第 13 卷 第 1 期
2013 年 2 月

交 通 运 输 工 程 学 报
Journal of Traffic and Transportation Engineering

Vol. 13 No. 1
Feb. 2013

文章编号:1671-1637(2013)01-0077-07

# 飞机和机组一体化恢复的约束规划模型

朱 博,朱金福,高 强
(南京航空航天大学 民航学院,江苏 南京 210016)

**摘 要**:分析了飞机和机组运行计划的特点与异同,以最小化恢复总成本为目标函数,以飞机、航班、机组和机场的时空衔接、流平衡等为约束条件,建立了飞机和机组一体化恢复的约束规划模型。针对一体化恢复问题的特点和模型结构,利用混合集合规划方法设计搜索算法,并进行了实例验证。计算结果表明:对小规模问题,约束规划模型与分阶段恢复方法得到的结果一致,延误均为 6 020 min;对中大规模问题,约束规划模型与分阶段恢复方法求得的延误分别为 9 670 min 和 12 840 min,约束规划模型比分阶段恢复方法减少约 24.69%的延误;分阶段恢复方法在约 22.2%的情况下无法求得可行解。可见,约束规划模型可行。

**关键词**:航空运输;航班延误;航班恢复;一体化优化;约束规划;混合集合规划
**中图分类号**:V355.2 **文献标志码**:A

# Constraint programming model of integrated recovery for aircraft and crew

ZHU Bo, ZHU Jin-fu, GAO Qiang
(School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

**Abstract**: The features and differences of running schedules for aircraft and crew were analyzed. The mininum total recovery cost was taken as objective function, the spatial-temporal connection and flow balance of aircraft, flight, crew and airport were considered as constraint conditions, and the constraint programming model of integrated recovery for aircraft and crew was built. Aiming at the characteristics of integrated recovery problem and model structure, the searching algorithm was designed by using mixed set programming method, and example verification was carried out. Calculation result indicates that for small scale example, the results obtained by the proposed model and sequential recovery method are same, and the delay is 6 020 min. For medium and large scale examples, the delays obtained by the proposed model and sequential recovery method are 9 670, 12 840 min respectively, and the delay obtained by the proposed model reduces by 24.69% compared with the result of sequential recovery method. By using sequential recovery method, 22.2% examples can not obtain feasible solution. So the proposed model is feasible. 6 tabs, 1 fig, 19 refs.

**Key words**: air transportation; flight delay; flight recovery; integrated optimization; constraint programming; mixed set programming

**Author resumes**: ZHU Bo(1987-), female, doctoral student, +86-25-84893502, iami-nor@163.com; ZHU Jin-fu(1955-), male, professor, PhD, +86-25-84895388, zhujf@nuaa.edu.cn.

**收稿日期**:2012-08-18
**基金项目**:国家自然科学基金项目(61079014);中国民航局软科学基金项目(MHRD201053)
**作者简介**:朱 博(1987-),女,江苏镇江人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事空中交通管理研究。
**导师简介**:朱金福(1955-),男,江苏常州人,南京航空航天大学教授,工学博士。

## 0 引 言

飞机故障导致飞机资源暂时短缺，恶劣的天气导致机场短暂关闭，这些情况经常使得航空公司的航班无法按原计划执行，给航空公司造成很大的成本损失，并给旅客带来诸多不便。以美国为例，每年不正常航班给航空公司增加数百亿美元的名义成本[1]，不正常航班恢复问题的优化空间和潜能是巨大的。航班的正常执行依赖于航空系统各个部门资源的协调和配合。从航空公司角度来看，航班的执行需要同时安排飞机、机组，从而满足旅客的需求，因此，不正常航班恢复应包括飞机路线恢复、机组排班恢复、旅客路线恢复等，是一个非常复杂的资源调度问题。飞机作为航空公司最宝贵的资源，其路线的恢复也理所当然成为工作的核心；机组是航空公司的稀缺人力资源，且是仅次于燃油的第 2 大运行成本来源，其排班的恢复对航空公司的运行和成本控制非常重要，由于其复杂的合法性检查要求，机组恢复常常成为整个不正常航班恢复的瓶颈[2]。在出现不正常航班时，如何调整各种资源配置，尽可能快速恢复航班计划，降低扰动造成的成本，成为近年来民航界和运筹学界研究的热点。

对不正常航班进行研究已有 50 年左右的历史，其中多数集中于分阶段恢复研究，即对航班运行过程中的各种资源分别进行调度，一般遵循航班时刻、飞机、机组、旅客的顺序依次进行恢复，前者的恢复方案作为后者恢复的初始条件。飞机路线恢复方面的研究较为成熟，Teodorovic 等研究了飞机遭遇意外故障时如何恢复航班计划使得旅客总延误最小，并用分枝定界方法对小规模问题进行求解[3]；Teodorovic 等在文献[3]的基础上，建立了最小化取消航班数量和最小化旅客总延误成本两级目标函数，设计了基于动态规划的顺序启发式算法[4]；Jarrah 等研究了飞机短缺时的网络流模型[5]；Yan 等研究了机场临时关闭时的航班计划恢复问题[6]；Arguello 等研究了飞机临时短缺情况下的航班计划恢复问题，利用 GRASP 算法对飞机路线进行重排[7]；唐小卫等设计了不正常航班恢复的贪婪模拟退火算法，将 GRASP 算法与模拟退火算法结合，提高了搜索领域解的效率，降低了解陷于局部最优解的可能性[8]。在机组恢复研究方面，Wei 等建立了机组恢复的多商品整数网络流模型，设计了基于分枝定界的启发式算法[9]；Stojkovic 等研究了以成本最小为目标函数，在给定航班计划下修复机组任务串的问题，将列生成算法植入分枝定界搜索树进行求解[10]；Lettovsky 等提出了一种最小化机组恢复成本的方法，通过定义恢复时间窗和受扰机组的最大数量，用列生成算法选择最小的机组任务串集合[11]。不正常航班所涉及资源众多，上述分阶段恢复方法将问题化大为小，化难为易，较容易在规定的时间内得出恢复方案。其中，飞机路线恢复的研究已经取得了很好的成果，然而这些理论研究成果在实际应用中却没能发挥预期的作用。这是由于航空运输系统是个复杂的系统，不正常航班涉及的各种资源之间是相互依赖和影响的。在分阶段恢复体系中，飞机路线恢复同时完成了航班时刻表的恢复，也就是说，飞机路线恢复方案确定了执行航班和取消航班以及各个执行航班的延误，机组路线恢复必须完成执行航班的飞行任务。可见，后阶段恢复依赖于前阶段的恢复结果，这样可能导致整体方案不优甚至不可行，难以保证全局优化性。例如，飞机路线恢复后的执行航班很可能找不到合适的机组来执行，这时先前制定的飞机路线恢复方案就无法实施，需要重新安排飞机路线，并在此基础上再次安排机组。不正常航班恢复问题要求在短时间内得到优化方案，一般难以接受这种迭代逐步优化的方法。

对不正常航班的一体化恢复问题，国内外的研究还处于起步阶段。Abdelghany 等研究了不正常航班恢复的一体化决策工具，给出了整合所有航班资源的一体化恢复方案[1]；Teodorovic 等研究了飞机路线和机组排班一体化恢复问题，在机组排班恢复方案的基础上恢复飞机路线，这种做法虽然效率较高，却未能摆脱分阶段恢复的实质[12]；刘德刚研究了飞机和机组的一体化恢复问题，依次生成飞机路线优化方案与机组恢复方案，检查其可行性并进行迭代，计算结果表明，在 35.6%的概率下，机组恢复方案可能导致原先的飞机路线恢复方案不可行[13]。

一体化恢复整合了部分或者全部飞机路线、机组任务和旅客路线，从全局角度研究不正常航班恢复问题，虽然问题规模比分阶段恢复增大很多，但却能有效避免出现恢复方案不可行或全局不优的情况，很有研究价值。无论是对分阶段还是一体化恢复，数学规划方法思路清晰，模型表达简洁，一直是学术界研究的重点，也取得了很多成果。但是，数学规划方法灵活性较差，面对复杂的航班运行问题时需要做大量的简化，而且很难找到有效的求解算法。

本文对不正常航班情况出现时的飞机和机组一体化恢复问题进行了研究，利用约束规划方法，建立

不正常航班恢复的逻辑优化模型，同时兼顾了飞机路线和机组计划的特点和恢复策略，结合顺序和启发式思想，设计简洁高效的混合集合规划搜索规则，实现了飞机和机组的一体化恢复。实际运用中，不同机型间的飞机交换的情况很少，而机组也有特定的适飞机型，因此，本文针对单一机型的不正常航班一体化恢复进行研究，将多种机型的航班计划拆分为多个单一机型的情况进行分析。

## 1　问题描述

航空公司的不正常航班恢复问题通常包括以下 4 个问题。

(1)航班时刻表恢复问题，通过延误或取消航班来修复航班时刻表。

(2)飞机恢复问题，修复飞机路线，策略有飞机交换、机型替换、调机等。

(3)机组恢复问题，修复机组任务，策略有机组交换、加机组、备份机组等。

(4)旅客恢复问题，重新安排受扰旅客的行程。

前 3 个问题是针对航空公司的生产资源，本文将对其进行一体化恢复的研究，而旅客作为航空公司的服务对象，并不纳入本文的研究范围。不正常航班恢复通常有限定的恢复期，在该恢复期内，航班、飞机路线、机组计划都允许被调整。本文研究一个飞行日内的不正常航班恢复问题，定义恢复期为该天最早扰动开始的时间到当天所有航班结束的时间。

飞机和机组的一体化恢复问题可被视为一个特殊的带时间窗的车辆路径问题优化问题。与一般的路径问题有所不同，它需要动态地考虑时空衔接、机组合法性规定等复杂约束，而且每个航班都需要飞机和机组两种资源的配合才能执行航班，完成运输任务。飞机和机组的路线不仅有着不同的约束条件，还有不同的调整策略，其中区别最大的一点在于加机组策略的使用，即机组像乘客一样搭乘航班，去某机场执行后续的航班任务。对飞机和机组一体化恢复模型和算法进行研究既要抽象出两种资源的相似之处，以得到简洁紧凑的模型，又要针对二者的特点设计不同的求解策略，并将它们融合在一个求解体系中。此外，不正常航班恢复是一个事件驱动的问题，一般有两种情况可能导致航班的不正常，即计划外的飞机故障与机场容量减少甚至关闭。

针对一体化恢复问题的上述特点，本文模型为每架飞机和每个机组虚拟了源航班和汇航班，作为任务路径的起点和终点。对飞机路线而言，源航班的后继航班即指向飞机实际执行的首航班，飞机实际执行的末航班的后继航班即为其汇航班[14]。每个航班(除了汇航班)的后继航班都是唯一的，由此构成了每架飞机的唯一执行路线，其中每个执行航班属于且仅属于一条飞机路线。机组任务恢复与飞机有所区别。首先，由于加机组策略的存在，一个执行航班除了必须有执行机组外，还可能有其他机组在该航班上加机组，即机组任务路线中可能有重叠的航班，因此，飞机路线恢复中后继航班的概念不能照搬到机组任务恢复中。令 $f_{ef}$ 为机组 $e$ 在航班 $f$ 上的后续航班，对不属于某机组任务集合的航班，该后续航班设置为该航班本身。从一个机组的源航班到汇航班，无论是加机组航班或实际执行航班，都通过后续航班确定其唯一的任务路线。航班衔接方式见图 1，机组 A 在机组 B 的源航班、航班 2、5 上的后续航班设置为这些航班本身；航班 3 则处于机组 A、B 两个航班串中。机组 A 的任务航班集合为航班 1、3、4；机组 B 的任务航班集合为航班 2、3、5；航班 3 上有一个加机组。其次，对飞机而言，日利用率越高对航空公司越有利，而机组却有严格的时间合法性规定，每天的飞行和执勤时间都有严格的限制，任何恢复方案都不能违反这些规定。同时，为了提高机组的工作效率，航空公司希望其有效飞行时间占总工作时间的比例越高越好，因此，模型中有关机组恢复的部分不仅要加入严格的时间合法性约束，还要尽量减少加机组、备用机组等策略的使用。

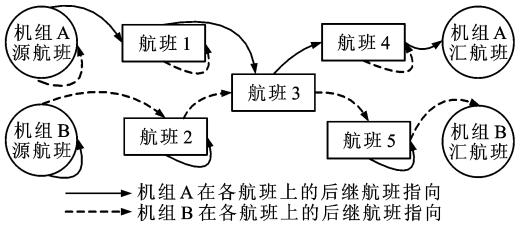


图 1　航班衔接方式

Fig. 1　Transfer mode of flight

## 2　一体化恢复的约束规划模型

约束规划是在逻辑编程框架下，运用运筹学算法求解约束满足问题的一门技术[15]。约束是指一个包含若干变量的关系表达式，用于表示这些变量必须满足的条件。约束规定将问题规模减小以确定未知变量，是一种解决约束满足问题的灵活而高效的方法。与数学规划相比，约束规划提供了更为灵活的建模框架，不仅可以建立简洁的模型，还可以通

过模型探索问题的结构并为解的搜索指出方向。约束规划结合了人工智能概念和程序语言，从表述层面来求解问题，使编程者从低层级的算法层面解放出来，关注于高层级的建模；同时打破了数学规划中等式与不等式的表达限制，约束的形式更加灵活，例如变量可以作为下标使用，这在传统的数学规划中是不允许的；使用基于逻辑推理的求解方法，例如域切割、约束传递等来加速搜索[16]。尤其是约束规划特有的全局约束如全不同、集合元素等，特别适合于求解路径优化和运输规划的问题[17]。

### 2.1 符号定义

在本文模型中，令 $S$ 为机场集合，$s\in S$；$A$ 为飞机集合，$a\in A$；$E$ 为机组集合，$e\in E$；$F_0$ 为原计划航班集合；$F_{a0}$ 为飞机源航班集合；$F_{e0}$ 为机组源航班集合；$F_{a1}$ 为飞机汇航班集合；$F_{e1}$ 为机组汇航班集合；$F_g$ 为执行的航班集合，$q\in F_g$；$F_k$ 为取消的航班集合；$F$ 为原计划航班与所有虚拟航班的集合，$f\in F$；$F_0$ 与 $F_{a0}$ 的并集构成航班集合 $F_1$，$i\in F_1$；$F_0$ 与 $F_{a1}$ 的并集构成航班集合 $F_2$，$k\in F_2$；$F_g$ 与 $F_{a0}$ 的并集构成航班集合 $F_{ag0}$，$j\in F_{ag0}$；$F_g$ 与 $F_{e0}$ 的并集构成航班集合 $F_{eg0}$，$v\in F_{eg0}$；$S_1$ 为飞机停场过夜的机场集合，$r\in S_1$；$h_r$ 为恢复期结束时，为执行正常航班计划机场 $r$ 需要的飞机数量；$t$ 为最小过站时间；$u_1$ 和 $u_2$ 分别为机组飞行和执勤时间的上限值；$s_{f1}$ 为航班 $f$ 的起飞机场；$s_{f2}$ 为航班 $f$ 的降落机场；$f_{af}$ 为飞机 $a$ 路线上航班 $f$ 的后继航班；$s_{a1}$ 为当日执行航班结束后，飞机 $a$ 的过夜机场；$t_{f1}$ 为航班 $f$ 预计起飞时间；$t_{f2}$ 为航班 $f$ 预计降落时间；$T_f$ 为航班 $f$ 的预计飞行时间窗；$T_{f0}$ 为航班 $f$ 的飞机故障时间窗；$t_{e1}$ 为机组 $e$ 当天的飞行时间；$t_{e2}$ 为机组 $e$ 当天的执勤时间；$c_{f\mathrm{d}}$ 为航班 $f$ 的延误成本，假设其与航班的延误成正比；$c_{f\mathrm{k}}$ 为航班 $f$ 的取消成本；$c_{\mathrm{h}}$ 为加机组带来的成本。

### 2.2 模型建立

根据对飞机和机组一体化恢复问题的研究和分析，以 $A$ 为目标函数，令 $X$ 与 $Y$ 分别为飞机 $a$ 路线上航班 $f$ 的后继航班的起飞时间与机组 $e$ 在航班 $f$ 的后继航班的起飞时间，$V$ 与 $W$ 分别为飞机 $a$ 路线上航班 $f$ 的起飞机场与机组 $e$ 在航班 $f$ 的起飞机场，则约束规划模型为

$$\min A=\sum c_{q\mathrm{d}}+\sum c_{f\mathrm{k}}+c_{\mathrm{h}}\quad q\in F_{\mathrm{g}},f\in F_{\mathrm{k}} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\ \ t_{j2}+t<X \tag{2}$$

$$t_{j2}+t<Y \tag{3}$$

$$s_{j2}=V=W \tag{4}$$

$$\sum(s_{a1}=r)=h_r\quad a\in A \tag{5}$$

$$t_{e1}\leqslant u_1 \tag{6}$$

$$t_{e2}\leqslant u_2 \tag{7}$$

上述式(1)为目标函数，设置为恢复方案的总成本最小，包括执行航班的延误成本、取消航班换算成的延误成本与加机组带来的成本；式(2)～(4)为飞机路线和机组任务的时空衔接约束；式(5)为飞机的流平衡约束等式，左边括号内为判断飞机 $a$ 是否在机场 $r$ 过夜的逻辑式，若等式成立则为 1，否则为 0，要求 $s_{a1}$ 中各机场过夜的飞机数量与计划所需飞机相同，以保证第 2 天航班计划的正常实施；式(6)、(7)均为机组的时间合法性约束。

## 3 模型算法

不正常航班的飞机和机组一体化恢复模型变量巨大，约束众多。面对这样复杂的优化问题，在可接受的时间内得到全局最优解几乎不可能。启发式算法虽然求解效率高，但得到的解往往距离最优解较远，有时候甚至难以保证解的可行性。

混合集合规划源于约束规划和逻辑规划[18]，是以一阶逻辑与集合推理为算法框架的逻辑求解系统，实现了实数、整数、布尔值、索引及集合类型的混合域上的全局推理，将集合运算、数值约束及运筹学算法集成于一个语言系统，对约束满足问题进行建模和求解。混合集合规划通过将业务逻辑引入求解过程，帮助系统快速地、个性化地构建合乎数学逻辑的解，能够高效地得到较高质量的解[19]。飞机和机组一体化恢复涉及到飞机和机组两种资源的调度，在设计求解策略时也应考虑到两种资源的各自业务特点。

### 3.1 恢复飞机路线

对 $F_1$ 中的航班 $i$ 和 $F_2$ 中的航班 $k$ 定义时间段变量 $t_{ik}$，表示若航班 $k$ 为航班 $i$ 的后继航班时的可能飞行时间段，即从航班 $k$ 的飞行时间段值域中减去航班 $i$ 的执行飞机故障时间窗和 $i$ 的飞行时间段。变量 $t_{ik}$ 的设置可以有效地切割变量的域空间。

模型中飞机路线恢复的关键是确定 $F_{ag0}$ 中所有航班的后继航班，即确定关键航班的后继航班变量。算法可以分为以下几步。

Step 1：基于顺序性原则，从 $F_{ag0}$ 中尚未确定后继航班的航班中，选择预计降落时间域下界最小的航班，记为 $j_1$。根据航班的时间先后顺序选择关键枚举变量，使解空间尽量保持凸性。

Step 2：在 $j_1$ 的后继航班中选择原计划机型与 $j_1$ 的预计机型相同的航班集合。

Step 3：若从 Step 2 中选择的集合元素不止 1 个，则从中选择使 $t_{jk}$ 时间段变量下界最小的航班，记为 $k_1$。

Step 4：检查由 Steps 2、3 选择出的航班 $k_1$ 作为 Step 1 中航班 $j_1$ 的后继航班是否可行，否则转至 Step 1，直到为 $F_{ag0}$ 中所有的航班确定可行的后继航班为止。

### 3.2　恢复机组任务

恢复机组任务的求解策略与恢复飞机路线相类似，即确定每个机组 $e$ 在 $F_{eg0}$ 每个航班上的后续航班。求解策略的步骤分为以下几步。

Setp 1：基于顺序性原则，从 $F_{eg0}$ 尚未确定机组后续航班的航班集合中，选择预计起飞时间下界最小的航班作为当前枚举的关键航班变量，记为 $v_1$。

Step 2：利用启发式规则，选择与 $v_1$ 的原计划执行机组一致的机组，从而确定相应的航班集合，目的是防止机组任务扰动太大。

Step 3：若从 Step 2 中选择确定的集合元素不止一个，则从中选择预计起飞时间下界最小的航班，记为 $w$。

Step 4：检查由 Steps 2、3 选择出的航班 $w$ 作为 Step 1 中航班 $v_1$ 在机组 $e$ 上的后继航班是否可行，否则转至 Step 1，直到所有机组在 $F_{eg0}$ 中任意航班上的后续航班变量确定为止。

将上述飞机路线恢复和机组任务恢复的求解规则同时植入深度优先搜索算法中去，一体化地搜索并确定执行航班集合的预计执行飞机和机组，确定航班的预计起飞时间，从而得到航班的预计飞行时间窗。

## 4　计算结果分析

本文首先对 2 个算例进行优化计算，旨在简单直观地体现一体化问题及其恢复方案的特点。然后，在某航空公司航班计划的基础上模拟一些飞机故障和机场关闭的扰动情形，对多组数据用分阶段恢复方法和一体化恢复方法分别进行优化和对比。关于机组时间合法性约束，本文算例均采用 24 h 内，机组的飞行时间不超过 8 h 和执勤时间不超过 14 h 的规定，即 $u_1$ 和 $u_2$ 分别为 480、840 min。

### 4.1　算例结果

表 1 为某航空公司某日的航班计划，编号 2 的飞机从 09:00 发生故障，预计 11:10 故障解除。备用机组 4 在上海基地。所有机组的初始飞行时间和执勤时间均为 0。用本文模型进行求解，得到最优解的延误为 485 min，结果见表 2。飞机故障导致机组 3 的执勤时间超上界，不得不招用备用机组 4。

**表 1　算例 1 的航班计划**

**Tab. 1　Flight schedules of example 1**

| 航班编号 | 起飞机场 | 降落机场 | 起飞时间 | 降落时间 | 飞机编号 | 机组编号 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 101 | 上海虹桥 | 成都 | 08:20 | 11:40 | 1 | 1 |
| 102 | 成都 | 上海虹桥 | 12:30 | 15:10 | 1 | 1 |
| 103 | 上海虹桥 | 三亚 | 17:05 | 20:00 | 1 | 2 |
| 104 | 三亚 | 上海虹桥 | 21:05 | 23:50 | 1 | 2 |
| 105 | 上海虹桥 | 台北 | 09:20 | 11:00 | 2 | 3 |
| 106 | 台北 | 上海虹桥 | 12:00 | 13:30 | 2 | 3 |
| 107 | 上海虹桥 | 哈尔滨 | 14:25 | 17:05 | 2 | 3 |
| 108 | 哈尔滨 | 上海虹桥 | 18:00 | 20:40 | 2 | 3 |
| 109 | 上海虹桥 | 济南 | 21:30 | 22:25 | 2 | 3 |

**表 2　算例 1 计算结果**

**Tab. 2　Calculation results of example 1**

| 航班编号 | 飞机编号 | 机组编号 | 起飞时间 | 降落时间 |
|---|---|---|---|---|
| 101 | 1 | 1 | 08:20 | 11:40 |
| 102 | 1 | 1 | 12:30 | 15:10 |
| 103 | 1 | 2 | 17:05 | 20:00 |
| 104 | 1 | 2 | 21:05 | 23:50 |
| 105 | 2 | 2 | 11:10 | 12:50 |
| 106 | 2 | 3 | 13:40 | 15:10 |
| 107 | 2 | 3 | 16:00 | 18:40 |
| 108 | 2 | 3 | 19:30 | 22:10 |
| 109 | 2 | 4 | 23:00 | 23:55 |

表 3 为某航空公司的日航班计划，两架飞机在 07:50 发生故障，预计均在 15:00 故障可排除。机组 5 的初始飞行时间为 40 min，初始执勤时间为 120 min，其余机组的初始飞行与执勤时间均为 0。算例 2 的求解结果见表 4，最优解的延误为5 070 min，包括航班取消换算成的延误，参考文献[8]和[14]，航班取消等价于航班延误 8 h，为执行航班 204 加机组一次，机组 8 在航班 201 上加机组。

### 4.2　与分阶段恢复方法对比

以上两个小型算例测试结果采用了使用备份机组、加机组以及延误、取消航班的恢复策略，说明了本文一体化恢复模型的可行性。为进一步说明一体化恢复模型的优化性，本文根据某航空公司的部分航班计划随机模拟出 9 个算例，见表 5，其中机组数包括备份机组。在相同的条件和假设下，对这些算例分别采用分阶段恢复方法和一体化恢复模型进行求解。分阶段恢复首先采用文献[14]中的方法进行

表 3 算例 2 的航班计划

Tab. 3 Flight schedules of example 2

| 航班编号 | 起飞机场 | 降落机场 | 起飞时间 | 降落时间 | 飞机编号 | 机组编号 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 201 | 南京 | 首尔 | 08:15 | 10:15 | 3 | 5 |
| 202 | 首尔 | 盐城 | 11:15 | 13:00 | 3 | 5 |
| 203 | 盐城 | 首尔 | 13:40 | 15:10 | 3 | 5 |
| 204 | 首尔 | 南京 | 16:10 | 17:50 | 3 | 5 |
| 205 | 南京 | 广州 | 19:00 | 20:50 | 3 | 6 |
| 206 | 广州 | 南京 | 21:55 | 23:55 | 3 | 6 |
| 207 | 南京 | 厦门 | 08:00 | 09:40 | 4 | 7 |
| 208 | 厦门 | 南京 | 10:30 | 12:10 | 4 | 7 |
| 209 | 南京 | 西安 | 13:00 | 14:55 | 4 | 6 |
| 210 | 西安 | 南京 | 15:55 | 17:35 | 4 | 6 |
| 211 | 南京 | 北京 | 19:55 | 21:25 | 4 | 8 |
| 212 | 北京 | 南京 | 22:15 | 23:45 | 4 | 8 |

表 4 算例 2 计算结果

Tab. 4 Calculation results of example 2

| 航班编号 | 飞机编号 | 机组编号 | 起飞时间 | 降落时间 |
|---|---|---|---|---|
| 201 | 3 | 5 | 15:00 | 17:00 |
| 202 | 3 | 5 | 17:40 | 19:25 |
| 203 | 3 | 5 | 20:05 | 21:35 |
| 204 | 3 | 8 | 22:15 | 23:55 |
| 205 | 取消 | | | |
| 206 | 取消 | | | |
| 207 | 4 | 7 | 15:00 | 16:40 |
| 208 | 4 | 7 | 17:20 | 19:00 |
| 209 | 4 | 6 | 19:40 | 21:35 |
| 210 | 4 | 6 | 22:15 | 23:55 |
| 211 | 取消 | | | |
| 212 | 取消 | | | |

表 5 九个算例比较

Tab. 5 Comparison of nine examples

| 算例编号 | 飞机数量 | 日航班数量 | 机组数量 | 飞机与机场故障数量 |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 2 | 12 | 4 | 1 |
| 4 | 3 | 20 | 6 | 3 |
| 5 | 4 | 26 | 8 | 3 |
| 6 | 5 | 32 | 11 | 3 |
| 7 | 6 | 36 | 13 | 3 |
| 8 | 7 | 40 | 14 | 2 |
| 9 | 8 | 46 | 16 | 3 |
| 10 | 9 | 54 | 18 | 3 |
| 11 | 10 | 62 | 18 | 3 |

飞机路线恢复，然后在其基础上采用文献[2]中的方法恢复机组任务。本文模型与分阶段恢复方法的计算结果见表 6，方法 S 表示分阶段恢复方法，I 表示本文的一体化恢复模型。对小规模问题如算例 3～5，分阶段恢复方法与本文模型求得的解相同，延误均为 6 020 min。对算例 6、11，分阶段恢复方法无法求得机组任务的可行解，本文模型则给出了较优的可行解。对算例 7～10，本文模型求得的结果在正常航班数、取消航班数、延误航班数、加机组数和延误时间上都比分阶段恢复方法的结果更优。本文模型与分阶段恢复方法求解延误分别为 9 670、12 840 min，使用本文模型减少约 24.69%的延误，分阶段恢复方法在约 22.2%的情况下无法求得可行解。对于大中规模的恢复问题，分阶段恢复方法并不稳定，计算结果不太理想，而本文模型则优势明显，这是由于分阶段恢复首先安排飞机路线，可能会使得机组恢复的结果不可行，导致更多地取消航班、加机组或使用备份机组；一体化恢复则从全局层面同时协调航班时刻、飞机和机组资源，能更好地发挥调度管理的作用。

表 6 两种计算结果对比

Tab. 6 Comparison of two calculation results

| 算例编号 | 方法 | 取消航班数量 | 延误航班数量 | 加机组数量 | 延误/min |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | S | 0 | 5 | 0 | 1 220 |
| | I | 0 | 5 | 0 | 1 220 |
| 4 | S | 0 | 11 | 0 | 2 680 |
| | I | 0 | 11 | 0 | 2 680 |
| 5 | S | 4 | 0 | 0 | 2 120 |
| | I | 4 | 0 | 0 | 2 120 |
| 6 | S | 无可行解 | | | |
| | I | 2 | 7 | 0 | 2 235 |
| 7 | S | 2 | 8 | 2 | 3 665 |
| | I | 0 | 9 | 0 | 2 075 |
| 8 | S | 0 | 12 | 0 | 2 525 |
| | I | 0 | 7 | 0 | 1 350 |
| 9 | S | 0 | 19 | 0 | 3 415 |
| | I | 2 | 14 | 0 | 3 025 |
| 10 | S | 0 | 19 | 0 | 3 235 |
| | I | 2 | 16 | 0 | 3 220 |
| 11 | S | 无可行解 | | | |
| | I | 4 | 22 | 4 | 4 500 |

## 5 结 语

不正常航班恢复问题一直是民航界研究的热

点,由于分阶段恢复可能导致整体方案不优甚至不可行,一体化恢复的需求应运而生。本文首次将约束规划理论引入不正常航班恢复的研究中,建立飞机和机组一体化恢复的约束规划模型,并利用混合集合规划方法,设计简洁而有效的搜索策略。一体化恢复方法在优化结果如正常航班数、取消航班数、加机组数、延误时间上比分阶段恢复更优,很有研究价值和发展前景。约束规划方法在一体化恢复问题的建模和求解上也显示出良好的性能。但是,本文的研究仅限于飞机路线和机组任务的恢复,旅客作为航空公司的服务对象,其行程恢复也应该纳入一体化恢复未来的研究中。同时,本文仅从航空公司角度进行不正常航班恢复,实际运行中,航班恢复还依赖于空管、机场等相关部门的协同决策。航空公司、空管、机场三方在协同决策机制下如何管理不正常航班也值得深入研究。

**参 考 文 献 :**

**References :**


[1] 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(2): 825-848.

[2] 白　凤.不正常航班的飞机和机组调度研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.
BAI Feng. Research on aircraft and crew rescheduling problems of irregular flight[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)

[3] TEODOROVIC D, GUBERINIC S. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation[J]. European Journal of Operational Research, 1984, 15(2): 178-182.

[4] TEODOROVIC D, STOJKOVIC G. Model for operational daily airline scheduling[J]. Transportation Planning and Technology, 1990, 14(4): 273-285.

[5] JARRAH A I Z, YU Gang, KRISHNAMURTHY N, et al. A decision support framework for airline flight cancellations and delays[J]. Transportation Science, 1993, 27(3): 266-280.

[6] YAN Shang-yao, YANG D H. A decision support framework for handling schedule perturbation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1996, 30(6): 405-419.

[7] ARGUELLO M F, BARD J F, YU Gang. A GRASP for aircraft routing in response to groundings and delays[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 1997, 1(3): 211-228.

[8] 唐小卫,高　强,朱金福.不正常航班恢复模型的贪婪模拟退火算法研究[J].预测,2010,29(1):66-70.
TANG Xiao-wei, GAO Qiang, ZHU Jin-fu. Research on greedy simulated annealing algorithm of irregular flight schedule recovery model[J]. Forecasting, 2010, 29(1): 66-70. (in Chinese)

[9] WEI Guo, YU Gang, SONG M. Optimization model and algorithm for crew management during airline irregular operations[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 1997, 1(3): 305-321.

[10] STOJKOVIC M, SOUMIS F, DESROSIERS J. The operational airline crew scheduling problem[J]. Transportation Science, 1998, 32(3): 232-245.

[11] LETTOVSKY L, JOHNSON E L, NEMHAUSER G L. Airline crew recovery[J]. Transportation Science, 2000, 34(4): 337-348.

[12] TEODOROVIC D, STOJKOVIC G. Model to reduce airline schedule disturbances[J]. Journal of Transportation Engineering, 1995, 121(4): 324-331.

[13] 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,2002.
LIU De-gang. Aircraft rerouting and crew pairing repair during airline irregular operations[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)

[14] 朱　博,朱金福.飞机计划恢复的混合集合规划方法研究[J].小型微型计算机系统,2012,33(11):2556-2560.
ZHU Bo, ZHU Jin-fu. Research on mixed set programming for aircraft schedule recovery[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(11): 2556-2560. (in Chinese)

[15] VAN HENTENRYCK P, SIMONIS H, DINCBAS M. Constraint satisfaction using constraint logic programming[J]. Artificial Intelligence, 1992, 58(1/2/3): 113-159.

[16] HOOKER J N. Logic, optimization and constraint programming[J]. INFORMS Journal on Computing Fall, 2002, 14(4): 295-321.

[17] 霍佳震,王新华.基于约束规划求解车辆调度问题[J].物流技术,2005,24(1):110-112.
HUO Jia-zhen, WANG Xin-hua. Solving vehicle scheduling problem based on constraint programming[J]. Logistics Technology, 2005, 24(1): 110-112. (in Chinese)

[18] ZHOU Jian-yang. A note on mixed set programming[C]// IEEE. The 7th International Symposium on Operations Research and Its Applications. Zhangjiajie: IEEE, 2008: 131-140.

[19] ZHOU Jian-yang. Introduction to the constraint language NCL[J]. The Journal of Logic Programming, 2000, 45(1/2/3): 71-103.