

中國民航大學

碩士學位論文



基于集合划分的飞机航线调配问题研究

研究生姓名：于 焯

导师姓名：樊 玮 教授

2017 年 5 月 9 日

分类号: TP391.9 密 级: 公开
UDC : 004 学 号: 1405033

中国民航大学

硕 士 学 位 论 文

基于集合划分的飞机航线调配问题研究

研究生姓名: 于 焯

导师姓名: 樊 玮 教授

申请学位类别: 工程硕士 学科专业名称: 计算机技术

所在院系: 计算机科学与技术学院 论文答辩日期: 2017 年 5 月 9 日

2017 年 5 月 9 日

Research on aircraft routing problem based on set partitioning

A Dissertation Submitted to

Civil Aviation University of China

For the Academic Degree of Master of Engineering

BY

YU Zhuo

Supervised by

Prof. FAN Wei

College of Computer Science and Technology

Civil Aviation University of China

May, 9 2017

摘 要

飞机航线调配问题是民航领域著名的 NP-completeness 问题,是航空公司各项组织生产和计划的重要环节。合理有效的飞机航线调配方案有助于提高航空公司资源的核心利用率,落实航空公司发展战略,保障航空公司生产经营活动的安全性以及提高航空公司的直接运营效益。

本文简述了航空公司各项组织生产环节,而后对飞机航线调配问题做出研究。首先,分析了国内外对于飞机航线调配问题的研究成果以及发展现状。其次,从飞机航线调配问题的 NP-completeness 难题入手,介绍了飞机航线调配问题的方案调配基本规则,调配流程和求解目标,对飞机航线调配问题进行数学描述并证明其 NP-completeness 性质。然后,在满足了飞机检修维护条件,航班覆盖条件,最小飞机数等约束条件的基础上,设计航班串生成算法,针对飞机运营成本最小化以及飞机使用均衡两个要素设计目标函数,采用集合划分思想,建立了一个多目标 0-1 整数线性规划模型,使用国内某航空公司真实数据对数学模型进行了实验验证,得到了较优的飞机航线调配方案,为航空公司提供理论方法和决策支持。最后,本文设计实现了飞机航线调配支持决策系统,接口航空公司的汉莎排班系统,开发特色的汉莎系统对接方式。开发设计过程中将原有的通过 office 文件传输进行的工作方式,改为通过信息系统来管理,实现了基础查询,效益评估,智能决策等适合航空公司发展的特色功能,进而提高工作效率,降低人工计算失误概率,为航空公司提供高效智能的信息化管理。

关键词: 航线调配; 飞机排班; 多目标优化; 使用均衡; NP-completeness; 智能决策系统

Abstract

Aircraft routing problem is one of the most famous NP - completeness problems in the field of Civil Aviation. It is an important part of the airline organization's production and planning. Reasonable and effective route planning is helpful to improve the utilization of airline resources, to ensure the security of production and operation activities.

In this paper, the production process of each organization of the airline is briefly introduced, and then the aircraft routing problem is studied. Firstly, an extensive literature review of the applications of Operations Research to air transportation schedule problem is proposed. Secondly, Starting from the NP-completeness problem of aircraft routing, the basic rules, deployment process and solution objectives of the plan deployment are introduced. Aircraft Routing Problem is proved to be NP-completeness in the general case. Thirdly, On the basis of satisfying the constraint conditions of aircraft maintenance, flight coverage and the minimum number of aircraft, a flight string generation method is presented and a 0-1 integer programming mathematical model with the objective of the fleet balance condition and cost minimization condition is proposed. This model was verified by the real data of a certain domestic airline company, and the experimental results show that the aircraft route deployment plan is quite satisfactory. The results can provide theoretical and decision support for airlines. Finally, this paper designs and implements a decision support system of the aircraft routing, interfacing the airline's Lufthansa aircraft scheduling system, developing a specific interface to the interface Lufthansa system. The development process changes the Office file transfer mode to the management of information system. Several characteristics of management are achieved, including data query, benefit evaluation, intelligent decision-making. The system can reduce the probability of manual calculation error, and provide efficient information management for the airline.

Key word: aircraft routing; fleet scheduling; multi-objective optimization; fleet balance; NP-completeness; intelligent decision system

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 国外研究成果.....	3
1.2.2 国内研究成果.....	4
1.3 论文章节安排.....	4
第二章 飞机航线调配问题及其 NP-Completeness 证明.....	6
2.1 飞机航线调配问题.....	6
2.1.1 飞机航线调配问题约束与目标.....	6
2.1.2 可行航线调配方案.....	8
2.2 飞机航线调配问题 NP-Completeness 证明.....	10
2.2.1 飞机航线调配实例描述.....	10
2.2.2 飞机航线调配等图.....	11
2.2.3 等价性证明.....	14
2.2.4 NP-completeness 证明.....	17
2.3 本章小结.....	19
第三章 基于集合划分的飞机航线调配问题研究.....	20
3.1 数学模型设计.....	20
3.1.1 集合划分概念.....	20
3.1.2 数学模型.....	22
3.2 航班串生成算法.....	24
3.2.1 航班串的时间周期.....	24
3.2.2 航班串生成流程.....	24

3.3 实验与分析.....	27
3.3.1 生成航班串.....	28
3.3.2 模型验证与结果分析.....	29
3.4 本章小结.....	30
第四章 飞机航线调配优化决策系统设计与实现.....	32
4.1 系统设计背景.....	32
4.2 系统需求分析.....	32
4.2.1 项目关联.....	32
4.2.2 主业务流程.....	33
4.2.3 功能总需求.....	34
4.2.4 详细需求设计.....	35
4.3 系统设计.....	38
4.3.1 设计思想.....	38
4.3.2 技术手段.....	39
4.3.3 系统架构.....	40
4.4 数据库设计.....	44
4.4.1 Oracle 数据类型.....	45
4.4.2 完整性约束.....	46
4.4.3 主要表结构与分析.....	48
4.4.4 建立存储过程.....	54
4.5 本章小结.....	55
第五章 总结与展望.....	57
5.1 结论与总结.....	57
5.2 不足与展望.....	57
致 谢.....	59
参考文献.....	60
作者简介.....	64

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

改革开放以来,随着中国经济的发展和综合国力的提升,我国民航运输业迅猛发展,已经成为世界上第二大航空运输系统^[1]。“十二五”期间,我国民航综合能力飞速成长,行业提升到新的高度,为今后的可持续发展打下坚实的基础。到了“十三五”,我国全面建设小康社会进入了非常时期,加大力度推进改革开放和加速优化经济发展方式也迈入了关键阶段。随着相关政策的出台,民航运输业迎来新的发展机遇与挑战,成为下一阶段国家支持发展的重点行业。时至2020年,随着中国小康社会的逐步建立,中国必将在民航领域成为强国,乃至领导者。响应国家发展政策,各大航空公司本着安全强化、战略增强、能力提升、服务品质升级、基础建设、绿色高效等理念,组织优化各项生产和计划。航空公司各项组织生产和计划主要包括以下四类问题^[2]:

1、航班时刻编制:航班时刻指定了航空公司执飞的航段以及飞行时间,是航空公司一切生产管理和运营活动的基础与核心^[3]。航班计划确定了一个航空公司所服务的市场占有率以及服务周期,首先给出满足周期和范围的航班时刻。设计出一个使得利润最大化的航班时刻表是一个十分复杂的过程,它关系到其他航空公司提供的状况、对于市场需求的预测、航空公司现有运营和人力资源等情况。

2、机型分配:一旦航班时刻表制定完成之后,下一步工作要为航班时刻表中的每一个航班指定成本花费最小的机型,即机型分配^[4]。机型分配在节约成本的目标下,将机队中机型与航线网络中的航段相匹配。机型分配的主要成本由所使用的机型和由于运力不足而造成的航班收入损失来决定。

3、飞机排班:包括航线调配和尾号指派。确定了航段执飞机型后,接下来的工作就是依据飞机维护工作安排和航空公司的航班计划为每一个航班指定具体的一架飞机来执飞,即飞机排班^[5]。飞机排班数据量大,规则限制多,是一项规则复杂并且难度很大的工作。给出合理有效的方案关系到生产运的有效性,也影响着飞机维护检修计划的执行,是确保航空公司运营效益和运营安全的关键环节^[6]。

4、机组排班：机组排班也在机型分配之后进行重要工作，为航班计划中的每个执飞航班，合理的分配飞机机组和乘务组。机组成本是航空公司继航油成本，花费最多地生产环节，其微小的利用率改进也可以转化为成本上显著的节约。机组排班过程中必须满足民航总局和航空公司制定的大量且复杂的规定，是计算量很大的复杂综合性问题，使用人工方式找到可行解是十分困难的，通常包括两个子问题：机组配对和机组人员指派^[7]。

航空公司通过周密的组织生产规划，来实现各生产要素之间的最佳配置，飞机航线调配是航空公司组织生产规划的重要组成部分，合理有效的飞机航线调配方案有助于保障航空公司资源的核心利用，落实航空公司发展战略，确保航空公司生产经营活动的安全性和当年航空公司收支预算的可实现性。长期以来，运筹学理论一直是国际航空运输业创新和发展的源泉，被广泛地应用于航空公司各项组织生产与计划，航空收益管理等领域。然而，航线网络是世界上最复杂的网络之一，并且仍在飞速发展，面对越来越庞杂的航线网络，航空公司各项组织生产和计划也给研究人员们提出了巨大的挑战^[8]。

1.1.2 研究意义

飞机航线调配，是民航运输业的重要组成部分，航空公司组织生产计划的核心环节，是影响航空公司运营成本，服务水平以及市场竞争力的关键因素。飞机航线调配本质上是一个组合优化问题，是民航运筹学研究领域著名的 NP-completeness^[9]问题，也是中外学者们研究的热点课题，该课题是否有效解决，直接影响到民航业发展的安全性和运营效益，进而牵动国民经济的发展，因此，一直以来飞机航线调配都是每个航空公司关注的焦点问题^[10]。

随着航线网络的日益复杂化，飞机航线调配问题的复杂性和重要性也日益凸显，在飞机航线调配环节采用人工编制已经无法满足需求，在庞大的机队规模面前，人工编制不仅耗费时间和人力资源，而且得到的航线调配结果也差强人意。国外的许多大型航空公司为了使得航空运输生产安全，高效率，高质量地执行，从上世纪 80 年代就已经着手进行各种民航控制管理系统的设计开发。在国内，各大航空公司也都迫切想要提高信息化管理程度，进而充分利用航空公司机队资源，制定高效合理的飞机航线调配等生产计划工作，从而实现运营成本最小化，经济运营效益最大化等目标。因此，本文从飞机航线调配问题的 NP-completeness 性质证明入手，基于集合划分的航线调配问题给出研

究，并且完成航线优化智能决策系统的设计实现，不论从理论研究还是从实际技术实现方面都具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

飞机航线调配是影响航空公司运营成本，服务水平以及市场竞争力的一项重要因素，一直以来不论是在学术研究领域还是在行业应用中，都是一项令人瞩目的研究焦点。飞机航线调配属于组合优化问题，在国内外已涌现出了许多研究成果，主要的研究方法集中在运筹学算法和启发式算法中。

1.2.1 国外研究成果

国外方面，Feo 等人对飞机航线调配的研究开始的较早，1989 年就提出了一个大规模的混合整数规划模型，给出了一种两阶段的启发式算法，对维护周期为一周的飞机排班问题给出求解方案^[11]。Kabbani 等人通过生成航线集合（Line of Flights），将研究的问题转化为求集合分割的问题，并设计出了一种启发式算法来获得时间周期为一周的飞机维护路径^[12]。Jarrah 等人通过使用整数规划方法对飞机维护路径的分配问题进行了研究。再后来，Clarke L, Johnson E 等人做出研究，于 1997 年分析了飞机航线问题与不对称旅行商问题的相似性并将研究问题进行转化，提出 Lagrangian 松弛算法，对问题进行了求解^{[13][14]}。Talluri 和 Gopalan 等利用图论对研究课题进行了深入的探讨，最终得出了 4 天以上飞机维护问题的存在可行解的条件，构造了一种“4-MET” (a Four-Day Maintenance Euler Tour) 启发式算法^[15]，2003 年 Sriram^[16] 在其飞机维护路线问题模型中加入了“B 检”。Levin 等人在单机型的航班时刻优化过程中，同时研究飞机路径选择问题，首先引入了航班时间窗的概念^[17]，之后 Desaulniers 等人进一步做出研究，通过对目标进行分解，生成了最优航班路径的方法，找到了最优的机队调度方案，解决了日航班量小于 400 个的航空公司飞机调度的问题^[18]。飞机航线问题由于其 NP 难性质，一直以来都是存在可行解的课题，在许多大型的航空公司都没有很好的最优解方案。为得到更好的优化解，国外许多学者将飞机航线调配问题与机型分配或者机组排班问题集成考虑^{[19][20]}，为航空公司生产规划提出了新的求解思路和求解方法^{[21][22]}。

1.2.2 国内研究成果

国内方面,孙宏^[23]等人对于广义的飞机排班问题进行了系统的研究分类,提出了将一个具体的飞机排班问题归结为基于飞机调度指令要求,基于最少飞机数或者基于飞机使用均衡要求的排班模型中的一种,构造了一系列启发式算法,基于飞机调度指令要求,提出一种基于飞机阶段指派的启发式算法^[24],设置求解目标为可用飞机数最小,提出了一种描述航班衔接问题的图论模型,给出一种优化算法^[25],基于均衡使用要求,提出了模拟退火算法^[26]。谭娜等类比车辆指派模型,建立出飞机路线模型,使用一种基于单亲算子的免疫遗传算法对模型进行求解^[27];王锦彪等人将启发式智能优化算法引入到飞机排班问题中,将小规模机群排班问题算法复杂度有效降低。肖东喜^[28]等人关注飞机维修机会最大化,采用 Follow-on 规则和列生成算法,动态的构建出满足 3 天维护需求的航班串。朱金福^[29]等人考虑多机型情况,应用动态列生成算法提出了问题研究。郑芸等人证明了蚂蚁算法应用到飞机排班问题上求解的可行性^[30]。李耀华等人基于遗传算法,提出了航班串优化方法^[31],综合考虑机型分配和尾号指派问题的飞机一体化排班^[32],机组指派优化方法^[33]。

1.3 论文章节安排

本文分 5 个章节对飞机航线问题进行研究,章节安排如下所示:

第一章:绪论。

介绍了飞机航线调配问题的研究背景与研究意义,总结国内外飞机航线调配问题文献,从内容和方法上,分析了飞机航线调配问题的国内外研究状况。

第二章:飞机航线调配问题及其 NP 难题证明。

介绍了飞机航线调配问题复杂的约束条件和求解目标,对飞机航线调配问题进行数学实例描述,介绍图论有关性质和概念,利用二商品流的 NP-completeness 性质,对飞机航线调配问题的 NP-completeness 性质进行了证明。

第三章:基于集合划分的飞机航线调配问题研究

介绍了国内航空公司飞机航线调配中关注的重点,据此设计飞机使用均衡和成本最小化两个求解目标函数,结合集合划分思想,给出飞机航线调问题多目标数学模型,应用航空公司实际数据,对模型进行实验求解,获得可行的航线调配方案。

第四章：飞机航线调配优化决策系统设计与实现

介绍了飞机航线调配问题优化决策系统设计与实现，包括项目背景，需求分析，采用的技术手段和设计理念，系统使用的开发框架，数据结构设计，存储过程的编写等内容。

第五章：总结与展望

对全文的研究进行总结，提出不足之处，对可创新改进之处进行展望。

第二章 飞机航线调配问题及其 NP-Completeness 证明

2.1 飞机航线调配问题

飞机航线调配问题主要目标之一就是在满足航班覆盖、飞机使用均衡、维护要求等约束条件下,使得航线网络的收入最大化或者运营成本最小化。飞机航线调配实际上就是要为机队中的每一架飞机确定执飞航班,通常情况下,一架飞机需要执飞一个航班序列。飞机航线调配不仅要解决执飞问题,也要确保飞机的安全性,每一架飞机在规定的时间内(D 天)都需要在特定机场进行维修检查,能够提供维修检查的机场,称为基地机场。传统的方法将航线调配问题分离成两个子问题,首先解决的问题是生成一天的飞机航线调配方案,第二个问题是在考虑维修条件的情况下,将每一天的飞机航线调配方案连接起来,生成一周、一月或者更长时间的航线调配方案。对于第二个子问题的求解过程,当维护周期 $D=3$ 时,存在多项式算法^[15],当 $D \geq 4$ 时,是一个 NP-Completeness 问题^[34]。

基于飞机航线调配问题的 NP-completeness 性质,其求解过程是十分复杂的,求解困难之处主要在于:一是飞机航线需要严格遵守维修计划要求;二是由航班集生成的飞机航线调配方案(航班串)数量众多。考虑一个拥有 50 架飞机的机队,每日待分配的航班节为 200 个的飞机航线调配问题,传统的方法下,估算求解将涉及到的 $200 \times 200 \times 50 = 2,000,000$ 个决策变量,产生 2,030,020 个约束方程,由此可见,飞机航线调配问题是超大规模问题,求解十分困难。现有研究对于飞机航线调配问题的数学描述形式多种多样,并不存在固定的形式,虽然多次提出飞机航线调配问题是 NP-completeness 问题,但是对于其 NP-completeness 性质并没有清晰的证明,本章从飞机航线调配问题的数学建模入手,对其 NP-completeness 性质给出一般性证明。

2.1.1 飞机航线调配问题约束与目标

若要使得飞机航线调配问题生成合理高效的飞机航线调配方案,首先必须要考虑飞机航线调配的各项约束条件且满足求解目标。

飞机航线调配问题的约束条件一般有如下几个方面:

1、符合航班计划约束

飞机航线调配通常在航班计划编制完成和飞机机型分配之后进行，因此，可执飞的机型以及执飞的航节都已经确定了。也就是说，在飞机航线调配过程中必须满足规定的机型，同时满足航班时刻表中规定的机场和时刻要求。此外，使用相同飞机执飞的连续航班之间必须满足航站衔接和过站时间衔接要求，即前续航班的到达机场必须等于后继航班的起飞机场，前续航班的到达时刻必须在后继航班的起飞时刻之前，两个连续航班之间的地面过站时间大于等于该型号飞机地面过站所需要的最少时间。

2、航班覆盖约束

为航班计划中编写好的航班指定执飞飞机的过程中，确保每个航班能且只能安排一架飞机执行飞行计划，一般情况下中途不更换飞机。

3、维护约束

飞机维护是航空公司效益和安全的保障，其目的是确保航空公司每天的执飞飞机能够安全、适航、正点的飞行。按照国际规定，航空公司要对飞机进行四种类型的维护检修，根据维护范围，时间和频率的不同，一般分为 A 检、B 检、C 检和 D 检。最常见，最直接的为 A 检，有关管理组织规定飞行器每飞行大约 60 个小时就必须对飞机进行 A 检，否则必须进行停场维护，不可以再执飞。B 检比 A 检的要求更高，更具体，不仅要进行全面的目视检在外，还要检查飞机所有的活动部件等，B 检要求每 300-600 飞行小时后必须进行一次。C 检和 D 检则更为严格，需要飞机进入修理厂进行维护，一般要求每 1-4 年进行一次。

飞航线调配过程中时最经常考虑的维修检查操作为 A 检，A 检通常在夜间进行。国外航空公司在考虑 A 检的执行过程中，大多制定“三天维修规则”或者“四天维修规则”，即飞机每连续飞行三天（或四天），至少有一天夜晚停场在航空公司规定的维修基地，进行过夜检修。

4、最小飞机数约束

飞机是一种昂贵的飞行设备，航空公司的飞机数量通常是一定的，飞机航线调配使用的飞机数必须小于等于航空公司所拥有的飞机数，特别是在运力紧张的情况下，要使用尽可能少的飞机承担起更多的航班任务。

根据各航空公司的实际发展，在飞机航线调配过程中关注的优化目标也不尽相同，如下列出了部分航空公司关注的重点优化目标。

1、成本最小化

高效益低成本一直是每个航空公司的追求，成本的具体分类和影响因素有很多，按照不同的计算方法，飞行成本也有所不同。影响成本最大的为油费，占整个航空公司运营成本的 30%到 40%左右。其他成本根据公司运营模式（传统航企或廉价航企），航线结构等不同而有所不同，包括飞机成本，机组成本，机场成本，飞机的维修成本，导航成本，地服成本等。有效的减少成本，相当于提高收益，成本最小化是航空公司始终关注的焦点，也是飞机航线调配问题的根本目标。

2、飞机使用均衡

飞机航线调配的另一个基本目标是飞机使用均衡。其实质是，确保机队中的每一架飞机的平均飞行时间和平均起降次数都接近于期望平均值，避免出现某些飞机长时间执飞，而有些飞机利用率很低的情况。从长远规划看，保障机队的使用均衡对于飞机航线调配有十分重要的意义。首先，飞机按期执行维修计划以及安全运营依赖于机队的使用均衡，其次，保证均衡性能够维持航空公司运力稳定，节约有限的航空资源，达到降低成本的目的。

3、价值最大化

乘客出行首先会选择点到点直飞的航班，但在某些情况下，航空公司不提供点对点的航班时，乘客则只好选择中转航班。选择中转航班时，乘客更喜欢全程使用相同的飞机，避免了下飞机等待，重新办理换乘等繁琐流程。若所有的中转航班能够使用相同的一架飞机执飞，则称其为经停航班。经停航班在航季繁忙时候，是旅客们的首选，能够为航空公司带来了较高的价值。

2.1.2 可行航线调配方案

航班：用来描述在某个确定时刻从始发站出发执行某个确定航班计划到达终点站的一次飞行运输。例如：2017 年 1 月 30 日从广州始发，终到北京的 MF8960 即为一个航班，图 2.1 中一条带箭头的实线，表示一个航班。

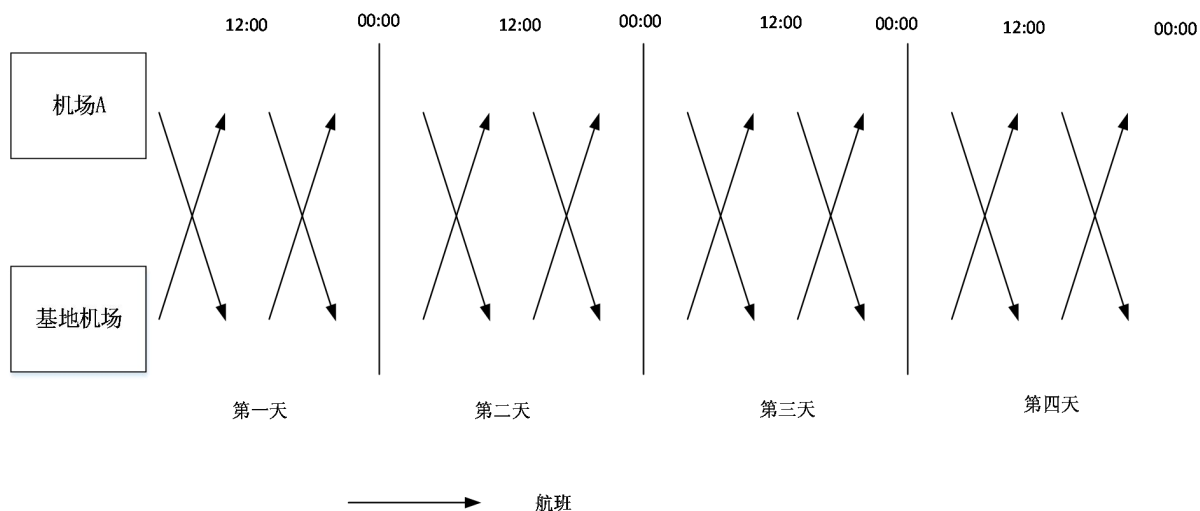


图 2.1 航班图

航班串：在航空公司制订日常生产计划的过程中，常常将航班衔接起来，生成一个航班序列，也可以理解为按照一定规则串成串，称为“航班串”^[23]。通过航班串的生成，就可以将飞机与航班的匹配转化为飞机与航班串的匹配，从而降低问题的求解规模和计算复杂性。

可行航线调配方案：满足维护要求的航班串为可行航班串，满足航班覆盖，周转时间，始发进场与到达机场约束的一组可行航班串，即为可行航线调配方案。如图 2.2 所示。

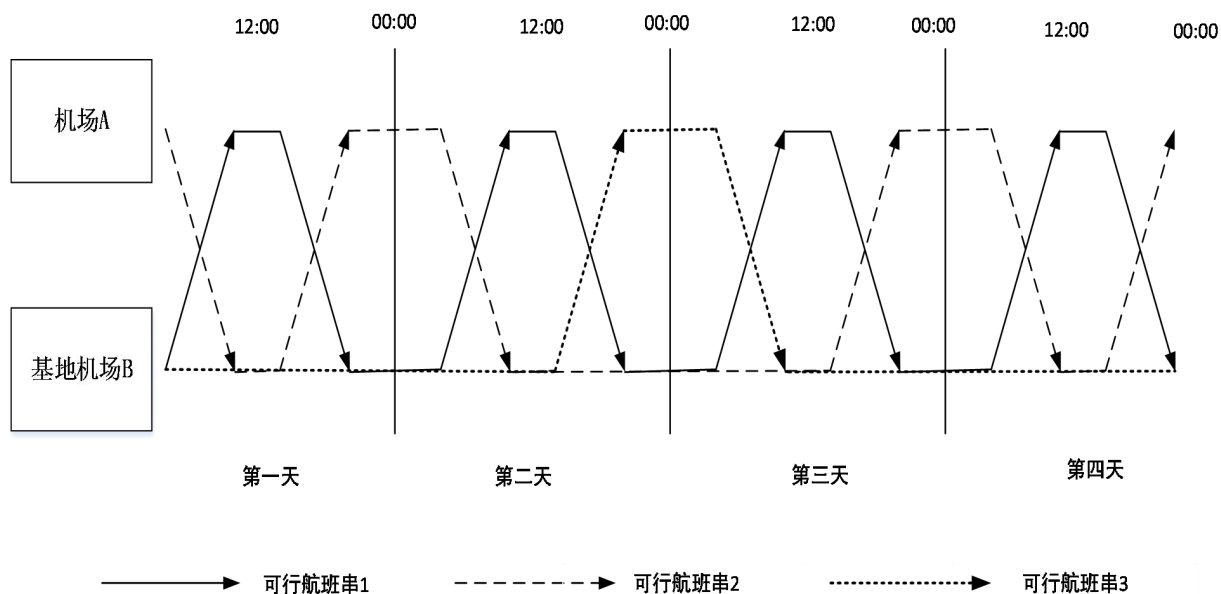


图 2.2 可行调配方案

2.2 飞机航线调配问题 NP-Completeness 证明

2.2.1 飞机航线调配实例描述

飞机航线调配问题数学描述：

航空公司通常按照周、月、季度等时间段来进行航线调配，设 H 为飞机航线调配的时间维度。离散化时间 T ，每一天的时间被离散化为 τ 个部分。满足维护要求，至少 D 天需要在基地进程进行维护检修，设 $D=4$ 。机场集合为 A ，机场 $\alpha \in A$ ，基地机场集合 $B \subseteq A$ 。定义航班集合 F ，每一个航班 $f \in F \subseteq (A \times [\tau] \times [H])^2$ ，用两个三元组来定义，一个三元组描述其的始发状态 $(\alpha_f^{dep}, t_f^{dep}, d_f^{dep})$ ，一个三元组描述其到达状态 $(\alpha_f^{arr}, t_f^{arr}, d_f^{arr})$ 。设 t_f^{arr} = 航班时刻表中的飞机落地时间 + 最小地面周转时间，这样可以使得航班 f 和任意在 t_f^{arr} 飞离 α_f^{arr} 的航班连成航班串。对于每一天 $d \in [H-1]$ 定义一个夜晚集 $A_d \subseteq F \cup F^2$ ，如果 $d_{f_1}^{dep} \leq d$ 并且 $d_{f_2}^{arr} > d$ ，即航班 f 在 d 天前始发，在 d 天后到达，则一个航班 f 属于夜晚集 A_d 。如果 f_2 的始发机场 = f_1 的到达机场，并且 $d_{f_1}^{arr} \leq d$ ， $d_{f_2}^{dep} > d$ ，则一个航班对 (f_1, f_2) 属于夜晚集 A_d 。如果一个航班对属于夜晚集 $(f_1, f_2) \in A_d$ ， f_1 的到达机场 $\alpha_{f_1}^{arr} \in B$ ， B 为基地机场，则这个航班对为可维护航班对 $(f_1, f_2) \in \Pi_d \subseteq A_d$ 。令两个航班之间的时间间隔大于维修检查的时间，令 τ_M 为维修检查需要的时间，则 $(t_{f_2}^{dep} + \tau) - t_{f_1}^{arr} \geq \tau_M$ 。定义一个航班串 $\sigma = (f_1, f_2, \dots, f_p)$ ，满足 $\alpha_{f_i}^{arr} = \alpha_{f_{i+1}}^{dep}$ 且 $t_{f_i}^{arr} \leq t_{f_{i+1}}^{dep}$ $i = 1, 2, 3, \dots, p-1$ ，则一个航班串在 d 天晚上执行维修检查，如果航班串 σ 中存在两个连续的航班 f_i, f_{i+1} ， $(f_i, f_{i+1}) \in \Pi_d$ 。如果一个航班串在连续的 D 天内，至少有一天晚上存在 $(f_i, f_{i+1}) \in \Pi_d$ ，则这个航班串为可行航班串。设航班 f 的运营天数 $o_f = d_f^{dep} - d$ ，就等于 f 始发当天和最近一次维护的夜晚 f 之间的天数。

航线调配问题的目标就是用可行航班串覆盖所有航班，假如航班串 σ 中最后一个航班 f 没有能够到达维修基地，这样的话航班的运营天数 o_f 将被考虑为下一个阶段飞机航线调配的一个初始条件。如此，在飞机航线调配问题中，机场飞机的初始状态定义为：

对于每一天 $d \in [D]$ ，机场 α 有 k_{α}^d 架飞机，必须要在 $D - d + 1$ 天内进行维护检修，即必须在 $D - d + 1$ 天内飞机到基地机场维护。对于每一天 $d \in [D]$ ，到达 α 机场的飞机数为 γ_{α}^o ，则至少 $\sum_{o=1}^d \gamma_{\alpha}^o$ 架飞机在 d 天内进行过维护检修了。到达机场 α 时，在 d 天内进行过维护。机队规模表示为： $k = \sum_{\alpha \in A} \sum_{d \in [D]} \kappa_{\alpha}^d$ 。

飞机航线调配问题的实例描述：

时间维度 H ，离散化时间 T ，机场集合 A ，基地集合 $B \subseteq A$ ， $f \in F \subseteq (A \times [\tau] \times [H])^2$ ，维护周期 D ，始发情况 k_{α}^d 和到达情况 γ_{α}^o 。

2.2.2 飞机航线调配等图

为了研究飞机航线调配问题，我们首先定义一个满足特定属性的无环有向图 $G = (V, A)$ ，它具有两个非空的不相交的顶点子集 S, T ，其中 S 顶点集合称为源， T 顶点集合称为汇，其他 $I = V - (S \cup T)$ 为内部点集合。

$\delta^{-}(v)$ ：表示终点为 v 点的弧的集合，即入边。

$\delta^{+}(v)$ ：表示以 v 点为起点的弧的集合，即出边。

$d^{-}(v) = |\delta^{-}(v)|$ 表示 v 点的入度； $d^{+}(v) = |\delta^{+}(v)|$ 表示 v 点的出度。

如果 $\delta^{-}(v) = \emptyset$ ，点 $v \in V$ 为源节点。如果 $\delta^{+}(v) = \emptyset$ ，点 $v \in V$ 为汇节点。如果图中的每一个内部点 $v \in I$ 满足条件 $d^{-}(v) = d^{+}(v)$ ，则这个有向无环图 G 为一个等图。如图 2.3 所示。

定义路径 $P \in G$ ，是从源节点始发，指向目的节点的路径，为 $S - T$ 路径。如果边 $a \in P$ ，则表示边 $a \in A$ 被路径 P 所覆盖，对于每一条边 $a \in A$ ，存在一条且仅有一条路径 $P \in \mathbf{P}$ ，使得 $a \in P$ ，则路径集合 \mathbf{P} 为 G 的路划分。

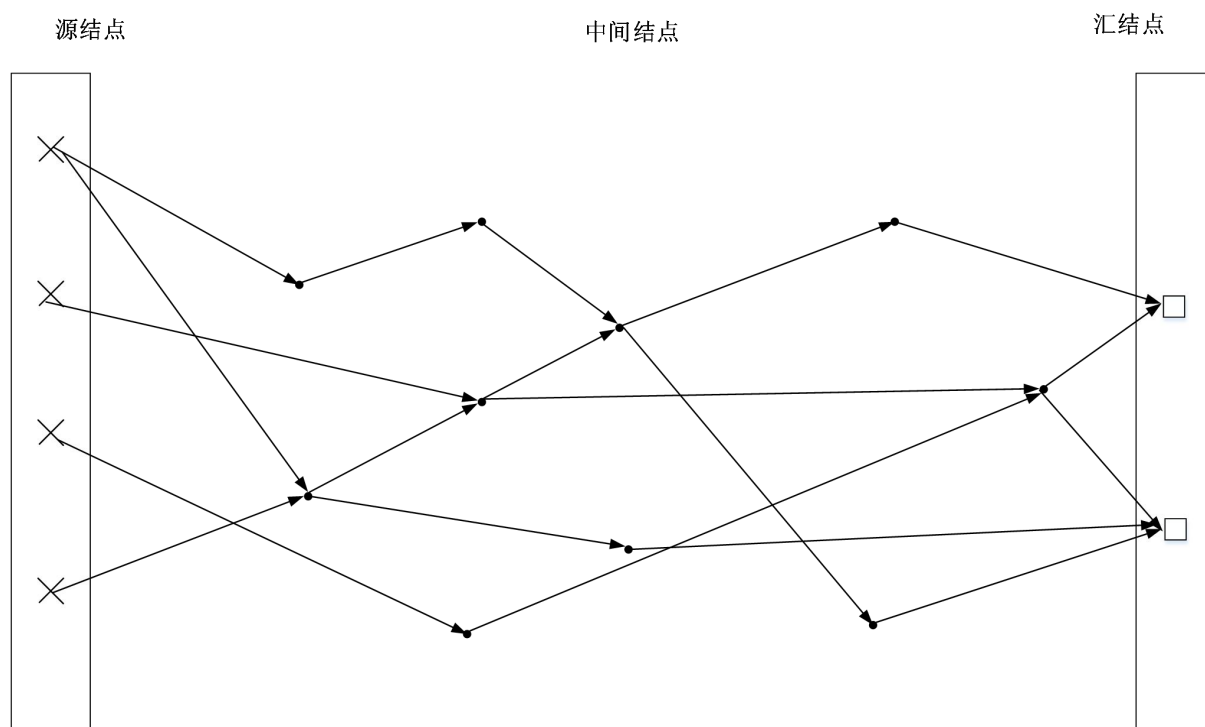


图 2.3 等图

等图中的边表示为执飞航班或者表示两个航班间的衔接情况，等价图中的点用 $\langle a, t \rangle$ 二元关系来表示，一条调配航线由 $S - T$ 路径表示。 d 通过夜晚来进行分离，用图中的有向割来表示。在一个有向图中，对于点集 U ，满足 $\delta^+(U)$ 为空的 $\delta^-(U)$ 的边的集合为有向割集 C 。定义等价图 $G = (V, A)$ ， $d \in [H]$ 表示夜晚的集合，如果对于 $d \in [H - 1]$ 的每一天有 $U_{d-1} \subseteq U_d$ ，并且 $U_H = T$ ， T 为终结点的集合，则表示飞机过夜情况的有向割的集合为 $N_d = \delta^-(U_d)$ 。如图 2.4 所示。

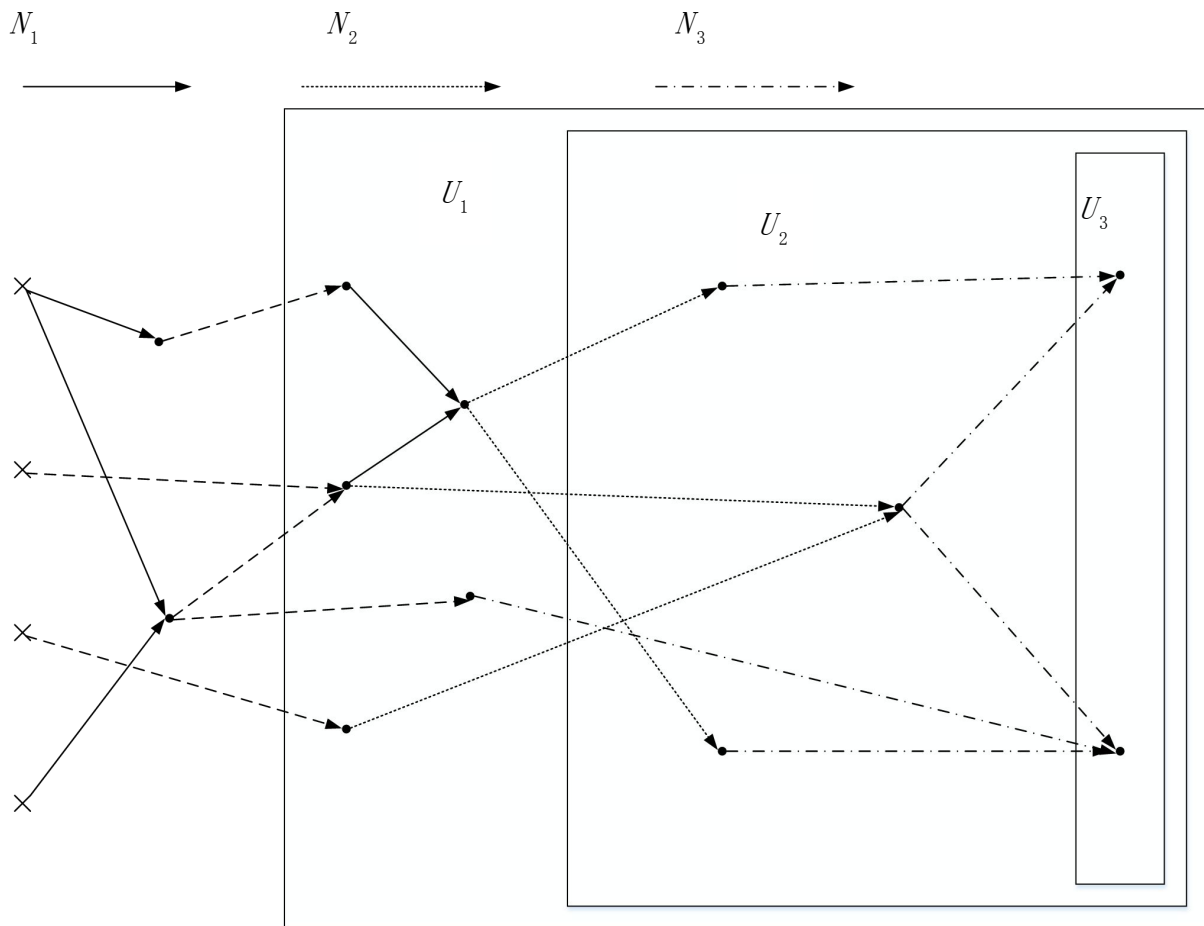


图 2.4 有向割图

在时间维度 H 内, 如果一个点 $v \in U_{d-1} \mid U_d$, 则定义函数 $day(v)=d$, 表示按照时间序列 v 的下一个夜晚所在的日期。夜晚弧集合 N_d 表示在机场过夜, 维护弧集合 M_d 表示在基地机场过夜且进行维修检查。 M_d 为 N_d 的子集。如果路径 P 覆盖 N , 则 $P \cap N \neq \emptyset$ 。令飞机在 D 天内进行维护, 即维护约束为 D 。从源节点 S 指向终结点 T 的路径 P 必须覆盖到所有的夜晚 N_d 。如果每 D 天路径 P 都覆盖到维护弧, 则这条路径为可行路径, 即对于 $d \in [H - D + 1]$, 有 $P \cap \left(\bigcup_{o=d}^{d+D-1} M^o \right) \neq \emptyset$ 。对于路径 P 中, 存在一条弧 a , 运营天数 $o_p(a)$ 等于弧 a 和最近的维护弧 M_d 间隔的天数。因此, 当路径 P 中每一条弧的运营天数小于维护约束, 则这样的路径 P 为可行路径, 即对于 $\forall a \in P, o_p(a) \leq D$ 。

根据计算每条可行路径在源节点和终节点的运营天数, 给出源节点限制条件和终节

点限制条件, 即对于任意的 s, t 和 $o \in [D]$, 令 κ_s^o 为初始限制条件, γ_s^o 为终止限制条件, 一个可行的路径集合 P 如果满足下面的条件, 则得到可行的飞机航线调配方案。

- 1、每个航班能且只能被覆盖一次。
- 2、至少 $\sum_{o=d}^D \kappa_s^o$ 条路径以 s 为源点, 在 $D - d + 1$ 天内遍历集合 $\bigcup_{o=1}^{D-d+1} M_o$ 的维护弧, 即必须确保航班在 D 周期内进行维护, $\forall d \in [D]$ 。
- 3、至少 $\sum_{o=1}^d \gamma_t^o$ 条路径以 t 为终点, 在最后的维护间隔 d 天内, 遍历集合 $\bigcup_{o=H-d+1}^H M_o$ 中的维护弧, $\forall d \in [D]$ 。

飞机航线调配等图的实例描述:

等图 $G = (V, A)$, 夜晚弧集合 N_d , 维护弧集合 $M_d \subseteq N_d$, 维护约束 D , 初始约束 κ_s^o , 终止约束 γ_s^o 。

引理 1 如果 P 是等图 G 中从源点指向汇点的一条路径, 在 G 中去掉路径 P , 剩下的部分依然是等图。

使用贪心算法可以容易的找到等图的路径划分。如图 2.5 所示。

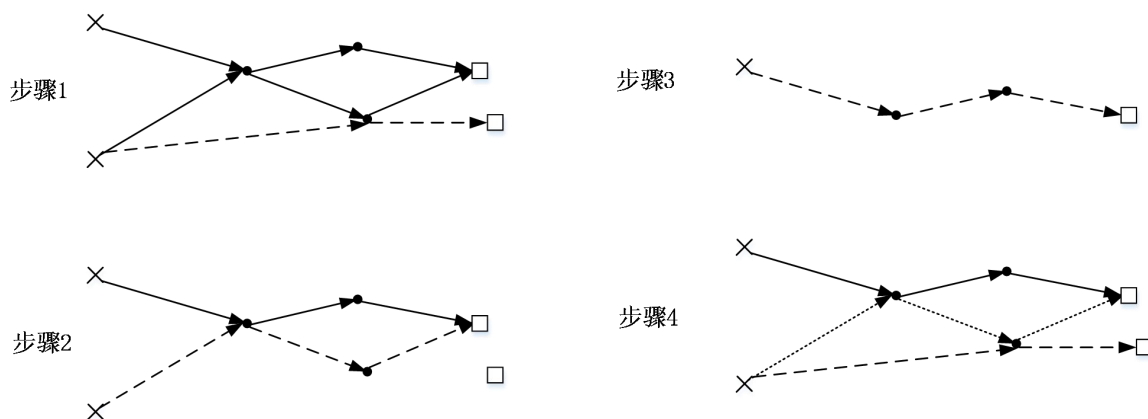


图 2.5 应用贪心算法在等图中找到路径划分

2.2.3 等价性证明

定理 1 飞机航线调配问题和等图问题是等价的: 在线性时间内, 一个问题可以推导出另一个问题。

证明: 首先能够证明航线调配问题可以在线性时间内推导为等图问题。令 T, A, B ,

F , D , κ_a^d , γ_a^d 为航线调配问题的一个实例。令 G' , N_d' , M_d' , D' , $\kappa_s^{d'}$, $\gamma_t^{d'}$ 为等图的一个实例, t 为一个按时间顺序排列的索引, α 机场的初始飞机总数表示为 $\theta_a^{t_0}$, $\theta_a^{t_0} = \sum_{o=1}^D \kappa_a^o$ 。由于航班覆盖约束, 每一个航班只能由一架飞机来执飞, α 机场在 t 时刻的飞机数 θ_a^t 可以用 t 时刻前抵达的飞机数减去 t 时刻前离开的飞机数求得。

$$\begin{aligned} \theta_a^t &= \theta_a^{t_0} + |\{t \text{ 时刻之前到达飞机数}\}| - |\{t \text{ 时刻之前离开飞机数}\}| \\ &= \theta_a^{t_0} + \sum_{\tau=0}^t \left[\sum_{f \mid \alpha_f^a = \alpha, t_f^a = \tau} 1 - \sum_{f \mid \alpha_f^d = \alpha, t_f^d = \tau} 1 \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

飞机航线调配有向等图 $G' = (V', A')$ 定义如下: 对于每一个机场 $\alpha \in A$ 在任意时刻 t , 如果至少有一个航班在 t 时刻离开机场 α , 则图中对应形成一个内部点 $v'(\alpha, t) \in V'$ 。对于每一个机场 α , 图中分别对应有一个源节点 $s'_\alpha \in S$ 和一个终结点 $t'_\alpha \in T$ 。对于每一个航班 $f = ((\alpha_f^d, t_f^d, d_f^d), (\alpha_f^a, t_f^a, d_f^a))$, 图中对应存在一个航班弧, 航班弧的起点为 $v'(\alpha_f^d, t_f^d, d_f^d)$, 终点为 $v'(\alpha_f^a, t_1, d_1)$, 其中 t_1, d_1 是第一个比 t_f^a, d_f^a 大的时间参数并且在 t_1, d_1 时刻有航班从机场 α 起飞, 如果不存在这样的 t_1 , 那么这个航班弧的目的节点指向终结点 t'_α 。这样形成的图中, 每一个点 v' 表示为机场和天数 $day(v')$ 。 $day(v')$ 表示: 如果一个点 $v \in U_{d-1} \mid U_d$, 定义函数 $day(v) = d$, 表示按照时间序列 v 的下一个夜晚所在的日期。令 t_1, t_2, \dots, t_n 为飞离机场 α 连续的时间点, 定义 $i \in [n]$, 则在节点 $v'(\alpha, t_i)$ 和节点 $v'(\alpha, t_{i+1})$ 存在 $\theta_a^{t_i}$ 个地面弧, 若 $i = n$, 则指向终结点 t'_α 。定义 $N_d' = \delta^-(U_d')$ 是 d 天之后形成的有向割集合, 即 $U_d' = \{v' \mid day(v') > d\}$, 因此, 满足了等价图中夜间特征 $U_{d+1}' \subset U_d'$ 。令 M_d' 表示维护弧的集合, N_d' 为夜晚弧的集合, 维护弧为在基地机场 b 过夜的夜晚。对于所有的 s, t 和 d , 初始条件和结束限制条件是相同的, 即 $\kappa_a^{d'} = \kappa_s^d$, $\gamma_t^{d'} = \gamma_t^d$ 。如图 2.6 所示。

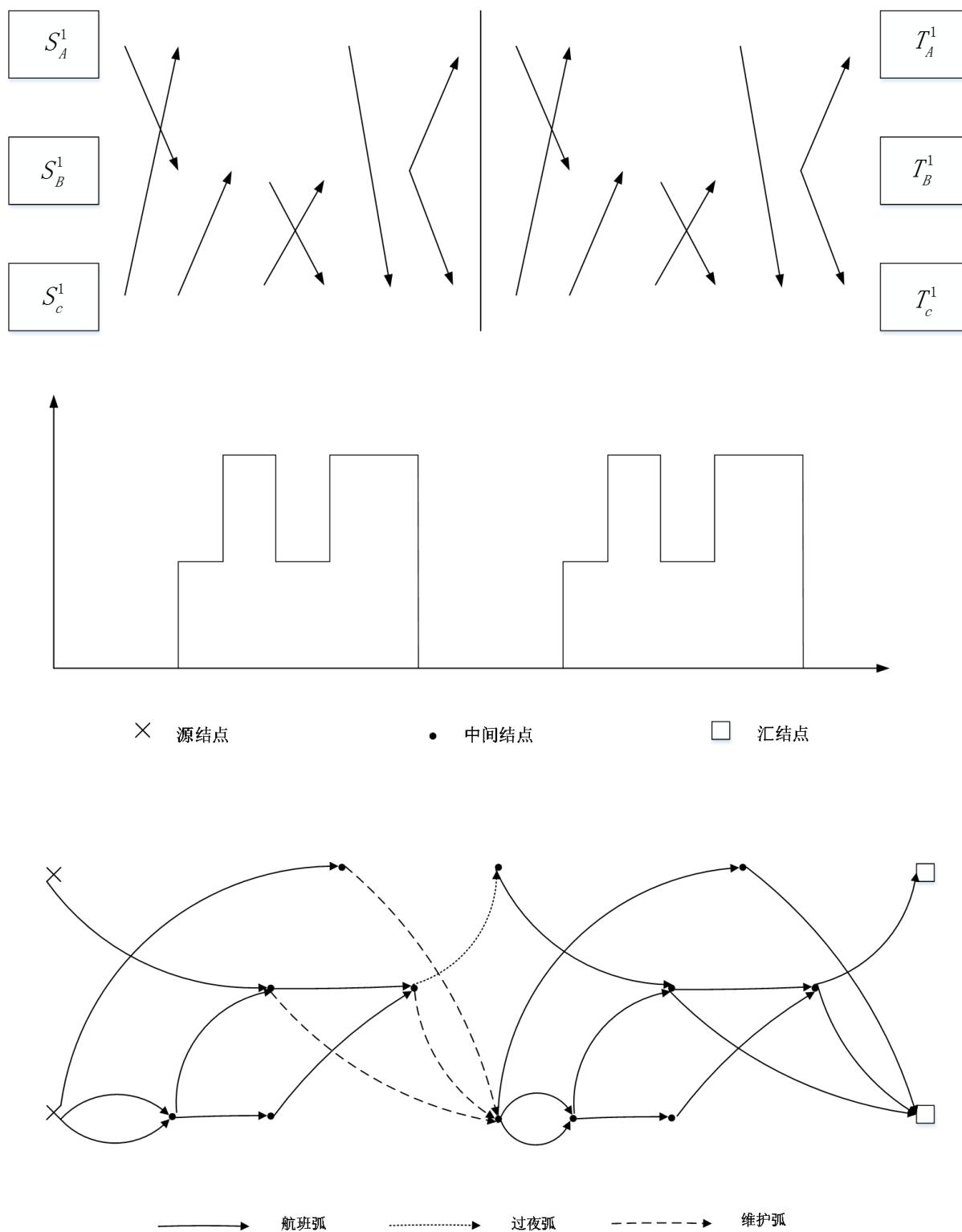


图 2.6 飞机航线调配与等图

按照上面过程得出的图即为等图。事实上，源节点 s' 和终结点 t' 满足 $d^-(s') = 0$ ， $d^+(t') = 0$ 。令 $v = v'(a, t)$ 是中间点，令 t_- 为从 a 始发的 t 时刻的前一个时刻，则可

以得出公式 (2.2)，中间点的出度和入度相等。

$$d^+(v) - d^-(v) = \theta_v^t - \theta_v^t - \left[\sum_{f \setminus \alpha_f^a = a, t_f^a = t} 1 - \sum_{f \setminus \alpha_f^d = a, t_f^d = t} 1 \right] = 0 \quad (2.2)$$

假如航线调配问题有一个可行解 S 。如果 a 是航班串 σ 中两个连续的航班弧之间的地面弧，则这个航班串 σ 覆盖了这个地面弧 a 。地面弧在图中是水平的，某一时刻某一机场的飞机数等于平行的地面弧的数量。因此，每一条地面弧都可以通过一条图中的路径 $P'(\sigma)$ 指派给唯一的航班串 σ 。由于航班串 σ 为可行方案，因此路径 $P'(\sigma)$ 也为可行的。

接下来，证明等图问题可以推导为飞机航线调配问题，令 $G = (V, A), B, D, \kappa_s^d, \gamma_t^d$ 为等图问题的一个实例，定义一个飞机航线调配实例 $T', A', B', F, D', \kappa_a^d, \gamma_a^d$ ，前面证明中已经中定义了用 $Day(v)$ 来表示夜晚集合，为了获得每一天的时间序列点，可以通过深度优先搜索这一天的等价割图 $U_d \mid U_{d+1}$ ，对于每一个点，将它的前续结点最大索引值加一，等图问题可以推导为飞机航线调配问题。

2.2.4 NP-completeness 证明

1、流的定义

设 $G = (V, E)$ 为一个有向图， S 为其源节点， T 为其汇节点，在弧集 $E(G)$ 上定义取非负整数值的函数 c ，称 G 为一个网络。函数 c 为 G 的容量函数，容量函数在弧 a 上的值称为 a 的容量，弧 $a = (i, j)$ 的容量记为 $c(a)$ 或者 $c(i, j)$ ，一般来说， $c(i, j) \neq c(j, i)$ 。

设 G 是有一个源 s 和一个汇 t 的网络， f 是定义在弧集 $E(G)$ 上的一个实数值函数， V_1, V_2 是 $V(G)$ 的子集，用 (V_1, V_2) 表示起点在 V_1 中，终点在 V_2 中的弧的集合，记为 $f(V_1, V_2) = \sum_{a \in (V_1, V_2)} f(a)$ 。

定义 设 f 是定义在弧集 $E(G)$ 上的一个整数值函数，若满足下面连个条件，

$$(1) \quad 0 \leq f(a) \leq c(a), \text{ 对所有的 } a \in E(G)$$

$$(2) \quad f(v, V) = f(V, v), \text{ 对所有中间点 } v \in V - (s, t)$$

条件(1)称为容量约束,条件(2)称为守恒条件。则称 f 为网络 G 的一个流。 $f(s, V)$ 称为流 f 的值。

2、有向二商品流

设 $G = (V, E)$ 为一个无环有向图, G 是有两个源 s_1, s_2 和两个汇 t_1, t_2 的网络, (u, v) 表示起点在 u , 终点在 v 的有向边。 f_i 是定义在弧集 $E(G)$ 上的实数值函数, $i = 1, 2$ 。二商品流满足下面两个条件。

(1) 容量条件定义为 $f_1(u, v) + f_2(u, v) \leq c(u, v), (u, v) \in E$ 。

(2) $\sum_{\{(u,v) \in E\}} f_i(u, v) = \sum_{\{(v,w) \in E\}} f_i(v, w)$, 对所有的中间点 $v \in V - (s_i, t_i)$ 且

$i = 1, 2$ 。

3、NP-completeness 证明

在无环有向图上的不相交路径二商品流问题是 NP-completeness 问题^[35]。

定义一个有向无环图 $G = (V, E)$, 源节点 s_1, s_2 , 汇节点 t_1, t_2 , 两个非负数 R_1, R_2 , 则可以在 s_i 到 t_i 之间形成 R_i 条路径弧, $i = 1, 2$, 成为一个解决方案。

定理 飞机航线调配问题是 NP-completeness 问题, 即使时间维度为 2 天也是。

证明: 令 $H, s_1, s_2, t_1, t_2, R_1, R_2$ 是无环有向路径不相交二商品流图的一个实例, 对图 H 进行如下拓展可以得到图 G : 共添加 $2R_1 + 2R_2$ 个源点和汇点, 组成点集 S_1, T_1, S_2, T_2 , 给每个属于 S_i 的点和 s_i 之间添加有向弧, 给 t_i 到 T_i 中的每个点也添加有向弧。其他的结点为中间结点, 对于中间结点 v , 如果 $\delta^-(v) > \delta^+(v)$, 添加 $\delta^-(v) - \delta^+(v)$ 个指向 v 的结点, 使得有 $\delta^-(v) - \delta^+(v)$ 条边指向 v 。若果 $\delta^+(v) > \delta^-(v)$, 添加 $\delta^+(v) - \delta^-(v)$ 个从 v 指出的结点, 使得有 $\delta^+(v) - \delta^-(v)$ 条边从 v 指出, 则所有的中间结点入度都等于出度。因此, 图 G 构成了一个等图。如图 2.7 所示。

假设无环有向路径不相交二商品流图存在一个解决方案 P 。对 P 中的每一条路径 p 应用引理 1, $G - p$ 即等图 G 去掉路径 p , 得到的子图仍然为等图。应用贪心算法, 就

可以得到一组不相交的覆盖图 G 的路径。如此一来，在 s_i 到 t_i 之间形成 R_i 条路径弧中能够得到覆盖 G 的解 p ，从而得到了飞机航线调配问题的一组解决方案。

相反地，假设飞机航线调配问题存在一组解决方案 P ，则 $P \cap H$ 可以得出无环有向路径不相交二商品流图的一组解。

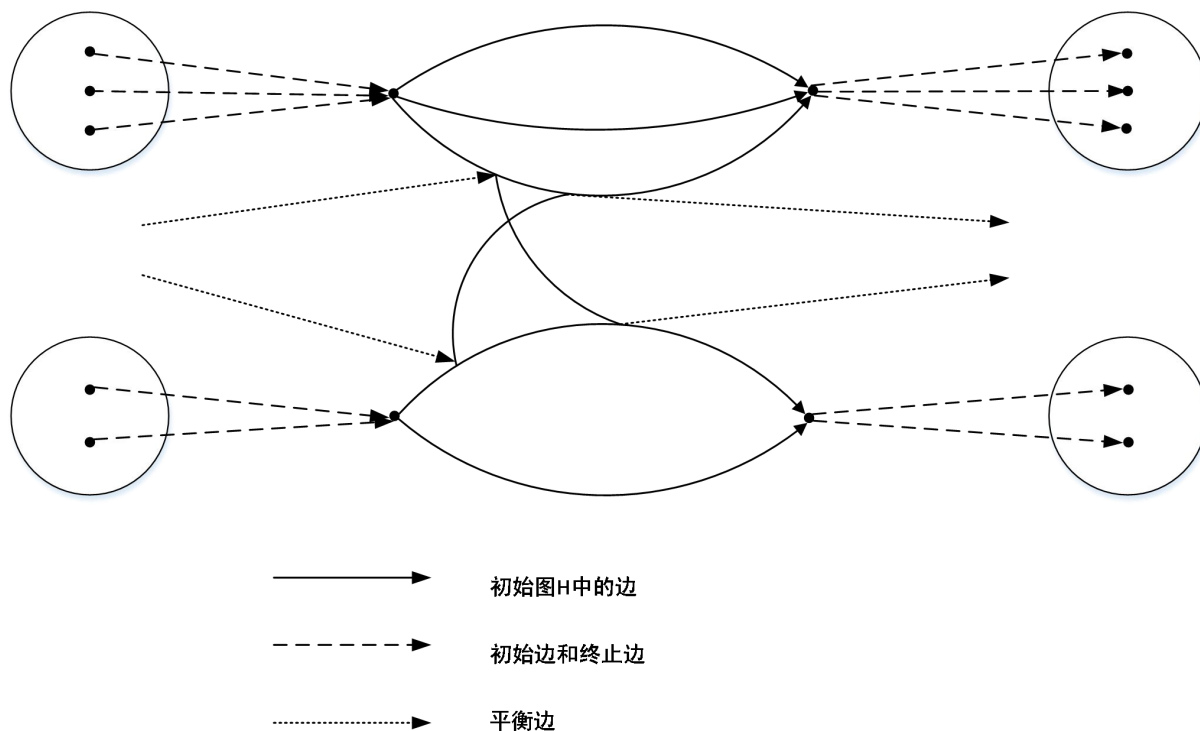


图 2.7 二商品流等价图

2.3 本章小结

本章介绍飞机航线调配问题的求解目标和约束条件，对飞机航线调配问题进行数学建模，利用图论的一些概念及性质，将飞机航线调配问题等价推导为飞机航线调配等图问题，将等图构造为二商品流图，利用二商品流图的 NP-completeness 性质，证明出飞机航线调配问题的 NP-completeness 性质，从理论上证明了民航界著名的 NP 难题，为以后的研究和实验奠定理论基础，提供求解思路。

第三章 基于集合划分的飞机航线调配问题研究

飞机航线调配直接关系到航空公司的运营效益,现有的许多研究方向主要考虑的因素是飞机维护。随着航空公司和机场基地维修水平的快速提高,提高飞机航线调配的效益已经成为各大航空公司关注的重点。本章以提高航空公司运营效益为关注点,分析总结影响航空公司生产效益的关键因素,将其设置为优化求解目标。影响飞机使用成本的主要因素有飞机日利用率、航段耗油量及国际油料价格等,其中飞机日利用率是一项重要因素,而飞行器也是一种十分昂贵的设备,要最大程度的确保航空运输经济效益,飞机的利用率不容忽视,如果某些飞机因为起落或者飞行时间太多,在维修计划安排的定检日期之前已经不能再飞,而另一些飞机的飞行小时太少,在定检日期到来时,还有许多剩余的飞行指标,这无疑是资源的浪费,直接影响经济效益。因此,保证机队中每架飞机的均衡使用,即可有效保证每架飞机的日利用率,维持运力的稳定,也可保证每架飞机维护均衡,提高飞机使用寿命和飞行安全。

实际情况下,对于国内航空公司,航线资源紧张,往往机队规模稍大,以提高航空公司的经济效益为宗旨,考虑各飞机总的飞行小时的均衡性,提出基于均衡条件的成本最小化飞机航线调配问题,在满足民用航空飞机检修维护条件、航班覆盖条件以及最小飞机数等约束条件的基础上,针对飞机运营成本最小化以及飞机使用均衡两个要素设计了目标函数,建立了一个多目标 0-1 整数线性规划模型,并使用国内某航空公司航班运行的真实数据对数学模型进行了实验验证。

3.1 数学模型设计

3.1.1 集合划分概念

集合覆盖问题 (Set Covering Problem)是运筹学中经典的组合优化问题,也是典型的 NP 难问题,已被广泛地应用于资源分配、设施选址、机组调度、物流配送、电路设计和情报检索等方面。集合划分是特殊情况下集合覆盖,在集合划分中每个集合的元素只可以被覆盖一次。

集合划分问题是指将一个集合的每一个元素匹配给另一个集合的某个元素,且只能覆盖一次,与飞机航线调配问题思想相一致。在飞机航线调配问题中,通常生成航班串,

将飞机分配到航线上，即将飞机分配给航班串。

集合覆盖问题数学描述：

定义一个包含 n 个元素的集合 X ，令 S_i ($1 \leq i \leq m$) 为 X 的子集，定义集合 F ， F 包含 X 的 m 个子集，即 $F = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_m\}$ 。

集合覆盖问题的求解目标：找出一个 F 的子集 C ，使得 C 覆盖整个 X 。如图 3.1 所示，左边为所有子集，右边为找到的一个全覆盖的最小子集。

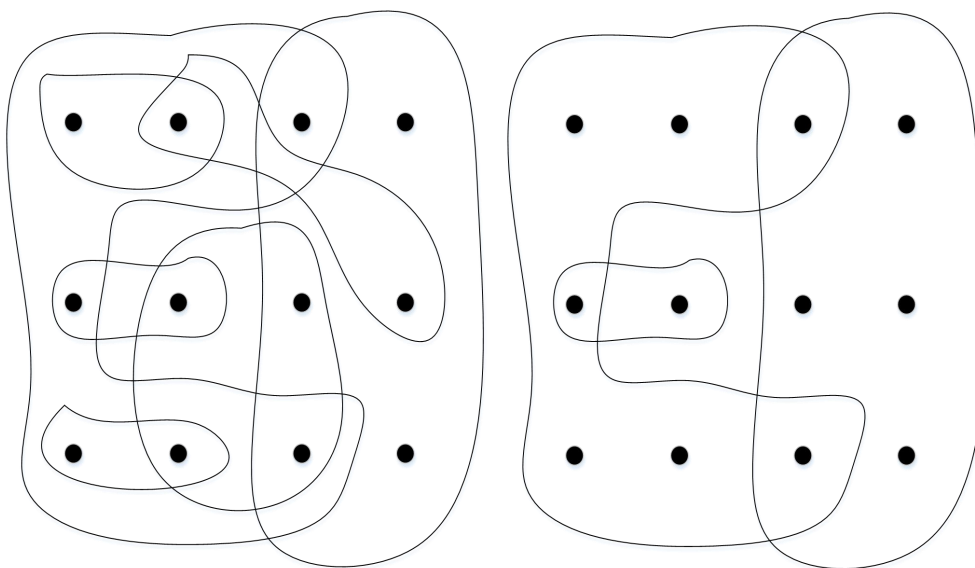


图 3.1 集合覆盖图

如果 X 中的每个元素属于且仅属于一个子集 S_i ($1 \leq i \leq m$)，那么这些 S_i 构成的 F 的子集 C ，即为 X 的一个集划分。在集合划分中每个元素只能被覆盖一次，这正好满足了飞机航线调配问题中的航班覆盖要求。集合划分模型使用矩阵表示，在集合划分矩阵 $a_{i,j}$ 中，矩阵的行和列分别表示一个元素的集合，设行的下标变量为 i ，列的下标变量为 j ，若矩阵中出现数字 1，则表示集合 B 中的元素匹配了集合 A 中的一个元素，若出现数字 0，则表示没有覆盖到。如图 3.2 所示。

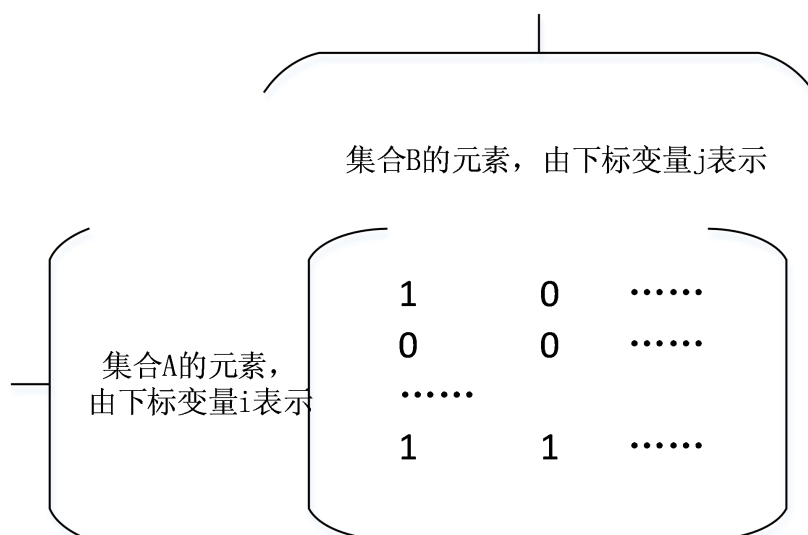


图 3.2 集合覆盖矩阵

3.1.2 数学模型

飞机航线调配问题一直以来被提出过很多数学模型，本章介绍的数学模型改编自 Kabbani 和 Patty 在 1992 年提出的数学模型，利用集划分方程的思想优化选择出每架飞机每天执飞的航线，首先通过算法求得满足需求的所有飞机航线调配方案，然后设计集合划分矩阵，矩阵中的行表示飞机航线调配方案，列表示航班，最后寻找出既能覆盖所有航班又能满足维护需求、周转时间和航线调配周期等要的最优航线调配组合。本章提出的数学模型基于集合划分思想^[36]，使用 0-1 整数线性规划^[37]方法，在满足飞机维护要求的前提下，综合考虑成本最小化和飞机使用均衡条件，设计了公式（1）和（2）所示的目标函数，给出如下的数学模型。

集合：

F = 航班的集合；

R = 可行调配方案的集合；

下标变量：

i = 航班的下标， $i \in F$ ；

j = 航线的下标， $j \in R$ ；

参数：

C_j =航线 j 的运营成本;

N =可用飞机总数;

Q =所有航班总的飞行时间;

T_j =可行航班节 j 的飞行时间;

$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{如果航班 } i \text{ 在调配方案 } j \text{ 中} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

决策变量:

$X_j = \begin{cases} 1, & \text{如果航线 } j \text{ 被选中} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

数学模型:

$$\min \sum_{j \in R} C_j X_j \quad (1)$$

$$\min \sum_{j \in R} |T_j - Q / N| X_j \quad (2)$$

$$s.t \sum_{j \in R} a_{i,j} X_j = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in R} X_j \leq N \quad (4)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad (5)$$

目标函数 (1) 表示成本最小化。目标函数 (2) 表示飞机使用均衡性, 均衡度用每个可行的航班串的飞行总时间与每架飞机的平均飞行时间差的绝对值和来表示。约束条件 (3) 表示航班覆盖的需求约束, 保证每个航班能且仅能属于一个航线调配方案。约束条件 (4) 表示机队规模需求约束, 调配方案所需要的飞机数必须小于等于机队内可使用的飞机数, 尽可能减少飞机数。式 (5) 为决策变量的 0-1 整数性要求, 取值只能为 1 或者 0。

3.2 航班串生成算法

飞机航线调配问题要求生成飞机连续执飞且始发机场和到达机场相同的航班串。航班串即为由若干个相继航班组成的航班任务序列，在空间上，后一个航班的出发机场与前一个航班的到达机场相同，在时间上，前后两个航班的衔接时间满足最小过站时间，在构建航班串时，可分为单维修基地航班串和多维修基地航班串，单维修基地航班串是指航班串从基地机场出发，最后回到该基地机场，即航班串的始发机场和最后的到达机场为同一基地机场；多维修基地航班串仅要求航班串从基地机场始发，最后回到任一基地机场，并不要求回到其始发机场。

3.2.1 航班串的时间周期

飞机航线调配问题只考虑飞机的 A 检，根据飞机的日利用率将飞机 A 检的时间间隔折合成天数，例如某飞机飞行 40h 执行一次 A 检，日利用率为 12h，则折合成每隔 3 天执行一次 A 检，这就要求该飞机每三天至少有一次到基地机场进行维修过夜，以便执行 A 检，这就叫做“三天维修规则”。

目前国内航空公司在维修基地的设置方面存在单维修基地和多维修基地两种情况。一些大的航空公司通常拥有多个维修基地，多种机型的飞机。但从飞机机型来讲，仍然是单维修基地为主，即同一机型的飞机只有一个维修基地。根据国内航空公司的航线网络与航班计划的特点，综合考虑航班衔接和飞机维修问题，针对单维修基地的轮辐式航线网络，定义三日航线调配封闭周期。

封闭调配周期定义为飞机从某个机场出发，经过一段时间回到这个机场，如此进行循环。封闭调配周期可以有效的减少航线调配数量，但封闭调配周期并不是必须的，一般根据航空公司的实际情况来确定，航空公司还会以月为周期制定非封闭的飞机航线调配方案。在基于集合划分的飞机航线调配问题研究中，设计生成 3 日封闭周期的航班串，也就是说飞机从一个机场出发，在三日周期结束时回到这个机场。通过生成 3 日航班串来有效减少航线调配数量级，提高航线调配效率。

3.2.2 航班串生成流程

由于每天的航班时刻表是相同的，航班串生成过程中需要保证航线调配的维护性，

航线调配的有效性以及航线调配的时间周期，所生成的可行航班串需满足下述具体要求：

1、满足维护要求：每架飞机至多运营 3 天后必须要有一个晚上在基地机场停车场过夜，进行维护检查，在单枢纽网络中，通常把枢纽机场设置为基地。

2、周转时间要求：为满足航线调配的有效性，确保足够的地面过站时间，即两个相邻航班之间的衔接时间，一般在 20 分钟至 1 小时之间，本章研究假设地面过站时间大于 45 分钟。

3、调配时间周期的要求：假设航线的封闭调配周期为 3 日，生成 3 日有效航线调配方案。

采用集合划分数学模型求解首先需要找出所有有效的航班调配方案，求解思路为将飞机与求解的一组航班串进行调配，把第 3 天内能够在基地机场过夜，并且封闭调配周期结束时航班能够返回起始机场的所有航班调配方案选择出来。通过计算机编程可以高效的找出既能覆盖所有航班，又能满足维护、周转时间和调配周期等等要求的可行航班串。首先将飞机与一系列可能的航班进行调配，然后将第一个晚上或者第二个晚上能够在基地机场过夜，并且在第三个航班结束时能够返回到起始机场的所有航线调配方案选择出来。这个过程使用计算机程序运行的步骤或者拟代码如下所示：

步骤 1：输入指派给某一机型的一组航班的航班号、离港和进港城市和离进港时间（来自机型分配系统）；

步骤 2：生成所有可能的周期为一日的有效飞机航线调配方案并考虑周转时间，将结果存入一个文件；

步骤 3：把这个文件中的每一个可行的周期为一日的航线调配方案与本文件中的所有其他的周期为一日的航线调配方案连起来。这个步骤重复两次即可生成三日未周期的调配方案，将结果存入一个文件；

步骤 4：用一下标准检查这个三日为一周期的文件的每一项。

- （1） 航线的起始机场与终止机场相同；
- （2） 每一天第一个航班始发于飞机前一天停场的机场；
- （3） 在基地机场至少过夜一次；

步骤 5：把符合上述条件的每一个方案存入文件中，该文件即为三日为一周期的全部的有效的航线调配候选方案。上述步骤适用于编程软件和线性规划软件。

具体的生成可行航班串流程图，如图 3.3 所示。

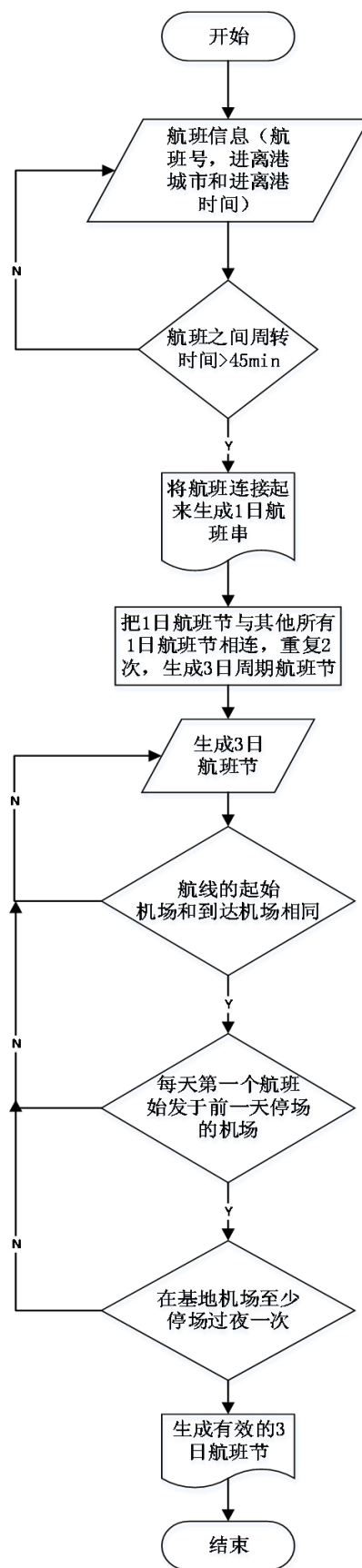


图 3.3 航班串生成流程图

3.3 实验与分析

航线网络可分为点对点的城市对结构和枢纽轮辐式(hub-and-spoke)结构两种主要模式。我国的航线网络以自发形成的点对点的模式为主,同时不少航空公司也把北京、上海、广州等机场作为枢纽机场建立基地,以基地为中心又形成小型轮辐式结构,如图 3.4 所示。

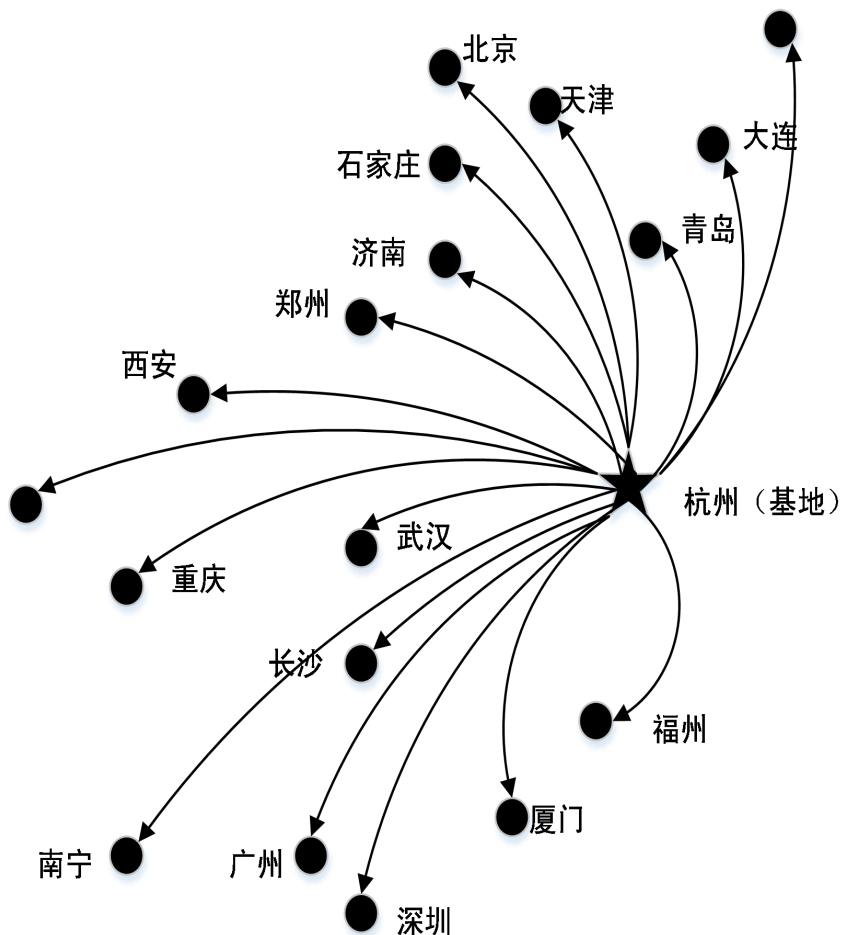


图 3.4 轮辐式网络图

本章使用国内某航空公司杭州基地组航班时刻表,建立了小型枢纽轮辐式网络结构,网络结构中只有一个枢纽机场,为杭州机场,设置枢纽机场为基地机场,只在基地机场进行维护检修。实验航班时刻表包括 40 个国内航班,分配给 9 架 738 机型飞行器,在此假定所有飞机都是一样的,不考虑现实中的一些限制因素,如飞机机龄等。表 3.1 中给出了部分航班时刻信息。

表 3.1 航班时刻表

航班号	始发地	起飞时间	目的地	到达时间	飞行小时	机型
1	HGH	07:45	CGQ	10:35	2.8	738
2	HGH	08:15	CTU	11:25	3.2	738
3	WUH	09:35	HGH	11:00	1.4	738
4	XMN	09:40	HGH	11:20	1.7	738
5	TAO	09:55	HGH	11:35	1.7	738
6	CGQ	11:20	HGH	14:20	3.0	738

3.3.1 生成航班串

按照 3.2 节提出的算法, 对于表 3.1 所给出的航班信息, 生成可行的航班串。为满足维护要求, 设定航空公司只在枢纽机场, 即 HGH 机场, 设置过夜维修检查。为满足周转时间要求, 设定地面过站时间为不小于 45 分钟。为满足调配时间周期要求, 设定封闭调配周期为 3 天, 即飞机从某一个机场始发, 到第 3 天周期期末时飞回这个始发机场。按照算法编写程序求解, 共生成 1742136 个可行的航班串。表 3.2 列出部分可行航班串信息

表 3.2 航班串信息

方案号	第一天	第二天	第三天	总飞行小时 (h)
1	{7, 23}	{5, 19, 29, 35}	{5, 19, 29, 35}	35
2	{2, 18, 31, 36}	{9, 15, 24, 32}	{9, 15, 24, 32}	32.5
3	{3, 17, 26, 34}	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	{6, 10, 14, 21, 27, 38}	33
4	{4, 11, 16, 30}	{2, 18, 31, 36}	{4, 11, 16, 30}	35.5
5	{5, 19, 29, 35}	{3, 17, 27, 38}	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	36
6	{9, 15, 24, 32}	{7, 23}	{2, 18, 31, 36}	34.5

表 3.2 航班串信息 (续)

7	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	34
8	{6, 10, 14, 21, 27, 38}	{6, 10, 14, 21, 26, 34}	{7, 23}	33
9	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	{4, 11, 16, 30}	{3, 17, 26, 34}	35

3.3.2 模型验证与结果分析

生成可行航班串后, 按照 3.2 节提出的数学模型对 1742136 个可行航班串进行航线调配, 使用 Lingo15 软件数学模型进行求解, 最终求得 9 个优化解, 可分配给 9 架飞机。如表 3.3 所示。

表 3.3 实验优化解

方案号	第一天	第二天	第三天	总飞行小时 (h)
1	{7, 23}	{5, 19, 29, 35}	{5, 19, 29, 35}	35
2	{2, 18, 31, 36}	{9, 15, 24, 32}	{9, 15, 24, 32}	32.5
3	{3, 17, 26, 34}	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	{6, 10, 14, 21, 27, 38}	33
4	{4, 11, 16, 30}	{2, 18, 31, 36}	{4, 11, 16, 30}	35.5
5	{5, 19, 29, 35}	{3, 17, 27, 38}	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	36
6	{9, 15, 24, 32}	{7, 23}	{2, 18, 31, 36}	34.5
7	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	34
8	{6, 10, 14, 21, 27, 38}	{6, 10, 14, 21, 26, 34}	{7, 23}	33
9	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	{4, 11, 16, 30}	{3, 17, 26, 34}	35

分析表 3.3 实验结果, 每个 3 日周期的可行航班节飞行小时分布在 32.5h 到 36h 之

间，在 3 日周期中，机队中飞机的日利用率分布在 54.17%-58.33%之间。相同数据条件下，在只考虑成本最小化单一目标的模型中，求得每个 3 日周期飞机日利用率分布在 50%-59.03%之间，具体结果见表 3.4。并且求得的最小成本与多目标模型求出的最小成本相差无几，可以看出，多目标模型比只考虑成本的单目标模型，飞机使用更加均衡。相同数据条件下，在只考虑飞机均衡单一目标的模型中，每 3 日周期飞机日利用率分布在 54.86%-58.33%之间，与多目标模型求得的结果相差无几，但是，多目标模型求得的成本对比使用均衡单目标模型更加节约了。可以看出，多目标模型在保证飞机使用均衡的条件下，更加节约成本。因此，所提出的多目标数学模型即可以满足飞机使用均衡条件，也可求得最小化成本，优于仅考虑成本或仅考虑飞机使用均衡的单目标数学模型。能够在保证飞机使用均衡的条件下实现航空公司成本最小化，并且给出较为满意的飞机航线调配优化方案。

表 3.4 单一目标求解

方案号	第一天	第二天	第三天	总飞行小时 (h)
1	{7, 23}	{4, 11, 16, 30}	{2, 18, 31, 36}	36
2	{2, 18, 31, 36}	{9, 15, 24, 32}	{7, 23}	34.5
3	{3, 17, 26, 34}	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	35.5
4	{4, 11, 16, 30}	{2, 18, 31, 36}	{4, 11, 16, 30}	35.5
5	{5, 19, 29, 35}	{3, 17, 27, 38}	{5, 19, 29, 35}	35.5
6	{9, 15, 24, 32}	{6, 10, 14, 21, 26, 34}	{9, 15, 24, 32}	30
7	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	{1, 12, 20, 25, 33, 39}	32.5
8	{6, 10, 14, 21, 27, 38}	{5, 19, 29, 35}	{3, 17, 26, 34}	33.5
9	{8, 13, 22, 28, 37, 40}	{7, 23}	{6, 10, 14, 21, 27, 38}	36

3.4 本章小结

针对小型枢纽轮辐式航线网络结构，在满足飞机维护要求、最小飞机数要求、航班覆盖和航班计划的前提下，以飞机使用均衡条件和飞机运营成本最小化为求解目标，

采用集合划分思想构建了多目标 0-1 整数规划模型，用于解决飞机航线调配问题。应用国内某航空公司小型轮辐枢纽航线网络，设置枢纽站杭州为运营基地，采用真实航班及飞机数据进行实验验证，实验结果表明，所提出的模型求解后可以得出比较满意的航线调配方案，能够为航空公司实际工作提供支持决策。

第四章 飞机航线调配优化决策系统设计与实现

4.1 系统设计背景

近年来，在市场化改革的促进和国家政策的大力支持下，中国民航业得到了飞速的发展，各大航空公司的机队规模越来越大，航线网络日益复杂，使用传统落后的人工方式进行生产计划调度已经不能满足需求，借助计算机和互联网来实现生产计划调度信息化管理成为必然趋势。国外航空公司和开发群体对民航信息化管理研究较早，有着丰富的经验，已经开发出比较成熟的产品。但毕竟我国的国情以及航线网络与国外不同，直接购买引进外国的管理软件，并不能直接适应国内航空公司的实际情况。

本章设计实现的飞机航线调配优化系统是为 X 航空公司开发的“航班优化智能支持决策系统”的一部分，接口 X 航空公司的汉莎排班系统，开发特色的汉莎系统对接方式，将原有的通过 office 文件传输方式进行的航线网络规划和航班优化编排等工作，改为通过系统接口对接。将人力从繁琐的、片段的、重复性高的数据计算中解放出来，减轻工作量，提高工作效率，降低原工作流程上因人工计算、因素考虑不周全等方面的失误概率。同时便于运网规划系统、资源管理系统、FOC 运行系统、新一代航班发布系统等的数据采集和校对，对运力、航班计划的各种数据进行查询和整理，及时监控运力变化情况及各航线收益变化情况。根据不同市场周期、竞争情况，及时调整运力投入，扩大航班的经济效益，提高运力使用效率。

4.2 系统需求分析

4.2.1 项目关联

项目关联分析如图 4.1 所示，其中 MIS（Management Information System）、FOC（Flight Operations Control）、航班发布、收益管理、汉莎系统、资源管理系统是支撑关联本系统的核心系统。

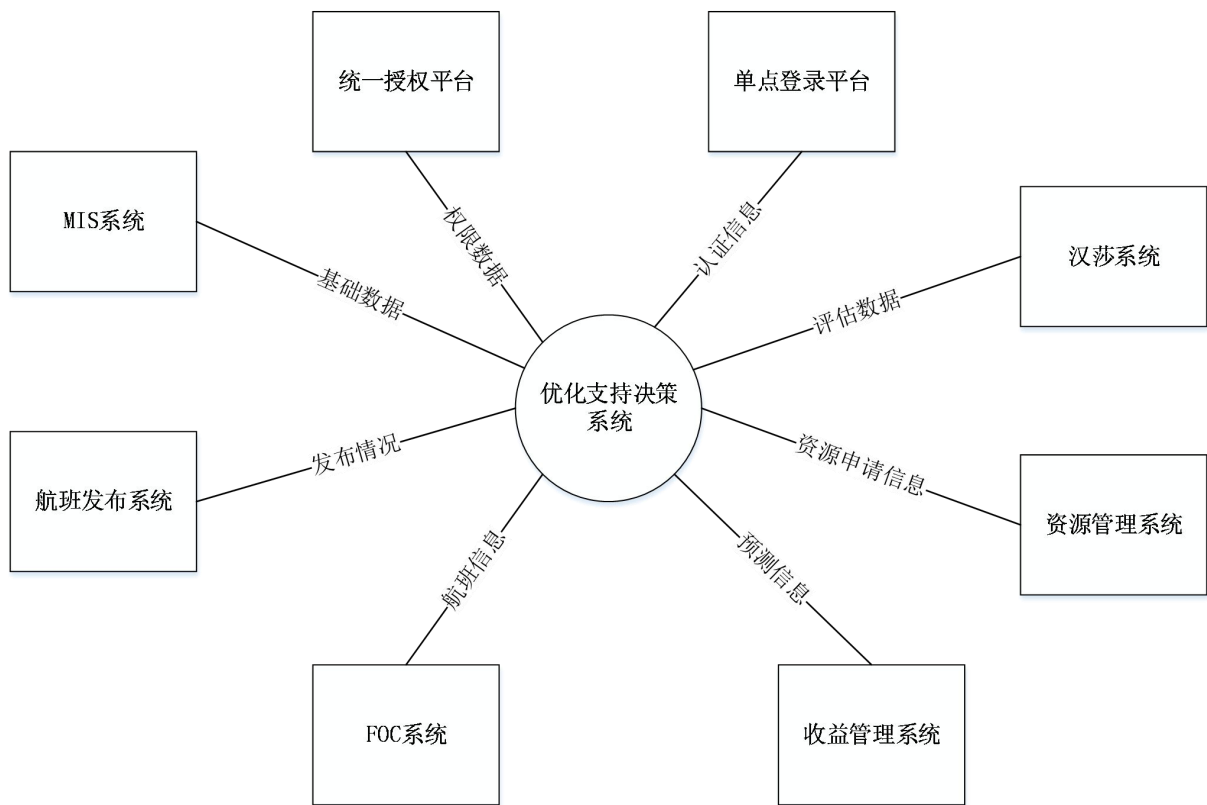


图 4.1 系统关联性

具体相关性描述如表 4.1 所列出。

表 4.1 相关性描述

项目名称	关联性描述
FOC 系统	获取汉莎系统发布到 FOC 系统的航班信息。
MIS 系统	获取数据分析的基础数据，如：运力，航班历史数据等。
汉莎系统	发送航班效益评估数据。
收益管理系统	提供航班的预测数据。
航班发布系统	汉莎系统发布到航班发布系统的情况跟踪。
资源管理系统	获取资源批复情况。
单点登录平台	通过单点登录平台管理用户和密码。
统一授权平台	获取用户的使用权限数据。

4.2.2 主业务流程

本系统主要服务于航空公司的客运营销委运力网络部、业务发展部，使用对象为部

门员工，用户通过 B/S 网站的形式，在公司内网进行业务处理。主要的部门业务流程如图 4.2 所示。

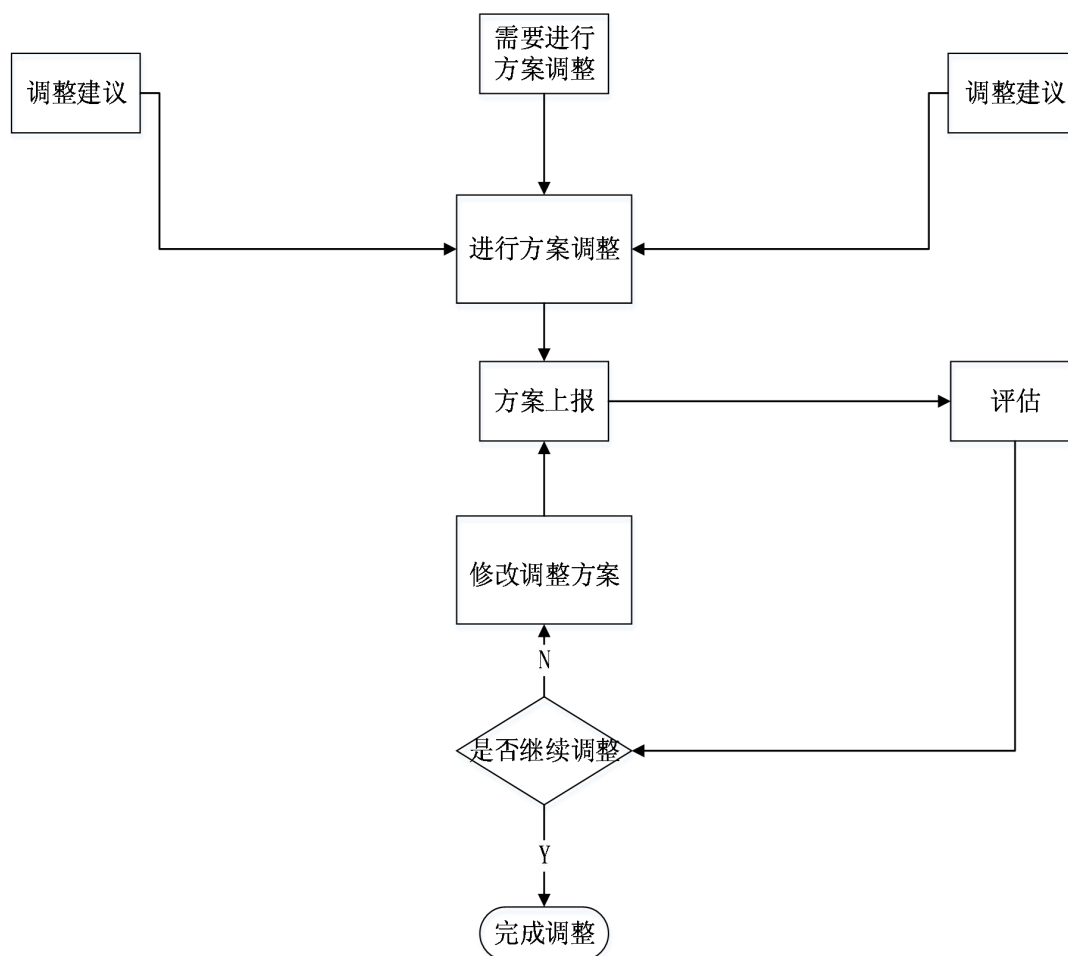


图 4.2 主业务流程图

4.2.3 功能总需求

功能总需求如下表所示：

表 4.2 总功能需求表

模块名称	功能编号	功能名称	优先级	描述	是否存在风险
航线网络	B.1	航点查询	中	计算某时段内，某些机场的吞吐量、排名、增速。（按年查询，不输城市、省份查所有）。	否
	B.2	航段查询	中	查询航段市场效益情况。	否
	B.3	航线查询	中	查询航空公司航线、航班的相关效益。	否

表 4.2 总功能需求表（续）

	B.4	航班计划	中	查询航线执行计划，给出航班计划调整建议。	否
效益评估	E.1	评估方案查询	中	根据检索条件，查询出所有评估方案，在上屏显示	否
	E.2	新增评估方案	中	添加一条评估方案	否
	E.3	对方案进行评估	中	根据参考日期的数据评估未来十天的收入效益	否
	E.4	对评估方案进行重新计算	中	双击方案后在下屏显示方案明细，手动修改方案明细中某些字段后并对其进行重新计算	否
智能决策	G.1	航班取消	中	预测未来 10 天航班中建议取消航班	否
	G.2	机型交换	中	智能提出满足航班可行性要求的机型互换方案。	否
	H.1	飞机日利用率	中	给出飞机日利用率的建议	否
	H.2	飞机航线调配	中	获取飞机信息，维修计划等，给出飞机航线调整与分配；	否
	H.3	航段增设	中	自动提出运力增投的建议，增投至那些航段，与现有航线可以组成哪些航线	否
	H.4	国内调减	中	智能提出国内航班调减。	否

4.2.4 详细需求设计

现列出飞机航线调配优化支持系统的部分模块的详细需求。

1、航线网络

（1）航线查询

实现功能为查询厦航集团航线、航班的相关效益。输入查询条件开始日期、结束日期、班期、班次、航班号、公司、航段或航点、航线、机型、是否显示班期、是否单程、政府补贴、机场优惠、机会贡献参照（包括公司平均不含北上广深、仅显示新开航线）。返回显示查询结果：航班号、航线、周期、时刻、班次、各机型班次（737、738、757、787）、每班收入、每班贡献、座小时贡献、机会贡献、客座率、折扣率、补贴优惠、执行率、不保变率、大额不保变率、不保变班次、大额不保变班次、座公里收入、每班人数、头等舱人数、头等舱客座率、团队人数、团队比例、散客折扣、团队折扣。

涉及到的概念与公式如下。

机会贡献（平均每班）：指某些航线或航班的机会贡献 = （航班或航线的平均座小

时贡献-公司平均座小时贡献)×航班或航线的每班座小时。公司平均座小时贡献要区分出整体和不含京沪穗圳两种。

两舱人数：包括头等舱和商务舱人数（含升舱）。

两舱客座率：用两舱人数/两舱可供座位来表示。

执行率：已执行航班班次/红头文件申请班次。

不保变航班：贡献为负的航班。

大额不保变航班：座小时贡献 ≤ -15 的航班。

不保变率：不保变航班班次/已执行航班班次。

（2）航班计划

航班计划的发布或调整是航线调配的重要环节，工作人员可以对航班计划作出各种调整，其中包括修改航班，新增航班，调整航班时刻，取消航班，互换/调动航班，删除航班，恢复航班，取消航班，恢复保护，增加一个航段，取消一个航段等。

实现输入开始时间、结束时间、公司、班期、航班号或航线（二选一）、航班性质、航班地区、航班状态、是否限制销售、执行机型、布局（跟随机型实现联动效果）等信息。

查询出航班号、航线、机型、班期、起飞时刻（包括去程、回程）、航班性质、航班状态等信息。

根据查询条件查询出中期所做的航班调整，在做调减预计时保存 FOC 系统中导出的计划航班，再与最终航班执行情况匹配差异，多出的航班为加班航班，减少的航班为调减航班。

保存 FOC 系统计划航班：在做“航班调减”预计时，保存 FOC 系统数据，作为航班计划的原始计划模板。后续每次做“航班调减”预计时，匹配 FOC 系统数据，将航班日期大于前次保存的 FOC 系统数据添入原始计划模板。

匹配原始计划模板与实际执行航班情况，两者差异即为加班和调减航班。加班情况下的收入即航班执行收入。

调减：航班收入=航段平均收入之和 $\times 0.7$ ，航线人数需限定为不超过机型座位 95%。如果航段无数据，用一周平均收入 $\times 0.7$ 替代，同样航线人数需限定为不超过机型座位 95%。

2、效益评估

评估方案查询

输入查询条件，点击“查询”按钮，返回查询结果。

查询条件为：开始时间、结束时间、航班号、航线。

返回结果为：全选框、类型、开始日期、结束日期、班期、航班号、航线、机型、布局、备注、收入预计（不含油收入、燃油收入、含油收入）、预计贡献、小时收入、座小时贡献、公司平均座小时贡献。

3、智能决策

（1）航班取消

筛选座小时贡献排名靠后的 15% 航班或执行率排名靠后的 15% 航班。

涉及的概念和公式如下：

预计收入为选择按上周同期预计收入，若上周同期预计收入为空，则选择按一周平均预计收入，若航班日期为小假期、国庆及春节黄金周，选择按去年同期预计收入。建议取消的筛选标准有预计座小时贡献 ≤ -15 和预售收入环比下降两项，且依据下降比例计算航班剩余销售量不保变。以本航季的厦航航线网络为新航季的基础模板，参考数据期为上航季数据，使用国内航线调减的三期数据对比方法，预计航班的效益数据。执行率参照本航季数据。

（2）机型交换

智能提出满足航班可行性要求的机型互换方案。智能生成机型交换方案算法思路为穷举满足可行性条件所有可交换的航班方案，代入航班不同布局收益，筛选整体收益为正的交换方案。其中包含最小航班模块生成，航班模块衍生，虚拟航班模块，模块间可行性交换判断，穷举连线模块交换方案，交换方案效益计算。

（3）飞机日利用率

显示开始日期，结束日期，进行查询。显示出日期、周期、飞机日利用率等信息。

涉及到的概念与算法有：

获取去年飞机日利用率，按 `compare_day` 字段设定的日期对应去年同期数据；获取各机型日利用率，建议利用率 $= 1.4711 \times \ln(\text{历史单机贡献}(\text{单位万})) + 5.9302$ 。历史单机贡献 = 历史同期总贡献 / 在册飞机数。单机贡献为历史每架飞机的贡献，等于日航班贡献总额 / 在册飞机数。设置修改飞机日利用率建议，支持手动修改。

（4）航段增投

自动提出运力增投的建议，增投至那些航段，与现有航线可以组成哪些航线。计算本航季厦门、福州、泉州、杭州、天津、长沙、南昌、重庆、北京等基地始发航段的效

益，按优先次序筛选出效益高、份额低的航段，或者效益高、份额高的航段，给出建议是否继续投入航线，支持手动修改。

（5）飞机航线调配

可查询飞机已经安排的航班，对市场部下达的调整（增加、减少）计划实现操作。

飞机航线调配包括飞机的联线调整，飞机与联线的分配，首先通过航班计划获得飞机号，判断机型是否符合航班计划要求，不相符合则给出警告。而后，判断当日的飞机停场检修情况，停场检修的飞机不能参加执飞任务。接着，判断一架飞机参加的飞行小时和起落机场是否能够衔接，是否满足过站时间要求。由用户选择检查方式，边输入边检查或者为在所有飞机录入完成后统一检查。

定检等生产任务安排，接口 MIS 系统，飞机执行完飞行任务后录入飞行小时，累积统计飞机使用时间。

飞行联线的预计飞行时间=每个航段的预计飞行时间+飞机使用时间。

估算出飞机执行完预计的联线任务后达到的使用时间后，根据定检任务、工程指令单等安排生产任务的执行时间。系统取得航班计划中的航班联线，机务进行飞机航线调配操作，生成调配方案计划，再加入定检计划，根据航班计划调整情况，对飞机航线调配进行调整，生成新的调配计划方案。

4.3 系统设计

本系统是以 JeeSite 开源项目框架为基础，进一步高度整合封装的 JavaEE 快速开发设计平台，具有高性能，高效率，高安全性等优势。使用 MyBatis 数据持久访问层框架，Oracle 数据库管理工具，Spring Framework 容器框架，Spring MVC 模型视图控制器等系统开发中优秀的主流开发管理框架。

4.3.1 设计思想

1、分层设计：将整体系统进行分层设计，包括数据访问层，业务逻辑层，展示层等，各层之间层次分明，依赖关系校，耦合程度低。各层之间互相通信需要通过特定的接口，并需要参数的校验，只有数据访问层可以操作数据库，表示层绝对不可以越层操作，确保数据的安全性操作。

2、双重验证：用户表单在提交时实现双重验证，防止用户非法通过浏览器等手段

跳过客户端验证，实现恶意篡改等行为，确保操作安全性。

3、安全编码：用户通过表单提交的全部数据，都要在服务器端通过安全编码，防止用户提交非法脚本的发生，防止通过非法 SQL 注入来获取敏感数据，从而可以确保数据的安全，

4、密码加密：用户登录时，输入的密码进行 SHA1 散列算法加密，此散列算法是不可逆的。确保了密文泄露后的安全问题。

5、访问验证：针对系统中所有的访问链接，设置用户身份权限验证，防止无权限用户直接通过 URL 对未授权页面进行操作。

6、数据验证：提供指定数据集权限过滤操作，通过数据特定的访问权限进行数据验证。

4.3.2 技术手段

1、采用航空公司现有数据库集群服务器，新增实例，配置信息如下。

实例名：ORCL

PROCESS: 500

SGA&PGA: 10G&0

block_size: 8192

字符集：UTF-8

2、前端技术

JS 框架：jQuery 1.9。

CSS 框架：Twitter Bootstrap 2.3.1。

数据表格：jqGrid。

树结构控件：jQuery zTree。

日期控件：My97DatePicker。

3、后端技术

核心框架：Spring Framework 4.0。

安全框架：Apache Shiro 1.2。

视图框架：Spring MVC 4.0。

持久层框架：MyBatis 3.2。

浏览器：支持 IE8（及以上）、谷歌、火狐浏览器。

4、平台技术

服务器中间件：Tomcat 6。

数据库支持：提供 Oracle 数据库的支持。

开发环境：Java EE、Eclipse、Maven、jdk1.6

4.3.3 系统架构

本系统应用主流 SSM (SpringMVC, Spring, Mybatis) 开发框架，将 Spring MVC , Spring 和 Mybatis 框架进行整合，是标准的 MVC 开发模式，将整个系统划分为 View 层，controller 层，Service 层，DAO 层四层，其中 Spring 负责业务对象管理，Spring MVC 实现视图的管理以及请求的转发，Mybatis 作为数据对象的持久化引擎。

1、MVC 框架

MVC (ModelViewController) 是一种设计模式，它强制性地 将应用程序的输入、处理和输出三部分进行分离，从而提高软件的可维护性、灵活性、可扩展性、封装性。MVC 应用程序在使用过程中分为三大核心部分：Model 对象、View 对象、Controller 对象。Model 对象表示模型，负责数据的存储以及对这些如何操作这些数据进行定义。View 对象即为视图，代屏幕上结构和内容的展示，与用户进行交互的界面，可以说是负责展示来自应用程序的 Model 对象，并允许用户编辑这些对象。Controller 对象表示控制器，提供过程处理控制，是 Model 对象和 View 对象的中间者，起到传递数据，监听事件，管理其他对象的生命周期等作用。MVC 设计模式解决了对象之间的耦合问题，可以使得程序易于复用、容易扩展和变更。三者之间关系如图 4.4 所示。

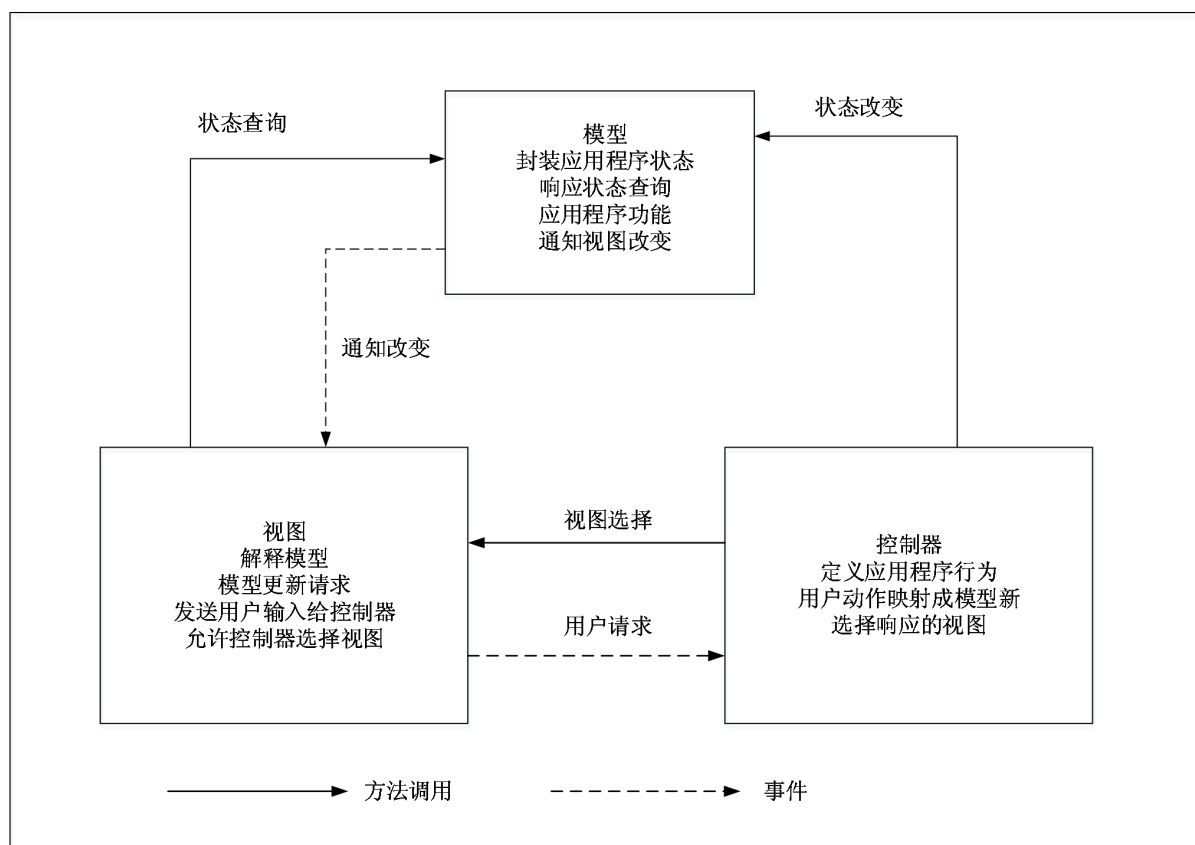


图 4.4 MVC 关系图

2、Spring 框架

Spring 是一个开源框架，由 Rod Johnson 创建。基于控制反转(Inversion of Control ,IoC) 和面向切面(Asspect Oriented Programming ,AOP)的容器框架。Spring 框架是一个一站式，轻量级，企业应用框架。Spring Framework 包括许多子模块，这些模块分类为核心容器，数据访问/集成，Web，AOP（面向方面的编程），消息传递和测试等，如图 4.5 所示。Spring 根据配置文件创建并且组装对象之间的依赖关系，Spring 面向切面编程实现无耦合的实现日志记录，性能统计，安全控制，提供简化的管理数据库事务。Spring 还可以与第三方数据访问框架无缝集成，自身包括一组 JDBC 的访问模板，使用模板可以方便地进行数据库访问。Spring 还提供与第三方网络层框架（比如 Struts 等），进行无缝集成，自身提供了一组 Spring MVC 框架，使得网络层更容易搭建。Spring 架构图如图 4.5 所示。

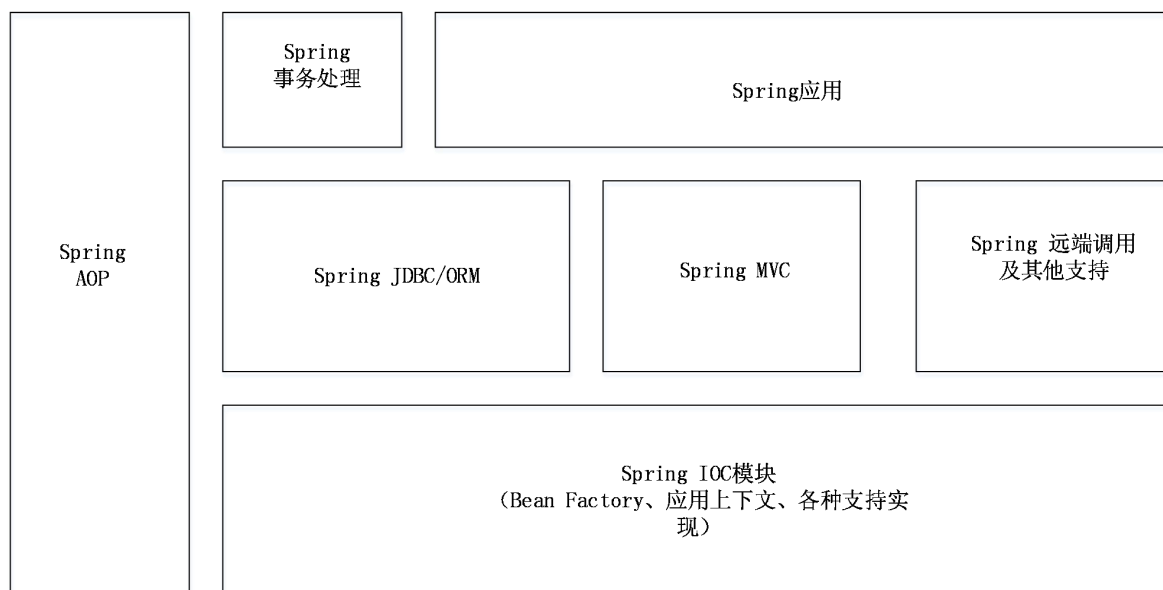


图 4.5 Spring 架构图

3、SpringMVC 框架

SpringMVC 属于 SpringFrameWork 的后续产品，已经融合于 Spring Web Flow 中。Spring 框架提供了构建 Web 应用程序需要的全部功能的 MVC 模块。SpringMVC 实质就是一个 MVC 的流程框架，适用于表现层到 action 的模块中，是 MVC 架构模式中真正的控制者。SpringMVC 可以十分灵活的进行流程处理，能够与 Spring 框架进行无缝集成。实现原理如图 4.6 所示。

(1) 首先，客户端浏览器会发送请求，DispatcherServlet 也叫分发器，收集发送来的客户端请求。

(2) 由 DispatcherServlet 控制器查询找到 HandlerMapping，继而找到处理请求的 Controller。

(3) Controller 调用业务模型进行业务逻辑处理，处理完毕后返回 ModelAndView。

(4) DispatcherSelect 查询视图解析器，处理视图映射，找出 ModelAndView 所指向的视图。

(5) 视图最后将所需要的结果显示给客户端浏览器。

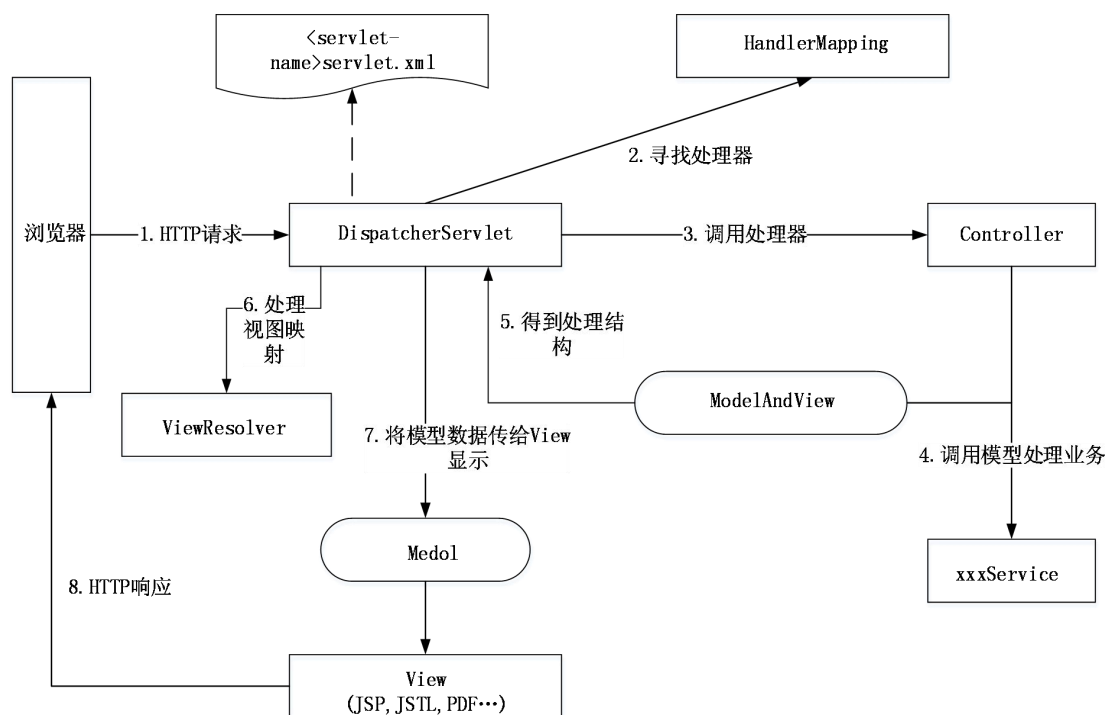


图 4.6 SpringMVC 实现原理图

4、Mybatis 持久层框架

MyBatis 是用来简化持久层的实现，支持定制化 SQL，存储过程和高级映射的优秀的开源持久层框架。Mybatis 为开发者提供了方便使用的数据库 API，减少了非常多 JDBC 相关的模板样式代码，简洁易用。MyBatis 发展自 iBATIS，但目前对 iBATIS 进行了彻底的重构，可以使用注解（annotations）和映射器（Mappers）。在项目开发架构中，持久层的具体工作包括：将使用 SQL 语句从数据库中查询出的数据对应填充到 Java 对象中和使用 SQL 语句将 Java 对象中的数据保存进数据库。在进行 SQL 查询过程中，MyBatis 提供了如下特性来对其进行简化：（1）对框架底层的 JDBC 代码进行抽象；（2）提供方法自动将 SQL 查询的数据结果保存到相对应的 Java 对象中；（3）从 Java 对象中获取数据，将数据对应地存入数据库的数据表中。在开发过程中，在实现功能的基础上，大型企业级应用也必须具备良好的性能。持久层的性能成为需要突破的性能瓶颈。MyBatis 在性能方面，支持数据库连接池的使用，避免了为每个查询请求都去申请创建数据库连接，MyBatis 提供了内置的缓存机制，能够在 SqlSession 层面将 SQL 查询的结果进行缓存。比如说，如果现在需要执行一次 select 查询，不久之后又需要进行一次相同的请求，那么 MyBatis 提供的缓存机制可以直接返回缓存区中的数据，不需要再次花费一次数据库连接查询的时间。

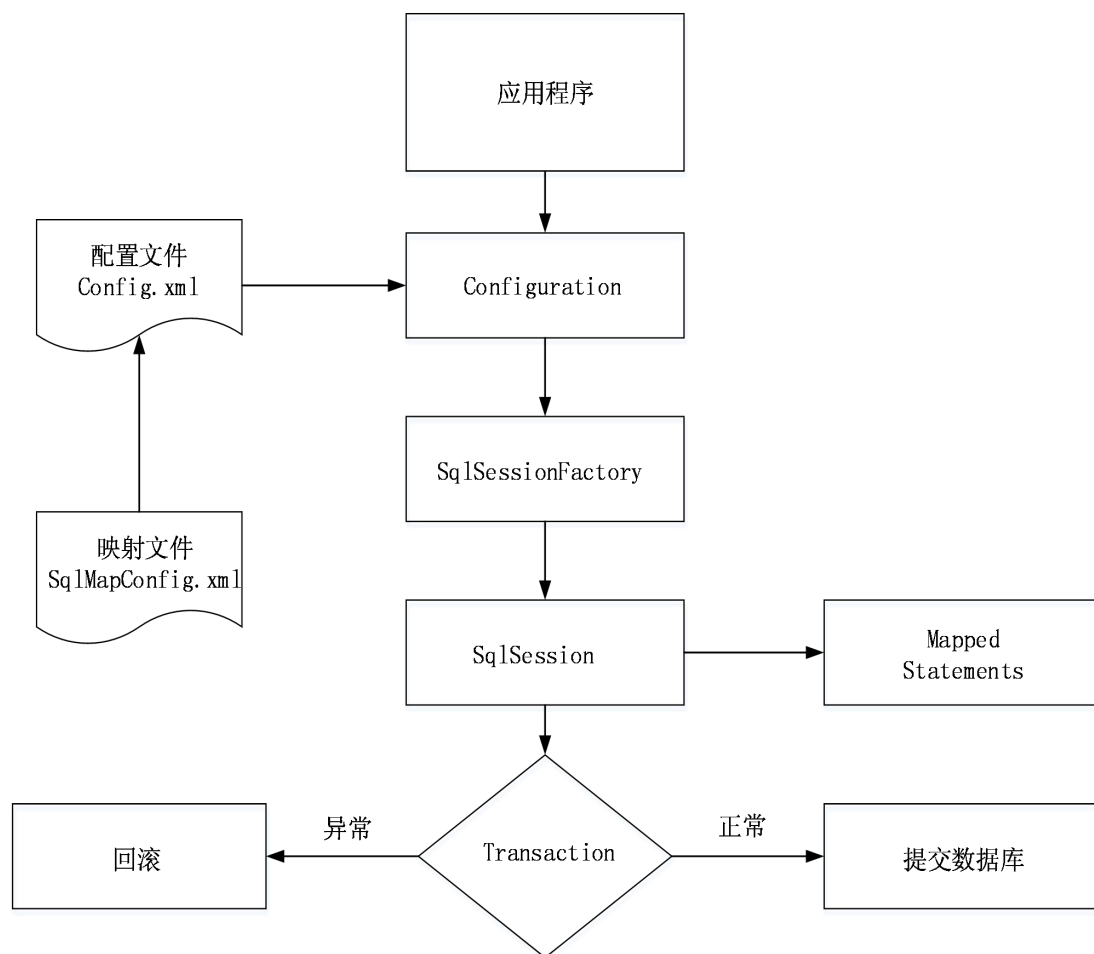


图 4.7 MyBatis 框架图

4.4 数据库设计

数据库设计是指在既定的应用环境中，包括硬件环境以及数据库管理系统等软件环境，设计构造出最优化数据库模式，在满足项目需求的情况下，有效的存储数据。数据库设计是项目的基石，尤其在大型项目中，当数据库的规模达到一定程度时，随着表之间的关系逐渐复杂，数据的存储量也逐渐增多，查询难度逐渐提升。没有规范化的数据库设计，将直接降低查询效率，浪费存储空间，加大维护难度。合理规范化的数据库设计，可以避免项目中的这些缺陷，为实现高效易用的项目奠定坚实的基础。数据库设计是优化支持决策系统的一个重要部分，它是整个系统的信息库，负责存储、组织和管理整个系统的数据信息。数据库设计的规范合理性，良好规范的数据库设计使得数据结构清晰，使得围绕数据结构的开发编写代码等工作更容易的开展，直接影响到项目开发进度，系统性能，数据准确性，用户体验等问题。

考虑到航空公司数据复杂，性能需求等因素，本系统使用美国甲骨文公司提供的 Oracle 数据库进行数据库开发与设计。Oracle 数据库是世界上第一个商品化的关系型数据库管理系统，是目前最流行的浏览器/服务器（Browser/Server, B/S）体系结构的数据库之一。

4.4.1 Oracle 数据类型

数据表是 Oracle 中主要的存储结构。数据表是其他对象存在的基础，所有的数据都存储在数据表中，数据表由属性构成，表属性由各种数据类型来定义，Oracle 数据库支持的常用数据类型如表 4.3 所示。

表 4.3 数据类型表

类型	含义	存储描述
CHAR	字符串（固定不变）	最大长度不超过 2000 字节
VARCHAR2	字符串（可变长度）	最大长度不超过 4000 字节
DATE	日期	格式为 DD-MM-YY (HH-MI-SS)
LONG	长字符串（可变长度）	存储容量可达到 2G
BLOB	二进制数据	最大长度 4G
CLOB	字符数据	最大长度 4G
ROWID	行号，记录的唯一标识	可存储 10 字节
NUMBER(D,N)	数字型	D 代表整数值，N 代表保留小数
INTEGER	整数型	整数，数值较小
FLOAT	浮点数值型	双精度
REAL	实数型	表示更高的精度

4.4.2 完整性约束

在优化支持决策系统中，需要获取来自不同接口的大量数据，在设计数据结构时，保障航空公司数据的正确性和安全性是十分重要的环节，可以有效的避免篡改数据、数据不完整、数据不一致、数据重复、数据存在错误、异常数据等问题。因而，设计良好的数据完整性约束是项目开发的基础，能够有效地防止数据不一致等现象的发生。

1、PRIMARY KEY 主键约束

为保证数据库关系的实体完整性，在设计过程中需要确保主键约束，主键定义在基本表上，是表中记录的唯一标识，主键不能为 NULL 也不能重复。

2、FOREIGN KEY 外键约束

FOREIGN KEY 约束作用于确保参照完整性，实质是以其他表建立联系，形成约束作用。设置外键的取值可以为参照的主键值或者为空。在插入非空值的情况下，若主键表中没有这个值，则不允许插入。在进行更新操作时，不允许更新为主键表中不存在的值。当删除主键表中的记录时，可以选择关联的外键记录一同级联删除或者拒绝删除，更新时，同样需要选择级联更新或者拒绝执行。

(1) 外键约束在建立表结构是进行定义

```
create table name1
(
    sno int identity(1,1) primary key,
    cno int not null,
    foreign key(cno) References
    表名 2(Cno)
    on Delete cascade (级联删除)
    on update cascade (级联更新)
    on delete on action (删除管制)
)
```

(2) 外键约束添加

```
alter table name2;
add constraint FK_name1_name2;
Foreign key(cid) references name2(cid);
```

3、NOT NULL 不为空约束

不为空约束为域完整性约束，只能定义在单一的列级，保证数据列值不能为空，但可以列值重复。

(1) 创建表的同时设置约束条件，作用于列级。

```
create table staff
(
  id number,
  name varchar2(10) not null,
  salary number(8,2);
  hire_date date constraint staff_hiredate_nn not null);
```

(2) 查询约束条件的名称

```
select constraint_name from worker_constraints;
where table_name = 'STAFF';
```

4、UNIQUE 唯一键约束

唯一键约束为域完整性约束，可以为空，但是不可以重复。唯一键约束定义在表级或者列级都可以，与表一同创建，唯一性约束通过一个 B-tree 索引来增强。例如：

(1) create table staff

```
(
  id number unique,
  name varchar2(20) not null,
  hire_date date ,
  email varchar2(30),
  constraint staff_email_uk unique(email)
);
```

(2) 给设置了唯一键约束表插入第一条记录.

```
insert into staff
values (12345,'you',sysdate,'student@who.com');
```

(3) 插入第二条记录，由于插入的有重复值，违反了唯一键约束，插入失败。

```
insert into staff values (1000,'me',sysdate,'student@who.com');
```

5、CHECK 检查约束

CHECK 检查约束为域完整性约束，对输入列或者整个表中存放的值设置特定的规则条件，起到限制输入值的作用，从而确保了数据的完整性。

(1) 定义 CHECK 约束

```
create table staff(
    id number ,
    salary number(8,2),
    constraint staff_sal_check check(salary> 800);
```

(2) 插入满足 CHECK 约束的记录，执行成功。

```
insert into staff values(2500);
```

(3) 插入不满足 CHECK 约束的记录，执行失败。

```
insert into staff values(4500);
```

6、DEFAULT 约束

DEFAULT 默认约束也是域完整性约束的一种，用于向没有值得列插入默认值。默认约束通常有函数、不带变元的内建函数、常量或者空值。

4.4.3 主要表结构与分析

参照 Oracle 数据完整性和 Oracle 数据类型等规则，对飞机航线优化支持决策系统进行数据表分析和定义，直接接口航空公司新购的汉莎排班系统，对汉莎排班系统的数据结果进行效益评估和智能决策。因此，如何设计数据表来获取汉莎排班系统、FOC 系统、MIS 系统等航空公司管理系统的复杂数据，是本系统的重点和难点。操作思想为，首先每天获取航空公司管理系统的基础数据，建立存储过程对数据进行过滤计算，得出需要的字段值，存入临时表中，MyBatis 数据持久层获取临时表中数据，与系统其他各层进行交互，计算出最终结果，返回到前端，显示成界面。设计过程中，为表设计索引，提高查询计算效率。

本文的重点研究为飞机航线调配问题，按照需求，主要对航线调配的数据结构和表结构进行设计，优化支持决策系统航线调配涉及的主要基本表有：航班计划基础表、飞机联线信息表、航点信息表、飞机信息表、维修计划表等。各基本表的数据结构表设计如下表 4.4 至 4.8 所示。

1、航班计划基础表

表 4.4 航班计划基础表

字段 编号	英文名称	中文名称	类型	主 键	为 空	取值范围	缺省值
1	PKID	主键 ID	VARCHAR2(64)	Y	N		sys_guid()
2	FLIGHT_NO	航班号	VARCHAR2(5)				
3	ROUTE_CN	航线中文名	VARCHAR2(50)				
4	D_OR_I	航班地区	VARCHAR2(1)				
5	CARRIER	公司二字码	VARCHAR2(2)				
6	ROUTE	航线	VARCHAR2(50)				
7	AC_TYPE	机型	VARCHAR2(5)				
8	UP_DATE	更新时间	DATE				sysdate
9	START_DATE	开始日期	DATE				
10	END_DATE	结束日期	DATE				
11	DEP_TIME	起飞时间	VARCHAR2(15)				
12	DEP_AIRPORT_3CODE	起飞机场	VARCHAR2(3)				
13	ARR_AIRPORT_3CODE	到达机场	VARCHAR2(3)				
14	ARR_TIME	到达时间	VARCHAR2(15)				
15	DEP_AIRPORT_CN	起飞机场中文	VARCHAR2(20)				
16	ARR_AIRPORT_CN	到达机场中文	VARCHAR2(20)				
17	AC_REG	机号	VARCHAR2(6)				
18	LAYOUT	布局	VARCHAR2(10)				

2、飞机联线信息表

表 4.5 飞机联线信息表

字段 编号	英文名称	中文名称	类型	主 键	为 空	取值 范围	缺省值
1	PKID	主键 ID	VARCHAR2(64)	Y	N		sys_guid()
2	FLIGHT_DATE	日期	DATE				
3	AC_LINK_LINE	飞机联线号	NUMBER (6, 2)				
4	FLIGHT_COM	航班号组合	VARCHAR2(50)				
5	FLIGHT_HOUR	飞机小时	NUMBER(10,2)				
6	DEP_AIRPORT_LINE	联线起飞机场	VARCHAR2(3)				
7	DEP_TIME_LINE	联线起飞时刻	DATE				
8	END_DATE	结束日期	DATE				
9	UP_DATE	更新时间	DATE				sysdate
10	START_DATE	开始日期	DATE				
11	ARR_AIRPORT_LINE	联线到达机场	VARCHAR2(3)				
12	ARR_TIME_LINE	联线到达时刻	DATE				
13	AC_REG	机号	VARCHAR2(6)				
14	AC_TYPE	机型	VARCHAR2(5)				

3、航点信息表

表 4.6 航点信息表

字段 编号	英文名称	中文名称	类型	主 键	为 空	取值 范围	缺省值
1	PKID	主键 ID	VARCHAR2(64)	Y	N		sys_guid()
2	FLIGHT_DATE	当天日期	DATE				

表 4.6 航点信息表 (续)

3	CITY_3CODE	城市三码	VARCHAR2(3)	
4	CARRIER	公司两字码	VARCHAR2(2)	
5	FLAG_TYPE	标志类型	NUMBER(1,0)	
6	FLAG_CITY	进出港标志位	NUMBER(1,0)	
7	RPK_CYTY_DAILY	每日城市客公里	NUMBER(16,2)	
8	RRSK_CITY_DAILY	每日城市客公里收入, 总收入 (全价收入)	NUMBER(16,2)	
9	ASK_CITY_DAILY	每日城市座公里	NUMBER(16,2)	
10	RASK_CITY_DAILY	每日城市座公里收入 (不含燃油收入)	VARCHAR2(1)	
11	PRO_INCOME	每日城市座公里含油收入	VARCHAR2 (2)	
12	CNTBU_CITY_DAILY	每日城市贡献	NUMBER(16,2)	
13	SEAT_HOURS_CITY_DAILY	每日城市座小时	NUMBER(16,2)	
14	UP_DATE	更新时间	DATE	sysdate
15	BACKUP_INFO	备用信息	VARCHAR2(60)	
16	SUPPORT_EQUI	器材保障	VARCHAR2(60)	

4、飞机信息表

表 4.7 飞机信息表

字段 编号	英文名称	中文名称	类型	主 键	为 空	取值范围	缺省值
1	PKID	主键 ID	VARCHAR2(64)	Y	N		sys_guid()
2	BASE_CODE	基地代码	VARCHAR2(6)				

表 4.7 飞机信息表 (续)

3	MAX_ARR_WET	最大落地重量	NUMBER(16, 2)	sysdate
4	MAX_DEP_WET	最大起飞重量	NUMBER(16, 2)	
5	UP_DATE	更新时间	DATE	
6	START_DATE	开始日期	DATE	
7	END_DATE	结束日期	DATE	
8	AC_THRUST	飞机推力	NUMBER(16, 2)	
9	SEAT_PAX	座位数	NUMBER(16, 2)	
10	AC_REG	机号	VARCHAR2(6)	
11	AC_TYPE	机型	VARCHAR2(5)	

5、维修计划表

表 4.8 维修计划表

字段 编号	英文名称	中文名称	类型	主 键	为 空	取值范围	缺省值
				Y	N		sys_guid()
1	PKID	主键 ID	VARCHAR2(64)				
2	REPAIR_CONT	维修内容	VARCHAR2(60)				sysdate
3	UP_DATE	更新时间	DATE				
4	START_DATE	开始日期	DATE				
5	END_DATE	结束日期	DATE				
6	REPAIR_BASE_ NAME	维修基地名	VARCHAR2(6)				
7	REPAIR_PLAN_NO	维修计划号	VARCHAR2(10)				
8	AC_REG	机号	VARCHAR2(6)				

根据航班信息、飞机信息、航点信息、维修计划等数据结构表设计, 结合需求分析, 给出航线调配智能决策逻辑流程图, 如图 4.8 所示。给出航线调配数据库设计的 ER 图,

如图 4.9 所示。

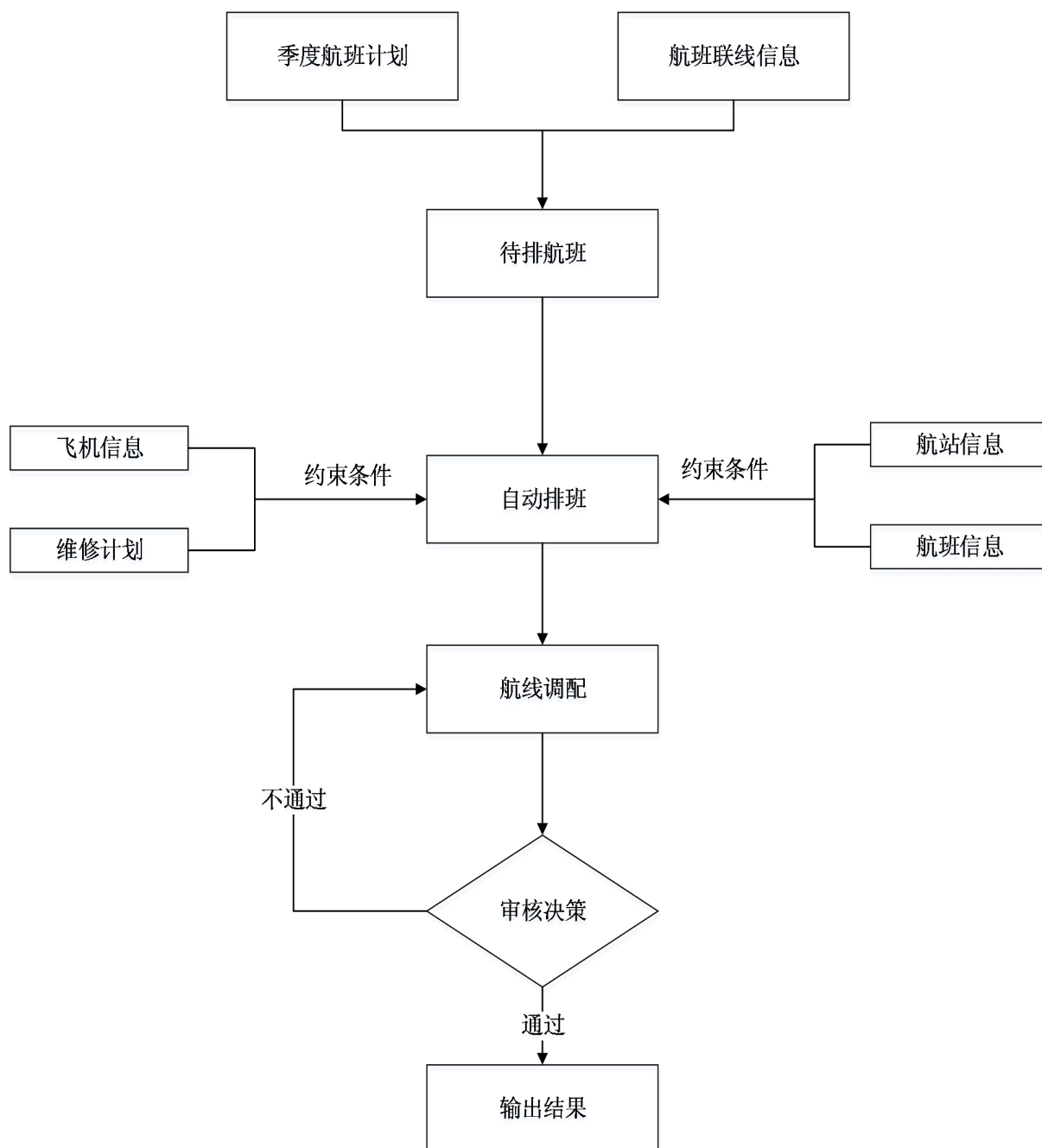


图 4.8 航线调配流程图

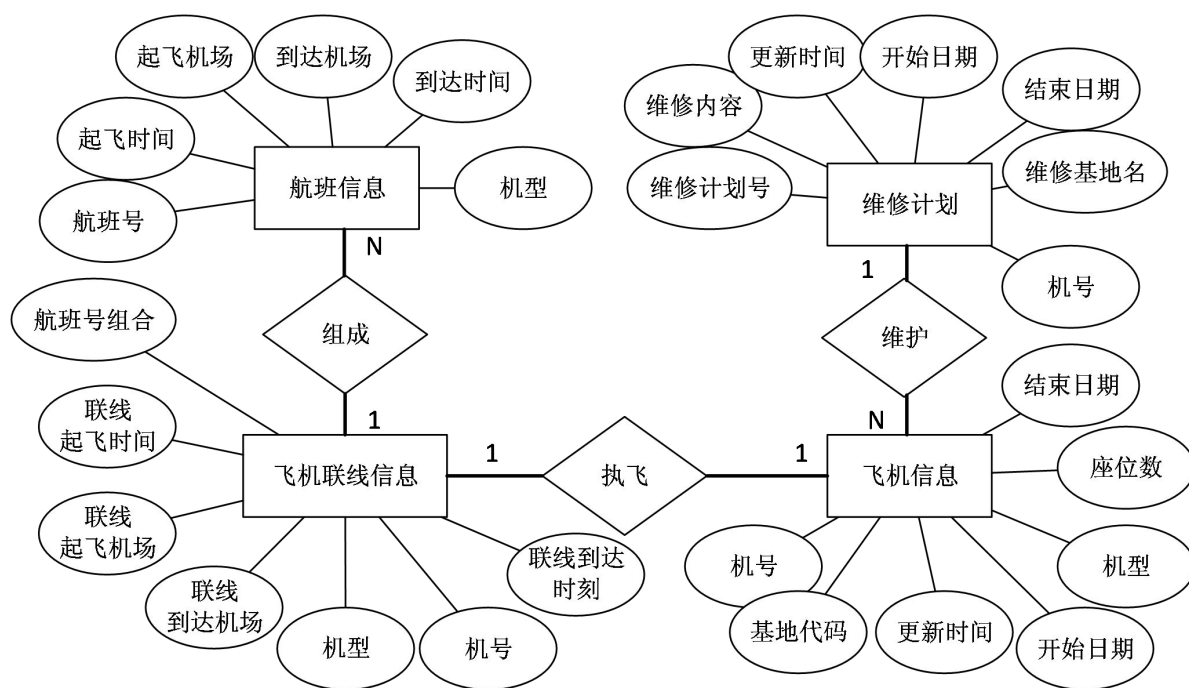


图 4.9 航线调配 E-R 图

4.4.4 建立存储过程

航空公司优化支持决策系统从 MIS、FOC、航班发布、收益管理、汉莎系统、资源管理等平台获取数据，数据量大，结构复杂。如果将所有操作放在前台进行处理，在交互过程中，需要多次连接数据库。这样会造成响应时间长，系统开销大，程序不稳定，资源利用率低等问题，严重影响系统性能。因此，在面对如此复杂的数据操作时，需要使用存储过程，建立存储过程获取数据源数据，编写逻辑规则，将复杂的操作过程封装起来，与事务结合使用，只需连接一次数据库，即可获得所需要的数据值，以供前台使用。极大的节约了系统资源，降低了响应时间，保障了系统的安全稳定。

存储过程（Stored Procedure）是一组 SQL 语句，控制流程语句的集合。存储过程数据库中编译且不需重复编译，还可以重复调用，极大的提高效率。开发系统过程中通过制定参数或不指定参数来编写存储过程，执行存储过程后，返回所需要的结果数据集。

MyBatis 作为高级的优秀持久层框架，提供方法支持定制化的 SQL，存储过程，高级映射等，MyBatis 数据持久层支持存储过程的交互流程为如下步骤。

1、在数据库中编写执行存储过程

```

create or replace procedure pro_Flight(p_line_name in varchar2,p_result out varchar2) is
begin
    p_result := 'flight,' || p_user_name;
end;

```

2、配置映射文件 mapper.xml

```

<select id="proFlight" statementType="CALLABLE">
<![CDATA[
{call pro_Flight
    ({p_line_name,mode=IN,jdbcType=VARCHAR},
    #{result,mode=OUT,jdbcType=VARCHAR})}
]]>
</select>

```

3、其它层通过 JAVA 代码使用存储过程

```

public class CallProcedure {
@CallProcedure
public void callProcedure() {
    SqlSession session = MybatisUtils.getSession();
    String statement = "com.mybatis.bean.puserMapper.getLineName";
    Map<string, integer=""> pMap = new HashMap<string, integer="">();
    pMap.put("p_line_name","p_line_name");
    String returnValue = (String) session.selectOne("Flight.proFlight", pMap);
    System.out.println("...");
    session.close();
    ...}
}

```

4.5 本章小结

本章介绍了飞机航线调配优化支持决策系统的设计与实现，本章介绍了系统的需求分析，系统设计，部分详细设计，数据库设计和系统结构图等。飞机航线调配优化支持决策系统是航空公司航班优化支持决策系统的一部分子系统，接口航空公司汉莎排班

系统, FOC 系统, MIS 系统以及其他航空管理系统, 为航空公司提供智能的查询, 评估和决策, 使得航空公司人力资源从繁重的 Office 计算中解脱, 使用信息化系统对航空公司生产计划进行组织管理, 对民航领域信息化创新以及航空公司现代化发展都有重要意义。

第五章 总结与展望

5.1 结论与总结

本文对飞机航线调配问题进行了理论和实践研究，飞机航线调配问题为各大航空公司组织生产计划的关键部分，是提高航空公司资源的核心利用率，落实航空公司发展战略，保障航空公司生产经营活动的安全性以及提高航空公司的直接运营效益的重要环节。

1、阅读国内外飞机航线调配问题文献，总结国内外飞机航线调配问题的发展背景和研究现状。研究飞机航线调配问题复杂的约束规则和求解目标。对飞机航线调配问题进行数学建模，应用图论的有关概念和性质，对飞机航线调配问题其进行 NP-completeness 证明，为后续的理论或实践研究提供理论基础。

2、由于随着航空公司和机场基地维修水平的快速提高，提高飞机航线调配的效益已经成为各大航空公司关注的重点，因此，提出飞机使用均衡和成本最小化两个求解目标，结合集合划分思想，设计 3 日航班串生成算法，建立了以飞机使用均衡条件和飞机运营成本最小化为目标的多目标 0-1 整数规划模型，应用航空公司实际数据进行实验求解，得出可行的调配方案，为航空公司提供决策支持。

3、针对航空公司的飞机航线调配环节，随着航空网络的日益复杂和机队规模的扩大，人工编制耗时耗力，浪费人力资源，已经不能满足日益发展的航线网络需求，实现航空公司生产运营的信息化管理刻不容缓。本文设计实现了飞机航线调配智能决策优化系统，为航空公司提供智能化信息管理，提高工作效率，节约人力资源，实现高效管理。

5.2 不足与展望

飞机航线调配问题是一个十分复杂和重要的课题，涉及的研究范围十分广泛。由于作者精力和能力有限，还有许多方面需要进一步研究和改进。

本文针对飞机航线调配问题进行研究，证明了飞机航线调配问题的 NP-Completeness 性质，在数学模型求解过程中，设计 3 日航班串生成算法，后续研究可以将 3 日航班串生成算法进行优化改进，设计新的算法，扩大求解规模。在后续研究中，也可以加入其他飞机航线调配影响因素，提出其他求解目标，设计更复杂全面的多

目标求解模型，进行实验验证。在系统设计实现方面，仍然需要对系统进行进一步优化维护，参考学习先进的技术与方法，结合实际需求，提高系统各项性能。

致 谢

时光如白驹过隙，转眼又到毕业时节。感谢当年的学习生涯所发生的一切，让我进步，让我成长。使我度过了人生中一段精彩的旅程。在此对所有的人和事做出诚挚的感谢！

首先，要感谢一直给我关心和指导的樊玮教授，樊教授因材施教，严于律己、宽以待人，治学严谨，知识渊博，在此容许我再一次我向樊老师表示衷心的感谢！同时，也衷心的感谢我们团队中的其他老师对我的帮助和指导！

感谢我的同学，室友，家人朋友，正因为有你们的帮助和支持，才使我度过了充实而有意义的三年，我的顺利毕业离不开你们的关心和陪伴。

在此，由衷地感谢各位评审专家、评审教授在百忙之中辛苦的评阅工作！十分感谢，此致敬礼！

参考文献

- [1] 贺富永. 我国航空运输业发展战略研究[J]. 理论探讨, 2005(2):71-73.
- [2] 孙宏, 文军. 航空公司生产组织与计划[M]. 西南交通大学出版社, 2008.1-3.
- [3] 王峰, 马寿峰. 航班时刻表优化模型的研究[J]. 系统工程学报, 1996(1):50-56.
- [4] 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.
- [5] 魏星. 飞机排班一体化优化模型与算法研究[D]:[硕士学位论文]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [6] Al-Thani N A, Ahmed M B, Haouari M. A model and optimization-based heuristic for the operational aircraft maintenance routing problem[J]. Transportation Research Part C, 2016, 72:29-44.
- [7] 赵焕省. 航班机组排班算法及应用技术研究[D]:[硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [8] 张永莉, 吴育华. 运筹学与航空公司管理[C]. 见: 中国运筹学会第七届学术交流会论文集:下卷. 青岛:Globe-Link出版社(香港), 2004. 952-960.
- [9] 杜立智, 陈和平, 符海东. NP完全问题研究及前景剖析[J]. 武汉工程大学学报, 2015, 37(10):73-78.
- [10] 宗绍鹏, 王锦彪, 石刚. 民航飞机排班问题的研究综述[C]. 见:孙瑞山主编. 2007年海峡两岸智能运输系统学术研讨会论文集:第三部分. 天津: 中国民航大学, 2007. 196-199.
- [11] Feo T A, Bard J F. Flight scheduling and maintenance base planning[J]. Management Science, 1989,35(12):1415-1432.
- [12] Kabbani N M, Patty B W. Aircraft routing at American airlines[C]. In: Kabbani, Nader M, Patty , Bruce W, eds. Proc.of The agifors symposium(32).California: UC Berkeley Transportation Library, 1992.
- [13] Clarke L, Johnson E, Nemhauser G, et al. The aircraft rotation problem[J]. Annals of Operations Research, 1997, 69:33-46.
- [14] Barnhart C, Boland N L, Clarke L W, et al. Flight string models for aircraft fleetling and

- routing[J]. *Transportation Science*, 1998, 32(3):208-220.
- [15] Gopalan R, Talluri K T. The aircraft maintenance routing problem[J]. *Operation Research*, 1998, 32(1):43-53.
- [16] Sriram C, Haghani A. An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment[J]. *Transportation Research Part A*, 2003, 37(1):29-48.
- [17] Levin A. Scheduling and fleet routing models for transportation systems[J]. *Transportation Science*, 1971, 5(3):232-255.
- [18] Desaulniers G, Desrosiers J, Dumas Y, et al. Daily aircraft routing and scheduling[J]. *Management Science*, 1997, 43(6):841-855.
- [19] Ruther S, Boland N, Engineer F G, et al. Integrated aircraft routing, crew pairing, and tail assignment: branch-and-price with many pricing problems[J]. *Transportation Science*, 2017, 51(1):177-195.
- [20] Shao S, Sherali H D, Haouari M. A novel model and decomposition approach for the integrated airline fleet assignment, aircraft routing, and crew pairing problem[J]. *Transportation Science*, 2017, 51:233-249.
- [21] Gürkan H, Gürel S, Aktürk M S. An integrated approach for airline scheduling, aircraft fleet and routing with cruise speed control[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2016, 68:38-57.
- [22] Mohamed N F, Zainuddin Z M, Salhi S, et al. Development of hybrid algorithm for integrated aircraft routing problem and crew pairing problem[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2017, 9(48):1-11.
- [23] 孙宏. 航空公司飞机排班问题:模型及算法研究[D]:[博士学位论文].成都:西南交通大学, 2003.9-12.
- [24] 孙宏, 杜文. 航空公司飞机排班问题的排序模型及算法[J]. *系统管理学报*, 2002, 11(3):244-247.
- [25] 孙宏, 杜文. 航空公司飞机排班问题的分阶段指派算法[J]. *系统工程学报*, 2003, 18(2):168-172.
- [26] 孙宏, 文军, 徐杰. 基于均衡使用要求的飞机排班算法[J]. *西南交通大学学报*, 2004, 39(5):569-572.
- [27] 李耀华, 谭娜, 郝贵和. 飞机维修计划优化模型与算法研究[J]. *控制工程*, 2008,

15(1):99-102 .

- [28] 肖东喜, 朱金福. 飞机路线问题中航班环的动态构建方法研究[C]. 见: 2007第三届中国智能交通年会学术委员会主编. 2007第三届中国智能交通年会论文集. 南京: 东南大学出版社, 2007.104-111.
- [29] 朱星辉, 朱金福, 高强. 基于动态列生成算法的飞机排班问题研究[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(19):23-30.
- [30] 郑芸, 王锦彪, 王元崑. 蚂蚁算法在民航飞机排班问题中的应用[J]. 计算机工程, 2005, 31(b07):7-9.
- [31] 贾宝惠, 杜建勋, 李耀华, 等. 基于遗传算法的航班串优化方法研究[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(5):45-48.
- [32] 李耀华, 谭娜. 基于遗传算法的飞机一体化排班优化方法[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 435-440.
- [33] 谭娜, 李耀华. 基于改进遗传算法的机组指派优化方法研究[J]. 控制工程, 2015, 22(4):674-678.
- [34] Pauley G S, Ormerod R J, Woolsey R E D, et al. The four-day aircraft maintenance routing problem[J]. Transportation Science, 1998, 32(1):43-53.
- [35] Even S, Itai A, Shamir A. On the complexity of time table and multi-commodity flow problems[J]. Foundations of Computer Science Annual Symposium on, 1975, 5(5): 184-193.
- [36] Balas E, Padberg M W. Set partitioning: A survey[J]. SIAM review, 1976, 18(4):710-760.
- [37] Meguerdichian S, Potkonjak M. Low power 0/1 coverage and scheduling techniques in sensor networks[R]. UCLA Technical Reports 030001, 2003.
- [38] Hane C A, Barnhart C, Johnson E L, et al. The fleet assignment problem: solving a large-scale integer program[J]. Mathematical Programming, 1995, 70(1):211-232.
- [39] 李耀华 谭娜. 飞机排班航班串编制模型及算法研究 [J]. 系统仿真报, 2008, 20(3): 612-615.
- [40] Zhang D, Lau H Y K. A rolling horizon based algorithm for solving integrated airline schedule recovery problem[J]. Engineering and Technology Publishing. 2014, 2:332-337.
- [41] Kasirzadeh A, Saddoune M, Soumis F. Airline crew scheduling: models, algorithms, and data sets[J]. Euro Journal on Transportation & Logistics, 2015:1-27.

- [42] Başdere M, Ümit Bilge. Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 235(1):315–328.
- [43] 王继强. 集合覆盖问题的模型与算法[J]. 计算机工程与应用, 2013,49(17):15-17.
- [44] Guépet J, Briant O, Gayon J P, et al. The aircraft ground routing problem: Analysis of industry punctuality indicators in a sustainable perspective[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248(3):827-839.
- [45] Liang Z, Feng Y, Zhang X, et al. Robust weekly aircraft maintenance routing problem and the extension to the tail assignment problem[J]. Transportation Research Part B Methodological, 2015, 78:238-259.

