \sum_{f \in r} b_{rf} c_{hf} + \sum_{f \in r} c_{df} p_f, \forall h \in H;$$

$$c_{pk} = \sum_{f \in p} a_{pf} c_{kf} + \sum_{f \in p} c_{df} p_f, \forall k \in K; c_f = 480 p_f。$$

为保证每一个航班被一架飞机、一个机组覆盖, 否则取消, 有

$$\sum_{r \in R} \sum_{h \in H} b_{rf} \omega_{rh} + y_f = 1 \quad \forall f \in F \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} a_{pf} x_{pk} + y_f - s_f = 1 \quad \forall f \in F \quad (3)$$

为保证每一架飞机被指派一条路线, 有

$$\sum_{r \in R} \omega_{rh} = 1 \quad \forall h \in H \quad (4)$$

为保证每一个机组指派一个配对, 有

$$\sum_{p \in P} x_{pk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

为确保前后两个航班衔接时间过短时, 机组衔接不改变飞机的航班衔接, 有

$$\sum_k \sum_p q a_{pf} - \sum_h \sum_r q b_{rf} \leq 0 \quad \forall q \in Q, f \in F \quad (6)$$

各机场须停驻一定的飞机以保证第二天的飞行计划, 有飞机流量平衡约束

$$\sum_{r \in R} v_{rs} = NB_s \quad \forall s \in S \quad (7)$$

为保证有维修要求的飞机停驻有维修资格的机场, 有飞机维修约束

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S^{\text{maint}}} \varphi_{rs} \omega_{rh} = 1 \quad \forall h \in H \quad (8)$$

为保证在机场关闭的情况下, 无航班的起降, 有机场关闭约束

$$\sum_{r \in R} \sum_{h \in H} \theta_{rs} \omega_{rh} = 0 \quad \forall s \in S^{\text{close}}[t_1, t_2] \quad (9)$$

为保证飞机故障期间该飞机无起降任务, 有飞机故障约束

$$\sum_{r \in R} \sum_{h \in H} \eta_{rt} \omega_{rh} = 0 \quad \forall t \in \text{TH}^{\text{def}}[t_1, t_2] \quad (10)$$

式(11~15)代表变量取值约束

$$x_{pk} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, k \in K \quad (11)$$

$$y_f \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F \quad (12)$$

$$\omega_{rh} \in \{0, 1\} \quad \forall r \in R, h \in H \quad (13)$$

$$y_f \in \{0, 1\} \quad \forall f \in F \quad (14)$$

$$s_f = \{0, 1, 2, \dots\} \quad \forall f \in F \quad (15)$$

## 3 模型求解

为了采用优化器来求解上述模型, 首先要确定可行的机组配对和可行的飞机飞行路径, 即确定  $a_{pf}$  和  $b_{rf}$ 。这两个变量的求取是问题的关键。文中,  $a_{pf}$  的求取采用配对存储树方法,  $b_{rf}$  的求取采用递归算法。

### 3.1 配对存储树算法

首先,为每个机组构造树。在这棵树中,节点表示机场,边表示航班,每棵树的路径代表了该机组的可行配对。构造每种干扰场景下的机组的可行配对时,需要考虑机组的合法性。具体配对存储步骤如下:

Step 1 以每个机组  $k$  原配对中的首航班出发机场为根结点。

Step 2 构造第一层结点,即从根结点出发的航班的目的机场,并连接根结点到第一层结点,标注航班号。按此方法,依次构造第二层到第  $N$  层结点。第  $N$  层结点即为叶结点,是尾航班的目的机场。

Step 3 从根结点到每一叶结点在满足以下约束条件下,都能成为机组的可行配对:每个叶结点所代表的机场需与机组基地机场(即一天结束后,机组过夜停留的机场)相同;从根结点到叶结点,机组的飞行时间不能超过 8 h;配对的尾航班到达时间不能超过宵禁时间;机组执行非原始配对时,延误时间不能超过最大延误时间;机组执行两个连续航班时,等待衔接时间不小于 30 min。

Step 4 针对每种干扰场景,删除不满足以上条件的叶结点。

Step 5 构造出每个机组的可行配对。可行配对中最小 2 层,最大  $N$  层。

本文求解中,针对一天周期, $N$  取为 4。

### 3.2 递归算法

将航班作为结点,每个结点记录航班的出发地、目的地、离港时间、到港时间、飞行时间、旅客人数及平均票价等信息。

Step 1 以每架可用飞机即将执行的航班作为根结点  $f_1$ ,将  $f_1$  的后续航班放入集合  $F$  中。

Step 2 遍历集合  $F$  中的航班。如果  $f_2$  的到达机场与  $f_1$  相同,且  $f_1$  出发时间+最小过站时间小于  $f_2$  的出发时间,放入集合  $F_1(f_2, f_3, \dots, f_n)$  中;如果机场相同,但  $f_1$  出发时间+最小过站时间大于  $f_2$  的出发时间,则更改航班  $f_2$  的起飞时间为  $f_1$  出发时间+最小过站时间, $f_2$  的到达时间等于更新后的  $f_2$  的起飞时间加飞行时间,将该航班加入到集合  $F_1$  中,更新集合  $F_1$ 。

Step 3 如果 Step 2 中两种情况均不满足,则返回至 Step 1。集合  $F_1$  中的航班即为航班树中的第一层叶结点,遍历  $F_1$  中与该飞机过夜机场相同的航班,检查如下条件是否满足:计算延误时间及飞机总的飞行时间,判断总延误时间是否超最大允

许延误时间,总飞行时间是否超过最大允许飞行时间,如超过,则删除该航班,将满足条件的航班放入集合  $F_2$ ,并进入 Step 4。

Step 4 集合  $F_2$  中的航班即为航班树中的第二层叶结点,依上述步骤依次遍历,直到条件不满足,则返回。

Step 5 检索从根结点到每一层叶结点的航班,即为该飞机的所有可行路径。

### 3.3 计算数据的预处理

飞机和机组的整合恢复所涉及的变量和约束较多,问题的规模和复杂程度远远高于单资源恢复。在大多数中断场景下,航线网络中并非所有的资源都受到影响。通过过滤掉未受影响的资源,可以减少计算规模,提高求解效率。即给定一个中断时间范围,模型求解中仅考虑受扰航班的集合,仅仅它们作为调整对象纳入计算中。这样虽然未能在更大范围内获得优化解,但却能够在合理时间内获得优化解,且符合对原航班干扰最小原则。

## 4 算例分析

本模型的算例假定为一周期,即飞机、机组一天的飞行任务结束后须回到各自的维修机场和基地。假定飞机在两个航班的衔接时间不得少于 40 min,机组周转时间不得少于 30 min。同时飞机的日利用率,按民航业平均水平,一天飞行不超过 10 h,机组每天的执勤时间不超过 8 h。机组可以采用加机组,飞机则必须保持流量平衡,即飞机在每一机场过夜数必须与计划一致。

### 4.1 小规模案例测试

算例数据首先通过识别受扰与否进行缩小规模预处理。处理后,总共涉及 5 架飞机,23 个航班,9 个机组,9 个机场。飞机信息、机组信息及航班信息见表 1。表中第一列至第十列分别为机组号、航班号、出发机场、到达机场、出发时间、到达时间、飞行时间、旅客人数、机尾号及平均票价。测试干扰场景为飞机 5145 在 7:40 时检查出故障,无法在 8:10 就绪,预计到 14:30 可以恢复运行。

运用上述方法,总共生成 125 条可行的飞机路径,104 个可行的机组配对,这里仅列出机组 C1 的可行配对和飞机尾号为 2498 的可行路径。计算结果如表 2,3 所示。表格从左往右依次为编号、配对或路径编号、总飞行时间及累计延误时间。加粗的数字为受到延误的航班。

表1 原始排班表

Tab. 1 Original scheduling table

Crew	Flt. No	DStat	AStat	STD	STA	Flt. time/min	Pax	Tail No.	V/元
C1	1	SHA	TSN	8:15	9:45	90	74	2498	630
	2	TSN	SZX	12:40	14:50	130	70	2498	1 050
	3	SZX	SHA	15:30	17:30	120	82	2498	840
C2	4	SHA	FOC	8:30	9:40	70	80	2570	490
	5	FOC	TSN	12:55	14:40	105	94	2570	735
	6	TSN	SHA	15:40	17:10	90	63	2570	630
C3	7	CAN	NKG	8:50	10:50	120	96	2850	840
	8	NKG	CAN	12:00	14:00	120	81	2850	840
C4	9	CAN	XMN	15:35	16:45	70	91	2850	490
	10	XMN	CAN	18:00	19:10	70	83	2850	490
C5	11	SHA	SZX	8:10	10:10	120	78	5145	840
	12	SZX	SHA	11:00	13:00	120	98	5145	840
	13	SHA	CAN	14:30	16:35	125	84	5145	875
C6	14	CAN	SHA	17:30	19:35	125	72	5145	875
	15	SHA	TAO	20:40	21:50	70	68	5145	490
	16	TAO	SHA	22:30	23:40	70	81	5145	490
C7	17	CAN	SHA	8:10	10:15	125	74	5393	875
	18	SHA	TSN	13:50	15:20	90	64	5393	630
	19	TSN	SHA	14:30	16:00	90	65	5393	630
C8	20	SHA	XMN	19:00	20:30	90	86	2570	630
	21	XMN	SHA	21:30	23:00	90	70	2570	630
C9	22	SHA	TAO	17:30	19:35	125	89	5393	875
	23	TAO	PEK	20:30	22:35	125	97	5393	875

表2 初级C1的可行配对

Tab. 2 Feasible pairing of C1

No.	Pairing	Flt. time/min	Accu. delaytime/min	No.	Pairing	Flt. time/min	Accu. delaytime/min
1	1-6	180	0	24	1-19-22-16	375	0
2	1-19	180	0	25	11-3-15-16	380	0
3	11-3	240	0	26	11-3-20-21	420	0
4	11-12	240	0	27	11-3-22-16	435	30
5	13-14	250	0	28	11-12-13-14	490	0
6	15-16	140	0	29	11-12- <del>15</del> -16	380	0
7	18-6	180	0	30	11-12-18- <del>6</del>	420	190
8	18-19	180	0	31	11-12- <del>18-19</del>	420	260
9	20-21	180	0	32	11-12-20-21	420	0
10	22-23	195	0	33	11-12-22-16	435	0
11	1-2-3	340	0	34	13-9-10- <del>14</del>	390	130
12	1-2-12	360	0	35	13-14-15-16	390	0
13	4-5-6	265	0	36	13-14- <del>20-21</del>	430	100
14	4-5-19	265	0	37	13-14- <del>22-16</del>	445	165
15	13- <del>9</del> -21	285	90	38	18-6- <del>13-14</del>	430	355
16	18- <del>2-3</del>	340	210	39	18-6-15-16	320	0
17	1-6- <del>13-14</del>	430	250	40	18-6-20-21	360	0
18	1-6-15-16	320	0	41	18-6-22-16	375	0
19	1-6- <del>20</del> -21	360	0	42	18-19- <del>13-14</del>	430	215
20	1-6- <del>22-16</del>	375	10	43	18-19-15-16	320	0
21	1-19- <del>13-14</del>	430	215	44	18-19-20-21	360	0
22	1-19-15-16	320	0	45	18-19-22-16	375	0
23	1-19-20-21	360	0				

表 3 飞机尾号 2498 的可行路径  
Tab. 3 Feasible route of Tail No. 2498

No	Route	Flt. time/min	Accu. delaytime/min	No.	Route	Flt. time/min	Accu. delaytime/min
1	1-6	180	0	42	18-19- <b>13-14</b>	430	245
2	1-19	180	0	43	18-19-15-16	320	0
3	11-3	240	0	44	18-19-20-21	360	0
4	11-12	240	0	45	18-19-22-16	375	0
5	13-14	250	0	46	1-2-3-15-16	500	0
6	15-16	140	0	47	1-2-3- <b>18-6</b>	520	540
7	18-6	180	0	48	1-2-3- <b>18-19</b>	520	610
8	18-19	180	0	49	1-2-3-20-21	520	0
9	20-21	180	0	50	1-2-3-22-16	535	0
10	22-16	195	0	51	1-2- <b>12</b> -15-16	480	150
11	1-2-3	340	0	52	1-2- <b>12-18-6</b>	520	670
12	1-2-6	340	0	53	1-2- <b>12-18-19</b>	520	510
13	4-5-6	265	0	54	1-2- <b>12</b> -20-21	520	150
14	4-5-19	265	0	55	1-2- <b>12</b> -22-16	535	150
15	13- <b>9</b> -21	285	100	56	1-6- <b>13-9-21</b>	465	555
16	18- <b>2-3</b>	340	240	57	1-19- <b>13-9</b> -21	465	360
17	1-6-13-14	430	385	58	4-5-6- <b>13-14</b>	515	385
18	1-6-15-16	320	0	59	4-5-6-15-16	405	0
19	1-6-20-21	360	0	60	4-5-6- <b>18-19</b>	445	510
20	1-6- <b>22-16</b>	375	20	61	4-5-6-20-21	445	0
21	1-19- <b>13-14</b>	430	245	62	4-5-6-22-16	460	0
22	1-19-15-16	320	0	63	4-5- <b>19-13</b> -14	515	245
23	1-19-20-21	360	0	64	4-5- <b>19</b> -15-16	405	50
24	1-19-22-16	375	0	65	4-5- <b>19-18-6</b>	445	650
25	11-3-15-16	380	0	66	4-5- <b>19</b> -20-21	445	50
26	11-3-20-21	420	0	67	4-5- <b>19</b> -22-16	460	50
27	11-3-22-16	435	40	68	11-3- <b>13-9-21</b>	525	543
28	11-12-13-14	490	0	69	11-12- <b>4-5-14</b>	540	610
29	11-12-15-16	380	0	70	11-12-13- <b>9</b> -21	525	100
30	11-12-18- <b>6</b>	420	220	71	11-12- <b>18-2-3</b>	600	400
31	11-12- <b>18-19</b>	420	290	72	18- <b>2-3</b> -15-16	480	240
32	11-12-20-21	420	0	73	18- <b>2-3-20</b> -21	520	270
33	11-12-22-16	435	0	74	18- <b>2-3-22</b> -16	535	360
34	13-9-10- <b>14</b>	390	140	75	18- <b>2-12</b> -15-16	480	470
35	13-14-15-16	390	0	76	18- <b>2-12-20</b> -21	520	500
36	13-14- <b>20-21</b>	430	130	77	18- <b>2-12</b> -22-16	535	590
37	13-14- <b>22-16</b>	445	195	78	18-6- <b>13-9</b> -21	465	500
38	18-6- <b>13-14</b>	430	385	79	18-6-20- <b>10-14</b>	465	450
39	18-6-15-16	320	0	80	18-19- <b>13-9</b> -21	465	360
40	18-6-20-21	360	0	81	18-19-20- <b>10-14</b>	465	450
41	18-6-22-16	375	0				

将上述结果作为优化模型的输入,利用 LINGO 优化器进行求解。最终的恢复方案如表 4 所示。表中从左至右依次为:机尾号、机组号、航班号、出发机场、到达机场、出发时间、到达时间及延误时间。

如果采取顺延方案,11 号航班一直延误到飞机 5145 排除故障后 14:30 起飞,后续 12~14 号航班依次顺延,将造成累计 1 335 min 的延误,此外 14 航班的到达时间将超过宵禁限制。经整合优化恢复后的结果只需延误 4 个航班,累计延误时间

610 min, 没有取消航班, 备份机组及加机组个数为 0, 在 Pentium (R) Dual-core, 2.30 GHz, 2 GB RAM 计算机上计算时间为 7 s, 总共迭代次数 620 次, 总成本为 45 490 元, 成本减少 34.38%。

表 4 小规模案例详细恢复方案

Tab. 4 Recovery plan of small-scale case

Tail No.	Crew	Flt. No.	DStat	AStat	STD	STA	Delaytime/min
2498	C2	4	SHA	FOC	8:30	9:40	0
2498	C2	5	FOC	TSN	12:55	14:40	0
2498	C6	6	TSN	SHA	16:30	18:00	50
2498	C8	20	SHA	XMN	19:00	20:30	0
2498	C8	21	XMN	SHA	21:30	23:00	0
2570	C5	11	SHA	SZX	8:10	10:10	0
2570	C5	12	SZX	SHA	11:00	13:00	0
2570	C6	18	SHA	TSN	13:50	15:20	0
2570	C1	2	TSN	SZX	16:00	18:10	200
2570	C1	3	SZX	SHA	18:50	20:50	200
2850	C4	7	CAN	NKG	8:50	10:50	0
2850	C4	8	NKG	CAN	12:00	14:00	0
2850	C3	9	CAN	XMN	15:35	16:45	0
2850	C3	10	XMN	CAN	18:00	19:10	0
5145	C5	13	SHA	CAN	14:30	16:35	0
5145	C7	14	CAN	SHA	17:30	19:35	0
5145	C7	15	SHA	TAO	20:40	21:50	0
5145	C7	16	TAO	SHA	22:30	23:40	0
5393	C6	17	CAN	SHA	8:10	10:15	0
5393	C1	1	SHA	TSN	10:55	12:25	160
5393	C2	19	TSN	SHA	15:20	16:50	50
5393	C9	22	SHA	TAO	17:30	19:35	0
5393	C9	23	TAO	PEK	20:30	22:35	0

## 4.2 整合恢复与分阶段恢复的比较

为了检验整合恢复的效果, 本文进行了大规模算例的计算试验。大规模算例采用了 70 架飞机, 387 个航班, 83 个机组, 覆盖 30 个机场。其中 6 个

机场有飞机维护资质且为机组基地机场。假定飞机故障数 10 架, 存在关闭时段的机场数 13 个(限于篇幅, 具体数据略)。在相同的假设条件、相同的系数下进行计算, 得到计算结果如表 5 所示。

表 5 整合恢复与分阶段恢复对比

Tab. 5 Comparison between integrated recovery and sequential recovery

恢复方法	累计延误/min	延误航班/个	取消航班/个	可行飞机路径	可行机组配对	加机组	运行时间/s	总成本/元
整合恢复	983	22	5	16 430	13 241	17	942	119 290
分阶段恢复	1 645	42	11	—	—	12	1 690	213 720

表 5 中, 延误时间超过 4 h 的航班作为取消航班。从表 5 可见, 整合恢复较之飞机、机组的分阶段恢复提升效果明显。

## 5 结束语

本文通过设计专门的启发式算法来构建飞机恢复和机组恢复的可行路径和可行配对, 在此基础上, 再对建立的优化模型在缩减的集合内使用优化

器求解, 在合理的时间内, 得到了整合恢复的优化解。计算试验表明, 该方法较之飞机、机组的分阶段优化恢复, 恢复效果和计算时间有明显的改善, 可用于航空公司中小规模的航班恢复。

值得指出的是, 为了开展建模求解, 文章对有关约束进行了一定的简化, 对模型涉及的系数的确定主要依赖经验数据, 没有开展深入的调研, 这在一定程度上可能会改变优化的结果。同时, 随着服



务意识的加强,乘客旅程恢复将被置于更加重要的位置,综合考虑飞机、机组、旅客的一体化恢复势在必行。这些将成为下一阶段的主要研究方向。

#### 参考文献:

- [1] Jedlinsky D C. The effect of interruptions on airline schedule control[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1967.
- [2] Teodorovic D, Gubernic S. Optimal dispatching strategy on and airline network after a schedule perturbation[J]. European Journal of Operations Research, 1984, 216(15): 178-182.
- [3] Yan S, Yang D. A decision support framework for handling schedule perturbations [J]. Transportation Research, Part B: Methodology, 1996, 61(30): 405-419.
- [4] Kanafani C J. A real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays, Part I [J]. Transportation Planning and Technology, 1997, 20(5):183-199.
- [5] Kanafani C J. A real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays, Part II: Algorithms and computational experiments [J]. Transportation Planning and Technology, 1997, 20(6):201-217.
- [6] Bard J, Yu G. Optimizing aircraft routing in response to groundings and delays[J]. IIE Transaction, 2001, 33(6):931-947.
- [7] Arguello M F, Bard J F, Yu G. A GRASP for aircraft routing in response to groundings and delays [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 1997, 1997(5):211-228.
- [8] Thengvall B G, Bard J F, Yu G. Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations[J]. IIE Transaction on Operations Engineering, 2000, 32(3):181-193.
- [9] Thengvall B G, Bard J F, Yu G. Multiple fleet aircraft schedule recovery following hub closures[J]. Transportation Research, Part A, 2001, 64(35):289-308.
- [10] Thengvall B G, Bard J F, Yu G. A Bundle algorithm approach for the aircraft schedule recovery problem during hub closures [J]. Transportation Science, 2003, 37(4):392-407.
- [11] Rosenberger J, Johnson E, Nemhauser G. Rerouting aircraft for airline recovery[J]. Transportation Science, 2003, 37(40):408-421.
- [12] Bisailon S, Cordeau J F, Laporte G, et al. A large neighborhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem[J]. Journal of Operations Research, 2011, 9(2):139-157.
- [13] Hua Y, Xu B, Bard J F, et al. Optimization of multi-fleet aircraft routing considering passenger transiting under airline disruption[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 75(80): 132-144.
- [14] Froyland G, Maher S J, Wu C-L. The recoverable robust tail assignment problem[J]. Transportation Science, 2014, 48(3):351-372.
- [15] 姚韵. 航空公司不正常航班管理和调度算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.
- [16] 唐小卫, 朱金福, 高强. 流不平衡条件下飞机恢复的优化模型与算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(4):793-796.  
Tang Xiaowei, Zhu Jinfu, Gao Qiang. Research on optimization model and algorithm of unbalanced aircraft recovery[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(4):793-796.
- [17] 赵秀丽, 朱金福, 郭梅. 不正常航班延误调度模型及算法[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(4):129-134.  
Zhao Xiuli, Zhu Jinfu, Guo Mei. Study on modelling and algorithm of irregular flight delay operation[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008, 28(4):129-134.
- [18] 白凤, 朱金福, 高强. 基于列生法的不正常班调度[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(11): 2036-2045.  
Bai Feng, Zhu Jinfu, Gao Qiang. Disrupted airline schedules dispatching based on column generation methods[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(11): 2036-2045.
- [19] 乐美龙, 马彬. 基于时间段网络模型的飞机路线恢复研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12):63-68.  
Le Meilong, Ma Bin. Study on aircraft routing recovery based on time-band network model[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(12):63-68.
- [20] Wu Congcong, Le Meilong. A new approach to solve aircraft recovery problem[C]// INFOCOMP 2012, The Second International Conference on Advanced Communications and Computation. Italy, Venice: RARIA, 2012, 148-154.
- [21] Johnson E, Lettovsky L, Nemhauser G, et al. Final report to Northwest Airlines on the crew recovery problem[R]. infocomp\_2012\_8\_30\_10133. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology for CRP, 1994.
- [22] Wei G, Yu G, Song M. Optimization model and algorithm for crew management during airline irregular operations[J]. Journal of Combinatorial Optimiza-

- tion, 1997, 1(3):305-321.
- [23] Lettovsky L, Johnson E, Nemhauser G. Airline crew recovery[J]. *Transportation Science*, 2000, 34(4): 337-348.
- [24] Yu Gang, Arguello M, Song G, et al. A new era for crew recovery at continental airline[J]. *Interfaces*, 2003, 33(1), 5-22.
- [25] Abdelghany A, Ekollu G, Narasimhan R, et al. A proactive crew recovery decision support tool for commercial airlines during irregular operations[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 127(1/2/3/4):309-331.
- [26] Guo Y. Solving the airline crew recovery problem by a genetic algorithm with local improvement[J]. *An International Journal of Operational Research*, 2005, 5(2):241-259.
- [27] Guo Y. Decision support systems for airline crew recovery in economics and business computing[D]. Paderborn, Germany: University of Paderborn, 2005.
- [28] Nissen R, Haase K. Duty-period-based network model for crew rescheduling in European airlines[J]. *Journal of Schedule*, 2006, 9(3):255-278.
- [29] 赵秀丽, 朱金福, 黄勇辉. 航空公司机组重调度问题建模和算法研究[J]. *广西大学学报: 自然科学版*, 2011, 36(2):303-307.  
Zhao Xiuli, Zhu Jinfu, Huang Yonghui. Study on hybrid optimal algorithm for crew rescheduling in airline[J]. *Journal of Guangxi University: Nat Sci Ed*, 2011, 36(2): 303-307.
- [30] 乐美龙, 李贞. 基于深度优先搜索算法的机组复原研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2012, 34(9): 63-68.  
Le Meilong, Li Zhen. Solving the crew recovery problem by depth first search[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(9): 63-68.
- [31] Le Meilong, Sun Lihong. Optimal airline crew recovery considering flight time constraint and pairing rule [C]// 2011 International Conference on Transportation and Mechanical & Electrical Engineering (TMEE 2011). Changchun:[s. n. ], 2011: 24-31.
- [32] 乐美龙, 黄文秀. 基于时空网络的航班机型分配问题研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(1):81-87.  
Le Meilong, Huang Wenxiu. Airline fleet assignment model based on time-space network[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(1):81-87.
- [33] Teodorovic D, Stojkovic G. Model to reduced airline schedule disturbances[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1995, 121(4): 324-331.
- [34] Lettovsky L. Airline operations recovery: an optimization approach [D]. USA, Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1997.
- [35] Abdelghany K F, Abdelghany A F, Ekollu G. An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(3): 825-848.
- [36] Petersen J D, Clarke J P, Johnson E, et al. An optimization approach to airline integrated recovery[J]. *Transportation Science*, 2012, 46(4): 482-500.
- [37] Dunbar M, Froyland G, Wu C-L. An integrated scenario-based approach for robust aircraft routing, crew pairing and re-timing[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 45(3):68-86.
- [38] 周志忠. 飞行运行实时优化控制研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001
- [39] 刘德刚. 航空公司实时飞机和机组调配问题的研究[D]. 北京: 中国科学院数学与系统科学研究所, 2002.
- [40] Zhao Xiuli, Zhu Jinfu, Gao Qiang. A hybrid heuristics for Irregular flight recovery [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 18(4):276-284.
- [41] 乐美龙, 王婷婷, 吴聪聪. 多机型不正常航班恢复的时空网络模型[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2013, 50(3): 477-483.  
Le Meilong, Wang Tingting, Wu Congcong. The time-band model for recovery of multi-type aircrafts' disrupted flights[J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2013, 50(3): 477-483.
- [42] Le Meilong, Wu Congcong. Solving airlines disruption by considering aircraft and crew recovery simultaneously[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Science*, 2013, 18(2): 243-252.

