

中图分类号: F560  
学科分类号: 082303

论文编号: 1028707 13-S033

# 硕士学位论文

## 不正常航班和旅客行程恢复问题研究

研究生姓名	王 莹
学科、专业	交通运输规划与管理
研 究 方 向	交通运输经济与市场分析
指 导 教 师	朱金福 教授

南京航空航天大学

研究生院 民航学院

二〇一三年三月



Nanjing University of Aeronautics and Astronautics  
The Graduate School  
College of Civil Aviation

# **Study on Recovery of Irregular Flights and Passengers Itinerary**

A Thesis in

Transportation Planning and Management

by

Wang Ying

Advised by

Prof. Zhu Jinfu

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

March, 2013



# 承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_



## 摘 要

随着航空运输的快速发展,资源日益紧缺,航班不正常情况越来越严重。不正常航班成为了社会日益关注的热点,也成为航空公司面临的巨大难题。如何科学合理地进行航班恢复,实现资源的合理调整,减少航班延误,提高旅客满意度是当前的研究热点。这对航空公司有效地组织运输生产,减少运行成本,改善企业和行业形象都具有相当重要的意义。

本文根据国内航空公司不正常航班旅客行程恢复的业务流程和需求,参考国内外不正常航班的研究成果,对旅客分阶段恢复问题、飞机路线和旅客行程一体化恢复问题进行了深入的探讨和分析。首先,本文根据国内各航空公司的延误处理办法以及航空公司运行控制中心的调度策略和流程,针对航班延误的旅客服务、旅客安排策略和流程以及旅客行程优化管理方法进行了总结和分析,为后续研究提供了现实背景和问题需求。其次,本文基于飞机路线的恢复方案,进行了旅客行程分阶段恢复问题的研究。构建了不正常航班旅客行程恢复的多商品流模型,采用 Danzig-Wolfe 算法,配合以十字链表、栈、深度优先策略、分枝定界算法的使用,进行模型求解。通过一个实际算例对算法的正确性和有效性进行了验证。最后,本文进行了飞机路线和旅客行程一体化恢复问题的研究工作,构建了不正常航班飞机路线和旅客行程一体化恢复的混合规划模型,设计出结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法,极大地缩小了问题规模,提高了求解效率。通过一个实际规模的算例验证,该算法可以有效地求解不正常航班恢复问题,并在符合实时决策要求的情况下获得满意解。

**关键词:** 不正常航班, 旅客行程, 恢复, 列生成算法, 启发式算法

## ABSTRACT

As the rapid expansion of air transportation and lack of the resources, irregular flights happen more and more frequently, which have been the most popular topic of passengers and a challenge of airlines. How to reduce irregular flights and improve passenger satisfaction has become the new study trend and become a significant factor for airlines to organize transportation, reduce operation costs and improve corporate image.

According to the operation processes and demand of passenger itinerary recovery in domestic airlines, phased recovery for passenger itinerary and integrated recovery for flights and passenger itinerary was discussed and analyzed in this paper. Firstly, according to the survey of domestic airlines, irregular flight service, passenger itinerary recovery policies and processes were summarized and analyzed. Secondly, a space-time network was built and a multi-commodity flow model of passenger itinerary recovery was established based on aircraft recovery schedule. Danzig-Wolfe decomposition algorithm was designed to solve the model and passenger itinerary recovery schedule can be given. Actual instance analysis shows that Danzig-Wolfe decomposition can be used to find out the optimal solution which reduces the airlines cost and enhances the passenger satisfaction in compliance with the request of real-time decision-making. Finally, a mixed programming model of integrated recovery for flights and passenger itinerary was established and a greedy simulated annealing algorithm combined with column generation algorithm was proposed to improve solving efficiency. It is proved by a real case that the algorithm can effectively solve the irregular flight recovery problems and obtain a satisfactory solution under real-time decision-making requirements.

**Key words:** irregular flights, passenger itinerary, recovery, column generation algorithm, heuristic algorithm



目 录

第一章 绪论 ..... 1

1.1 研究背景 ..... 1

1.2 旅客行程恢复研究现状分析 ..... 2

1.2.1 分阶段恢复问题研究现状 ..... 2

1.2.2 一体化恢复问题研究现状 ..... 3

1.3 旅客行程恢复问题总结 ..... 4

1.3.1 问题描述 ..... 4

1.3.2 典型目标 ..... 4

1.3.3 典型约束 ..... 5

1.4 研究内容和研究方法 ..... 6

1.4.1 研究内容 ..... 6

1.4.2 研究方法 ..... 6

1.5 论文结构 ..... 7

第二章 不正常航班旅客管理方法 ..... 9

2.1 航班不正常旅客服务 ..... 9

2.1.1 经济补偿 ..... 9

2.1.1 退票/签转 ..... 10

2.1.2 提供食宿 ..... 10

2.1.3 协助成行 ..... 11

2.2 航班不正常旅客安排 ..... 11

2.2.1 旅客安排策略 ..... 11

2.2.2 航班恢复流程 ..... 12

2.3 优化管理方法 ..... 14

2.3.1 报告制度和资质审核 ..... 14

2.3.2 责任分担机制 ..... 15

2.3.3 加快立法 ..... 15

2.3.4 建立旅客帮助部门 ..... 15

2.4 本章小结 ..... 16

第三章 旅客行程分阶段恢复问题 ..... 17

3.1	引言 .....	17
3.2	术语定义 .....	17
3.3	旅客行程恢复模型 .....	18
3.3.1	模型假设 .....	18
3.3.2	构造时空网络 .....	18
3.3.3	符号定义 .....	19
3.3.4	数学模型 .....	19
3.4	算法设计 .....	21
3.4.1	主问题 .....	22
3.4.2	子问题 .....	22
3.4.3	子问题搜索算法 .....	23
3.4.4	Danzig-Wolfe 算法步骤 .....	25
3.4.5	分枝定界算法求整数解 .....	26
3.5	算例分析 .....	26
3.6	本章小结 .....	29
第四章	飞机路线和旅客行程一体化恢复问题 .....	30
4.1	引言 .....	30
4.2	术语定义 .....	30
4.3	飞机路线和旅客行程一体化恢复模型 .....	31
4.3.1	模型假设 .....	31
4.3.2	时空网络 .....	32
4.3.3	恢复策略 .....	33
4.3.4	符号定义 .....	35
4.3.5	数学模型 .....	36
4.4	算法设计 .....	38
4.4.1	贪婪算法分析 .....	39
4.4.2	模拟退火算法分析 .....	40
4.4.3	Danzig-Wolfe 算法分析 .....	41
4.4.4	结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法设计 .....	42
4.5	算例分析 .....	46
4.6	本章小结 .....	48
第五章	全文总结与研究展望 .....	49

5.1 本文总结 .....49

5.2 本文创新点 .....50

5.3 研究工作展望 .....50

参考文献 .....52

致谢 .....55

在学期间发表的学术论文及研究成果.....56

## 图清单

图 3.1	成本分解示意图.....	21
图 3.2	子问题搜索算法的网络弧示意图.....	24
图 3.3	子问题搜索算法的栈存储示意图.....	25
图 3.4	旅客自行签转和分阶段恢复方案的延误时间分布 .....	28
图 3.5	旅客自行签转和分阶段恢复方案的取消旅客时间分布 .....	28
图 4.1	时空网络示意图.....	32
图 4.2	航班不正常示意图.....	33
图 4.3	不正常航班恢复结果示意图.....	34
图 4.4	贪婪算法流程图.....	40
图 4.5	模拟退火算法流程图.....	41
图 4.6	Danzig-Wolfe 算法流程图 .....	42
图 4.7	解空间示意图.....	43
图 4.8	构造飞机路线示意图.....	43
图 4.9	构造可行旅客行程和最优旅客行程对比示意图 .....	44
图 4.10	结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法流程图 .....	46
图 4.11	分阶段和一体化恢复方案的航班延误和取消情况分布 .....	47
图 4.12	分阶段和一体化恢复方案的旅客延误和取消情况分布 .....	47

## 表清单

表 3.1	不正常航班算例数据.....	26
表 3.2	旅客行程恢复实例数据.....	27
表 3.3	旅客自行签转和分阶段恢复方案性能指标.....	27
表 4.1	分阶段和一体化恢复方案的综合统计指标.....	47

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景

我国民航运输业持续发展了 30 年，保持着 GDP 增长速度 1.5 倍左右的年增长率。2011 年，全行业共完成运输总周转量 577.44 亿吨公里，比上年增长 7.2%，旅客运输量 29317 万人次，比上年增长 9.5%，货邮运输量 557.5 万吨，比上年降低 1%。年旅客吞吐量达到 1000 万人次以上的机场达到全国的 75.1%<sup>[1]</sup>。随着民航运输业的快速发展，运输资源日益紧缺，航班不正常情况越来越严重。2011 年航空公司共计划航班 235.3 万班，正常执行 181.5 万班，航班正常率为 77.2%，比上一个五年规划期降低了 5% 左右。《中国民航发展的第十二个五年规划》提出的三个突出问题之首就是航班正常率下降，航班平均延误时间增加。“十二五”时期航班正常率的目标是高于 80%，保证公众对民航服务的基本满意<sup>[2]</sup>，提高航班正常率任务艰巨。

引起航班不正常的主要原因包括：航空公司自身原因、天气原因、空管原因、军事活动、旅客原因、机场原因等。其中最主要因素为航空公司自身原因，具体包括航班计划过站时间短于标准、航班计划临时调整、维修计划制定不当、机组原因等。天气原因是指本场或降落场天气情况低于最低飞行和运行标准。天气原因的比例仅次于航空公司自身原因，而且随着自然灾害的频发，天气原因导致的航班不正常越来越多。空管原因主要包括流量控制、航行保障设备故障、未及时提供气象服务等<sup>[3]</sup>。不正常航班的发生将带来巨大的经济损失，主要包括地面延误损失、空中延误损失、调机和食宿费用以及正常盈利损失等<sup>[4]</sup>。提高航班正常率是航空公司和旅客实现双赢的有效途径。

飞机、机组、旅客是不正常航班管理最重要的三个方面。尽管其他资源，例如地勤人员、餐食保障资源及候机门资源同样需要考虑，但这些资源的成本相对较低，管理弹性较大。飞机和机组是航空公司的稀缺资源，是不正常航班恢复问题的研究重点，而旅客是航空公司收益的主要来源，是体现不正常航班恢复价值的重要部分。在发生不正常航班之后，航空公司和机场通常被动地将长时间延误的旅客改签到临近的后续航班，不为中转衔接失败的旅客提供行程安排。旅客在无法完全获取订座信息和航班延误信息的情况下，往往无法获得满意的改签路线。另外，运行控制中心进行飞机路线调整时，通常不考虑旅客行程的衔接问题以及交换飞机后旅客是否能完全登机的问题。这样安排导致的后果是，即使航班已经合理调整，但仍有许多旅客无法出行或等待较长时间。在出现大面积延误的情况下，旅客的满意度直线下降，更有不少旅客情绪激动，出现和工作人员的冲突事件，例如，旅客不肯登机、霸机、损毁机场设施。据统计，2011 年，民航局、各地区管理局、民航局消费者事务中心和中国航空运输协会共受理航空

消费者投诉 2018 件，比上年增加 684 件，增长 51.27%。因此，加强不正常航班旅客行程恢复问题的研究对提高民航运输的服务质量，维持运输系统正常运转十分重要。

## 1.2 旅客行程恢复研究现状分析

一般来说，不正常航班恢复问题有两种思路。第一种思路是将整个问题分解为几个子问题逐一求解，已求解子问题的解是后继子问题的已知条件，不再调整。例如：首先，求解飞机路线恢复问题，通过取消航班、将航班延误、交换飞机或使用备份飞机等操作获得新的航班计划；然后，根据新的航班计划求解机组路线恢复问题，获得新的机组排班计划；最后，根据新的航班计划求解旅客行程恢复问题，给出受扰动旅客的新行程方案。这种求解思路下的不正常航班恢复问题称为分阶段恢复问题。第二种思路是将整个问题综合在一个模型中进行求解或将相关子问题综合求解。例如：飞机和机组路线同步恢复或飞机路线和旅客行程同步恢复。这种思路下的不正常航班恢复问题称为一体化恢复问题。因此，不正常航班旅客行程恢复问题通常是指分阶段恢复中第三阶段的旅客行程恢复问题或包含旅客行程恢复的一体化恢复问题。

### 1.2.1 分阶段恢复问题研究现状

不正常航班分阶段恢复方面主要集中于飞机路线恢复问题，这也是不正常航班研究的起源。Teodorovic 和 Guberinic<sup>[5]</sup>在 1984 年首次提出不正常航班恢复网络流模型，该模型以旅客延误最小为目标，只针对一个机型和一天的航班计划，有较多的假设条件，无法完全解决实际问题，但却提供了不正常航班恢复问题的解决思路。该模型采用分支定界算法进行求解，由于模型较为简单，其算法无法保证大规模问题的求解效率。此后，诸多学者在此基础上进行了模型的完善和算法的改进。例如，Teodorovic 和 Stojkovic<sup>[6]</sup>在模型中增加了机场宵禁时间限制、允许取消航班。该文提出了混合整数规划编程算法，采用了一个简单的策略：依次对每架飞机指派尽可能多的航班，运用计算机编程的方法进行求解。由于算法简单，求解速度比较快，但是解的优质性无法保证。Jarrah<sup>[7]</sup>建立的模型中允许调机，并对成本进行了细分。Yan 和 Young<sup>[8]</sup>尝试将模型扩展成多机型的飞机路线恢复模型，并将其视为最小成本流问题，采用拉格朗日松弛算法进行求解。但该模型虽然考虑了多机型，却不允许不同机型进行交换，其本质仍是一个单机型问题。之后，Yan 和 Tu<sup>[9]</sup>又构建了飞机路线恢复的多商品流模型，该模型为真正意义上的多机型飞机路线恢复问题，采用了拉格朗日松弛算法和次梯度方法进行求解。经过对算法进行改进，将问题进行了分解，求解效率得到了很大提高。Argüello<sup>[10]</sup>、唐小卫、高强等<sup>[11]</sup>采用了 GRASP（贪婪随机自适应搜索算法）邻域搜索技术进行问题求解。首先通过取消所有延误航班获得初始解；再通过尽可能小的变换获得邻域解，并计算成本；最后通过 GRASP 搜索算法随机选择较优邻域解，快速得获得较优解。该算法经算例验证是比较快速且可以获得较优解的，但未能

考虑旅客行程衔接性。除此之外, Yu 和 Qi<sup>[12]</sup>, Kohl<sup>[13]</sup>, Anderson 和 Varbrand<sup>[14]</sup>, Filar<sup>[15]</sup>, Clarke<sup>[16]</sup> 等都对不正常航班恢复问题的概念和模型进行了扩展和改进。

分阶段恢复问题中关于旅客行程恢复的研究并不多。Lettovsky<sup>[17]</sup>构建了 AIR (不正常航班恢复) 模型, 全面考虑了飞机、机组和旅客行程恢复问题, 为解决该问题又分解成了 SRM (航班计划恢复模型)、CRM (机组恢复模型) 和 PFM (旅客流模型) 三个子问题逐一进行求解, 这也是不正常航班分阶段恢复问题的主要思路。除此之外, Barnhart<sup>[18]</sup>建立了分阶段旅客行程恢复问题的多商品流模型, 陆宏兰<sup>[19]</sup>、高强<sup>[20]</sup>、严俊<sup>[21]</sup>构建了分阶段旅客行程恢复模型, 将该问题转化为运输匹配问题, 采用单纯形法进行求解。这三篇文献虽然优化了存储方法和搜索策略, 但由于要生成所有 OD 对的可行路径, 并要对所有 OD 进行路径重排, 未能充分利用原方案, 所以影响了求解效率。

分阶段恢复的思路来源于实际的运行控制经验, 将整个问题分解成了 3 个子问题, 降低了求解的难度, 线性的方式也有利于系统的结构构建和调度人员的工作分配, 是实际中运用较多的一种求解思路。但是, 这种恢复方法限制了资源之间的相互协调, 并不能充分利用资源, 优化结果不如一体化恢复方法。

## 1.2.2 一体化恢复问题研究现状

不正常航班一体化恢复问题研究起步相对较晚, 由于较难求解, 成功的模型和算法并不多。Bratu 和 Barnhart<sup>[22]</sup>以旅客为研究重点, 建立了不正常航班一体化恢复问题的 DPM (受扰动旅客度量) 模型和 PDM (旅客延误度量) 模型, DPM 模型是以运行成本和受扰旅客成本最小为目标的飞机和机组路线一体化恢复模型。该模型的延误成本是估计值, 在此基础上, 加入关于旅客的约束和精确计算的旅客成本, 模型就扩展为了 PDM 模型, 该模型是个一体化恢复模型。Jafari 和 Zegordi<sup>[23]</sup>构建了飞机和旅客一体化恢复模型, 允许调整航班计划、交换飞机、调机、使用备份飞机、取消航班、调整旅客行程。**该文重新定义了恢复期, 以航班环而非航班、旅客行程而非旅客航段为交换单位, 减小了问题规模并保证了求解问题的时效性。**Bratu 和 Barnhart<sup>[24]</sup>使用了一种称为“旅客延误计算器”的启发式算法进行求解, 该算法允许一些旅客行程恢复策略, 如常旅客优先、先受扰动的旅客先恢复。Bisaillon 和 Cordeau 等<sup>[25]</sup>采用破坏和修复的启发式算法, 将该问题处理为车辆路径问题进行求解。该方法分为构建、修复和改进三个阶段, 在构建完可行的飞机路线之后采用最短路算法进行旅客行程的初始构建, 为实现运送旅客人数最多, 进行了放松延误时间的枚举尝试, 进行飞机路线和旅客行程的相互调整。该文章的启发式算法虽然考虑了旅客行程衔接性, 但枚举的搜索策略效率较低。

一体化恢复对所有资源进行同步恢复, 允许相互协调, 弥补了分阶段恢复的缺点。但同时, 该问题规模较大, 很难给出较好的精确求解算法, 为满足时效性要求, 一般只能尝试启发式算

法进行求解。

## 1.3 旅客行程恢复问题总结

### 1.3.1 问题描述

不正常航班旅客行程恢复问题是指航班发生不正常之后，参考航班延误情况或恢复方案、航班订座信息、航空公司补偿方案等，对受扰动的旅客进行签转、取消等操作重新安排行程，减少旅客延误和取消，提高旅客满意度和航空公司收益。

### 1.3.2 典型目标

不正常航班恢复问题是随着运输量的增加在实际运行控制中产生的，有着明确的生产需求。

**不正常航班恢复问题通常有三个主要目标：**

#### 1) 保证恢复期后航班按原计划正常运行

该目标体现了恢复的原则。不正常航班恢复是一个修复工作，将断裂的时空网络进行合理的衔接，而不是时空网络的重新排列，**一般要求恢复方案与原计划方案尽可能相同**。这样不仅可以减少对旅客的影响，还可以减少机组、地勤、地面保障、运行控制等相关部门的工作变动，减少对后续工作的影响。通常，恢复工作要求恢复期结束时，恢复方案与原计划中的各项资源在各机场的配置一致。例如，恢复期结束后，各个机场所拥有的飞机数、机组数必须与原计划一致，否则就需要调机或调机组，这样不仅会出现巨大的成本，还会影响后续工作。

在进行不正常航班恢复系统研究时，根据航空公司的需求，一般还会要求减少航班变动。可以采用以下两种方式减少航班变动：一种是以惩罚函数形式在目标中加入限制条件，包括航班取消总数、航班更换飞机总数、旅客改签人数等。例如，Bisaillon 和 Cordeau 等<sup>[25]</sup>在模型中将调机成本作为惩罚函数写入了目标函数，限制调机数量。另一种是通过恢复期和恢复主体的定义，缩小恢复范围。例如，定义恢复主体为受扰动的航班或旅客，未受扰动的航班或旅客不参与恢复。

#### 2) 减少航班不正常对旅客的影响

航班不正常将会导致旅客延误、签转或取消行程。为此，航空公司将对旅客进行补偿，可能会产生延误补偿、降舱补偿、退票补偿等，此外航班不正常还将影响整体服务质量和旅客满意度。不正常航班对旅客的影响衡量指标通常有两个：“旅客延误时间”和“旅客补偿成本”。

“旅客延误时间”是旅客和民航业最为关心的指标之一，也是不正常航班恢复模型最典型的目标；“旅客补偿成本”应该包括：旅客延误补偿、旅客降舱补偿（损失）、旅客退票补偿。

一般来说，为了简化模型，**目标函数只包含旅客取消成本和旅客延误成本**。旅客延误成本等于单位时间平均旅客延误成本乘以延误时间。**当某航班延误成本大于取消成本时，一般将该**



**航班取消。**因此，可以通过计算延误成本的临界值，将航班取消转化为航班延误，进一步简化成本计算和算法求解。假设当航班延误  $t$  小时，延误成本大于或等于取消成本，**则将所有延误超过  $t$  小时的航班都取消，可以认为：取消一个航班等价于将航班延误  $t$  小时。**这种情况下，该目标本质等同于“旅客延误时间”。

### 3) 减少航班不正常带来的运行成本

随着研究的不断深入，模型的不断完善，学者们逐渐在目标中加入了航空公司运营成本。例如，Jarrah<sup>[7]</sup>在建立的模型中开始允许调机，并对成本进行了细分，计入了调机成本、旅客退票或签转其他航空公司航班的票价损失等直接影响航空公司收益的成本。不正常航班运行成本通常包括调机成本、取消航班退票损失、延误航班餐饮成本、长时间延误航班的食宿成本等<sup>[15]</sup>。通常，延误航班的餐饮及食宿成本可以和旅客延误补偿进行合并，使用平均旅客延误小时成本进行简化。

## 1.3.3 典型约束

旅客行程恢复问题的约束一般可以分为以下两类：功能性约束和运行约束。

### 1) 功能性约束

不正常航班恢复方案需要完成原方案的运输任务，实现运输功能，需要对飞机和旅客行程进行约束。典型的功能性约束有：

- (a) 飞机流平衡。该约束要求在非过夜机场，进港航班数等于出港航班数；在过夜机场，进港航班数减去出港航班数等于过夜飞机数。
- (b) 航班覆盖性和唯一性。该约束要求航班不是执行就是取消。
- (c) 旅客行程可行。该约束要求恢复方案的旅客始发地和目的地与原计划一致。
- (d) 旅客出发时间可行。该约束要求恢复方案的旅客第一个航段的预计出发时间不早于原计划相应的出发时间。
- (e) 旅客覆盖性和唯一性。该约束要求每位旅客被安排一条行程或取消行程。

### 2) 运行约束

不正常航班恢复方案同样要满足一些运行管理规定。典型的运行约束有：

- (a) 过站时间限制。该约束要求同一架飞机进港和出港之间的时间间隔应大于等于最小过站时间标准。
- (b) 更换机型限制。该约束要求航班更换的机型为同一型号或者同一系列飞机。
- (c) 调机限制。是否拥有备份飞机决定了航班恢复中是否可以进行调机。
- (d) 航班座位数限制。该约束要求旅客人数不大于可用座位数。可用座位数由机型和订座

人数决定，订座人数等于恢复期开始时的订座人数加上恢复期内预计订座人数。

- (e) 航班要客等级限制。航班的要客等级决定了航班是否允许取消、航班允许延误的最长时间。

## 1.4 研究内容和研究方法

### 1.4.1 研究内容

为解决不正常航班旅客行程恢复问题，本文进行不正常航班旅客行程的分阶段和一体化恢复问题研究，分别建立符合国情、符合管制条例和调度规则的旅客行程恢复模型，设计出高效的算法并完成问题求解。

具体研究内容包括：

1. 中国航空公司不正常航班旅客管理现状及运行控制部门处理不正常航班的具体流程，更改飞机路线和旅客行程需考虑的限制因素、飞机调度的各项成本、旅客延误补偿方案和优化管理旅客延误的方法。
2. 通过已开发的飞机路线恢复系统获得飞机路线恢复方案，进行基于飞机路线的旅客行程恢复问题的优化建模与算法设计。
3. 对飞机路线和旅客行程一体化恢复问题，在已有的研究基础上，完善模型假设，进行优化建模与算法设计。

### 1.4.2 研究方法

本文通过实地调研和查阅资料，完成对不正常航班恢复问题的透彻理解 and 需求分析；以数学规划模型实现该问题的抽象表达，并通过优化求解算法和计算机编程技术，实现这一问题的求解与分析。

本文采用的技术路线如下：

1. 实地调研、查阅资料，构建飞机路线和旅客行程恢复模型的目标函数和约束条件。通过前往航空公司运控中心实地观察实习以及与工作人员的交流，了解不正常航班恢复工作的操作流程、模型中目标函数和相关软性约束；通过阅读我国相关民航法规，了解相关硬性约束。
2. 通过理论研究优化建模方法以及国内外关于不正常航班恢复问题的模型，构建符合我国国情、符合实际运行控制流程和管制条例的不正常航班旅客行程恢复模型。
3. 通过系统研究大规模整数规划的求解算法——精确求解算法、近似求解算法和启发式算法，进行该问题的算法设计：分析已建立的模型，根据模型的特点，选用高效快速的算法进行求解。

4. 进行试验验证和实验分析：在VC++6.0平台上，使用结构化设计的程序开发方法，设计旅客行程恢复程序。通过大规模案例进行实验分析；通过不同恢复方案的对比，分析算法的恢复效果及差异原因；最终完成不正常航班旅客行程恢复决策支持系统的开发。

## 1.5 论文结构

本文首先在熟悉和理解不正常航班恢复问题的基础上，概括和对比分析了该问题的研究现状。通过对航空公司运行控制中心的实地调研，了解了不正常航班旅客行程恢复的管理方法，介绍了航空公司处理实际的不正常航班旅客行程恢复问题的方法和流程，并探讨了优化该问题的管理方法。在此基础之上，本文进行了不正常航班旅客行程分阶段恢复问题研究以及飞机路线和旅客行程一体化恢复问题研究，建立了不正常航班旅客行程恢复问题的多商品流模型，采用精确求解算法和启发式算法完成了两个问题的求解，并通过实际规模的案例进行了算法验证和结果分析。

全文共分为五个章节，具体的章节内容安排和介绍如下：

章	节	主要内容
第一章 绪论	1.1 研究背景 1.2 旅客行程恢复研究现状分析 1.3 旅客行程恢复问题总结 1.4 研究内容和研究方法 1.5 论文结构	介绍论文的选题背景，概述并总结不正常航班旅客行程恢复问题的国内外研究现状，简述本文的研究内容、研究方法以及论文结构。
第二章 不正常航班旅客管理方法	2.1 航班不正常旅客服务 2.2 航班不正常旅客安排 2.3 优化管理方法 2.4 本章小结	介绍航空公司在不正常航班发生后的管理方法，包括航空公司提供的旅客服务、旅客安排，介绍优化旅客管理的方法。
第三章 旅客行程分阶段恢复问题	3.1 引言 3.2 术语定义 3.3 旅客行程恢复模型 3.4 算法设计 3.5 算例分析 3.6 本章小结	建立不正常航班旅客分阶段恢复问题的多商品流模型，设计 Danzig-Wolfe 算法进行模型的求解，通过算例结果分析进行算法验证。

第四章 飞机路线和旅客行程一体化恢复问题	4.1 引言 4.2 术语定义 4.3 飞机路线和旅客行程一体化恢复模型 4.4 算法设计 4.5 算例分析 4.6 本章小结	建立不正常航班飞机路线和旅客行程一体化恢复问题的混合规划模型, 结合贪婪算法、模拟退火算法、Danzig-Wolfe 算法进行算法设计, 并通过算例分析进行算法验证。
第五章 全文总结与研究展望	5.1 本文总结 5.2 本文创新点 5.3 研究工作展望	对全文的研究内容和结果进行总结, 归纳文章的创新点以及有待后续研究的内容。

## 第二章 不正常航班旅客管理方法

不正常航班旅客的管理主要分为两个部分：航班不正常服务和航班不正常旅客安排。当出现航班不正常后，旅客会获得经济补偿、退票/改签、食宿、帮助成行等服务，航空公司会通过航班分流、合并航班以及航班顺延等策略安排无法继续行程的旅客。本章将首先介绍航班不正常服务及旅客安排，为后续研究做铺垫，在此基础上介绍旅客的优化管理方法和改进建议。

### 2.1 航班不正常旅客服务

#### 2.1.1 经济补偿

国家民航总局于 2004 年 6 月公布了《民航总局对国内航空公司因自身原因造成航班延误给予旅客经济补偿的指导意见（试行）》（以下简称《航班延误经济补偿指导意见》）。这份意见就国内航空公司因自身原因造成航班延误给予旅客的经济补偿提出了指导意见，并明确了航班正常率与航班/航线经营权挂钩的具体措施。根据这份指导意见，旅客在遇到航空公司自身原因导致的长时间延误时，可以得到经济补偿。这份意见将航空公司自身原因造成的延误按标准分为两种：延误 4 小时以上（含 4 小时）、8 小时以内的和延误 8 小时以上（含 8 小时）的。对于这两种延误，航空公司要对旅客进行经济补偿，航空公司应尊重旅客本人的意愿和选择，补偿方式可以为现金、购票折扣或返还里程等方式。在航班延误情况下，为避免进一步影响后续航班和旅客，一般不在机场进行现场补偿，航空公司可采用登记、信函等方式进行事后补偿。<sup>[26]</sup>

国家民航总局表示，航空公司可在《航班延误经济补偿指导意见》的框架下自行制定具体的补偿标准和补偿方案，制定并公布《旅客服务承诺》，将旅客延误给予旅客补偿的标准和办法作为主要内容。

深圳航空公司是第一家向社会公布旅客服务承诺的公司。《深圳航空公司顾客服务指南》中明确指出，由于航空公司原因造成的延误，深圳航空公司将予以补偿，补偿标准为：延误 4 小时以上（含 4 小时）、8 小时以内的，补偿旅客所持票面价格的 30%；延误 8 小时以上（含 8 小时）的，补偿旅客所持票面价格的 100%。鹰联航空公司（后来的成都航空公司）是第二家响应《航班延误经济补偿指导意见》的公司，鹰联航空公司规定的两种延误补偿标准分别为旅客所持票面价格的 20% 和 40%。

除此之外，航空公司对航班延误的经济补偿标准比较模糊，未公布旅客服务承诺。《航班延误经济补偿指导意见》未能真正发挥作用，反而促使部分旅客在这种不对等的关系下，丧失对

航空公司的信任，出现拒绝登机、霸机、损毁机场设施、与工作人员发生冲突等过激行为，导致航空公司和机场受到严重损失。

### 2.1.1 退票/签转

由于航班取消、提前、延误、航程改变或航空公司无法提供原定座位时，旅客要求退票视为非自愿退票。航空公司对旅客非自愿退票和签转一般在其《旅客须知》中均有明确的规定。

**一般来说，在非自愿情况下的客票退票执行以下规定：**

#### 1) 始发站退票

由于航班取消、提前、延误、航程改变或航空公司不能提供原定座位时，航空公司将在始发站退还旅客全部票面票款。

#### 2) 经停地或备降地退票

在经停地或备降地，航空公司将根据旅客所持客票舱位等级退还未使用的航段票款，即经停地至旅客所持客票上目的地间的公布普通票价乘以旅客原购客票折扣得出的金额（若经停地或备降地至旅客所持客票目的地间没有定期航班的公布正常票价，航空公司将参照其它交通工具的费用退还票款），但不超过原付票款金额，均不收取退票手续费。有的航空公司在经停站或备降地的退票更加人性化，例如，厦门航空公司规定退还的票款应保证旅客能够继续旅行至目的地。

#### 3) 来回程退票

来回程已使用部分航段后，航空公司将根据原实付票款扣除已使用航段票款，退还未使用航段全部票款。

**航班延误导致的旅客改签一般执行以下规定：**

1) 由于航空公司原因（工程机务、航班计划、运输服务、空勤人员）造成航班延误时间较长或取消，航空公司将尽力将旅客安排到最早的后续航班，使旅客能够尽早成行，票款差额由航空公司承担。另外，中国国际航空公司还规定：在必要时为旅客延长客票有效期，如果改变后航程的票价和费用低于旅客已付的票价和费用，航空公司将退还差额；

2) 由于非航空公司原因（包括天气、空中交通管制、突发事件、机场等原因）引起的非自愿变更或签转，航空公司为旅客安排临近的航班，票款差额由旅客自己承担。

### 2.1.2 提供食宿

航班发生不正常时，航空公司有责任帮助旅客解决当前的生活问题，提供食宿。这样做一方面可以提高旅客满意度，另一方面在大面积延误情况下，可以缓解旅客对抗心态，有利于不正常航班恢复管理工作的开展。一般来说，延误时间 4 小时以内的航班，航空公司会为旅客提

供餐食和饮用水，对于延误超过 4 小时（有的航空公司为 8 小时）的航班，航空公司会提供住宿。因航空公司的原因，造成航班延误或取消，航空公司应免费向旅客提供餐食和饮用水；由于天气、突发事件、空中交通管制、安检和旅客等非航空公司原因在始发站造成的延误或取消，航空公司可协助旅客安排膳宿，费用由旅客自理。同时，中国国际航空公司承诺：航班在经停地点延误或取消，无论何种原因，航空公司均将向旅客提供餐食、住宿等。另外，为体现航空公司的人性化服务，提高旅客满意度，有些航空公司为延误旅客提供免费电话，为特殊旅客提供相应的特护服务等。<sup>[27]</sup>

### 2.1.3 协助成行

在发生航班不正常之后，旅客与航空公司之间处于明显的信息不对称关系，旅客往往无法了解航班延误现状、后续恢复情况，只能依赖于航空公司为其做出合理的选择。航空公司在旅客服务承诺中也提出会尽力协助旅客及时成行，尽可能安排到最早的后续航班。

海南航空公司和中国国际航空公司均在服务承诺中说明，当发生航班不正常时，会为旅客安排本航空公司最早有可用座位的定期航班而不额外收费，在必要时延长旅客的客票有效期；或在合理期限内，通过改变旅客的行程，安排本航空公司的航班或其它承运人的航班；或者采用相互认可的其它运输方式和舱位等级，将旅客运送到客票上载明的目的地点，不额外收费。

另外，中国东方航空公司还承诺将通过以下方式及时、完整地提供关于航班延误、取消和变化状态的信息：如果旅客在预定客票时提供了联系信息，航空公司将在获悉航班延误或取消信息后，在客票列明的离站时间前 4 小时前或更早时间通知旅客，以免旅客赶到机场耗费时间。在机场或飞机上发生航班延误或取消时，航空公司将及时发布书面告示或广播向旅客提供航班延误时间和预计离港时间等信息。航班延误时间不确定时，航空公司将每隔 30 分钟向旅客通报一次航班动态信息。对于在机场候机楼贵宾休息室或客舱等待的旅客，如果航班延误时间不确定，航空公司将每隔 20 分钟向旅客通报一次航班动态信息。在机场候机楼或客舱发生航班延误，旅客可通过登机口工作人员或乘务人员及时获取航班延误、变化状态等最新信息。旅客也可垂询客户服务热线获得航班延误或取消最新信息。

## 2.2 航班不正常旅客安排

### 2.2.1 旅客安排策略

在航班不正常发生后，类似于飞机恢复和机组恢复，航空公司也会有相应的工作人员负责对延误旅客进行行程的重新安排，通常会通过航班分流、合并航班、航班顺延等方式实现长时间延误旅客的签转，减少旅客的延误。

#### 2.2.1.1 航班分流

航班分流是航空公司最常用的方式。航空公司对于延误 4 小时以上的航班，通常会选择让旅客分流到临近且有可用座位的后续航班上。在航班的选择上，航空公司通常会参照这样的先后顺序：（1）选择承运航空公司航班；（2）选择同一个航空联盟的航空公司航班；（3）在旅客要求下选择其他航空公司航班。航班分流一般不在天气原因及机场关闭情况导致的航班延误情况下使用。

#### 2.2.1.2 航班顺延

当某个航班出现长时间延误时，如果该飞机还有较多后续执飞航班，或者该航班属于某一个航班波，则该航班的延误可能会导致较多后续航班的延误以及航班波的衔接中断，较多旅客无法中转。这种情况下，航空公司会考虑将后续航班或航班波内的航班都顺延一些，增加这些航班的过站时间，吸收部分延误。这种做法很普遍，通常，航班刻意延迟的时间不会超过 30 分钟（超过 30 分钟的航班被定义为不正常航班，影响航空公司正常率）。采用航班顺延的策略，可以在保证正常率的情况下，减少了衔接失败的旅客人数，且 30 分钟之内的延误也属于旅客接受范围，这种策略可以实现航空公司和旅客的双赢。

#### 2.2.1.3 合并航班

飞机是航空公司的重要资源，通常在遇到大面积航班延误和飞机故障时，不会有充足的备份飞机可以调用，此时，合并航班是不少航空公司的选择。通常，航空公司会视航线客座情况以及航班频率，选择时间临近的两个航班进行合并。这样做虽然使得这两个航班中前一个航班的旅客产生了延误，却空出一架飞机，可以大大缩短其他航班的延误时间。从整体来说，是一个更优的选择。

### 2.2.2 航班恢复流程

不正常航班发生的原因有很多，如飞机故障、大雾、台风、雷雨、流量控制等，签派人员会综合考虑各种影响因素对后续航班运行的不同影响进行航班的恢复工作。因此，对于不同的不正常原因，航空公司有不同的航班处理流程。本文根据调研结果，结合运行控制中心签派人员的决策依据和决策过程进行了归纳总结，将不正常航班恢复过程分为了轻度延误和严重延误两种情况，详细介绍了航空公司不正常航班的恢复流程。由于本文的研究重点是飞机路线和旅客行程恢复，以下将不讨论机组恢复流程。

#### 2.2.2.1 轻度延误的不正常航班恢复流程

局部航线的流量控制、某个飞机的机务故障、小范围且持续时间不长的天气原因等会造成某些航班或者某些机型的航班不正常，不造成严重的航班延误。这种情况下的航班恢复一般遵



循下面的步骤流程：

- (1) 了解影响因素的详细情况，包括影响范围和持续时间；
- (2) 根据了解到的情况给出受影响航班的预计延误时间，作为临时参考；
- (3) 对受影响的第一个航班做出延误、调整或取消的决策；
- (4) 对后续航班做出决策；
- (5) 实时了解影响因素发展情况，若没有发生变化，则决策不变；否则重新决策。若影响范围或持续时间变长，造成了严重的航班延误，则考虑使用严重延误的不正常航班恢复流程。

#### **2.2.2.2 严重延误的不正常航班恢复流程**

影响范围大、持续时间长的天气原因或严重的流量控制等原因会导致航班大面积延误甚至是机场关闭。这种情况下，航班恢复一般遵循下面的流程：

首先，将需要调整的航班分为三类：a) 已经起飞需要选择备降机场的航班（一般不需要重新选择备降机场，但也有例外）。b) 出发或到达机场受影响的航班。c) 后续非航空公司原因导致的延误航班。

对于 a 类航班，根据航空公司运行手册的规定和当时的天气情况等做出延误、调整或取消的决策。

对于 b 类和 c 类的航班采用以下步骤进行恢复：

- (1) 计算受影响的航班在延误时段各个航线上总的延误旅客人数，查询当前可用飞机，优先选择座位数与该航线上延误旅客人数匹配的飞机，做出航班取消或合并的决策。
- (2) 若旅客能够顺利安排，则优先考虑航班合并，合并后取消的航班号由商务部门决定。
- (3) 若旅客不能顺利安排，但可以分流到本公司的后续航班中，对旅客进行签转，可取消受影响的航班。
- (4) 若本公司的航班都无法提供处理方案，但其他航空公司的航班可以安排旅客，则为旅客签转到其他航空公司的航班上，可取消受影响的航班。
- (5) 若所有航空公司的航班均无法提供处理方案，则延误该航班或取消航班改成第二天补班。

#### **2.2.2.3 航班恢复优先顺序**

当发生严重的航班延误，航空公司面临多个航班同时需要调整时，一般会遵循一定的优先顺序进行恢复工作。根据实地调研，能够得到签派人员认可的恢复顺序有两种：

第一种是：

先重后轻，即优先考虑专机或要客航班；

先复杂后简单，即优先考虑复杂条件和航行保障限制的机场航班；

先长后短，即优先考虑长航线的航班。

另一种的优先顺序从上到下是：

要客航班；

公司领导航班；

机场夜航限制航班；

延误严重或多次延误的航班；

维修部门要求尽早进行航后检查的航班；

国际航班；

类似京沪快线的重点航班；

联程航班；

旅客较多或者满座航班。

## 2.3 优化管理方法

为进一步加强工作，提高航班不正常服务，国家民航局和航空公司都在不少方面进行了努力，其中包括国家民航局制定的不正常航班报告制度、资质审核制度，航空公司和保险公司联合推出的责任分担机制等。但由于旅客与航空公司信息不对称、航空公司补偿不到位、工作人员服务不主动等原因，旅客在航班延误时往往处于无助、不信任、失望的状态，不断出现与工作人员的冲突事件，影响航空公司和机场的正常工作。国家民航局、航空公司、机场应当针对问题，采取相应的改善措施，例如，加快立法，建立旅客辅助决策部门等。

### 2.3.1 报告制度和资质审核

为保证航班运行正常率，国家民航局在 2004 年 6 月提出的《航班延误经济补偿指导意见》中将航班正常与航线（航班）经营权挂钩，并提出了四项具体措施：第一，对上半年航班正常率、航班计划执行率低于行业平均水平的航空公司，在审定下一航季航班计划时，限制其航班总量的增加。第二，对前三季度航班正常率较低的航空公司，停止审批下一个季度的加班包机飞行；在运输旺季，有限制地审批加班包机飞行。第三，对擅自改变所给定的航班时刻，或售票时刻与公布时刻不一致的航空公司，撤销该航班经营许可和飞行时刻。第四，对因航空公司主观原因，或客观原因延误后不作有效处理，造成航班 12 小时以上延误的，视情节轻重，暂停或撤销该航线（航班）经营许可。

同时，国家民航局于 2004 年 7 月 1 日实行航班正常报告制度。各航空公司每月 10 日前要向总部所在地地区管理局报送上月航班正常报告书，并抄报民航总局运输司，报告书由企业主

要负责人签署。各航空公司内部要建立航班延误即时报告制度,根据延误程度逐级报告,及时、妥善地作出处理。凡发生延误 2 小时以上航班,必须即时报告当日值班领导;凡发生延误 4 小时以上航班,必须即时报告当地管理局和安全监管办公室,地区管理局和安监办值班领导及有关部门对延误航班的处理进行督促检查。

### 2.3.2 责任分担机制

航空公司为追求企业利益最大化,会尽量避免索赔,为同时符合民航局提出的指导意见,提高旅客的满意度,许多航空公司与保险公司合作,联合推出“航班延误险”,将经济补偿责任与保险公司共同分担。<sup>[26]</sup>这样做一方面可以监督航空公司进行延误控制,另一方面保证了稳定的延误补偿,让旅客在航班延误时更加安心,减少了争执冲突事件的发生。

从航班延误险问世八年的经验来看,航班延误险一般与航空意外险组合推出,但是由于延误险的赔偿额度较低,理赔手续繁琐,降低了消费者的购买欲望,且航空公司为避免赔偿不积极宣传,航空延误险的市场知晓程度很低。对此,相关的产险公司已开始投入到相关产品的研发当中。例如结合国外的先进经验,将航班延误险的赔偿标准多元化,适应不同层次的旅客需求,如:提高国际航空及 VIP 旅客的赔偿金额,将延误 4 小时赔付调整为延误 2 小时赔付,将旅客延误补偿扩展到行李延误、丢失补偿等。随着责任分担机制的引入,相关产险公司也逐步调整角色,协助航空公司提高了运输服务的质量,提高了航班不正常时旅客的满意度。

### 2.3.3 加快立法

《中华人民共和国民用航空法》于 1995 年出台,至今已过去了 17 年,随着民航运输的快速发展,这部法律已经在诸多方面不能适应当前的发展形势。国家民航局关于航班延误的经济补偿问题未能明确立法,给出的指导意见无法真正发挥作用,应尽早明确航空公司在航班不正常时应尽的法律责任、航班延误的具体定义以及经济补偿的金额,做到有法可依,才能更好的服务旅客,加强旅客对航空公司的信任,提高旅客满意度,减少过激行为的发生。

### 2.3.4 建立旅客帮助部门

根据一项旅客调查,在航班延误情况下,最希望进行经济补偿的旅客只占 26.28%,最希望及时成行、掌握知情权的旅客占 73.72%。<sup>[26]</sup>而事实上,在很多机场,航班延误之后,旅客通常处于被忽视的状态,几乎没有工作人员与旅客主动交流,没有信息来源,也没有其他帮助。旅客不知道航班会有什么变化,不知道自己会被如何安置,有急事的旅客不知如何才能及时成行,随着时间的推移,旅客内心的疑惑越来越多,在对延误原因和 workflows 不了解的情况下,极易引发旅客和工作人员的冲突。<sup>[28]</sup>因此,机场应在各航空公司的配合下组织建立一个针对不正

常航班旅客的帮助部门，该部门主要负责延误信息的公布和帮助旅客选择航班。该部门可以与媒体合作或沟通，采用电视、网络等方式即时进行信息公布，包括航班延误原因、预计延误时间、受扰航空公司经济补偿标准、人性化服务内容、签转/退票政策等。为了消除旅客无助、被忽视的感受，该部门可以考虑在航班延误发生时派工作人员第一时间出现在旅客群中，主动安抚旅客，告知延误信息、帮助答疑解惑，而不是等到公众情绪发展到一定程度被动的接受大量旅客多次询问。另外，该部门需要与运行控制中心及时沟通，通过不正常航班恢复系统平台或根据飞机路线调整方案采用经验方式，为旅客提供更换航班的最优方案。在遭遇大规模航班延误或机场关闭的情况下，该部门应配合各航空公司的旅客服务部门，帮助旅客更改为地面交通运输方式。

## 2.4 本章小结

本章介绍了航空公司的航班不正常旅客服务和旅客安排，并总结旅客管理现状，分析优化管理的方法，详细探讨了航班不正常的旅客管理方法。其中，航班不正常旅客服务的分析为下文的模型参数提供了成本分析的依据；航班不正常旅客安排策略和航班恢复流程的分析为下文的模型算法提供了恢复策略和方法的参考，是后续研究假设抽象的基础。

## 第三章 旅客行程分阶段恢复问题

### 3.1 引言

旅客行程恢复是不正常航班恢复问题中必不可少的部分。分阶段恢复问题中，在完成了第一阶段的飞机路线恢复之后，某些航班被取消或延误，相应的旅客取消和延误作为旅客延误成本计入了该阶段的目标函数，实现了成本最小化。但仍有一部分多航段旅客，由于计划的变动，导致行程无法衔接。由于我国主要航空公司航班的客座率一般在 70%-80%<sup>[1]</sup>，每个航班都有可用的剩余座位，如果充分利用这些剩余座位，可以实现受扰动旅客的行程重排。分阶段恢复中旅客行程恢复的目标就是在获取旅客订座信息、航班延误信息以及不正常航班恢复方案的基础上，站在全局的角度，通过签转和取消的策略，为衔接失败的旅客重新安排航班，减少旅客退票和延误时间。

本章在航班恢复方案的基础之上，根据航班订座信息，对行程受到扰动的旅客进行行程调整，将旅客行程恢复问题处理成经典的多商品流模型，采用 Danzig-Wolfe 算法进行求解，并通过一个实际规模的算例验证算法的可行性和效率。

### 3.2 术语定义

下面将对本章中即将用到的术语进行定义：

**定义 3-1** 航班恢复方案：分阶段恢复中第一阶段飞机路线恢复的求解结果，即通过取消航班、延误航班、调机、交换飞机、重排飞机路线等方式，得到的新的航班计划。该航班计划包含以下信息要素：航班号、航班是否被取消、出发机场、预计出发时间、到达机场、预计到达时间、飞机尾号、飞机机型等。

**定义 3-2** 受扰动旅客：按照航班恢复方案，由于某些航班取消或延误，导致行程无法满足衔接条件的旅客。这部分受扰动旅客就是本章旅客行程恢复问题的研究对象。

**定义 3-3** OD 对：满足始发地和目的地以及出发时刻相同的旅客集合。OD 对是对旅客进行分类形成的集合，是本章模型中的“商品”。

**定义 3-4** 行程（路径）：旅客完成出行所乘坐的航班构成的路径和时刻要求。

**定义 3-5** 可行行程（路径）：满足始发地和目的地与旅客原行程相同，出发时刻不早于旅客原定出发时刻的航班路径。

**定义 3-6** 时空网络：以机场时刻为结点，航班为弧的有向网络。在此，将机场时刻结点简

化为机场出发航班的计划出发时间/到达航班的计划到达时间。

### 3.3 旅客行程恢复模型

#### 3.3.1 模型假设

本文为简化模型和算法,对航空公司不正常航班恢复的实际操作规范和原则进行适当抽象,做以下假设:

- 1) 航班不正常发生后,在进行旅客行程恢复之前已获得了航班恢复方案,调整旅客行程的过程中不对航班计划进行调整。
- 2) 只针对受扰动旅客进行行程调整。受扰动旅客通过签转到其他航班的方式获得新的行程;无法实现签转的旅客进行取消行程操作。
- 3) 航班容量限制为航班剩余座位数;OD 对的旅客需求已知,且不再变化。

#### 3.3.2 构造时空网络

本文采用时空网络建立旅客行程恢复问题的多商品流模型。多商品流模型中的“商品”、“弧”和“商品流通成本”分别对应为时空网络中的“OD 对”、“航班”和“OD 对运输成本”。

##### 3.3.2.1 受扰动 OD 对的构造

构造受扰动的 OD 对,首先要根据航班恢复方案和订座信息,采集受扰动旅客信息。由于航班信息以及旅客信息规模较大,如果根据旅客信息一一搜索对应的航班信息,效率将会降低。本文首先根据航班恢复方案,采集受扰动的航班信息,结合航班订座情况,查看该航班上的旅客是否出现衔接失败情况,构造出受扰动的旅客信息。然后将相同始发地和目的地以及相同计划离港时间的旅客分到一个 OD 对中,对同一个 OD 对进行订座旅客人数统计和预测,获得 OD 对的旅客需求。

##### 3.3.2.2 航班弧的存储

本文根据航班恢复方案构造航班弧信息,建立航班弧的连接表,完成多商品流模型中弧的构建。航班弧的连接矩阵是一个大规模的稀疏矩阵,本文采用十字链表存储航班弧连接,配合栈的使用,以便求解 OD 对的可行路径。为了减小链表规模,十字链表中不包含取消航班弧。在初始化链表时,本文对航班恢复方案的航班出发时刻排序,以便 3.4.2 节的子问题快速求解。

##### 3.3.2.3 成本的表达

不正常航班旅客行程恢复问题中的成本主要包括旅客行程取消成本、旅客延误成本以及旅客中转成本。每一个 OD 对选择一条航班路径(可能包括多个航班)均有对应的成本,而多商品流模型要求每一个 OD 对选择每一条弧(即一个航班)均有相应的成本,这就需要对成本进

行分解。成本的分解关系到数学模型中目标函数的表达方式，本文将在后面进行详述，具体见 3.3.4.2 节。

### 3.3.3 符号定义

#### 上下标

$i, j$  等表示时空网络的节点。

$(i, j)$  表示时空网络图上从节点  $i$  到节点  $j$  的弧，即一个航班。

$k$  表示编号为  $k$  的 OD 对。

#### 集合

$E$  表示时空网络图上所有弧的集合，即  $(i, j) \in E$ 。

$K$  表示所有受扰动旅客 OD 对的集合。

#### 参数

$C_{ij}^k$  表示 OD 对  $k$  在弧  $(i, j)$  上的单位流成本，即编号为  $k$  的 OD 对上一位旅客乘坐该航班的成本。 $C^k$  表示 OD 对  $k$  取消一位旅客行程的成本。

$d^k$  表示 OD 对  $k$  的旅客需求。

$s^k$  和  $t^k$  分别表示 OD 对  $k$  的始发地时空节点和目的地时空节点。

$u_{ij}$  表示弧  $(i, j)$  的容量上限，即该航班的剩余座位数。

$\sigma_i$  表示取消旅客在时空网络中的流向。

$$\sigma_i = \begin{cases} 1, i = s^k \\ 0, \text{others}, k \in K \\ -1, i = t^k \end{cases}$$

#### 变量

$x_{ij}^k$  表示 OD 对  $k$  在弧  $(i, j)$  上的流量，即编号为  $k$  的 OD 对中乘坐该航班的旅客人数。

$y^k$  为 OD 对  $k$  取消行程的旅客人数。

### 3.3.4 数学模型

#### 3.3.4.1 多商品流模型

根据上文构造的时空网络和符号定义，可以给出不正常航班旅客行程恢复问题的多商品流模型如下：

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} C_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} C^k y^k \quad (3.1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in adj(i)} x_{ij}^k - \sum_{j: i \in adj(j)} x_{ji}^k + \sigma_i y^k = \begin{cases} d^k, i = s^k \\ 0, others, k \in K \\ -d^k, i = t^k \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij}, (i, j) \in E \quad (3.3)$$

$$x_{ij}^k, y^k \geq 0, x_{ij}^k, y^k \text{ 为整数} \quad (3.4)$$

式 (3.1) 为目标函数, 要求总成本最小, 包括运输成本和取消成本; 式 (3.2) - (3.4) 为约束条件, 其中: 式 (3.2) 为流平衡约束, 要求每个时空节点满足旅客流量平衡, 始发和目的节点保证实际运输的旅客流量与取消旅客流量之和等于 OD 对旅客需求, 由于实际运输的旅客流量大于等于零, 必有  $y^k \leq d^k$ ; 式 (3.3) 为航班弧的容量约束, 要求改签到该航班的旅客总量不超过该航班的剩余座位数; 式 (3.4) 是决策变量的非负约束, 要求每个航班上乘坐的旅客人数和取消行程的旅客人数大于等于零且为整数。

#### 3.3.4.2 成本的分解

多商品流模型中每一条航班弧对应一个 OD 对, 均有相应的成本, 因此需要进行成本分解。如果首先计算整个路径对应 OD 对的成本, 再对各航段进行成本分摊, 则需要生成各个 OD 对的所有可行路径, 效率极低。图 3.1 所示, 本文定义的航班弧有三种: 取消弧、延误弧和中转弧, 分别对应旅客行程恢复问题中三个主要成本。根据生成的 OD 对信息, 每一个 OD 对均设有一条从始发地到目的地的虚拟取消弧, 假设取消一位旅客的订票不发生其它费用, 只是减少了相应的机票收入, 则取消弧的单位流成本为航班平均票价。根据航班恢复方案, 执行航班均为一条延误弧或中转弧, 旅客行程最后一个航段决定旅客的总延误时间, 属于延误弧, 旅客延误成本与旅客总延误时间有关, 因此延误弧的成本为延误成本。其他始发和中转航段为中转弧, 中转弧的成本为签转方案导致旅客出行不便的固定费用。为保证在成本相同的情况下, 尽量让旅客乘坐原航班, 减少旅客签转, 设定旅客原行程中的中转弧成本为零。



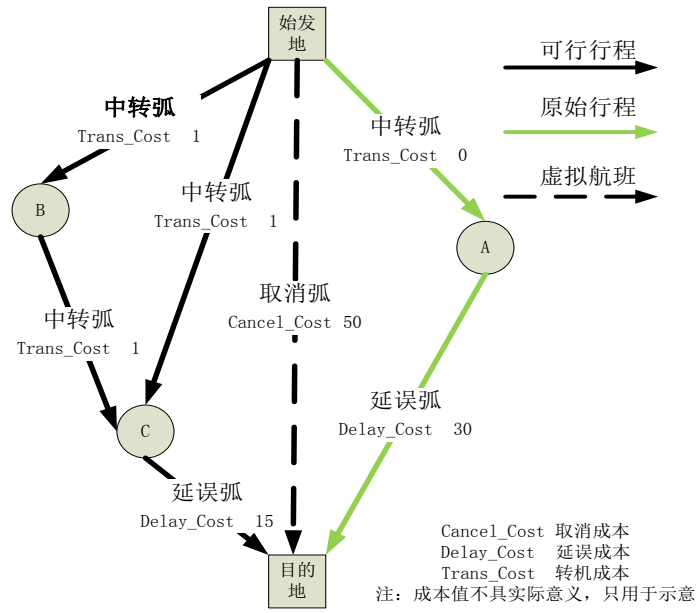


图 3.1 成本分解示意图

### 3.4 算法设计

本文 3.3 节提出的旅客行程恢复模型是一个基于时空网络构建的多商品流模型，同时也是一个组合优化问题。由于时空网络中的航班弧和 OD 对数量规模较大，如果预先生成所有组合情况，再进行最优搜索，效率不高。本文采用 Danzig-Wolfe 分解算法对 3.3 节的多商品流问题进行求解，由于算法过程中逐个生成组合解，减少了时间和空间的消耗，提高了效率。

Danzig-Wolfe 分解算法建立在列生成算法基础之上，将约束条件处理成“难处理”和“易处理”约束。主要思想是：对于大规模的线性规划问题，用“难处理”的约束条件构造主问题，“易处理”的约束条件构造子问题。不必列出所有的列，只求解这个约束矩阵列的一个子集构成的问题（称为限制主问题），获得原问题的解。在每一步求解限制主问题迭代过程中，通过子问题的解产生入基的新列，并重新进行迭代。当限制主问题的解符合最优性检验标准则停止迭代，此时获得原问题的最优解。

模型中式(3.3)为“难处理”约束条件，用来构造主问题，式(3.2)和（3.4）为“易处理”约束，用来构造子问题。式（3.2）和（3.4）构成的可行域  $X$  是一个  $K$  维空间封闭的凸多面体，其中任意一点可以表达成如下形式：

$$x = \sum_{l \in L} \lambda_l x^l \quad (3.5)$$

$$\sum_{l \in L} \lambda_l = 1 \quad (3.6)$$

$$\lambda_l \geq 0, l \in L \quad (3.7)$$

其中,  $L$  是  $X$  顶点指标集;  $x^l$  是  $X$  的一个顶点, 是子问题的一个基本可行解, 即  $k$  个无容量约束最短路问题最优解的组合;  $\lambda_l$  为极点  $x^l$  的凸组合系数,  $0 \leq \lambda_l \leq 1$ 。

### 3.4.1 主问题

根据模型的分解, 本文采用路径变量表示主问题:

$$\min Z = \sum_{l \in L} \left( \sum_{k \in K} C(p_l^k) f(p_l^k) \right) \lambda_l \quad (3.8)$$

s.t.

$$\sum_{l \in L} \left( \sum_{k \in K} \sigma_{ij}(p_l^k) f(p_l^k) \right) \lambda_l + S_{ij} = u_{ij}, (i, j) \in E \quad (3.9)$$

$$\sum_{l \in L} \lambda_l + S_0 = 1 \quad (3.10)$$

$$\lambda_l \geq 0, l \in L \quad (3.11)$$

$p_l^k$  为子问题第  $l$  次求解获得 OD 对  $k$  的最短路径 ( $p_l^k$  可能是 OD 对  $k$  的取消弧, 表示取消旅客行程);

$\sigma_{ij}(p_l^k) = 0$  或 1, 表示  $p_l^k$  是否包含边  $(i, j)$ , 包含时为 1, 否则为 0。若  $p_l^k$  为 OD 对  $k$  的取消弧, 则  $\sigma_{ij}(p_l^k) = 0$ 。

$C(p_l^k)$  表示第  $k$  种商品在路径  $p_l^k$  上的单位流成本, 若  $p_l^k$  为 OD 对  $k$  的取消弧, 则  $C(p_l^k) = C^k$ , 即 OD 对  $k$  取消一位旅客行程的成本。

$f(p_l^k)$  (以下简称为  $f_l^k$ ) 为第  $k$  种商品在路径  $p_l^k$  上的流量,  $f_l^{k*}$  为第  $l$  次求解子问题 OD 对  $k$  的最优解。由于子问题没有容量约束, 最优解即为沿路径  $p_l^k$  运送 OD 对  $k$  的全部旅客, 即  $f_l^k = d^k$ ; 若  $p_l^k$  为 OD 对  $k$  的取消弧, 则  $f_l^k = y^k = d^k$ 。

$S_0$  为人工变量,  $S_{ij}$  为松弛变量, 用于生成初始可行解。

主问题是一个规模较小的线性规划问题, 本文采用修正单纯形法配合热启动的方法进行求解。

### 3.4.2 子问题

子问题的约束条件由模型中式(3.2)和(3.4)构成, 目标函数为主问题变量的简约成本最小。变量  $\lambda_l$  的简约成本是  $\delta_l = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} (C_{ij}^k - \pi_{ij}) f(p_l^k) \sigma_{ij}(p_l^k) - \pi_0$ 。

其中,  $\pi_{ij}$  为约束式 (3.9) 对应的对偶变量,  $\pi_0$  为约束式 (3.10) 对应的对偶变量。若  $p_l^k$  为 OD 对  $k$  的取消弧, 则  $\sum_{(i,j) \in E} (C_{ij}^k - \pi_{ij}) f(p_l^k) \sigma_{ij}(p_l^k) = C^k y^k$ ; 否则  $f(p_l^k) \sigma_{ij}(p_l^k) = x_{ij}^k$ , 因

此子问题的模型可以表达为：

$$\min w = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} (C_{ij}^k - \pi_{ij}) x_{ij}^k + \sum_{k \in K} C^k y^k \quad (3.12)$$

*s.t.*

$$\sum_{j \in \text{adj}(i)} x_{ij}^k - \sum_{j: i \in \text{adj}(j)} x_{ji}^k + \sigma_i y^k = \begin{cases} d^k, i = s^k \\ 0, \text{others}, k \in K \\ -d^k, i = t^k \end{cases} \quad (3.13)$$

$$x_{ij}^k, y^k \geq 0, (i, j) \in E; k \in K \quad (3.14)$$

当  $\sum_{(i,j) \in E} (C_{ij}^k - \pi_{ij}) x_{ij}^k > C^k$  时,  $f_l^{k*} = y^k = d^k$ , 此时 OD 对  $k$  的最短路径为取消弧, 流量为 OD 对  $k$  的旅客需求。

### 3.4.3 子问题搜索算法

子问题是  $k$  个 OD 对的广义最短路问题。一般来说, 比较常用的经典算法有狄克斯特拉算法 (Dijkstra algorithm)、弗洛伊德算法 (Floyd algorithm) 等。本文通过对不正常航班旅客行程恢复这一特定问题的研究发现: 旅客的行程通常不会有很多航段, 旅客在接受调整过程中通常也无法接受多次中转, 也就是说, 不正常航班旅客行程恢复问题的时空网络是一个分支很多, 长度很短的网络 (如图 3.2 所示)。因此, 本文采用栈的存储结构和深度优先的搜索策略, 配合十字链表的使用, 采用回溯的方法搜索 OD 对的最短路。

以图 3.2 所示的航班弧网络为例, 根据十字链表, 可以快速地找到 OD 对的延误弧, 即图 3.2 中的弧 B、E、F、R、L 和 M。将这些延误弧按照成本大小进行排序, 这里的优先顺序为: M-L-R-E-B-F。

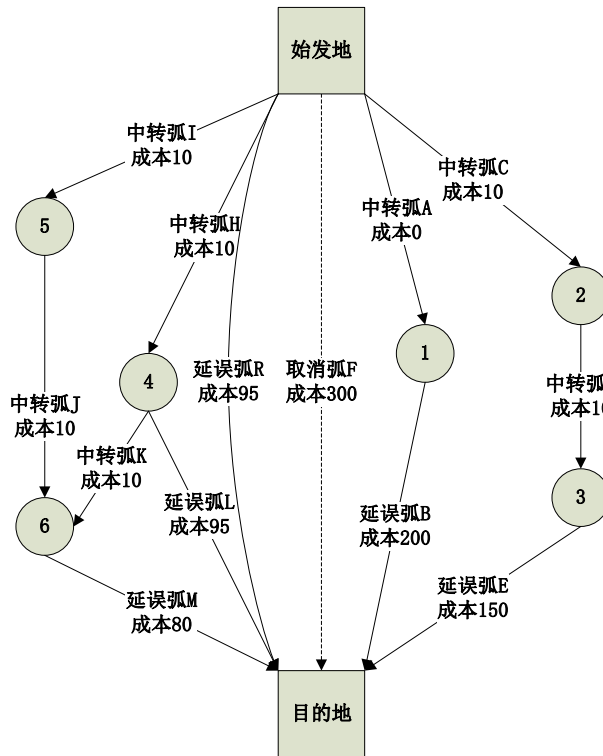


图 3.2 子问题搜索算法的网络弧示意图

为缩小问题规模，本文根据旅客最大可接受的中转次数，将栈的容量设置为 3。在栈的结构之外，再设置两个存储单元，其中一个用于记录下每一次入栈后的当前成本，另一个用于记录当前的可行路径及其成本。

以图 3.2 的网络图为例，首先按顺序将成本最小的延误弧为 M 推入栈中，依次寻找前继中转弧入栈，直到找到可以作为该 OD 对始发航班的弧。这样就得到初始路径 I-J-M，路径成本为 100。得到可行的路径后，将栈顶 I 出栈（J 成为当前栈顶），寻找 J 的前继航班入栈；若没有，则栈顶 J 出栈，栈顶变成 M，继续迭代。当栈为空时，按照成本大小顺序选择下一个延误弧入栈。具体搜索迭代过程见图 3.3。

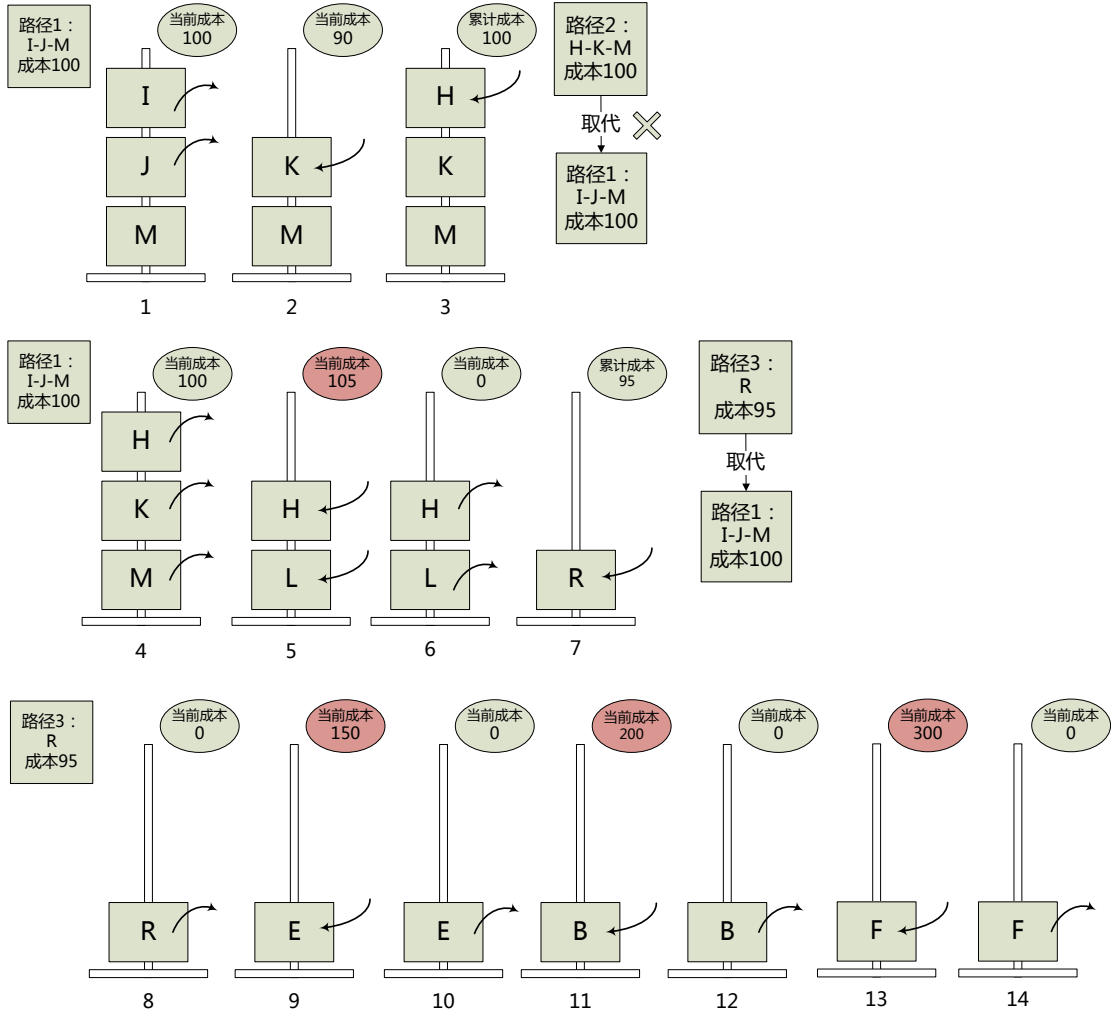


图 3.3 子问题搜索算法的栈存储示意图

在之后的迭代搜索过程中，若某个航班弧入栈后，当前成本大于当前的路径成本，则该航班弧出栈，不再考虑其分支，继续寻找同一级的其他航班弧（见图 3.3 中步骤 5-6、9-14）。当形成可行路径，比较这时的路径成本和当前路径成本，若小于当前路径成本，则进行替代，否则，路径不变，继续迭代。在所有延误弧的可行路径搜索结束之后，若当前路径成本大于取消弧成本，则将栈置空，取消弧入栈。

#### 3.4.4 Danzig-Wolfe 算法步骤

- (1) 给出初始可行列，构造初始限制主问题；
- (2) 解限制主问题，得到对偶变量  $\pi = (\pi_{ij}, \pi_0)$ ；
- (3) 将对偶变量  $\pi$  代入子问题，求解子问题，根据子问题的最优解得到第  $l$  个极点  $x^l$ ；
- (4) 计算最小检验数  $\delta = \min w - \pi_0$ 。若  $\delta < 0$ ，则将极点的组合系数  $\lambda_l$  作为入基变量，返

回步骤(1); 若  $\delta \geq 0$ , 则停止迭代, 求得主问题的最优解, 即原问题的松弛解。

### 3.4.5 分枝定界算法求整数解

Danzig-Wolfe 算法求得问题的松弛解, 需要进一步采用分枝定界算法产生问题的整数解。主问题的解是组合系数, 取值范围为 0~1, 不适合做分枝节点。本文首先根据一次迭代生成的解, 搜索不满足整数约束的 OD 对  $k$ , 以当前解为分枝节点。假设 OD 对  $k$  选择的其中一条路径为  $p_l^k$ , 这条路径上流量为  $d$ , 则节点左孩子为主问题增加一条约束:  $f(p_l^k) \leq d_0 (d_0 = \lfloor d \rfloor)$ ; 节点右孩子为主问题增加一条约束:  $f(p_l^k) \geq d_0 + 1$ 。采用二叉树先序遍历的搜索策略, 求得旅客行程恢复问题的整数解。

## 3.5 算例分析

本文根据国内某航空公司一天的实际航班计划、订座情况、签转/赔偿方案, 模拟一些航班不正常情况, 设计出算例, 见表 3.1。

A 航空公司某日共计划使用 67 架飞机, 执行航班 436 班, 其中国内航班 310 班, 国际航班 126 班, 到达 83 个机场, 共运送旅客 40,974 位。由于天气原因、流量控制和飞机故障原因, A 航空公司当日航班发生不正常, 共涉及 6 个机场和 10 架飞机。若不立即进行航班恢复工作, 将会直接和间接影响 120 个航班的运行, 导致 11536 名旅客航班延误或取消行程。根据航空公司补偿标准, 设定取消一名旅客行程的成本为航班平均票价 600 元, 旅客延误每小时的成本为 100 元, 则航空公司预计将损失 3,993,510 元。

表 3.1 不正常航班算例数据

航班计划		不正常航班概况		不正常航班的影响	
航班总数	436	受影响机场总数	6	取消航班	30
旅客总数	40,974	故障飞机总数	10	延误航班	90
飞机总数	67	受影响航班总数	120	航班平均延误时间	143(min)
		受影响旅客总数	11,536	取消旅客人数	3130
				延误旅客人数	8460
				旅客平均延误时间	151(min)
				预计总损失	3,993,510

注: “取消旅客”包括因航班取消和行程衔接失败的旅客;  
“平均延误时间”只计算受扰动的航班/旅客。

通过飞机路线恢复, 已经获得的航班恢复方案, 见表 3.2。该方案取消了 13 个航班, 延误 107 个航班, 航班的平均延误时间为 114 分钟, 飞机路线恢复成本为 832,700。根据订座情况,

持联程票的旅客共有 1336 名，新的航班计划将导致 1221 名旅客取消行程，旅客补偿和退票损失共计 2,918,920 元。

表 3.2 旅客行程恢复实例数据

航班恢复方案		旅客情况	
航班总数	436	旅客总数	40974
取消航班数	13	联程票旅客数	1336
延误航班数	107	取消旅客人数	1221
平均延误时间/min	114(min)	延误旅客人数	9924
		平均旅客延误时间	118(min)
飞机路线恢复成本	832,700	旅客成本	2918920

注：航班恢复成本包括飞机交换和调机成本；旅客成本包括退票损失和延误补偿成本。

一般来说，旅客行程衔接中断进行自行签转。为对比分析旅客自行签转方案和行程分阶段恢复方案，本文根据以下策略获得旅客自行签转方案：受扰动旅客按受扰动时间顺序进行自行签转，旅客签转到当前有剩余座位的直达航班上，若无法签转则退票。同时，根据本章设计的 Danzig-Wolfe 算法在 Visual C++ 6.0 软件平台上进行程序编译，并在 Inter (R) Core (TM) 2 Duo CPU, E7500 2.93GHz, 2GB 内存的台式电脑上运算求解，可以在 1' 53" 内获得旅客行程分阶段恢复方案，旅客自行签转方案和分阶段恢复方案的统计指标见表 3.3。

表 3.3 旅客自行签转和分阶段恢复方案性能指标

自行签转方案		分阶段恢复方案	
签转人数	284	签转人数	1028
(比例)	(17.62%)	(比例)	(63.77%)
取消旅客人数	1328	取消旅客人数	584
延误旅客人数	10208	延误旅客人数	10952
旅客平均延误时间	119	旅客平均延误时间	124
旅客成本	2821387	旅客成本	2613813
(减少百分比)	(3.34%)	(减少百分比)	(10.45%)

注：旅客成本包括退票损失和延误补偿成本

旅客通过自行签转，可以实现 17.62% 的旅客签转，被取消行程的旅客减少为 1328 名；相比之下，分阶段恢复方案可以实现 63.77% 的旅客签转，被取消行程的旅客减少为 584 名，比自行签转方案增加了 46.15% 的签转率，减少了旅客退票成本约为 446,400 元。从旅客延误时间来看，自行签转方案的平均延误时间较短，因为大部分旅客在自行签转时只选择当前延误时间最少的方案；而分阶段恢复方案的旅客平均延误时间较长，这是因为分阶段恢复方案从全局出发，牺牲了部分旅客的延误时间，换取了更多旅客的签转机会。从成本的角度来看，旅客自行签转可以减少退票损失 170400 元，增加了延误成本 72867 元，总计减少成本 97,533 元，占总成本的 3.34%；分阶段恢复方案可以减少退票损失 616800 元，增加了延误成本 311693 元，总计减

少成本 305107 元，占总成本的 10.45%。因此，通过本章设计的算法给出的旅客行程恢复方案能够实现更多的旅客签转，为航空公司减少退票损失，恢复方案的成本更低。

从恢复方案的旅客延误时间分布来看（见图 3.4），旅客自行签转获得的恢复方案中旅客延误时间集中在 0.5-2 小时以及 3-4 小时这两个时间段。分阶段恢复方案中旅客延误时间在 0.5-4 小时之间分布比较平均，延误 3-4 小时的旅客相对于自行签转方案有所减少，延误 2-3 小时的旅客人数明显增加。

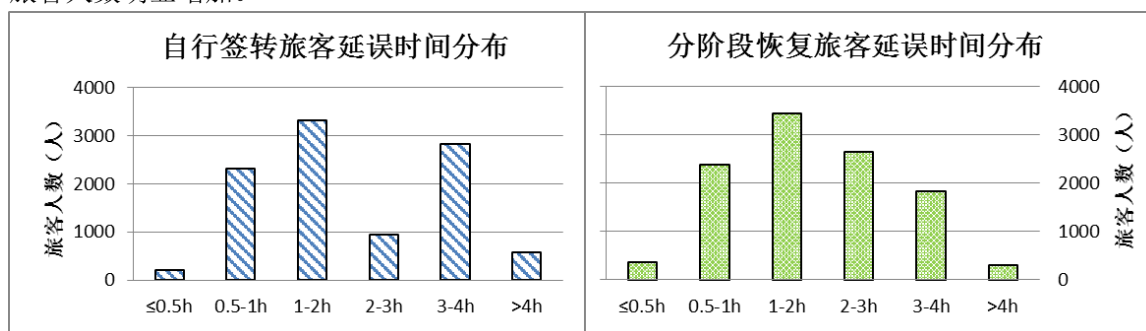


图 3.4 旅客自行签转和分阶段恢复方案的延误时间分布

对恢复方案中的取消旅客时间分布来看（见图 3.5）：

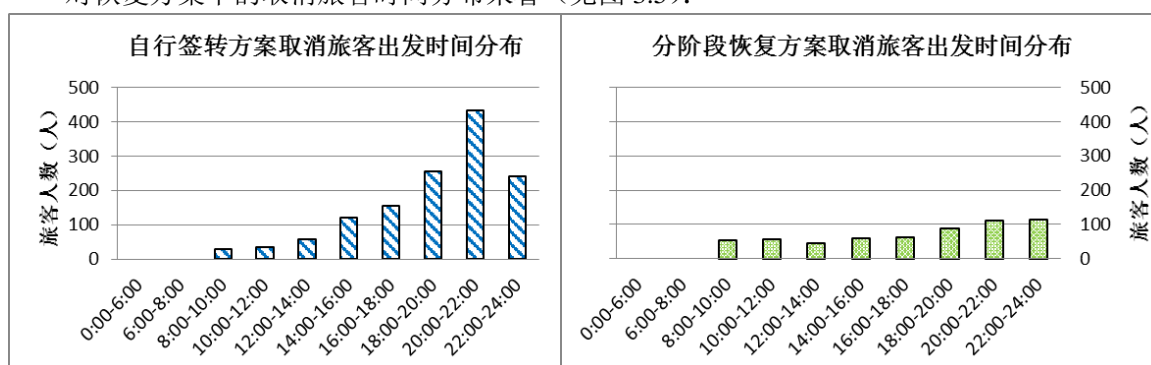


图 3.5 旅客自行签转和分阶段恢复方案的取消旅客时间分布

由于出发时间较晚的旅客的可选后继航班较少，相对于出发时间较早的旅客会更容易被取消行程，因此，分阶段恢复方案中可以看出一些这样的分布趋势。而自行签转方案中这样的分布趋势更为明显，无法签转的几乎都集中在出发时间为 18:00-24:00 之间的旅客。这是因为旅客自行签转方案实际上是一种贪婪策略，恢复顺序优先的旅客拥有更多选择，并可以最大程度恢复行程，减少延误；恢复顺序靠后的旅客则因为没有太多后继航班和剩余座位的选择，很有可能退票。这与现实情况很相符，但是这种情况会造成旅客的购票倾向，对于航空公司来说会容易形成运力分布不均衡的情况。本章提供的旅客行程分阶段恢复方案是一个全局优化的方案，对旅客来说更加公平；从航空公司角度来说，也可以更大程度上减少退票损失。



### 3.6 本章小结

本章在时空网络的基础上建立了不正常航班分阶段恢复中旅客行程恢复的多商品流模型，采用 Danzig-Wolfe 分解算法对旅客行程恢复问题进行了精确求解，该算法配合多种存储结构和搜索策略，能够在符合实时决策要求的前提下，快速有效地提供受扰旅客的行程恢复方案。实例分析验证了模型的正确性和算法的有效性，表明采用本文的方法不但减少了旅客延误时间，还可以减少航空公司损失，可以用于解决航空公司不正常航班恢复问题。

## 第四章 飞机路线和旅客行程一体化恢复问题

### 4.1 引言

分阶段恢复以节约资源为主，虽然飞机路线的恢复会考虑旅客延误，但旅客延误的损失都是根据航班的平均延误时间计算的估计值，而且无法考虑旅客行程的航班衔接。在飞机路线和机组路线确定之后，仍会有部分旅客出现衔接中断的情况，本文第三章已对这部分受扰动旅客进行了行程恢复研究。这种恢复思路是以航空公司为导向，在航空公司用最小的恢复成本恢复了航班运营之后，飞机路线不会因旅客是否会出现大量衔接中断而更改。事实上，这给航空公司带来了 many 负面影响和经济损失。

不正常航班一体化恢复是实现时刻资源、飞机资源、机组资源优化配置的最佳途径。一体化恢复问题是根据机场时刻安排、飞机执勤情况、机组执勤情况、旅客订座信息以及资源受扰动情况，进行综合建模优化求解，获得恢复成本最小及旅客延误和取消最少的恢复方案。这种恢复思路以航空公司和旅客为共同导向，航空公司的资源和旅客的行程在一体化恢复问题中进行了综合优化，二者相互协调实现目标的最优。

本章主要研究飞机路线和旅客行程的一体化恢复问题，在航班计划、旅客订座信息、飞机执勤以及不正常报告等信息的基础之上，对受扰动的航班和旅客进行调整恢复。本文构建的飞机路线和旅客行程一体化恢复问题是建立在时空网络基础上的混合规划模型，结合模拟退火算法、贪婪算法及 Danzig-Wolfe 算法进行求解，并通过一个实际规模的算例进行了算法可行性和效率的验证。

### 4.2 术语定义

为了更好地理解本章内容，下面将对本章中即将用到的术语进行定义：

**定义 4-1** 航班串：一架飞机执行多个时间、空间相继连接的航班，这些航班按时空顺序串连起来的一组航班称为航班串。

**定义 4-2** 航班环：航班环是航班串的一种特殊情况，是指第一个航班的出发机场和最后一个航班的到达机场相同的航班串。

**定义 4-3** 受扰动飞机路线：飞机执行的航班串连接成的路径称为飞机路线。若某架飞机执行的航班中出现因机场关闭、飞机故障、机组原因、天气原因等延误或取消的情况，未能按原计划执行，这条飞机路线称为受扰动飞机路线。

**定义 4-4** 受扰动旅客行程：受扰动旅客（参照定义 3-2）乘坐的航班按时空顺序串联起来的路径称为受扰动旅客行程。

**定义 4-5** 恢复期：恢复期是指不正常航班恢复问题涉及的时间区间，恢复期的确定决定了恢复工作涉及的航班和旅客。一般来说，恢复期从第一架不正常航班的计划出发时间开始到当天的 24 点结束。由于一天的航班恢复可能会导致飞机不平衡或飞机/机组执勤地点的更换等原因，影响第二天或后续的航班计划执行，也有一些学者在进行研究时将恢复期定为一周左右。这种做法有利有弊，一方面预测并控制了航班不正常对后续工作的影响，另一方面扩大了问题规模，忽视了后续运行的不可预测性。本文定义的恢复期采用上述第一种做法。

**定义 4-6** 邻域解：从集合的角度来讲，假设  $A$  是拓扑空间  $(X, \tau)$  的一个子集，点  $x \in A$ 。如果存在集合  $U$ ，满足①  $U$  是开集，即  $U \in \tau$ ，② 点  $x \in U$ ，③  $U$  是  $A$  的子集，则称点  $x$  是  $A$  的一个内点，并称  $A$  是点  $x$  的一个邻域。在本问题中，邻域解是指将当前执行解进行适当变换（移动）构造的新解，这些解在问题的可行域内，当前执行解是这些邻域解的一种特殊情况（未经变换的情况）。

**定义 4-7** 执行解：一个执行解就是一个不正常航班恢复方案，在本章研究的问题中包括飞机路线恢复方案和旅客行程恢复方案。根据搜索策略和评价指标生成邻域解，并用邻域解中相同飞机或 OD 对的路线替代当前的恢复方案就形成了一个执行解。

### 4.3 飞机路线和旅客行程一体化恢复模型

#### 4.3.1 模型假设

为简化模型和算法，本章结合航空公司不正常航班处理的管制条例以及实际恢复过程中的考虑因素进行适当抽象，做以下假设：

- 1) 不正常航班发生后，根据实际操作经验确定恢复期。只针对恢复期内的航班和旅客进行恢复，不考虑恢复方案对恢复期结束后航班运营的影响。
- 2) 航班不正常报告中包括确定的飞机就绪时间、机场关闭/启用时间、流量控制或天气原因的限制飞行时间段等，恢复工作根据恢复期开始时刻的航班不正常报告进行，不考虑恢复期内的变化情况。
- 3) 在飞机数量不足，无法满足当前航班运行的情况下，允许从异地调飞机。每架飞机（包括备用飞机）在每个机场都有确定的飞机就绪时间，根据这个时刻确定飞机是否可以执行某个航班。
- 4) 航班容量限制为航班剩余座位数；旅客 OD 对的需求已知，且在恢复期内不再变化。

### 4.3.2 时空网络

本文基于时空网络，将飞机路线和旅客行程一体化恢复问题处理成多商品流模型，并在此基础上表达飞机路线和旅客行程的恢复策略。时空网络以机场时刻为节点，航班为弧，飞机和旅客看作经弧运输的商品。如图 4.1 所示，共有 A、B、C、D 四个机场的 24 个节点，12 个航班弧，1-6 号 6 架飞机和 a-m 号 12 个旅客流。

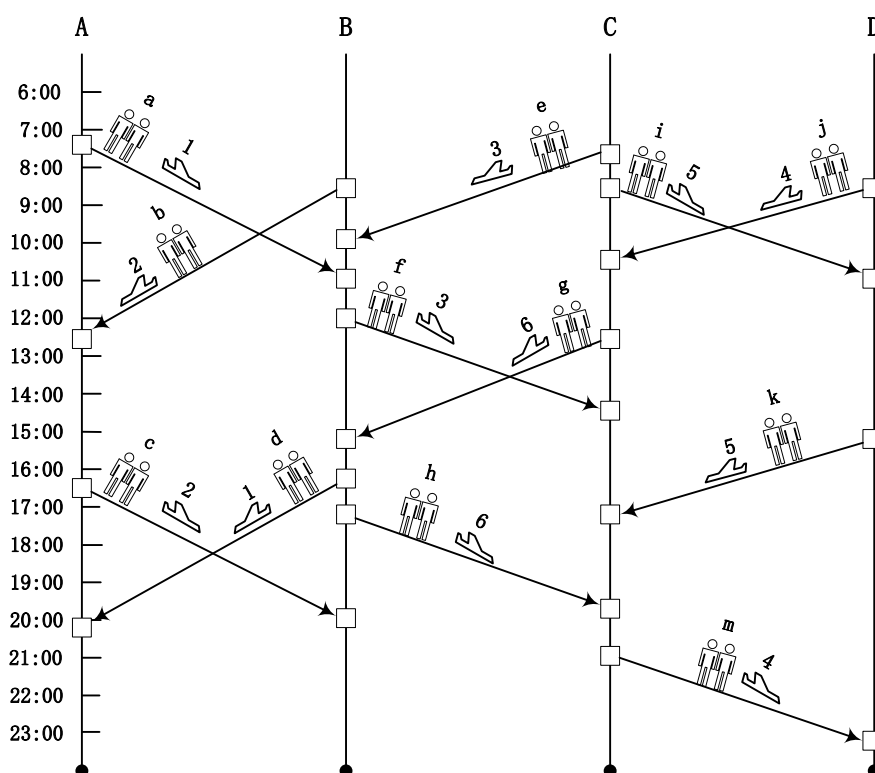


图 4.1 时空网络示意图

一个正常运转的航班时空网络应当具备如下特性：

- (1) 航班弧是有向弧，方向总是从上指向下；航班弧对飞机这种商品的容量为 1。
- (2) 飞机行走的路线满足时空衔接性，衔接时间大于飞机最小中转时间；在机场宵禁/关闭期间没有飞机到达。
- (3) 旅客行走的路线具备时空衔接性，衔接时间大于旅客最小中转时间；航班弧上的旅客总人数不大于该弧上飞机提供的最大座位数。

当发生机场临时关闭、飞机故障、机组无法到位或其他状况，飞机路线和旅客行程无法满足上述要求，就发生了航班不正常。不正常航班的恢复问题就是在给定的恢复期内，通过恢复策略的使用，修复断裂的飞机路线和旅客行程，重新满足上述要求，并实现恢复成本最小。以

图 4.2 为例，飞机 3 于 11:00 在 B 机场发生故障，预计排除故障时间为 15:00；飞机 6 于 12:00 在 C 机场发生故障，一时无无法查明原因，需要进场检修；机场 A 遭遇雷雨天气，从 14:00 开始关闭，雷雨预计于 19:00 结束。图 4.2 圈中的区域为恢复期。

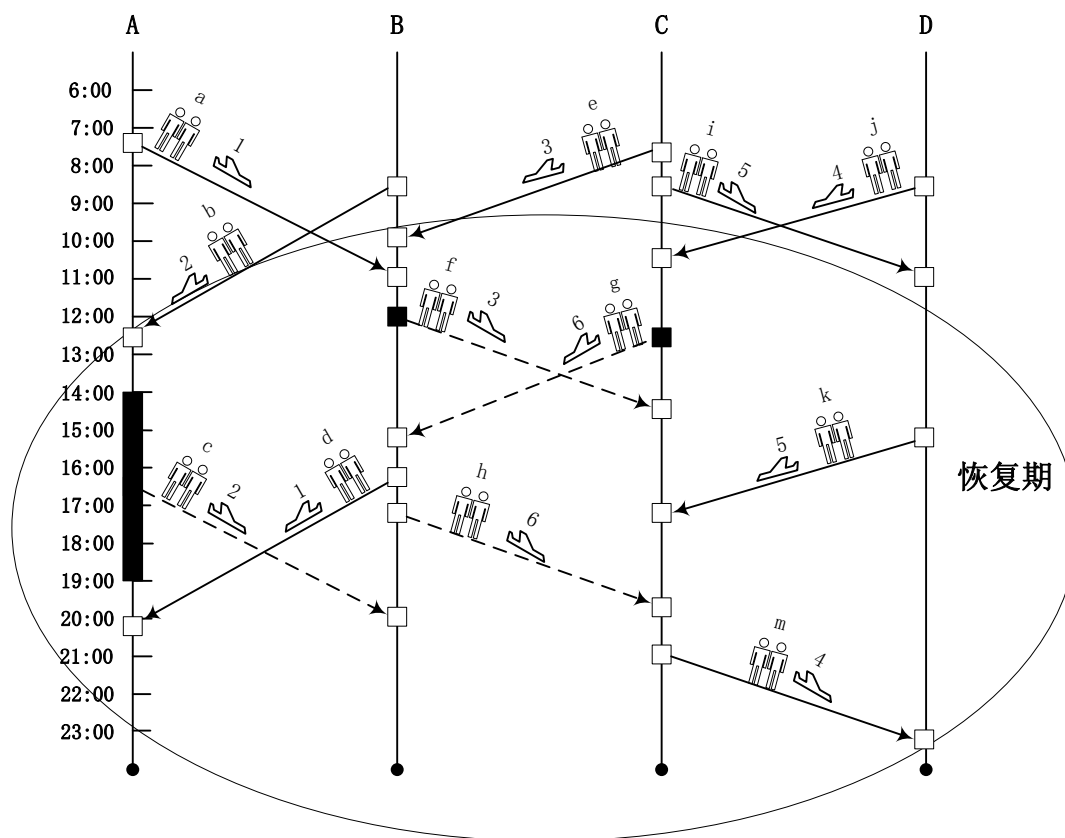


图 4.2 航班不正常示意图

### 4.3.3 恢复策略

本文使用的飞机路线恢复策略有 3 种，分别为：

1) 飞机路线的插入，即取消不正常飞机的任务，指派给别的飞机；以图 4.2 中所示的航班不正常情况为例，将飞机 6 无法继续执行的航班任务指派给飞机 4，就是飞机路线的插入策略。（恢复结果见图 4.3）

2) 飞机路线的交换，即交换不正常航班的飞机任务和正常航班的飞机任务；以图 4.2 中所示的航班不正常情况为例，将出现故障的飞机 3 的第二个航段 B-C 交由飞机 1 飞行，飞机 1 的第二个航段 B-A 交由排除故障的飞机 3 飞行，就是飞机路线的交换策略。（恢复结果见图 4.3）

3) 飞机路线的取消，即取消不正常航班飞机的任务；以图 4.2 中所示的航班不正常情况为例，将处于 A 机场关闭时间内的飞机 2 的航班取消，就是飞机路线的取消操作。（恢复结果见

图 4.3)

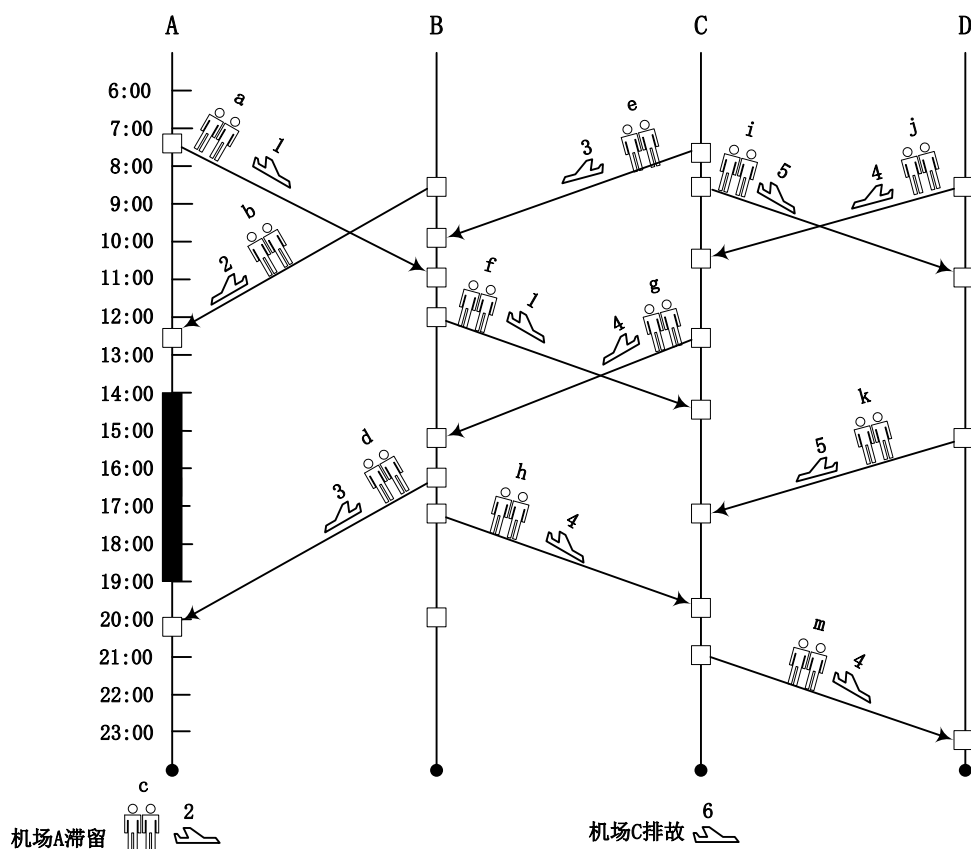


图 4.3 不正常航班恢复结果示意图

根据操作过后对飞机流平衡的影响，上述三种恢复策略又可以分别分为航班环操作和航班串操作。航班环的操作不会引起飞机流不平衡现象，例如上述的插入操作中，飞机 6 的飞行路线（C-B-C）就是一个航班环，进行插入操作之后，飞机 4 仍然回到了原定停车场 D。航班串的操作可能会引起飞机流不平衡现象，例如，假设飞机 1 原来只有一项航班任务为 A-B，在飞机 3 遇到故障之后，需要进行尾航班串的插入操作：由飞机 1 执行飞机 3 原计划的第二个航段 B-C，飞机 3 停场检修，不做其他任务安排（即，假设没有图 4.3 中飞机 3 执行的 B-A 的航班）。这时 A、B、C 机场的停场飞机数就和原计划的不一致，影响第二天的航班运行。针对航班环和航班串分别采用插入、交换和取消的三种操作就形成了 6 种恢复策略，即：插入航班环、插入航班串、交换航班环、交换尾航班串、取消航班环、取消航班串。

本文针对衔接中断的旅客使用的恢复策略有 2 种，分别为：

- 1) 改签，即旅客分流到其他航班，充分利用剩余运力；
- 2) 取消行程，即旅客取消部分行程，获得补偿，自行采用地面运输方式到达目的地。

## 4.3.4 符号定义

**集合：** $A$ ：机场集合。 $F$ ：航班集合。 $K$ ：飞机集合。 $D$ ：旅客 OD 对集合。 $L$ ：飞机路线集合。 $R$ ：旅客 OD 对路线集合。 $OR$ ：旅客 OD 对原路线集合。**上下标：** $l$ ：飞机路线下标， $l \in L$ 。 $s$ ：飞机路线中航班序号。 $r$ ：旅客 OD 对路线下标， $r \in R$ 。 $o$ ：旅客 OD 对原路线下标， $o \in OR$ 。 $q$ ：旅客行程中航班序号。 $k$ ：飞机序号。 $d$ ：旅客 OD 序号。 $i$ ：航班序号。**参数：** $t_{l,s}^{STD}$ ：飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班的实际起飞时间。 $t_{l,s}^{ETD}$ ：飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班的预计起飞时间。 $t_{r,q}^{ETD}$ ：旅客行程  $r$  中第  $q$  个航班的预计起飞时间。 $t_{l,s}^{ETA}$ ：飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班的预计到达时间。 $t_{r,q}^{ETA}$ ：旅客行程  $r$  中第  $q$  个航班的预计到达时间。 $da_{l,s}$ ：飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班的起飞机场。 $da_{r,q}$ ：旅客行程  $r$  中第  $q$  个航班的起飞机场。 $aa_{l,s}$ ：飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班的到达机场。 $aa_{r,q}$ ：旅客行程  $r$  中第  $q$  个航班的到达机场。 $N(l)$ ：飞机路线  $l$  中航班数量。

$N(r)$ : 旅客行程  $r$  中航班数量。

$N(o)$ : 旅客原计划路线  $o$  中航班数量。

$MCT_{da_{l,s}}^k$ : 飞机  $k$  在路线  $l$  中第  $s$  个航班的起飞机场的最小中转时间。

$TR_r^d$ : 旅客 OD 对  $d$  在路线  $r$  上的最小中转时间。

$T_{da_{l,1}}^k$ : 飞机  $k$  在路线  $l$  的第一个航班出发机场的最早就绪时间。

$T_{da_{l,s}}^{Start}$ : 飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班的起飞机场的宵禁/机场关闭开始时间。

$T_{da_{l,s}}^{End}$ : 飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班的起飞机场的宵禁/机场关闭结束时间。

$\delta_{l,s}^{r,q}$ : 飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班是否为旅客行程  $r$  中第  $q$  个航班, 若是  $\delta_{l,s}^{r,q} = 1$ , 否则,  $\delta_{l,s}^{r,q} = 0$ 。

$\sigma_o^d$ : 若旅客 OD 对  $d$  的原计划路线为  $o$ , 则  $\sigma_o^d = 1$ , 否则  $\sigma_o^d = 0$ 。

$Psg_d$ : 旅客 OD 对  $d$  的旅客总人数。

$Seat_{l,s}^k$ : 飞机路线  $l$  中第  $s$  个航班采用飞机  $k$  执飞的座位总数。

$f_i^l$ : 飞机路线  $l$  是否包含航班  $i$ , 若包含, 则  $f_i^l = 1$ , 否则,  $f_i^l = 0$ 。

$f_i^r$ : 旅客行程  $r$  是否包含航班  $i$ , 若包含, 则  $f_i^r = 1$ , 否则,  $f_i^r = 0$ 。

$Cdelay$ : 每位旅客单位小时延误成本。

$Ccancel$ : 每位旅客取消行程平均成本。

$Cflight_i^k$ : 飞机  $k$  指派给航班  $i$  的运行成本, 包括与原计划相比的单位小时运行成本差和调机成本。

#### 决策变量:

$x_l^k$ : 若飞机  $k$  指派给飞机路线  $l$ , 则  $x_l^k = 1$ , 否则  $x_l^k = 0$ 。

$cf_i$ : 若航班  $i$  被取消, 则  $cf_i = 1$ , 否则  $cf_i = 0$ 。

$y_r^d$ : 旅客 OD 对  $d$  指派给行程  $r$  的旅客人数比例,  $0 \leq y_r^d \leq 1$ 。

$cp_d$ : 旅客 OD 对  $d$  行程取消的旅客人数比例,  $0 \leq cp_d \leq 1$ 。

#### 4.3.5 数学模型

本章的数学模型建立在飞机路线和旅客行程的基础上, 从 4.3.2 节可知, 飞机路线和旅客行程要满足以下约束:

##### 1) 飞机时间衔接性



$$t_{l,s}^{ETA} + x_l^k MCT_{aa_{l,s}}^k \leq t_{l,s+1}^{ETD}; \quad \forall l \in L, s \in \{1, 2, \dots, N(l)\}$$

即，飞机路线中任意相邻两个航班之间的停场时间（后一个航班的预计起飞时间和前一个航班的预计到达时间之差）大于执飞该航班的机型在到达机场的最小中转时间。

2) 飞机空间衔接性

$$aa_{l,s} = da_{l,s+1}; \quad \forall l \in L, s \in \{1, 2, \dots, N(l)\}$$

即，飞机路线中任意两个相邻航班，前一个航班的到达机场和后一个航班的出发机场一致。

3) 飞机可行性

$$t_{l,1}^{ETD} \geq x_l^k T_{da_{l,1}}^k; \quad \forall l \in L, s \in \{1, 2, \dots, N(l)\}$$

即，飞机路线中第一个航班预计起飞时间要晚于飞机在该起飞机场的就绪时间（就绪时间等于飞机在当前机场就绪时间加上可能的调机时间）。

4) 机场关闭/宵禁约束

$$t_{l,s}^{ETD} \leq T_{da_{l,s}}^{Start}; \quad \forall l \in L, s \in \{1, 2, \dots, N(l)\}$$

$$t_{l,s}^{ETA} \geq T_{aa_{l,s}}^{End}; \quad \forall l \in L, s \in \{1, 2, \dots, N(l)\}$$

即，所有飞机的预计起飞时间必须早于起飞机场关闭/宵禁开始时间，飞机的预计到达时间必须晚于该机场关闭/宵禁结束时间。

5) 旅客时间衔接性

$$y_r^d (t_{r,q}^{ETA} + TR_r^d) \leq t_{r,q+1}^{ETD}; \quad \forall r \in R, q \in \{1, 2, \dots, N(r)\}$$

即，旅客行程中任意相邻两个航班之间的停场时间（后一个航班的预计起飞时间和前一个航班的预计到达时间之差）大于旅客选择这条路线的最少中转时间。

6) 旅客空间衔接性

$$aa_{r,q} = da_{r,q+1}; \quad \forall r \in R, q \in \{1, 2, \dots, N(r)\}$$

即，旅客行程中任意相邻两个航班，前一个航班的到达机场和后一个航班的出发机场一致。

7) 旅客时间可行性

$$y_r^d \sigma_o^d t_{r,1}^{ETD} \geq y_r^d \sigma_o^d t_{o,1}^{ETD}; \quad \forall r \in R, o \in OR$$

即，旅客行程中第一个航班的预计起飞时间不得早于原计划中第一个航班的预计起飞时间。

8) 旅客空间可行性

$$y_r^d \sigma_o^d da_{r,1} = y_r^d \sigma_o^d da_{o,1}; \quad \forall r \in R, o \in OR, d \in D$$

$$y_r^d \sigma_o^d aa_{r,N(r)} = y_r^d \sigma_o^d aa_{o,N(o)}; \quad \forall r \in R, o \in OR, d \in D$$

即，旅客行程的第一个航班的出发机场和最后一个航班的到达机场分别与原计划一致。

9) 旅客人数约束

$$\delta_{l,s}^{r,q} \sum_d y_r^d Psg_d \leq x_l^k Seat_{l,s}^k; \\ \forall r \in R, q \in \{1, 2, \dots, N(r)\}, \forall l \in L, s \in \{1, 2, \dots, N(l)\}$$

即，任意一段航班上的旅客总人数不大于执飞该航班的飞机提供的最大座位数。

应用飞机路线和旅客行程恢复策略调整出满足上述约束的飞机路线和旅客行程，还要用下述的数学模型寻找出最优的可行方案。

$$\min z = \sum_{d \in D} \sum_{r \in R} y_r^d Psg_d Cdelay \sum_{q=1}^{N(r)} (t_{r,q}^{STD} - t_{r,q}^{ETD}) + \sum_{d \in D} cp_d Psg_d Ccancel \\ + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{i \in F} x_l^k f_i^l Cflight_i^k \quad (4.1)$$

$$s.t. \quad \sum_{l \in L} \sum_{k \in K} f_i^l x_l^k + cf_i = 1; \quad \forall i \in F \quad (4.2)$$

$$\sum_{r \in R} y_r^d + cp_d = 1; \quad \forall d \in D \quad (4.3)$$

$$cp_d Psg_d \in Z; \quad \forall d \in D \quad (4.4)$$

$$x_l^k, cf_i \in \{0, 1\}, 0 \leq y_r^d \leq 1, 0 \leq cp_d \leq 1, \\ \forall r \in R, \forall k \in K, \forall d \in D, \forall i \in F \quad (4.5)$$

式 (4.1) 是目标函数，要求恢复方案的成本最小。成本主要包括三个部分：第一项为航班延误成本，第二项是航班取消成本，第三项是飞机恢复成本（包括飞机交换成本和调机成本）。式 (4.2) 是航班覆盖约束，要求航班必须被飞机执行或者取消；式 (4.3) 为旅客 OD 对覆盖约束，要求旅客 OD 对所有旅客必须有恢复行程或取消行程；式 (4.4) 为取消行程旅客人数的整数约束；式 (4.5) 为变量的取值约束。

#### 4.4 算法设计

飞机路线和旅客行程一体化恢复问题属于大规模组合优化问题。4.3 节提出的模型是一个约束众多，复杂的时空网络优化模型，它的可行解随着航班数量、飞机数量、旅客 OD 对数量的增加呈指数增加，目前没有较好的精确算法。而且，对于这种大规模规划问题，即便是专业优化软件，在实时决策要求时间内获得最优解也几乎是不可能的。因此，本节将结合贪婪算法和模拟退火算法以及 Danzig-Wolfe 算法，设计出解决飞机路线和旅客行程一体化恢复问题的求解思路，降低算法陷入局部最优的概率，改进算法的收敛性。

#### 4.4.1 贪婪算法分析

贪婪算法又称为贪心算法，基本思路是对最优规划问题，设计一个优化标准来进行优化选择。每次只取以当前情况为基础的最优选择，并采用自上而下的方式进行迭代选择，在每一步的选择过程中，问题就被简化为一个规模更小的子问题，并最终获得问题的一个满意解。由于贪婪算法采用的这种选择策略，算法过程中是不进行回溯的，这样做节省了大量搜索最优解的遍历时间。不过，这同样也带来了该算法的一定缺陷。采用贪婪算法获得的全局解有时不一定是最优的，算法容易陷入局部最优的情况。

贪婪算法目前被广泛的应用于背包问题、拓扑排序问题、二分覆盖问题、最短路径问题等。在不正常航班恢复问题上，Argüello<sup>[10]</sup>早在 1997 年设计出了一种贪婪自适应搜索算法来求解不正常航班飞机路线恢复问题。他将该问题处理成经典的指派模型，通过取消已经延误的航班和已经停场飞机的所有后继航班生成初始可行解。接着，选择初始解中任意的两条飞机路线，通过 5 种操作生成邻域解。然后，计算所有邻域解的恢复成本，将引起恢复成本下降的邻域解存储在一个限制性列表（Restricted Candidate List, RCL）内。最后，随机选择列表中的一个邻域解构造新的执行解，这样就完成了一次迭代。算法要求当 RCL 为空或 CPU 运行时间超过限制时停止迭代。算法流程见图 4.4。

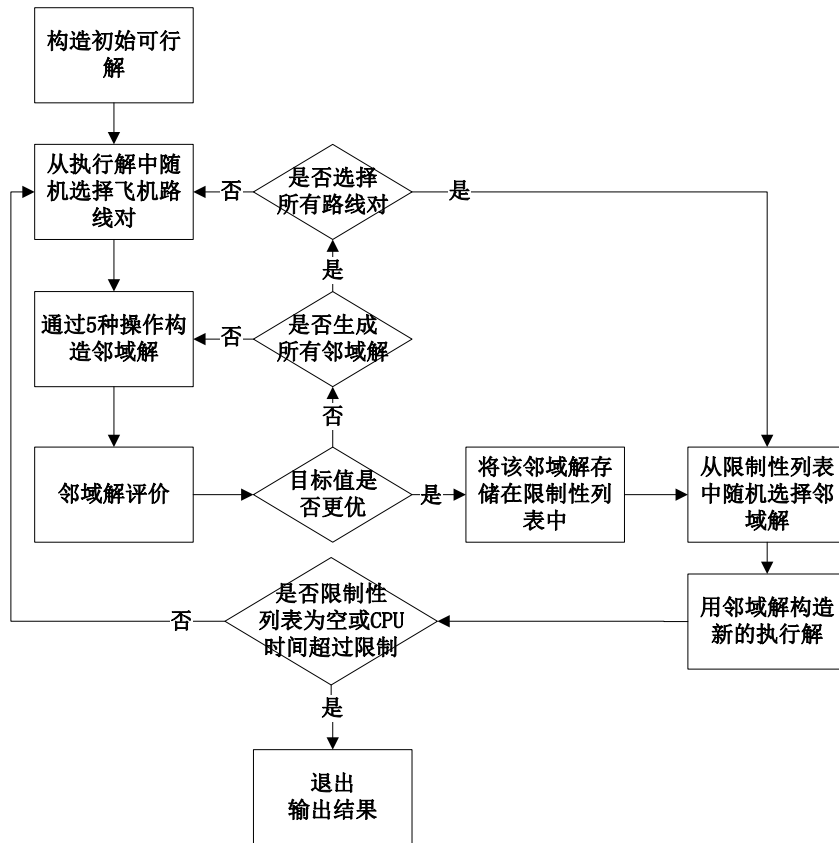


图 4.4 贪婪算法流程图

#### 4.4.2 模拟退火算法分析

模拟退火算法来源于固体退火理论：将固体加温至充分高，再慢慢冷却。加温时，固体内部粒子随着温度的升高呈现无序状，内能增大；而在冷却的过程中，粒子逐渐趋向有序状，并在每个温度都达到一个平衡态；最后在常温时达到基态，内能减为最小。该原理最早由 Kirkpatrick 等引入组合优化领域。它是基于蒙特卡罗（Monte-Carlo）统计模拟法的一种随机优化搜索算法，根据固体退火理论与一般组合优化问题之间的相似性模拟固体物质的退火过程。

根据 Metropolis 准则，粒子在温度  $T$  时趋于平衡的概率为  $e^{-\Delta E/(kT)}$ ，其中  $E$  为温度  $T$  时的内能， $\Delta E$  为能量改变量， $k$  为玻尔兹曼常数 (Boltzmann constant)。将内能  $E$  设为目标函数值  $Z$ ，温度  $T$  设为控制参数  $t$ ，就得到了组合优化问题的模拟退火算法。算法从给定的初始解和控制参数开始，对当前解重复“产生新解→计算目标函数差→接受或舍弃”的迭代过程，逐步衰减控制参数，采用冷却进度表控制整个退火过程，包括控制参数  $t$  的初值、衰减因子、每个参数值  $t$  的迭代次数以及停止条件等。伴随着控制参数的不断衰退（即温度的不断下降），算法结合蒙特卡罗概率突跳性地在整个解空间随机地搜索全局最优解，避免了陷入局部最优的陷阱。算

法流程如图 4.5。

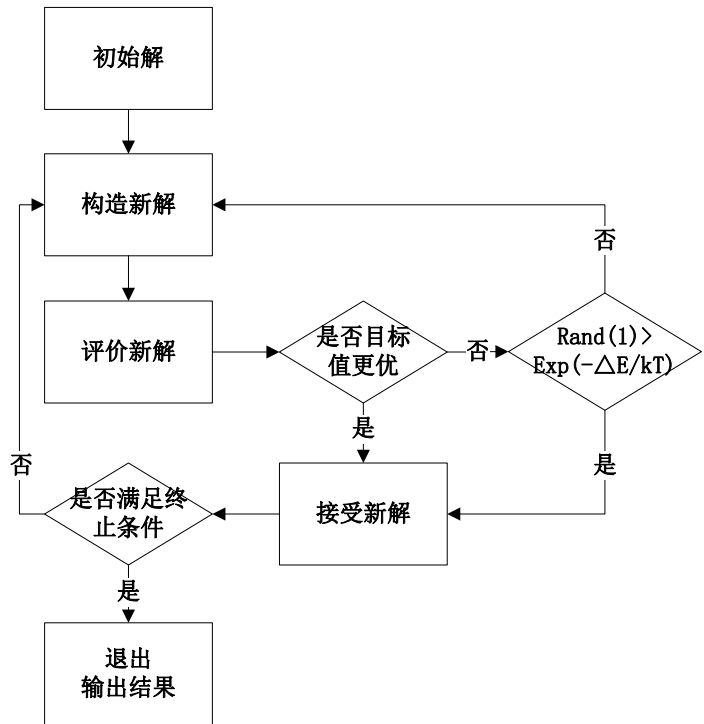


图 4.5 模拟退火算法流程图

模拟退火算法是一种通用的优化算法，理论上算法具有概率的全局优化性能，目前已在工程中得到了广泛应用，如机器学习、生产调度、信号处理、控制工程、神经网络等领域。

4.4.3 Danzig-Wolfe 算法分析

本文在 3.4 节介绍了 Danzig-Wolfe 算法的主要算法思路，该算法在求解混合整数规划问题上具有一定的优势，本文通过算法设计和案例分析证明了 Danzig-Wolfe 分解算法可以有效地求解线性规划问题。

本文 4.3 节提出的飞机路线和旅客行程一体化恢复模型是一个混合整数规划模型，可以引入 Danzig-Wolfe 分解算法进行求解，算法流程如图 4.6。

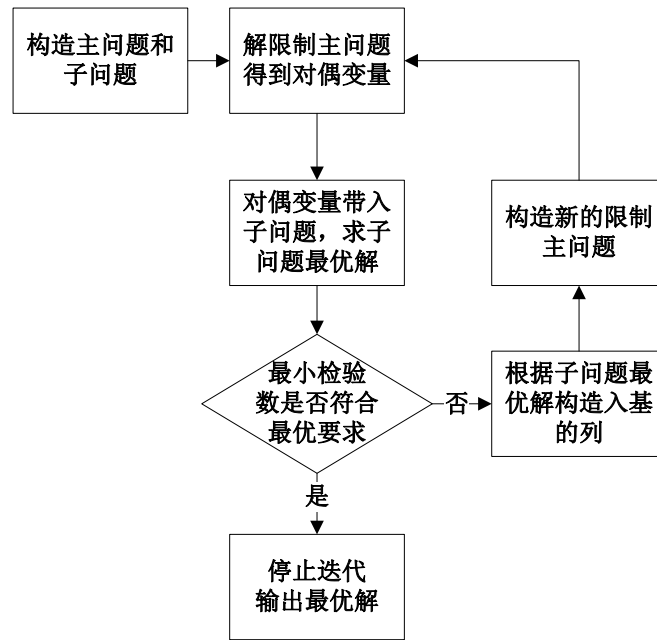


图 4.6 Danzig-Wolfe 算法流程图

若对飞机路线和旅客行程一体化恢复问题直接采用 Danzig-Wolfe 分解算法求解，在子问题的构造和求解上将会耗费大量时间，本文对该问题进行了简化和分解，只针对旅客行程恢复模块采用 Danzig-Wolfe 算法进行求解，以提高整个问题求解效率。具体的问题分解将在 4.4.4 节进行详细介绍。

#### 4.4.4 结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法设计

本章 4.3 节的数学模型是难解的规划模型，为了更有效地求解该模型，本章将结合上述三种算法的优点，使用贪婪算法作为搜索策略，结合 Danzig-Wolfe 算法来构造邻域解，并使用模拟退火算法的 Metropolis 准则概率性地跳出局部最优。算法的主要思路为：构造初始可行解→构造可行邻域解→更新邻域解备选池→构造执行解。

##### 4.4.4.1 构造初始解

构造初始解是启发式算法的第一步，初始解一定是问题的可行解，一般不会是最优解。大部分启发式算法的初始解都是通过随机算法或策略给出的。本文结合不正常航班恢复问题的需求特点，针对恢复期开始时刻的航班计划进行微调得到初始解，减少对原航班计划的扰动，使恢复方案符合实际运行中签派工作的要求。

初始解的构造分为两个步骤：1) 构造飞机路线；2) 构造旅客行程。将恢复期开始时刻已延误航班的后续航班进行顺延，已停场飞机的所有后续航班和已关闭机场的所有航班进行取消，给出初始可行的飞机路线；基于初始飞机路线，将延误航班上的旅客顺延，无法衔接的中转旅

客的行程取消，获得旅客行程的初始可行解。

#### 4.4.4.2 结合 Danzig-Wolfe 算法构造邻域解

不正常航班恢复问题是一个典型的组合优化问题，解空间是一个凸集。以图 4.7 示意，假设解空间中封闭区域 R1 为飞机路线可行域，R2 为旅客行程可行域，重合部分 R 即为该问题的可行域。X 轴代表飞机路线更优方向，Y 轴代表旅客行程更优方向，点 P 为初始可行解。

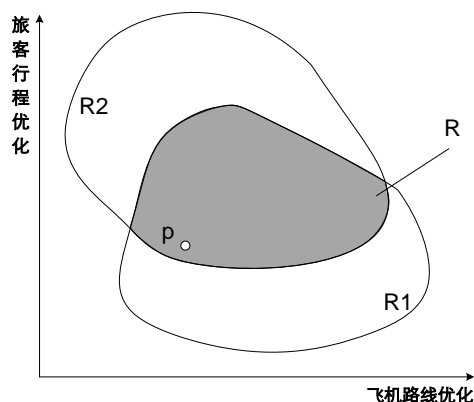


图 4.7 解空间示意图

邻域解是问题的一个可行解，包括可行的飞机路线和旅客行程。可行的旅客行程建立在当前的飞机路线基础之上，所以，本文将邻域解的构造分解以下两个步骤：

##### 1) 6 种恢复策略构造可行飞机路线：

以图 4.8 为例，可行飞机路线的构造就是从点 P 出发，采用恢复策略，沿 X 轴在 R1 区域内随机地产生一个点 a（见左图）。此时飞机路线一定可行，旅客行程不一定可行，如产生点 a'（见右图）。

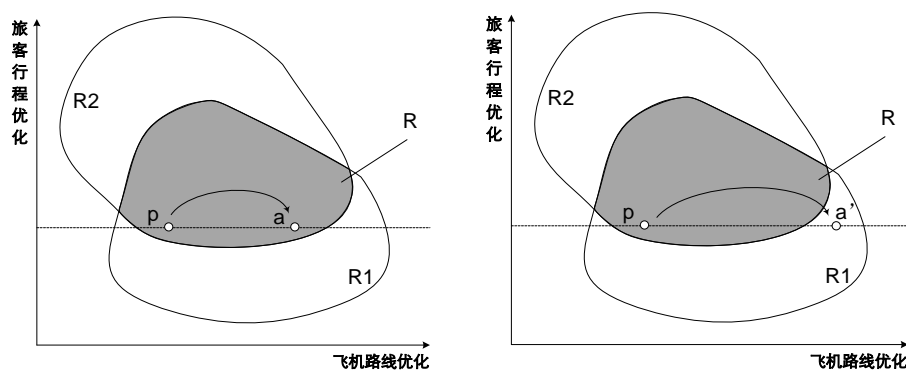


图 4.8 构造飞机路线示意图

在文献[10]的贪婪算法中，对任意一对飞机路线进行五种交换操作（即，插入航班环、插

入尾航班串、交换航班环、交换尾航班串和取消航班环)产生飞机路线恢复的邻域解,这种算法对时间和空间的耗费都较小,本文结合 4.3.2 节的恢复策略,在此算法基础之上进行了改进。

本文首先将飞机路线分为受扰动路线和未受扰动路线,用 1 条受扰动飞机路线与 1 条未受扰动飞机路线组成 1 对飞机路线对,通过 4.3.2 节的 6 种飞机路线恢复策略(即,插入航班环、插入航班串、交换航班环、交换尾航班串、取消航班环和取消航班串)产生可行的飞机路线。这样做减少了恢复方案对原航班计划的变动,也缩小了邻域解的规模。假设目前有  $N$  条飞机路线,其中  $M$  条飞机路线受到扰动,原先随机生成  $C_n^2$  (即  $N(N-1)/2$ ) 条飞机路线对,现在只生成  $M(N-M)$  条飞机路线对,产生邻域解的规模缩小  $2M(N-M)/N(N-1)$ 。若目前有 30% 的航班延误,邻域解规模约缩小为文献[10]的 42%。受扰动的航班比例越小,这一改进的效果越明显,若只有 10% 的航班延误,邻域解规模约缩小为文献[10]的 18%。

## 2) Danzig-Wolfe 算法构造最优旅客行程

本章 4.3.2 节提出了旅客行程恢复的两种策略:改签或取消行程。在第一步构造的可行飞机路线基础之上,根据本文 3.4.3 节的搜索算法,可以快速获得旅客 OD 对的可行行程,这样就完成了一个邻域解的构造。以图 4.9 的左图为例,这样做相当于从点  $a$  出发,沿  $Y$  轴在  $R2$  区域内随机地生成一个点  $b$  (若此时没有可行的旅客行程,如图 4.8 中点  $a'$ ,则返回第一步重新构造可行飞机路线),这是随机生成邻域解的基本步骤。

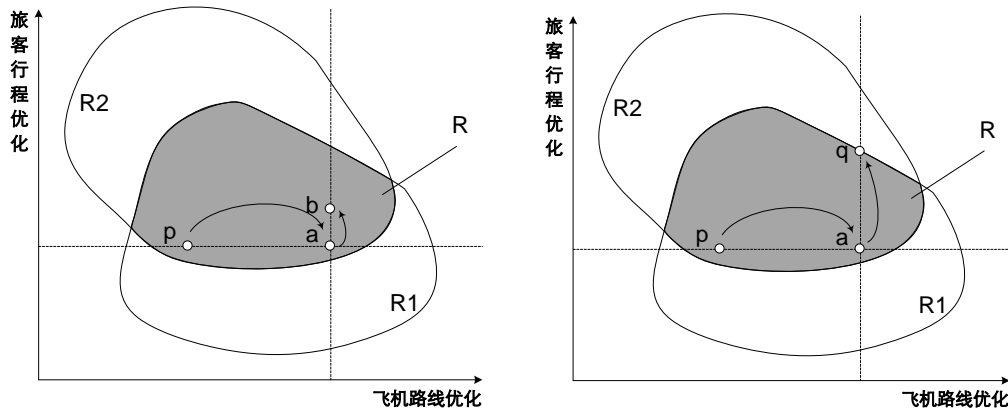


图 4.9 构造可行旅客行程和最优旅客行程对比示意图

本文在此基础之上,对旅客行程恢复方案进行了优化选择。基于第三章的研究,将第一步构造出的可行飞机路线作为已知的飞机路线恢复方案,采用 Danzig-Wolfe 算法求解当前最优的旅客行程。相当于从点  $A$  出发,沿  $Y$  轴在  $R2$  区域内优化生成局部最优解(即图 4.9 的右图中点  $q$ )。由线性规划的凸集定理可知,全局最优解一定是该凸集的顶点。因此,这样做既可以保证解的最优性同时也减少了搜索算法的迭代次数,提高了问题的求解速度。



#### 4.4.4.3 邻域解备选池

由于算法的搜索过程中没有回溯，本文通过构造邻域解备选池存储一些较优的邻域解。通过可行性检查和目标值评价，生成的邻域解被存储在备选池中。为提高算法效率，本文没有将较优的解存储在限制性列表（Restricted Candidate List, RCL）中，而是直接将每次操作的最优邻域解放入备选池中。这样做较好地控制了邻域解的数量规模，也省略了贪婪算法中关于备选解排序操作，节省了大量时间，提高了效率。

另外，为避免陷入局部最优的陷阱，本章根据模拟退火算法中 Metropolis 准则，对一个飞机路线对生成的多个邻域解进行优化选择。若一个邻域解的成本值比产生它们的方案成本值小，则以概率 1 接受并存储在成本降低的备选池中；若一个邻域解的成本值比产生它们的方案成本值大，则以概率  $e^{-\Delta E/T}$  接受并存储在成本升高的备选池中。其中  $\Delta E$  为目标值改变量（即当前邻域解与产生它们的方案成本之差），温度  $T$  为控制参数。

#### 4.4.4.4 构造执行解

从一个初始可行解中随机选取生成的飞机路线对，生成可行飞机路线及当前飞机路线下最优旅客行程得到该飞机路线对的邻域解，选择备选池中的邻域解去替代执行解中相应变化的路线，就构造出了新的执行解。

得到邻域解成本降低备选池和成本升高备选池之后，本章根据以下策略进行执行解的构造：若成本降低备选池不为空，则在其中随机选择一个或多个不相容的邻域解来构造新的执行解。（不相容的邻域解，是指互不相同的飞机路线对构造的邻域解。）若成本降低备选池为空，且成本上升备选池中邻域解数量占邻域解总量比例超过一定值（如大于 10%），从成本上升备选池中选择一个邻域解构造执行解，以跳出局部最优。

#### 4.4.4.5 算法流程

根据 4.4.4.1-4.4.4.4 小节介绍，本章不正常航班飞机路线和旅客行程一体化恢复的算法流程如下（算法流程图见图 4.10）：

- (1) 根据航班计划、航班延误情况以及旅客订座情况构造初始可行解；
- (2) 在执行解中随机选择符合要求的飞机路线对；
- (3) 根据选择的飞机路线对，产生可行飞机路线，采用 Danzig-Wolfe 算法构造最优旅客行程，构造成一个邻域解。
- (4) 通过可行性和目标值评价邻域解，选择最优邻域解；若该邻域解比产生它的飞机路线对成本值小，则存储在成本降低备选池中，否则存储在成本升高备选池中。
- (5) 重复步骤(3)-(4)直到邻域解全部产生。
- (6) 重复步骤(2)-(5)直到该执行解中所有飞机路线对都被选择过。

- (7) 若成本降低备选池不为空，则随机选择其中一个邻域解构造新执行解；若成本降低备选池为空，且成本上升备选池中邻域解数量占邻域解总量比例超过一定值，从成本上升备选池中选择一个邻域解构造新执行解。
- (8) 用新的执行解替代当前执行解。
- (9) 判断是否满足程序退出规则，若满足，则退出；否则，转到步骤(2)。

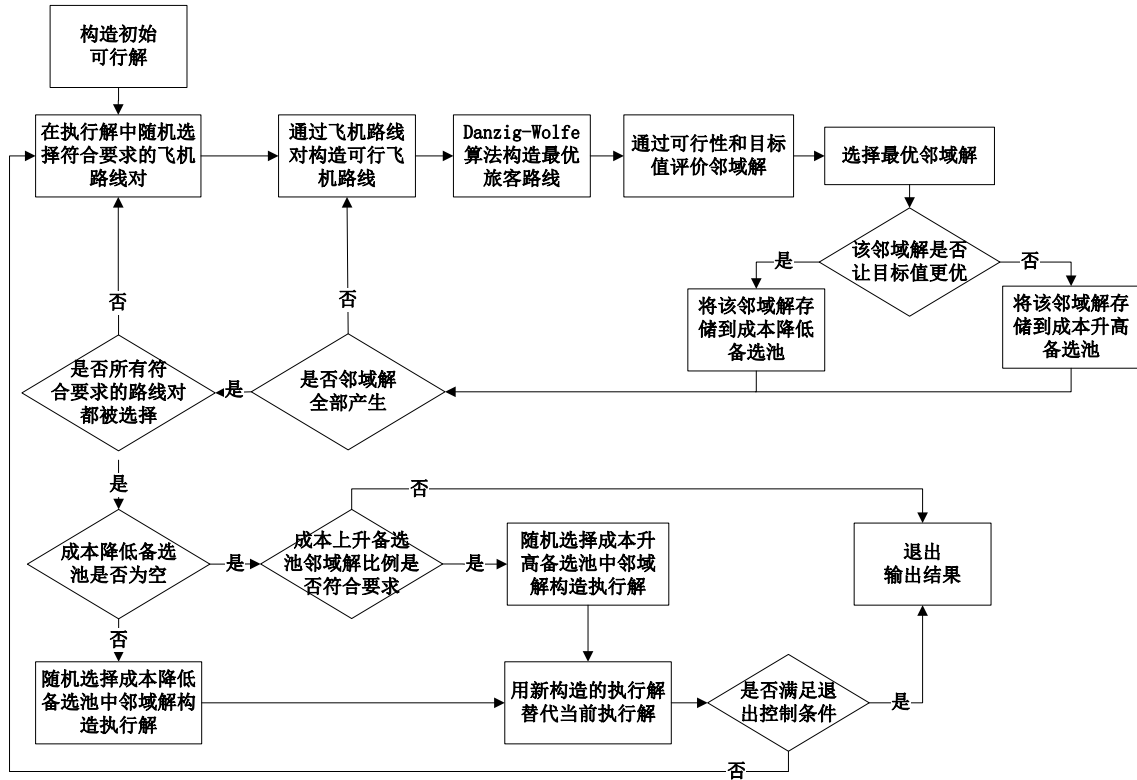


图 4.10 结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法流程图

## 4.5 算例分析

为便于对比分析，本章采用第三章的不正常航班数据，见表 3.1。采用本章设计的结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法，在 Visual C++6.0 软件平台上进行程序编译，并在 Inter (R) Core (TM) 2 Duo CPU, E7500 2.93GHz, 2GB 内存的台式电脑上进行运算求解，获得了飞机路线和旅客行程一体化恢复方案。一体化恢复方案与分阶段恢复方案的统计指标对比见表 4.1、图 4.11 和图 4.12。

表 4.1 分阶段和一体化恢复方案的综合统计指标

性能指标	分阶段恢复方案		一体化恢复方案	
航班恢复情况	取消航班数	13	取消航班数	11
	延误航班数	107	延误航班数	109
	航班平均延误时间	114 min	航班平均延误时间	130min
旅客行程恢复情况	取消旅客人数	584	取消旅客人数	192
	延误旅客人数	10,952	延误旅客人数	11,344
	旅客平均延误时间	124 min	旅客平均延误时间	131min
成本和运行时间	飞机路线恢复成本	832,700	飞机路线恢复成本	833,100
	旅客行程恢复成本	2,613,813	旅客行程恢复成本	2,591,973
	总成本	3,446,513	总成本	3,425,073
	比预计成本减少（%）	13.70%	比预计成本减少（%）	14.23%
	运行时间	4'46"+1'53"	运行时间	8'06"

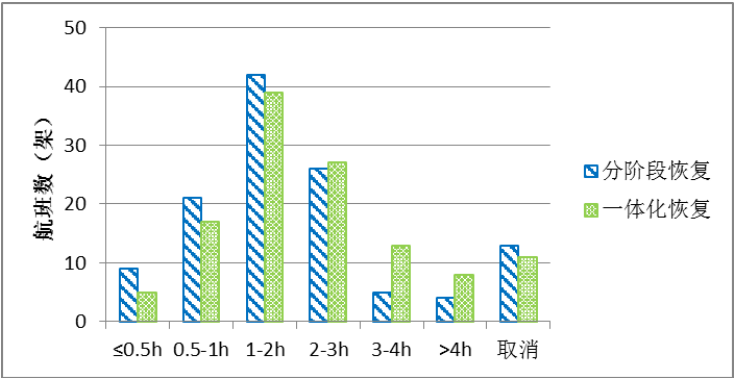


图 4.11 分阶段和一体化恢复方案的航班延误和取消情况分布

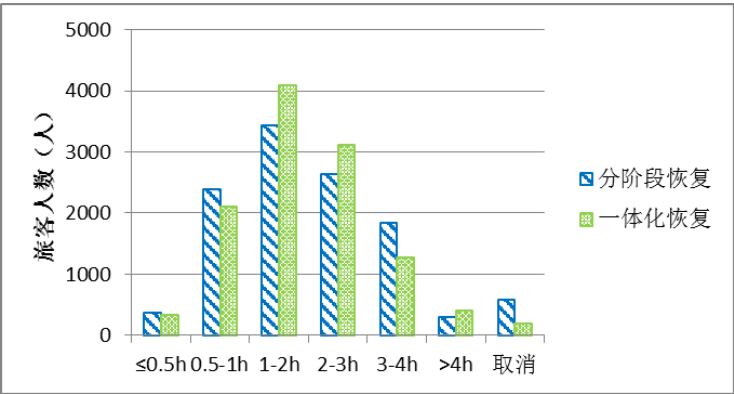


图 4.12 分阶段和一体化恢复方案的旅客延误和取消情况分布

通过对比可以发现：

- (1) 通过表 4.1 可以看出，一体化恢复结果比分阶段恢复结果的航班延误数增多了，航班和旅客的平均延误时间变长，签转的旅客人数增多，取消旅客人数减少。通过图 4.11 可以看出，一体化恢复方案的航班取消数比分阶段方案有所减少，在延误 2-3h、3-4h 以及 4h 以上的航班数有所增加；通过图 4.12 可以看出，一体化恢复方案的旅客取消人数有所减少，在延误 1-2h、2-3h 的旅客人数有所增加。通过分析可知：一体化恢复充分考虑了旅客的衔接中断问题，牺牲了一部分的航班和旅客的延误时间换取更多可以成行的航班和旅客。这在实际的航班运行控制过程中是十分常见的，在遇到大面积延误的情况下，签派人员会考虑将航班进行航班顺延，增大航班过站时间吸收一部分延误，让更多旅客可以进行中转。因此，一体化恢复比分阶段的恢复更加符合实际运行控制的需求。
- (2) 通过表 4.1 可以看出，一体化恢复中飞机运行成本增加有限，旅客行程恢复成本却有明显减少。说明一体化恢复的恢复策略和思路是从一个整体最优的角度出发，平衡飞机运行成本和旅客延误/取消成本，实现了航空公司和旅客的共赢。
- (3) 从运行时间角度考虑，由于旅客行程恢复建立在飞机路线恢复方案之上，问题规模和迭代次数相对一体化恢复问题要少很多，所以一体化恢复问题的运行时间要相对长一些。

## 4.6 本章小结

本章针对飞机路线和旅客行程一体化恢复问题进行了细致的分析和研究，基于时空网络建立了一体化恢复的混合规划模型，提出了飞机恢复的 6 种策略和旅客行程恢复的 2 种策略，根据贪婪算法、模拟退火算法以及 Danzig-Wolfe 分解算法设计出结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法，将该问题进行模块分解，提高了算法的求解效率。通过一个实际规模的算例分析，该算法可以快速有效地获得飞机路线和旅客行程恢复方案，该方案比分阶段的恢复方案更优。

## 第五章 全文总结与研究展望

### 5.1 本文总结

本文主要以旅客行程恢复问题为核心，以不正常航班旅客管理现状为现实基础，抽象出旅客行程恢复问题的恢复策略、恢复流程以及恢复成本。在此基础上，本文进行了不正常航班旅客行程分阶段恢复问题研究以及飞机路线和旅客行程一体化恢复问题研究，分别构建出符合实际运行调度规则和管制条例的数学模型，设计高效的求解算法，并通过实际规模的算例验证了算法的有效性和正确性。

#### (1) 不正常航班旅客管理方法研究

本文通过查阅国内外文献资料、国内各航空公司的延误处理办法以及前往航空公司运行控制中心的实地调研，总结出不正常航班旅客管理方法。通过查阅和调研获得资料的总结归纳，本文从航空公司提供的旅客服务、航班延误旅客安排管理以及用于优化不正常航班旅客管理的方法三方面进行了详细阐述。这部分的研究工作，既为本文提供了实际的问题需求，也为第三章和第四章的理论研究提供了可抽象表达的恢复策略、恢复流程以及恢复成本。

#### (2) 不正常航班旅客分阶段恢复问题研究

本文第三章基于飞机路线的恢复方案，进行了旅客分阶段恢复问题的研究。基于抽象表达的时空网络构建不正常航班旅客行程恢复的多商品流模型，采用 Danzig-Wolfe 算法进行求解。根据问题的特殊性，本文同时配合使用了十字链表、栈等存储结构，采用了深度优先的子问题搜索策略，并通过分枝定界算法的使用获得了该问题的整数解。最后，通过一个实际规模的算例进行了算法分析，验证了算法的正确性和有效性。

#### (3) 不正常航班飞机路线和旅客行程一体化恢复问题研究

本文第四章进行了飞机路线和旅客行程一体化恢复问题的研究工作。基于时空网络，构建了不正常航班飞机路线和旅客行程一体化恢复的混合整数规划模型。为求解这个大规模难解问题，本文结合了贪婪算法、模拟退火算法、Danzig-Wolfe 算法，并根据恢复策略的使用，设计出结合 Danzig-Wolfe 算法的贪婪模拟退火算法，极大地缩小了问题规模，提高了求解效率。通过一个实际规模的算例验证，该算法可以有效地求解不正常航班恢复问题，并在符合实时决策要求的情况下获得满意解。

## 5.2 本文创新点

### (1) 提出了旅客行程恢复多商品流模型的成本分解方法

不正常航班问题一般构建在时空网络之上，是一个典型的多商品流模型。但是很多国内外的研究都未采用多商品流模型进行问题的表达和求解。一方面是由于不正常航班恢复的多商品流模型一般是个复杂的规划问题，比较难解；另一方面就是由于恢复成本一般与一条完整的路径有关，国内外的研究通常将该问题转化为运输匹配问题进行求解。本文通过仔细分析恢复成本与路径中每一段航段的关系，将航班弧分为了延误弧、取消弧和中转弧，相应地将成本分成了三个部分，实现了多商品流模型中成本的表达。

### (2) 设计了 Danzig-Wolfe 子问题搜索算法的设计

Danzig-Wolfe 是求解多商品流问题的经典算法，算法中主问题和子问题的构造以及子问题搜索算法的设计是决定算法效率的关键。针对子问题的广义最短路问题，本文通过对特定问题的网络分析，放弃了不合适的经典算法，结合十字链表的储存结构、深度优先的搜索策略以及栈的使用，设计出效率较高的子问题搜索算法。该算法可以简单快速地找到 OD 对的最短路，子问题搜索算法的高效性保证了整个问题求解的效率。

### (3) 提出了一体化恢复问题中飞机路线和旅客行程的分模块求解方法

本文在进行一体化恢复问题求解时，将大规模的混合整数规划问题进行了分解，缩小了问题规模。根据飞机路线和旅客行程的相互关系，本文在构造邻域解时，首先在解空间内搜索飞机路线的可行解，在此基础之上，再搜索最优旅客行程。这一步的分解操作极大地减小了问题规模，让算法能够更快地搜索到最优解。

## 5.3 研究工作展望

不正常航班恢复问题是个复杂的系统规划问题，对航空公司也有着重大的战略意义。本文主要侧重于该问题中旅客行程恢复问题进行了一些研究和探讨。由于时间和精力有限，仍有以下需要进一步研究和探讨的问题：

- (1) 本文构建的旅客行程分阶段恢复模型以及飞机路线和旅客行程一体化恢复模型都建立在旅客需求在恢复期内不变的假设之上。一般来说，恢复期通常为 1 天，当恢复期定为 3 天、1 周或者更长时，就需要考虑旅客需求的变化问题，今后的研究可以考虑为旅客 OD 对建立几个时间节点的预测需求值。
- (2) 本文从航空公司的角度对不正常航班进行研究，实际运行中，航班恢复策略还依赖于空管部门的决策支持以及机场对停机位、跑道和其他保障设施的调度。因此，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。

- (3) 本文侧重旅客行程恢复问题，在进行一体化问题研究中未考虑机组的恢复问题。机组是航空公司的紧缺资源，机组路线恢复方案也直接影响着航班的运行。当然，飞机、机组和旅客一体化恢复问题将会是一个更为复杂的混合规划问题，该问题还有待于进一步的研究。
- (4) 要真正将不正常航班恢复的优化技术应用于航空公司的实际生产运行中，还需要设计、开发相应的辅助决策支持系统，用大量的实例进行模拟和测试。

## 参考文献

- [1] 中国民航总局,2011 年民航行业发展统计公报, <http://www.caac.gov.cn/I1/K3/201205/P020120507306080305446.pdf>
- [2] 中国民航总局,中国民航发展的第十二个五年规划, [http://www.caac.gov.cn/I1/I2/201105/t20110509\\_39615.html](http://www.caac.gov.cn/I1/I2/201105/t20110509_39615.html)
- [3] 黄为,张向晖,王文俊.我国航空公司不正常航班调度管理现状及优化策略[J].交通企业管理.2009,8:65-66.
- [4] 李雄,刘光才,颜明池. 航班延误引发的航空公司及旅客经济损失[J].系统工程,2007,12(25):20-24.
- [5] D. Teodorovic, S. Guberinic. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation [J]. European Journal of Operational Research. 1984, 15:178-182.
- [6] D. Teodorovic, G. Stojkovic. Model for operational daily airline scheduling [J]. Transportation Planning and Technology. 1990, 14(4):273-285.
- [7] A.I.Z. Jarrah, G. Yu, N. Krishnamurthy. A decision support framework for airline flight cancellations and delays[J]. Transportation Science. 1993, 27(3) :266-280.
- [8] S. Yan, H. Young. A decision support framework for multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling [J]. Transportation Research-A. 1996, 30(5):379-398.
- [9] S. Yan, Y.P. Tu. Multi-fleet routing and multi-stop flight scheduling for schedule perturbation [J]. European Journal of Operational Research. 1997,103 :155-169.
- [10] M.F. Argüello, J.F. Bard, G. Yu. A GRASP for aircraft routing in response to groundings and delays [J]. Journal of Combinatorial Optimization. 1997, 5:211-228.
- [11] 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.
- [12] Yu,X Qi. Disruption Management: Frameworks, Models and Applications, World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd.,2004.
- [13] N.Kohl, A.Larsen, J.Larsen. Airline disruption management-perspectives, experiences and outlook, Project Supported by CEC Contract IST-1999-14049, 2004.



- [14] T. Andersson, P. Varbrand. The flight perturbation problem [J]. Transportation Planning and Technology. 2004, 27:91–117.
- [15] J.A. Filar, P. Manyem, K. White. How airlines and airports recover from schedule perturbations: a survey [J]. Annals of Operations Research. 2001, 108 :315–333.
- [16] M.D.D. Clarke. Irregular airline operations: a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers [J]. Journal of Air Transport Management. 1998,4:67–76.
- [17] L. Lettovský. Airline operations recovery: An optimization approach [M], Georgia Institute of Technology (1997).
- [18] C. Barnhart, T. Kniker, M. Lohatepanont. Itinerary-based airline fleet assignment [J] Transportation Science. 2002, 36:199–217.
- [19] 陆宏兰. 基于旅客行程的飞机航班一体化恢复研究[M]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [20] 高强,严俊,陆宏兰. 不正常航班旅客流恢复方法[J]. 科学技术与工程, 2011, 27(11):6670-6673.
- [21] 严俊,高强,吴桐水,朱金福. 航班计划恢复中旅客流恢复问题的研究 [J].交通信息与安全, 2012,167(30):20-23.
- [22] Stephane Bratu, Cynthia Barnhart. Flight operations recovery: New approaches considering passenger recovery [J]. J Sched. 2006, 9:279–298.
- [23] Niloofar Jafari, Seyed Hessameddin Zegordi. Simultaneous recovery model for aircraft and passengers [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(7):1638-1655.
- [24] S. Bratu, C. Barnhart. An analysis of passenger delays using flight operations and passenger booking data [J]. Air Traffic Control Quarterly. 2005, 13 (1):1-28.
- [25] Serge Bisailon, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte. A large neighborhood search heuristic for the aircraft and passenger recovery problem [J]. A Quarterly Journal of Operations Research, 2011, 9(2): 139-57.
- [26] 路荣,毛加强.《航班延误经济补偿指导意见》实施中的问题与解决途径[J].西北工业大学学报.2006,26(4).44-47.
- [27] 赵影,钟小东.妥善处理航班延误,提高旅客服务质量[J].空运商务,2006,13:23-25.
- [28] 李卫华.以旅客需求为关注点: 航班延误服务举措浅析[J].空运商务,2010,14:12-14.
- [29] 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.
- [30] 都业富,田振才.民航航班延误成本的上升趋势[J].综合运输,2004,10:60-62.

- [31] 唐小卫. 协同鞠策机制下航空运输系统不正常航班问题研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [32] 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,2008,4:129-134.
- [33] 姚韵, 朱金福, 柏明国.不正常航班管理的可拓预警模型[J].运筹与管理,2006,15(1):100-104.
- [34] Chunhua Gao. Airline Integrated Planning and Operations [D]. Georgia Institute of Technology:2007,8.
- [35] Cynthia Barnhart, Ellis L. Johnson, George L. Nemhauser. Branch-and-price: column generation for solving huge integer programs[J]. Operations Research, 1998, 46(3):316-329.
- [36] C.C. Ribeiro, F. Soumis. A column generation approach to the multiple-depot vehicle scheduling problem[J]. Operations Research, 1994, 42(1):41 - 52.
- [37] Choi Eunjeong, Tcha Dong-Wan. A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem[J]. Computers and Operations Research, 2007, 34(7):2080-2095.
- [38] Michel Gamache, Francois Soumis, Gerald Marquis. A column generation approach for large-scale aircrew rostering problem[J]. Operations Research, 1999, 47(2):247-263.
- [39] Kniker T. Itinerary-based airline fleet assignment model[D]. Massachusetts: MIT,1998.
- [40] Rexing B, Barnhart C, Kniker T S. Airline fleet assignment with time windows[J]. Transportation Science, 2000, 34(1):1-20.
- [41] 肖东喜, 朱金福. 飞机排班中航班环的动态构建方法[J]. 系统工程,2007,25(11):20-24.
- [42] Ahmed Abdelghany, Goutham Ekollu, Ram Narasimhan. A Proactive Crew Recovery Decision Support Tool for Commercial Airlines During Irregular Operations. Annals of Operations Research, 2004, 12:309-331.
- [43] Rosenberger J, Johnson E, Nemhauser G. Rerouting aircraft for airline recovery[J]. Transportation Science, 2004, 37(4):408-421.
- [44] 朱金福. 航空运输规划[M]. 西安:西北工业大学出版社,2009.
- [45] 陈元琰. Visual C++ 6.0 编程实用技术与案例[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
- [46] William J. Cook. 组合优化[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [47] 谢金星, 邢文训. 网络优化[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [48] 张福德, 陈玉莲. 规划论及其程序设计[M]. 长春:吉林大学出版社,1985.

## 致 谢

紫金山依旧，秦淮水长流，不知不觉，我已经在南京航空航天大学度过了人生中最美好的 7 年，从本科到硕士，我完成了蜕变，从青涩走向了成熟。衷心感谢母校授予我全面的知识，赋予我生命的色彩。

首先，我要感谢我的导师朱金福教授。在近三年的硕士研究生学习过程中，在本课题的研究过程中，朱老师的悉心指导和谆谆教诲让我收获良多。不管是学习过程中遇到的挫折还是关于人生中的困惑，朱老师都能够耐心与我交流，提供思路。朱老师不仅是我学习中的导师，也是我人生方向的指引。朱老师渊博的学识，敏锐而严谨的科研能力，睿智的人生阅历使我受益匪浅。在这里，作者向朱老师表以最真诚的谢意！

感谢高强老师、吴薇薇老师、唐小卫老师对我学业的关心和支持，感谢吴小欢博士、朱博博士、杜婧博士在我课题研究过程中提供的无私的帮助和指导，师兄师姐们踏实的学术作风，严谨的科学精神永远是我学习的榜样，感谢教研室的师弟师妹们给予我诸多的关心，实验室的三年学习时光值得我永远珍藏。

感谢冯程同学、王睿明同学、孟娜同学、刘沁同学、付聪同学、周铭钰同学、侯思博同学以及所有与我一起学习生活了 7 年的同学们，是你们让我的求学生涯充满了温馨，充满了欢乐。你们将是我人生中永远的财富，不管以后相隔多远，我相信，重逢的那一刻，我们就回到了大学的时光，我们的友谊永远不会褪色。

感谢我的父亲和母亲，是你们赋予我生命，启迪我成长，我人生中每一个脚印都蕴含着你们的心血和牵挂，你们的期望是我不断前进的动力。感谢我所有的亲人一直以来的支持和包容，我将永远爱着你们。

感谢在我 24 年的生命中所有支持、鼓励和帮助过我的人，谢谢你们！

最后，谨向参加本文论文评阅和答辩的专家、老师们表示最诚挚的谢意，感谢你们的辛勤劳动！

作 者：王莹

2012 年 11 月 30 日

于南京航空航天大学

## 在学期间发表的学术论文及研究成果

本文来源于国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(批准号:61079014)。  
攻读硕士期间的研究成果及发表的学术论文如下:

发表的论文:

- 1、王莹,朱金福.基于 Danzig-Wolfe 算法的不正常航班旅客行程恢复问题.武汉理工大学学报(信息与管理工程版)(已录用,核心期刊)。
- 2、王莹,朱金福.不正常航班旅客恢复问题研究.南京航空航天大学第十四届研究生学术会议(已录用,二等奖)。

作者：[王莹](#)  
学位授予单位：[南京航空航天大学](#)

## 参考文献(13条)

1. [黄为, 张向晖, 王文俊](#) 我国航空公司不正常航班调度管理现状及优化策略[期刊论文]-[交通企业管理](#) 2009(08)
2. [李雄, 刘光才, 颜明池, 张玮](#) 航班延误引发的航空公司及旅客经济损失[期刊论文]-[系统工程](#) 2007(12)
3. [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[期刊论文]-[预测](#) 2010(01)
4. [陆宏兰](#) 基于旅客行程的飞机航班一体化恢复研究[学位论文]硕士 2010
5. [高强, 严俊, 陆宏兰](#) 不正常航班旅客流恢复方法[期刊论文]-[科学技术与工程](#) 2011(27)
6. [严俊, 高强, 吴桐水, 朱金福](#) 航班计划恢复中旅客流恢复问题的研究[期刊论文]-[交通信息与安全](#) 2012(02)
7. [路荣, 毛加强](#) 《航班延误经济补偿指导意见》实施中的问题与解决途径[期刊论文]-[西北工业大学学报\(社会科学版\)](#) 2006(04)
8. [李卫华](#) 以旅客需求为关注点: 航班延误服务举措浅析[期刊论文]-[空运商务](#) 2010(14)
9. [姚韵](#) 航空公司不正常航班管理和调度算法研究[学位论文]博士 2006
10. [都业富, 田振才](#) 民航航班延误成本的上升趋势[期刊论文]-[综合运输](#) 2004(10)
11. [赵秀丽, 朱金福, 郭梅](#) 不正常航班延误调度模型及算法[期刊论文]-[系统工程理论与实践](#) 2008(04)
12. [姚韵, 朱金福, 柏明国](#) 不正常航班管理的可拓预警模型[期刊论文]-[运筹与管理](#) 2006(01)
13. [肖东喜, 朱金福](#) 飞机排班中航班环的动态构建方法[期刊论文]-[系统工程](#) 2007(11)

引用本文格式: [王莹](#) 不正常航班和旅客行程恢复问题研究[学位论文]硕士 2013