

北京交通大学

硕士学位论文

机场停机位优化分配模型构建

Research on Optimization Models for Airport
Gate Assignment Problem

作者:

导师:

北京交通大学

2018 年 1 月

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权北京交通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，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

学校代码：10004

密级：公开

北京交通大学

硕士/博士学位论文

机场停机位优化分配模型构建

Research on Optimization Models for Airport
Gate Assignment Problem

作者姓名：学号：

导师姓名：职称：

学位类别：工学级别：硕士

学科专业：控制科学与工程研究方向：智能交通系统

北京交通大学

2018 年 1 月

致谢

本论文的工作是在我的 xxx 细心指导下完成的，xxx 严谨的治学态度和科学的工作方法给了我极大的帮助和影响。在此衷心感谢两年半来 xxx 对我的关心和指导。

在实验室工作及撰写论文期间，xxxxxxxxx 等同学对我论文中的研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

感谢我的家人，尤其是我的父母，他们的理解和支持使我能够在学校专心完成我的学业。

摘要

机场停机位是机场运行组织的核心资源，飞机各项地面服务作业（包括航班的上下旅客、行李装卸、客舱清洁、加水、加油等）及为完成上述作业所需要人员的调度计划都是在机位分配计划的基础上制定的。科学合理的停机位分配计划可以减少因航班延误等随机因素带来的影响，降低机场运营成本，提升旅客满意度。因此，停机位分配问题已经成为机场运营迫切需要深入研究和尽快解决的关键问题。

本文以机位分配问题为研究对象，首先，根据机场停机位分配的实际业务规则将其抽象成模型的目标函数和约束条件，以乘客靠桥率最大为优化目标建立基于机场实际业务规则的机位分配模型；其次，针对航班随机延误对机位分配计划稳定性带来的影响，通过对航班随机延误的概率分布进行量化研究，以航班延误的概率分布规律为基础，推导出分配至同一机位的连续航班间冲突概率的计算公式及方法；再次，考虑航班随机因素，在之前建立模型的基础上增加基于机位冲突概率的鲁棒性约束，使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，达到机场运营效率和运行安全的双赢；最后，设计免疫遗传算法对本文提出的模型进行求解，根据本文建立的模型对昆明长水国际机场的实际算例进行求解，实验分析结果表明本文设计的模型和算法可用于解决机场实际运营中的机位分配问题，且效果良好。

关键词：机位分配；鲁棒性；冲突概率；免疫遗传算法

ABSTRACT

Airport gate is the core resource for airport operation and organization. Airport ground service (including passengers on and off, baggage handling, cabin cleaning, water adding, refueling, etc.) and personal scheduling are based on the gate assignment plan. A scientific and rational gate assignment plan can reduce the impact of random factors such as flight delays, decrease airport operating costs and enhance customer satisfaction. Therefore, the allocation of gate has become a key issue urgently needed to be studied in an airport and solved as soon as possible.

This paper focuses on the gate assignment problem. First of all, the problem is abstracted into a numerical model according to the actual business rules, aiming at the maximization of the berth utilization ratio. Secondly, in view of the effect of random delay of flights on the stability of gate assignment system, the probability distribution of flight delay is quantitatively studied. And continuous flight conflict probability formula is deduced based on the probability distribution of flight delays. Thirdly, considering random factors, robustness constraints are added to the previous model based on the conflict probability, so that the model would have more robustness and realize the optimization objective of maximum berth utilization ratio at the same time, achieving a win-win situation of operation efficiency and operational safety. Finally, the immune genetic algorithm is designed to solve the model proposed in this paper.

The model established in this paper is used to solve the gate assignment problem of Kunming Changshui International Airport. The experimental results show that the model and the algorithm design can be used to solve the gate assignment problem in the actual operation of the airport, and to good effect.

KEYWORDS: Airport gate assignment; Robustness; Conflict probability; Immune genetic algorithm

目录

摘要.....	III
ABSTRACT	IV
1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究意义	1
1.3 机位分配问题研究综述.....	2
1.3.1 国内外研究现状	2
1.3.3 国内外研究现状小结	6
1.4 论文的研究内容及结构	6
2 基于机场实际业务规则的机位分配模型构建.....	9
2.1 机位分配相关概念及理论	9
2.1.1 机位分配业务描述	9
2.1.2 相关业务名词的解释	11
2.1.3 机位分配规则的分类	11
2.1.4 机位分配优化目标分析	12
2.2 基于机场实际业务规则的停机位分配模型构建	13
2.2.1 大型枢纽机场机位分配问题的难点	13
2.2.2 假设条件	13
2.2.3 数据定义	14
2.2.4 模型的约束条件及目标函数	16
2.3 本章小结	17
3 基于冲突概率的机位分配鲁棒性设计	19
3.1 机位分配的鲁棒性综述	19
3.1.1 鲁棒性定义	19
3.1.2 提升机位分配鲁棒性的一般方法	20
3.2 问题描述	21
3.3 基于航班延误的机位冲突概率计算方法	22
3.3.1 航班延误对机位分配造成影响分析	22
3.3.2 航班延误时长的分布函数与参数估计	23

3.3.3 同机位航班冲突概率计算方法	28
3.4 基于冲突概率的停机位分配鲁棒性设计	31
3.4.1 基于冲突概率的停机位分配鲁棒性设计	31
3.4.2 数据定义	32
3.4.3 模型建立	33
3.5 本章小结	34
4 模型求解	35
4.1 遗传算法	35
4.1.1 遗传算法简介	35
4.1.2 遗传算法基本操作及流程	35
4.1.3 遗传算法特点及应用	37
4.2 免疫遗传算法	37
4.2.1 免疫遗传算法简介	37
4.2.2 免疫遗传算法流程	38
4.2.3 免疫遗传算法特点	39
4.3 改进免疫遗传算法求解机位分配问题	40
4.3.1 算法设计	40
4.3.2 算法基本流程	49
4.4 本章小结	50
5 实例及结果分析	51
5.1 昆明长水机场机位分配案例概述	51
5.1.1 昆明长水机场停机位布局	51
5.1.2 算例数据概述	52
5.2 基于机场实际业务规则的机位分配模型求解算例	54
5.3 基于冲突概率的机位分配鲁棒性模型求解算例	56
5.5 本章小结	60
6 结论与展望	61
6.1 主要工作和研究结论	61
6.2 论文创新点	62
6.3 研究展望	62
参考文献	63

作者简历及攻读硕士/博士学位期间取得的研究成果	66
独创性声明	67
学位论文数据集	68

1 绪论

1.1 研究背景

伴随着国民经济的迅猛发展，航空运输由于其安全、快捷、方便、舒适的比较优势在综合交通运输体系中的地位不断提高，航线、民航机队、客货运输量、以及机场数量不断增长。这给航空运输各个部门带来新的发展机遇的同时，也带来更多严峻的挑战。飞机、机场、空中交通管理系统和飞行航线是航空运输体系的四个主要组成部分。在空中交通管理系统的统一协调控制下这四个部分分工协作，共同完成航空运输的各项业务活动。机场作为为飞机提供起飞、着陆、停驻、维护、补给及组织飞行保障活动的场所。经过几十年的建设和发展，已初步形成颇具规模的民用机场体系。当前我国的民用机场的基本布局为：以北京、广州、上海等大型枢纽机场为中心，以成都、昆明、重庆、西安、乌鲁木齐、深圳、杭州、武汉、沈阳、大连等省会或重点城市机场为骨干，以及其他城市支线机场相配合。根据《全国民用机场布局规划》，到 2020 年，我国机场数量将达到 244 个。

但是随着航线、航班数量和客运量的不断增长，机场跑道、滑行道、机坪、机位资源，空域资源、以及航站楼资源等有限且固定的资源成为限制机场发展的资源瓶颈的同时，对各项设施资源管理的复杂度的也在不断增强。因此，在保障机场安全运行的前提下，通过对机场各项软、硬件资源的科学合理地进行资源优化配置，提升资源使用效率从而降低机场运营成本，提升服务质量和运营效率，已成为当前机场运营管理亟需解决的问题。停机位是机场的重要资源，是供飞机在机场过站期间接受一系列地面服务（包括上下旅客、装卸货物、加油、加水等）时停放的场所。随着航班数量的快速增长，固定且有限的机场停机位、登机口资源已经处于超负荷状态，机场停机位资源紧张的问题不容忽视。其中，尤其以机场机位中的近机位资源的紧缺问题尤为突出。根据国际航空运输协会（International Air Transport Association, IATA）规定，所有出港旅客的 90%-95% 应通过廊桥进行登机^[1]。但是在中国，机场所有出港旅客中仅有 70-75% 左右通过廊桥登机。因此，针对目前的航班量，我国的近机位资源非常短缺。

1.2 研究意义

机场自身资源分为硬件资源和软件资源。其中，机场跑道、滑行道、机坪、

廊桥、航站楼、地面保障车辆等机场各项设施设备资源组成了机场的硬件资源，而保障机场各项作业的机场服务人员和机场信息管理系统等构成了机场的软件资源。随着航线、航班数量和客运量的不断增长，对各项设施资源调度管理的复杂度的也在不断增强。尤其是大型枢纽机场，航班的起降过程具有短时间、高密度的特点，在高峰时段对机场各种软、硬件资源的需求较为集中，管理调度不当有可能造成航班延误，降低乘客的满意度、提升机场运营成本。

目前解决机场停机位资源紧张的方式一般有两种：一是直接增加硬件设施设备资源如扩建机场和机坪等。一方面，机场的各项硬件设施也不可能无限扩建；另一方面，机场的扩建和硬件设备的投入需要大量资金、时间、人力、土地等，受到多种因素的制约。二是对机场停机位资源优化配置，通过对机场停机位资源的优化分配从而达到提升机场硬件资源的利用效率的同时，降低机场运营成本。目前，国内各大中型机场的停机位分配基本上还是调度人员根据个人的经验，以手工方式和简单的计算机辅助方式进行分配，尤其是在大型枢纽机场，航班的起降过程具有短时间、高密度的特点。这使得在机位资源有限的条件下的停机位调度工作，不仅强度大、作业成本高而且效率较低，机位分配质量依赖于工作人员的经验，难以保证机场停机位的优化分配。据统计，由于机场原因造成的所有航班延误中，70%以上是由机场资源调度不当造成的；所有航班延误中，15.45%为航班地面作业延误并造成航班起飞延误^[2]。基于这组统计数据，可以看出机场资源调度对航班正常率具有重要影响。此外，停机位分配计划关乎机场的运行安全，作为为飞机提供客货运输服务的场所，机场停机位上通常存在多架飞机以及地面作业车辆同时进行地面作业，稍有疏忽将可能发生航空事故造成经济损失或人员伤亡。总之，机场停机位是机场运行组织的核心资源，飞机各项地面服务作业（包括航班的上下旅客、行李装卸、客舱清洁、加水、加油等）及为完成上述作业所需要人员的调度计划都是在机位分配计划的基础上制定的，建立合理的机场停机位优化分配方案，为旅客提供更便捷的服务，降低机场调度作业成本和提高资源的利用率，这具有很强的现实意义。

1.3 机位分配问题研究综述

1.3.1 国内外研究现状

在停机位分配优化建模方面，目前国内外学者从不同角度对该问题进行了研究。下面对停机位分配问题建模的不同角度研究进行分析和阐述。

1. 最小化旅客行走距离研究综述

最小化旅客行走距离是国内外学者研究最多的问题。旅客总的行走距离关系到旅客乘机的方便性和服务满意度水平。通常情况下,旅客在机场的步行距离是指旅客在机场各种主要设施之间所经历的距离。机场设施包括值机柜台、近机位、远机位、行李转盘等,各种设施之间的距离部分是固定的,部分是可变的,其中可变的距离与停机位调度水平有很大关系。为简化问题,旅客步行距离一般归纳为三类:出港旅客步行距离、到港旅客步行距离以及转机旅客步行距离。为了提升登机门的利用率,1971年,Braaksma和Shortreed以旅客在航站楼内步行距离最小为优化目标建立了基于关键路径方法的仿真模型^[3]。1984年,Babic等人建立了停机位分配的0-1整数规划模型,该模型以旅客步行距离最小为目标函数,并采用分支定界算法(Branch and Bound)对该模型进行求解,但在其模型中没有考虑中转旅客^[4]。1985年,Mangoubi和Mathaisel^[5]在Babic等人的工作基础上,考虑了中转旅客的步行距离,分别采用混合整数规划的线性松弛法和启发式算法进行求解,对比得出启发式求解算法的求解性能接近最优。2005年H.Ding, A.Lim和B.Rodrigues对近机位容量受限的停机位分配问题进行研究,以分配至远机位的航班数量最小和乘客的步行距离最小为目标函数建立机位分配模型。在模型的求解方面,首先采用贪婪算法求出初始可行解,接下来结合模拟退火算法和禁忌搜索算法对初始可行解进行优化求出最优指派结果^[6]。2008年,鞠姝妹,许俐以旅客提升旅客满意度(乘客步行距离总和最小为目标函数),将机场假定为虚拟航班,并认为以机场为始发地的旅客是从虚拟航班转机而来,以机场为目的地的旅客是转机到虚拟航班去的^[7]。2014年,曾琳燕以缩短机场旅客步行总距离和均衡各航空公司旅客平均步行距离为目标,建立了停机位分配优化模型^[8]。

2. 提升机位分配鲁棒性研究综述

以往研究机位分配时,大都假设航班的到达及起飞时刻看作是是确定性固定不变的已知量,然而在实际情况由于部分航班地面作业延迟、流控、恶劣天气等影响,航班到达及起飞时刻是在一定范围内变化的随机量。由于航班时刻的变动会对机位分配方案造成影响,提升机位计划的鲁棒性,即在航班时刻变动情况下保持机位计划的稳定性是目前停机位分配研究的一个重要优化目标。为避免由于空中交通延误、恶劣天气条件、设备故障等意外状况对机位分配计划的影响,保持机位分配计划的稳定性,A Bolat^[9-11]以机位空闲时间均衡(即机位空闲时间的变化范围最小)作为目标函数建立机位分配模型。在2001年A Bolat^[12]提供了该类AGAP问题模型的线性化表示,确定了该问题可在多项式时间内得到最优解的条件——即不考虑机位-机型匹配约束。2001年,Shangyao Yan和Cheunming Hou^[13]在2001年在分配至同一个机位的连续航班之间设置一个固定的缓冲时间来吸收航班时刻的不确定变化,建立多目标0-1整数规划的机位分配模型,并采用

加权法、列生成法、单纯形法和分枝定界法对该模型进行求解。但由于航班起降的密度具有随时段变化的规律,将机位缓冲时间设置为固定值的方法针对性不强。Yan^[14]在 2002 年通过分析航班随机延误对停机位静态分配的影响,设计灵活的缓冲时间(根据航班密度确定),以有效地吸收机位实时分配中的随机延误。该模型采用添加鲁棒性约束条件的方法来提机位分配方式的鲁棒性,而不是将其作为一个优化目标。2009 年,卫东选等^[15]以最小化停机位各空闲时间段的离差为目标函数建立考虑航班机型-机位匹配约束的数学模型。并结合动态时间窗法以及贪婪算法对考虑机位-机型匹配约束的模型进行优化求解,实现了对该目标的优化。

以上综述中停机位问题的鲁棒性优化目标大都通过使停机位空闲时间段均衡分布以及设置同机位连续航班之间预先加入一定缓冲时间来实现。在数学上达到该方法包括:1.将模型的目标函数设置为最小化机位空闲时间段的变化范围、最大化最小机位空闲时间段或最小化最长机位空闲时间段,以及最小化机位空闲时段的方差等 2.设置同机位连续航班之间缓冲时间的约束条件。

2005 年, Lim^[16]将航班的到达时刻看作是一个随机变量,把飞机到达机场后直到被分配机位之间的过程认为是时间固定的,这段固定的时间是在一个给定的时间窗内,并以最小化机位分配时刻与航班可能到达时间窗的起始时间之间的差距作为目标函数建立机位分配模型,并利用动态时间窗算法实现了插入和实践间隔同步移动,然后使用禁忌搜索算法和局部优化算法解决该问题,并取得良好的效果。同年 9 月, Lim^[17]提出鲁棒性机位分配问题。在文献中, Lim 认为机位空闲时间的大小和产生的冲突概率之间存在一定的函数关系,并假设这种函数关系为倒数性函数、指数型函数、线性函数等,对比研究不同函数条件下机位分配模型抵抗航班延误的效果,对比发现指数型函数的机位分配鲁棒性效果较好,并以不同航班占用同一机位的时间相互重叠而产生冲突的次数(停机位冲突)最少为优化目标建立机位分配模型,但该模型对停机位分配的鲁棒性指标(机位冲突概率)做出量化研究,但缺点在于模型对机位冲突的处理采用假设方式,没有基于实际运行数据做深入分析。2010 年,杨文东等人^[18]通过构造停机位航班连接树的方法,研究了以最小化航班延误和停机位空闲时间为目标的停机位分配问题

3. 提升近机位资源利用率问题研究综述

在机场运营中,一般尽量将航班分配至设有廊桥的近机位以提高旅客的满意度,当近机位资源紧张时才考虑停靠远机位。部分停机位分配问题文献基于机场近机位资源充足的假设,即认为对于任意一个航班,总存在至少一个可以分配的近机位。然而在机场实际运营中,短时间高密度的航班流给机场的近机位资源造成很大压力,造成可用近机位不足的现象。Ding^[6]虚拟了一个同时可为多架飞机服务的远端停机坪,建立以分配至远端停机坪的飞机数量最小和乘客的步行距离

最小为目标函数的机位分配模型，约束条件是每个门只能停一架飞机且每一架飞机只能停一个门。2010 年，卫东选^[19]建立了在资源受限情况下最大化靠桥率的机位分配模型，并采用启发式算法进行求解。2015 年，王岩花^[20]针对繁忙机场机位分配问题，建立混合集合规划模型，该模型包含机型匹配、飞机拖曳、航班性质、组合机位等规则并以靠桥率最大为优化目标，最后采用首都机场实例对模型和程序进行验证，取得了很好的效果。

4. 多目标优化问题研究综述

机场航班停机位的分配涉及到机场、航空公司、旅客等多方面利益，是一个复杂的多目标组合优化问题，一些文献对多目标的停机位分配问题进行了探讨。徐肖豪等^[21]以航班延误时间最小，以及停机位空闲时间平方和最小即停机位使用均衡为优化目标，并引入了停机位均衡因子，将机位分配问题转化为单目标优化模型，在利用 **Memetic** 算法求解机位的占用次序的前提下，用贪婪算法确定飞机进入停机位时间，最后通过仿真模拟得到了优化方案，并通过实例比较证明了 **Memetic** 算法优于遗传算法。2008 年，孔佳玉^[22]将出港旅客总登机距离和停机位空闲时间均匀作为优化目标，分别建立了相应的整数规划模型，采用化多为单的线性加权法将所建模型进行转换并求解。2008 年，Andreas Drexl 和 Yury Nikulin^[23]建立了没有分配机位的航班数量最小，旅客总步行距离（或时间）最小，航班优先级总和最大的多目标机位分配模型，并采用基于 **Perato** 的模拟退火算法进行求解，并且在 2009 年^[24]，他们又建立了以最大化机位分配优先级，最小化机位更换次数，最小化机位偏差为优化目标的多目标机位分配问题。

对于停机位分配问题的求解算法，目前主要存在 2 种类型的方法：精确性算法和基于人工智能的智能优化算法。早期机位分配问题由于运算规模较小，大都采用精确性算法进行求解，例如 A Bolat^[9-11]在文献中采用分支定界法对机位分配问题进行求解。Mangoubi 和 Mathaisel^[5]采用混合整数规划的线性松弛法对 **AGAP** 问题进行求解等。但由于机位分配问题是一个 **NP** 难的组合优化问题（在多项式的计算时间内无法获得最优解），当扩大求解规模后，可行解的数量将呈指数增长，若仍然采用精确算法求解该问题时会出现维数灾难，因此研究学者们提出了不同的启发式算法（例如粒子群算法、禁忌搜索算法等）来对该问题进行求解。2001 年，Jiefeng Xu 和 Bailey^[26]采用禁忌搜索算法对机位分配的 0-1 混合整数二次规划模型进行求解，该模型以旅客步行总时间为目标函数。Ding^[6]在 2004 年对该禁忌搜索方法进行了改进。2007 年，陈欣^[27]等设计了一种排序模拟退火算法，首先通过排序算法求得初始可行解，接下来利用经典模拟退火算法对初始解进行优化得到最优分配方案。2008 年，鞠妹妹^[7]以旅客满意度为优化目标建立数学模型，并设计了贪婪模拟退火算法来求解枢纽机场的停机位分配问题。

1.3.3 国内外研究现状小结

综上所述，国内外研究学者对停机位分配问题已经进行了较为深入的研究，但针对机场实际生产实践，目前仍然存在着机场停机位分配需求和理论支持相对缺少的矛盾，主要表现在以下几个方面：

（1）机场调度尤其是机位调度受到多种条件的限制，如滑入推出冲突限制、相邻机位之间的约束等等，业务流程复杂。许多文献为了简化问题，省略了某些机场实际业务规则中重要的约束条件，约束规则分析的不全面、建立的模型相对简单，与实际情况并不相符，不能满足机场实际运营需求。

（2）既有研究中，考虑航班随机因素较少。机场实际运营中，由于恶劣天气、机场流量控制以及地面保障工作等随机因素造成航班延误，并产生机位占用冲突使得机位分配计划不能照原计划实施的情况很多。以往文献研究多侧重于根据确定的信息进行停机位分配，研究航班延误的不确定性（随机性）规律及其对机位分配造成影响的文献较少。

（3）既有研究中，提高机位分配方式的鲁棒性的一般方法是通过设置同机位最小安全事件间隔以及保持各机位空闲时间的均衡性来吸收航班的实时随机延误从而提高机位分配方式的鲁棒性。而关于通过航班延误规律评估航班间发生机位占用冲突的概率，提高机位分配鲁棒性（抗延误特性）影响的研究较少，有待进行进一步深入量化的研究。

1.4 论文的研究内容及结构

根据研究内容，本文一共分为 6 章：

第一章：绪论

本章首先对停机位分配的背景和意义进行了简要概述。然后从不同角度对目前机位分配的国内外研究现状进行总结，奠定了研究基础。最后介绍了论文的结构和主要研究内容。

第二章：基于机场实际业务规则的机位分配模型构建

首先简要说明了机位分配业务、相关业务名词的解释和机位分配优化目标、约束规则的分类，其次就机场实际运营中存在的问题，在现有数学规划模型约束的基础上，加入了飞机拖曳、相邻机位机型限制、航班滑入推出冲突等业务规则约束，并以乘客靠桥率最大为目标函数，建立基于机场实际业务规则的机位分配模型。

第三章：基于冲突概率的机位分配鲁棒性设计

航班延误是造成机位占用冲突的主要原因。本章通过分析航班到达及起飞延误时长差异化的概率密度分布规律，推导出同机位航班间的冲突概率的计算公式及方法。其次，根据冲突概率计算理论，在第二章模型的基础上增加鲁棒性约束，建立基于机位冲突概率的机位分配鲁棒性模型，使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性。

第四章：模型求解

首先总结了基本遗传算法以及免疫遗传算法的原理、基本操作流程、以及算法特点。接下来采用各种优化策略对基本免疫遗传算法进行优化，设计适合本文机位分配模型的免疫遗传算法的抗体编码、初始抗体种群的生成、亲和力的计算、各项遗传操作具体步骤、算法终止条件，以及改进免疫遗传算法基本流程。

第五章：实例及结果分析

机位分配实证研究。以昆明市长水机场的真实数据为例，根据本文提出的分配模型及改进免疫遗传算法对其进行求解，并与实际的机位分配结果进行对比分析。

第六章：总结与展望

本章首先对论文的主要工作进行了总结，概述了本文的创新点，为停机位分配的研究提供了新的参考思路；最后，充分分析了论文的不足之处及未来展望，对以后的研究工作指明了方向。

论文的研究框架如图 1-1 所示。

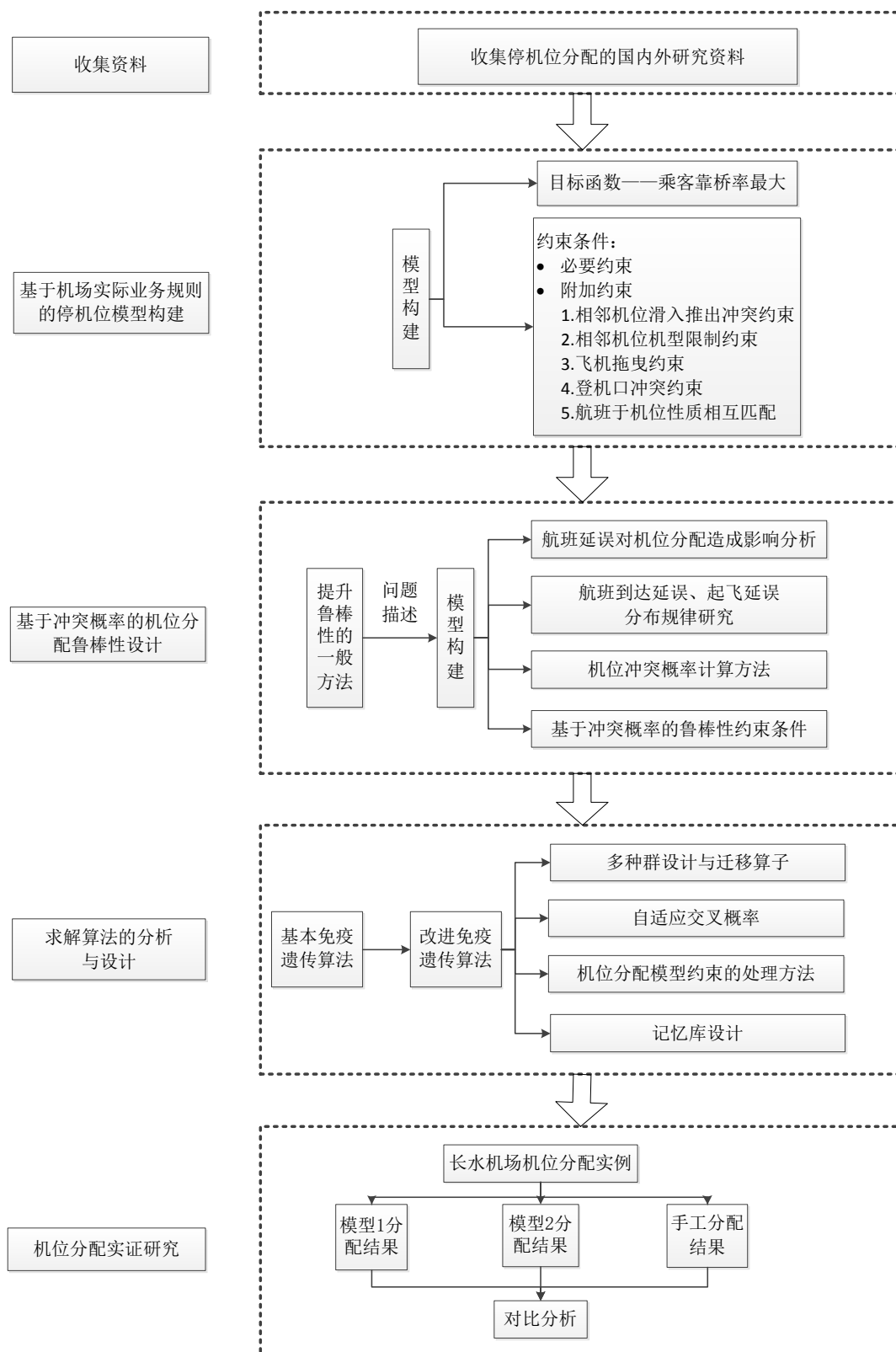


图 1-1 组织框架图

Fig.1-1 Paper research framework

2 基于机场实际业务规则的机位分配模型构建

机场停机位分配业务流程复杂、受到多种条件限制，是一个典型的多约束条件的优化问题。本章通过对机场停机位分配的实际业务进行归纳总结并抽象成目标函数和约束条件，以乘客靠桥率最大为优化目标，综合飞机拖曳、相邻机位机型限制、航班滑入推出冲突、登机口冲突限制等约束建立机位分配模型。

2.1 机位分配相关概念及理论

2.1.1 机位分配业务描述

如图 2-1 所示，机场主要由飞行区、航站区和进出机场的地面交通系统组成。飞行区是供飞机起飞、着陆、滑行和停放区域，主要由飞机跑道、滑行道、停机坪及辅助措施等构成。

停机坪是指在陆地机场上划定的一块供航空器上下旅客、装卸货物或邮件、加油、维修时停放之用的场地。飞机在停机坪的作业活动主要包括三部分：上下旅客，行李和货物的装卸，以及为飞机在机场过站期间提供清洁、配餐、加水、加油等地面保障作业；

旅客可分为进港旅客和出港旅客，其在机场内的流向通常为：若航班被分配至远机位，则由机场摆渡车在飞机机位与登机口之间运送乘客，出港旅客通过登机梯乘坐飞机；而进港旅客则到达航站楼后前往行李转盘处或直接离开；中转旅客在航站楼内从一个航班对应的登机口转到另一航班对应的登机口后登机。若航班被分配至近机位，出港旅客可直接从登机口通过廊桥登机；

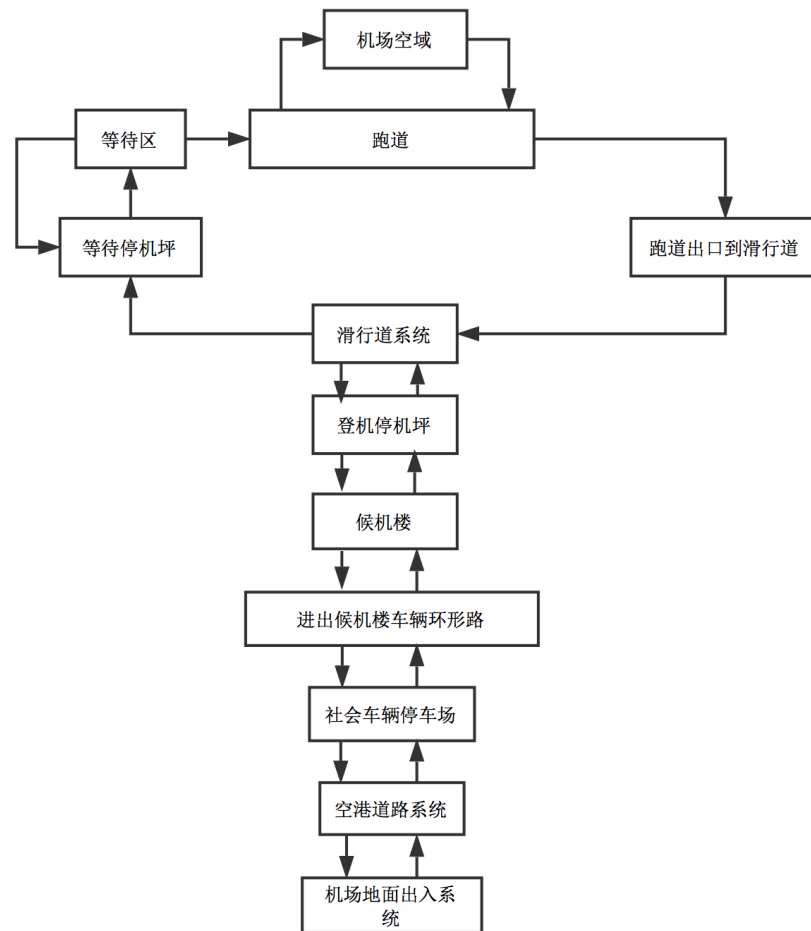


图 2-1 机场构成图

Fig.2-1 The constitutions of the airport

机场停机位分配是指考虑航班进离港时刻、飞机机型、航班类型、旅客信息，以及机场停机位拓扑结构、运行规则、利用状况等，在一定时限范围内，由机场指挥运行中心为到离港航班分配合理的停机位。

机场停机位分配包括两个阶段，分别为停机位预分配和停机位实时再分配。本文是对机场停机位预分配进行研究。机位预分配是指机场在前一天 24 点之前接收到次日各航空公司的航班计划后根据当前停机位利用状况和停靠航班等信息，对机场停机位进行预分配，并将机位分配计划送达机场相关的保障部门。其他机场资源计划（如摆渡车辆、值机柜台、安检口、登机口等）都需要根据机位分配计划进行预分配；停机位实时再分配是指在机场的实时运行中，由于随机因素（例如空中交通延误、恶劣天气、机械故障、流量控制等）常造成航班时刻与预计时刻的不一致，根据报文等实时航班动态在机位预分配方案的基础上通过人工对原分配机位进行实时动态调整。

总之，机场停机位是机场运行组织的核心资源，飞机各项地面服务作业（包括航班的上下旅客、行李装卸、客舱清洁、加水、加油等）及为完成上述作业所

需要人员的调度计划都是在机位分配计划的基础上制定的，建立合理的机场停机位优化分配方案，为旅客提供更便捷的服务，降低机场调度作业成本和提高资源的利用率，这具有很强的现实意义。

2.1.2 相关业务名词的解释

机场停机位分配相关业务的名词解释如下：

近机位：又称为桥位，停机位距离候机楼较近，旅客通过连接飞机与登机口的廊桥登机或离机。

远机位：离候机楼比较远，登机口与机位之间的连接过程由摆渡车来完成，旅客通过客梯车或飞机上自备梯登机或离机。

单进航班：单进航班指在该机场停留过夜的航班。对于执行该航班飞行任务的飞机来说，单进航班是其当天执行的最后一个到港航班。

单出航班：与单进航班相对应，单出航班是指执行该航班飞行任务的飞机在机场过夜后、第二天从该机场出发的航班。对于飞机来说，单出航班为这架飞机当天最早执行的出港航班。

连班航班：又称为过站航班，除了单进航班和单出航班，其余均为连班航班。连班航班包含连班到达和连班出发两类航班，任何一个连班到达航班都可以找到与之配对的连班出发航班。

配对航班：飞机执行进港航班的飞行任务到达机场并进入为其分配的机位完成地面作业后，又执行离港航班的飞行任务离开机场，则该架飞机执行的进港航班与离港航班相互配对，形成了一个“配对航班”。

2.1.3 机位分配规则的分类

机位分配问题是一个多约束条件的优化问题，由于各机场实际状况、运营决策不同，在机位分配过程中使用的约束规则也各不相同。目前国内机场较通用的约束规则可大致分为两类：一类为机位分配的必要约束，即保证机场正常安全运行的最基本机位指派约束条件。另一类为机位分配的附加约束，是为了实现机位分配的不同优化目的，使优化结果更能满足机场实际运行要求而增加的约束。

其中，机位分配的必要约束主要包括：

- (1) 唯一性约束：一个飞机必须，且仅能停靠一个停机位；
- (2) 独占性约束：一个停机位不能同时分配给两个飞机；
- (3) 机型机位相互匹配约束：机位与停靠飞机的机型相互匹配，即飞机的机

型必须属于该机位的可容纳机型列表；

(4) 同机位最小安全时间间隔约束：对于分配至同一个停机位的两架连续飞机之间设置必要的安全时间间隔，称之为机位最小安全时间间隔或机位缓冲时间，以保障前一架飞机的安全离开和后一架飞机的安全进入，此外还可以吸收航班可能发生的微小延误，提升机位分配方式的鲁棒性。

除了上述的必要约束条件外，实际运行中机位分配问题可能还需增添一些附加约束条件，主要包括：

(1) 航班优先级约束：对航班设置不同的优先级，例如专机的优先级大于日常航班；旅客人数越多的航班优先级越高等；

(2) 机位优先级约束：近机位大于远机位；临时机位/备用机位优先级最低；机型可容纳机型越多，机位优先级越低等。

(3) 相邻机位停靠约束：某些机位在停靠大机型航班时，由于飞机翼展和停机位尺寸等原因，为避免发生碰撞或其他事故，对其相邻机位停靠飞机的机型有一定限制；

(4) 飞机推入、滑出约束：两架分配在相邻机位的飞机，不能同时滑入机位；两架分配在相邻机位的飞机，不能同时推出机位等；

(5) 其他匹配性约束：专机/VIP 航班必须分配至近机位；飞机与停机位的航空公司相匹配；飞机与停机位的国际/国内属性相匹配等；

(6) 飞机拖曳约束：为提高航班靠桥效益，飞机可从远机位拖曳至近机位；

(7) 登机口冲突约束：若两机位对应的登机口相同，分配至这两个机位的配对航班的登机口占用时间不发生重叠且有一定的缓冲时间，即同一登机口不能同时被占用；

不同机场的附加约束条件不完全相同，本文在这里列举的仅为部分国内机场较通用的附加约束。

2.1.4 机位分配优化目标分析

典型的机位分配的优化目标主要有以下几方面：

(1) 提升乘客满意度：最小化旅客步行总距离，最小化旅客总步行时间，最小化旅客等待时间等。

(2) 提升机位分配方式的鲁棒性：一般以停机位空闲时间均衡即机位空闲时间的方差最小为优化目标，以应对机场实际运行过程中由于恶劣天气、机械故障、流控等因素造成航班的随机延误对其他航班的起降造成影响。

(3) 提升近机位资源利用率：优化目标一般是航班靠桥率最大化即分配到靠

桥机位的航班数量最多，或者分配到远机位的航班数量最少。因为航班分配至远机位，不仅会增加机场的运营成本，例如摆渡车的费用以及其它地面作业（加油、加水等）复杂化带来的费用，而且降低旅客满意度。

2.2 基于机场实际业务规则的停机位分配模型构建

2.2.1 大型枢纽机场机位分配问题的难点

大型枢纽机场起降具有短时间高密度的特点，高峰时段停机位资源紧张，增加了机场停机位管理的复杂度和难度，对机场停机位的优化调度提出了更高的标准和要求：

（1）大型枢纽机场的航班起降具有短时间高密度的特点，高峰时段停机位资源紧张。以昆明长水机场为例，包含停机位 198 个，其中近机位 68 个、远机位 133 个，日平均起降航班架次超过 1000 架次，因此，大型枢纽机场停机位分配问题属于大规模整数规划问题，求解难度较大。

（2）大型枢纽机场停机位分配规则复杂。为简化问题，目前机位分配的学术研究大多仅考虑机位分配的最基本约束。但在机场实际运行过程中，除了机位分配的必要约束之外，还有许多复杂的附加约束规则。包括：为提高航班靠桥率，对停靠在远机位的单出航班，在航班离港前拖曳至近机位上客；航班分为国际航班和国内航班，不同性质的航班需停靠相应机位；某些机位在停靠大机型航班时，为避免发生意外，其邻近机位对停靠的机型有一定限制等。

（3）算法运算速度要求较高。机场运行指挥中心前一天 24 点接收到次日的航班计划后根据当前停靠的航班信息以及停机位利用状况，制定出机位分配方案，并下发到机场各个服务部门，这就对模型的求解速度提出了更高的标准和要求。

因此，大型机场的机位分配问题是一个多约束的复杂组合优化问题，接下来本章将基于机场实际业务规则并将其抽象成约束条件和目标函数，对大型枢纽机场机位分配问题进行建模。

2.2.2 假设条件

机位分配问题的建模实质上是对机场实际分配规则的一种高度抽象和总结。本文研究机位分配模型，基于如下假设：

（1）有限时间假设

机场实际运行过程中，航班的起降是一个持续动态的过程，航班能否停靠机

位受到已停靠在该机位的前一个航班的制约，即当前时段的停机位的分配受前一时段停机位占用状态的影响。这里的有限时段假设是指根据实际情况，利用时间窗来对停机位分配进行划分，使得在当前时间窗内停机位分配达到最优。本文设置时间窗的长度为一天。

（2）航班配对假设

在机场实际运营中，每个离港航班必然存在一个进港航班与之相互配对形成配对航班，并且由同一架飞机执行这两个相互配对航班的飞行任务。因此，为了简化模型，虽然进港航班和离港航班的航班号存在差异，但如果没有特殊说明，本文后面出现的航班，均表示由到港航班和离港航班配对而成的配对航班。

（3）机场容量假设

假定机场的停机位容量能够满足机位分配要求。即对于给定的航班和停机位数据，至少存在一个机位分配方案的可行解。

（4）信息完备性假设

假定在进行机位分配时所需要的相关数据已知。这些数据具体包括：1、航班信息。包括了配对航班的计划到港、离港时间，乘客人数，所属航空公司等以及执行该航班的飞机机型等信息。2、停机位信息。包括机场停机位拓扑结构，各停机位属性（可容纳机型、国际国内属性、默认登机口、是否拥有廊桥等），当前机位的利用情况等。3、机位分配的相关参数，例如同机位最小安全事件间隔、相邻机位机型限制信息等。

2.2.3 数据定义

在我们建立模型之前，我们需要对模型中所要使用的参数和变量进行简单的定义和规定：

（1）输入变量

用于制定机位分配方案的输入数据由几个部分组成。第一部分规定了机位需求信息，包括航班计划时刻表，以及每个航班的乘客数量、航班属性、执行该航班飞机的机型等信息；输入数据的第二部分包含机场的停机位信息，即停机位的数量、拓扑结构、机位利用状况以及停机位的属性信息；输入数据的最后一部分由机场运控中心机位分配人员输入，确定机位分配的相关参数例如同机位最小安全时间间隔、相邻机位的航班用于避免滑入推出冲突的最小安全时间间隔等。

模型中的输入变量及相应符号如表 2-1 所示。

表 2-1 输入变量

Table 2-1 Input variables.

输入变量符号	表达含义
n_f	待分配航班数量
F	待分配航班集合
F_d	单出航班集合
x'_{ik}	若单出航班 i 停靠于停机位 k ，则为 1，否则为 0
n_g	停机位数量
G	停机位集合
T_{buffer}	同机位最小安全时间间隔
$T_{neighbor}$	相邻机位飞机滑入、推出最小安全时间间隔
N_i^p	航班 i 的乘客数量， $i \in F$
ETA_i	航班 i 的预计到达时间， $i \in F$
ETD_i	i 的预计离开时间， $i \in F$
f_i^{Type}	航班 i 的机型， $i \in F$
f_i^{Nation}	航班若航班 i 是为国内航班取 1，否则取 0， $i \in F$
P_k	停机位 k 的可容纳机型集合， $k \in G$
f_k^{Nation}	若停机位 k 为国内机位取 1，否则取 0， $k \in G$
f_k^{Bridge}	若停机位 k 拥有廊桥取 1，否则取 0， $k \in G$
g_k	停机位 k 的默认登机口， $k \in G$
N_{kl}	若停机位 k 与停机位 l 临接取 1，否则取 0， $k, l \in G$
H_k^s	停机位 k 的空闲开始时间， $k \in G$

(2) 中间变量

为了简化计算，通过对模型中的输入变量进行数据预处理得到中间变量。则本章建立模型中的中间变量及符号表达见表 2-2。

表 2-2 中间变量

Table 2-2 Intermediate variables.

输入变量符号	表达含义
Q_{ik}	若航班 i 与停机位 k 相匹配，即 $f_i^{Nation} = f_k^{Nation}$ ， $f_i^{Type} \in P_k$ 且 $H_k^s \leq ETA_i - T_{buffer}$ 取 1，否则取 0， $i \in F, k \in G$
R_i	先于航班 i 到达且与航班 i 的机位占用时间存在冲突的航班集合
M_{ij}	若航班 i 与航班 j 存在滑入推出冲突，即 $ ETA_i - ETA_j \leq T_{neighbor}$ 或 $ ETD_i - ETD_j \leq T_{neighbor}$ 或 $ ETA_i - ETD_j \leq T_{neighbor}$ 取 1，否则取 0
P_{ij}	若航班 i 与航班 j 分配至相邻机位时存在机型冲突与机位占用时间冲突取 1，否则取 0
t_i^B	配对航班 i 的登机口占用时间，其中到港航班的登机口占用时间为飞机

输入变量符号	表达含义
	到港后 10 分钟，离港航班的登机口占用时间为飞机起飞前 30 分钟
B_{ij}	若航班 i 与航班 j 的登机口占用时间冲突（重叠）取 1，否则取 0

（2）决策变量

机位分配问题的决策变量 x_{ik} ，其含义为当且仅当航班 i 被分配至停机位 k 时为 1，否则为 0。

机位分配问题的解的形式是 0-1 二元矩阵，机位分配矩阵的具体表现形式如表 3-3，其中矩阵的一行对应每一个机位，矩阵的一列对应每一个航班，矩阵中的元素为决策变量的取值，矩阵中的行元素则表示了分配至该机位的航班序列。

表 3-3 机位分配矩阵

Table 3-3 The matrix of gate assignment.

机位 \ 航班	1	2	3	n_f
1	0	1	0		0
2	0	0	1		0
3	1	0	0	0
.....	0	0	0		0
n_g	0	0	0		1

2.2.4 模型的约束条件及目标函数

1. 目标函数

停机位是供飞机在机场过站期间接受一系列地面服务（包括上下旅客、装卸货物、加油、加水等）时停放的场所。近机位与航站楼的距离较近，通过廊桥实现机位和登机口的连接，旅客可直接经由廊桥进行登机或离机；而远机位距离候机楼较远，旅客登机或离机时需要通过机场摆渡车、客梯车等地面保障车辆实现。机场运营中，应首先考虑将航班分配至近机位，只有当高峰时段近机位不足时才考虑将其分配至远机位。这样可增加旅客满意度，减少保障车辆造成的地面复杂度增加带来的费用，减轻地面保障人员的工作负荷。因此最大化航班靠桥率往往成为评价大型枢纽机场机位分配方案优劣的核心。但是最大化航班靠桥率并没有考虑不同航班乘客数量差异所造成航班优先级的不同，而将所有航班同等对待，因此本文以乘客靠桥率最大为优化目标进行建模。

$$\max \frac{\sum_{k=1}^{n_g} \sum_{i=1}^{n_f} x_{ik} f_k^{bridge} N_i^p}{\sum_{i=1}^{n_f} N_i^p} \quad (2-1)$$

2. 约束条件

基于大型枢纽机场实际业务规则，停机位指派模型构建的约束函数如下：

(1) 唯一性约束：一个飞机必须，且仅能停靠一个停机位；

$$\sum_{k=1}^{n_g} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in F, \forall k \in G \quad (2-2)$$

(2) 分配至同一停机位的两架连续的飞机之间应有必要的安全时间间隔，以保障前一架飞机的安全离开和后一架飞机的安全进入；

$$\sum_{j \in R_i} x_{ik} + x_{jk} \leq 1 \quad \forall i, j \in F \forall k \in G \quad (2-3)$$

(3) 飞机停靠机位时，机型和机位相互匹配，航班性质与机位国际/国内属性相互匹配，且飞机的进港时间大于机位的空闲开始时间加上同机位最小安全时间间隔；

$$x_{ik} = 0 \quad \forall Q_{ik} = 0, \forall i \in F, \forall k \in G \quad (2-4)$$

(4) 飞机的推出时刻与分配至相邻机位的飞机推出，滑入时刻应保持一定的时间间隔；

$$x_{ik} + x_{jl} \leq 1 \quad \forall N_{kl} = 1, \forall M_{ij} = 1, \forall i, j \in F, \forall k, l \in G \quad (2-5)$$

(5) 飞机停靠机位时，必须满足相邻机位停靠约束。即某些机位在停靠大机型航班时，由于飞机翼展及停机位尺寸限制，为避免发生碰撞等安全事故，对其相邻机位停靠的机型有一定限制；

$$x_{ik} + x_{jl} \leq 1 \quad \forall N_{kl} = 1, \forall P_{ij} = 1, \forall i, j \in F, \forall k, l \in G \quad (2-6)$$

(6) 飞机拖曳约束：停靠在远机位的过夜航班，可拖曳至近机位停驻，但不允许从远机位拖曳到远机位。停靠在近机位的过夜航班，则保持原分配机位不变。

$$x_{ik} = 0 \quad \forall k \in \{k \mid x'_{ik} = 0 \text{ 且 } f_k^{bridge} = 0\}, \forall i \in F_d \quad (2-7)$$

$$x_{ik} = 1 \quad \forall k \in \{k \mid x'_{ik} = 1 \text{ 且 } f_k^{bridge} = 1\}, \forall i \in F_d \quad (2-8)$$

(7) 登机口冲突约束：若两机位对应的登机口相同，分配至这两个机位的配对航班的登机口占用时间不发生重叠且有一定的缓冲时间，即同一登机口不能同时被占用；

$$x_{ik} B_{ij} + x_{jl} B_{ij} \leq 1 \quad \forall g_k = g_l, \forall i, j \in F, \forall k, l \in G \quad (2-9)$$

2.3 本章小结

本章首先就机位分配相关概念及理论进行综述，包括机位分配业务描述、机位分配业务所涉及名词的解释说明，以及对目前研究中机位分配的约束条件和优化目标分别做了细致的总结和分类。接下来对大型枢纽机场停机位分配问题的难点进行了详细的分析和介绍。最后在现有数学规划模型研究的基础上，增加了包含相邻机位机型限制、飞机拖曳以及登机口冲突等规则的机位分配模型，参考机场实际运营状况，采用最大化乘客靠桥率为优化目标，建立基于机场实际业务规则的机位分配模型，并对模型进行了详细的数学描述。

3 基于冲突概率的机位分配鲁棒性设计

为控制航班延误传播对机位分配方案造成的影响，提升机位分配方式的鲁棒性，一个重要的方法是在分配至同机位的前后航班之间设置一定的缓冲时间，即机位空闲时间，来提升机位分配方案的抗延误特性，为航班延误传播留下足够的缓冲空间。然而，在本文第 3 章建立的基于机场实际业务规则的机位分配模型中，为提高近乘客靠桥率，航班间的时隙被最小化，丧失了缓冲延误传播的空间，这与提高机位分配方式的鲁棒性目标有一定的矛盾。使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性是否可能呢？

本章以昆明长水国际机场的实际航班数据为基础，对航班到达、起飞延误时长的分布规律进行参数估计和假设检验，得出航班到达延误以及起飞延误差异化的概率分布模型。通过分析航班随机延误对同机位连续航班机位占用冲突机理的研究，对机位冲突概率的计算公式进行推导。最后在第 3 章模型的基础上增加基于机位冲突概率的鲁棒性约束条件，对航班时刻表中那些最易扩散延误的敏感航班合理分配航班时隙。使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性。

3.1 机位分配的鲁棒性综述

3.1.1 鲁棒性定义

系统在受到外部扰动或内部参数发生变动时维持某些性能的特性即为系统的鲁棒性。将停机位分配的内容结合鲁棒性的定义，可以看出：

机位分配的鲁棒性是指机位分配方案具有这样一种性能，它能够吸收航班计划实施过程中一种或多种不确定性因素（主要是指由于恶劣天气、机械故障、流控等因素造成的航班随机到达、起飞延误）的影响，保持机位计划的稳定性。由于机场停机位是机场运行组织的核心资源，飞机各项地面服务作业（包括航班的上下旅客、行李装卸、客舱清洁、加水、加油等）及为完成上述作业所需要人员的调度计划都是在机位分配计划的基础上制定的，因此，提升机位分配方案的鲁棒性对减少后期实时分配中停机位的频繁变更，降低随机因素对机位分配方案的影响，保证机场高效运作具有至关重要的现实意义。同时可以提升机场服务水平。

提高旅客满意率。

反映飞机机位分配方式鲁棒性的性能指标：

- (1) 稳定性：飞机分配方案在受到扰动后偏离的程度；
- (2) 灵活性：在受到扰动偏离后，机位分配方案的恢复能力；

3.1.2 提升机位分配鲁棒性的一般方法

既有研究中，提升机位分配鲁棒性的一般方法是通过增加某些约束条件或设置优化目标控制航班的延误传播从而提高机位分配的鲁棒性。主要包括以下两个方面：

- (1) 增加同机位航班的缓冲时间（机位空闲时间）

同机位航班的缓冲时间是指同机位 2 个衔接航班的计划过站时间之间的间隔。在分配到同一机位的 2 个航班之间设置必要的缓冲时间（机位空闲时间），可以降低航班起降时刻不确定所造成的随机延误对机位分配计划产生的扰动，控制航班的延误传播。对于分配到同一机位的两架连续飞机，同机位最小安全间隔时间设置地越长，航班时刻的扰动对机位分配的影响越小。

- (2) 最小化所有空闲时间段的离差（控制停机位空闲时间段均衡）

由于不同航班的随机延误相互独立，通过最小化所有空闲时间段的离差，达到提升机位分配方式的鲁棒性的目的。如图 2-1、2-2 所示是四架飞机在两个机位中的两种不同的分配方式。在图 2-1 中，飞机 2 的预计起飞时刻为 D，若飞机 2 发生起飞延误至 D' 时刻起飞，造成飞机 2 与飞机 3 在产生机位占用冲突，导致分配到同一机位的后续飞机 3 不能分配至机位 1 中。而如果按照图 2-2 所示的方式分配机位，使得机位 1 和机位 2 的空闲时间段相对较为均衡，机位分配方案的稳定性增强。

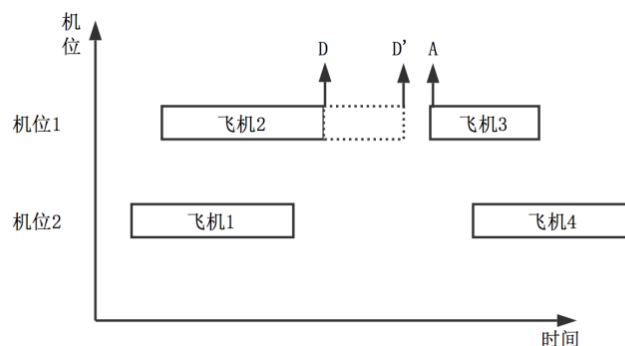


图 3-1 一般分配方式

Fig.3-1 The general gate assignment assignment

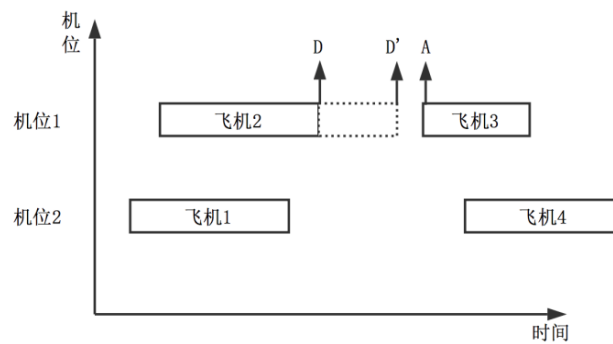


图 3-2 鲁棒性分配方式

Fig.3-2 The robust gate assignment

在既有研究中，机位分配方式鲁棒性的提升实际上就是适当增加每个停机位的空闲时间，并使得所有空闲时间段的离差最小化。然而，为了提升航班靠桥率，在机场实际运营中通常首先考虑将航班分配至近机位进行停靠，造成近机位上停靠航班的频率增加，近机位的机位空闲时间相对减少，远机位的机位空闲时间相对增加，这与提升机位分配方式鲁棒性的优化目标相互矛盾。

3.2 问题描述

在机场实际运营中，由于恶劣天气、机场流量控制以及地面保障工作等随机因素造成航班延误，并产生机位占用冲突使得机位分配计划不能照原计划实施的情况很多。提升机位分配方案的鲁棒性对降低随机因素对机位分配方案的影响，减少其他机场资源计划如摆渡车调度等进行过于频繁的实时调整，保证机场高效运作具有至关重要的现实意义。同时可以提升机场服务水平。

为控制航班延误传播对机位分配方案造成的影响，一个重要的方法是在分配至同机位的前后航班之间设置一定的缓冲时间，即机位空闲时间，为延误传播留下足够的缓冲空间。然而，在本文第三章建立的基于机场运行实际的机位分配模型中，为提高近乘客靠桥率，航班间的时隙被最小化，丧失了缓冲延误传播的空间，这与提高机位分配方式的鲁棒性目标有一定的矛盾。使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性是否可能呢？

在先前的研究中，提高机位分配方式的鲁棒性的一般方法是通过保持所有机位空闲时间段的均衡性以及增加航班的过站时间裕度（同机位连续航班间的机位空闲时间）从而提高机位分配方式的鲁棒性。但空闲时间段的均衡性并不能反映机位冲突概率的均衡，在机位空闲时间的具体分配上，针对性不强。且对于国内大多枢纽机场，由于航班起降过程具有短时间高密度的特征，航班延误的传播变

得更为容易，增加同机位航班的过站时间裕度，使用扩展航班过站时间窗来分配机位的策略，并不能解决机场实际运行中的存在的问题。

本章以昆明长水国际机场的实际航班数据为基础，对航班到达、起飞延误时长的分布规律进行参数估计和假设检验，得出航班到达延误以及起飞延误差异化的概率分布模型。通过分析航班随机延误对同机位连续航班机位占用冲突机理的研究，对机位冲突概率的计算公式进行推导。最后在第三章模型的基础上增加基于机位冲突概率的鲁棒性约束条件，对航班时刻表中那些最易扩散延误的敏感航班合理分配航班时隙。使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性。

3.3 基于航班延误的机位冲突概率计算方法

3.3.1 航班延误对机位分配造成影响分析

航班到达延误是指进港航班实际到港时刻（ATA）与预计到港时刻（ETA）的偏离，航班起飞延误是指离港航班实际离港时刻（ATD）与预计离港时刻（ETD）的偏离。航班随机延误对机位分配造成的影响，大致可分为以下几类情形：

（1）航班到达延误并相应的延误起飞

如图 4-1 所示，原分配至停机位的航班 $B(j)$ 其计划到港时刻（ ETA_j ）与计划离港时刻（ ETD_j ）分别为 8:40 与 9:30，过站时间为 50 分钟，但由于发生到达延误其实际到港时刻（ ATA_j ）为 9:00，过站时间保持不变的情况下实际离港时刻（ ATD_j ）为 9:50，这将与分配至同机位的紧后航班 $B(j+1)$ 在时间上发生冲突，原机位分配方案受影响，需进行停机位实时调配生成新的机位分配方案。

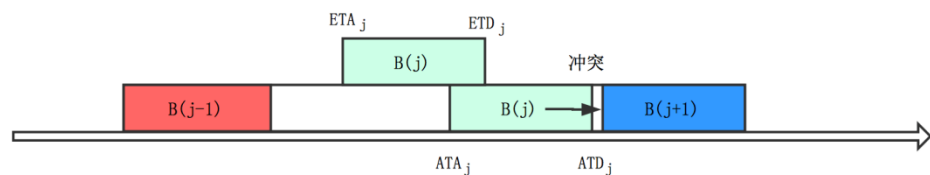


图 3-3 到达延误并造成相应的起飞延误对机位分配造成影响

Fig.3-3 The impact of arrival delay on gate assignment

（2）由于地面作业等原因造成航班起飞延误

航班已经停靠在为其分配的机位上，但由于地面作业延误等情况造成起飞延误，对分配至同一机位的后续航班造成影响。如图 4-2 所示，原分配至停机位的航班 $B(j)$ 其计划到港时刻（ ETA_j ）与计划离港时刻（ ETD_j ）分别为 8:40 与 9:

30, 过站时间为 50 分钟, 但由于由于地面作业等原因造成航班起飞延误, 其实际到港时刻 (ATD_j) 变为 9: 40, 与原分配方案中的紧后航班发生冲突, 需要对其机位进行变更操作。



图 3-4 航班起飞延误对机位分配的影响

Fig.3-4 The impact of departure delay on gate assignment

(3) 航班提前到达目的地机场

航班提前到达目的地机场, 并与分配至同机位的紧前航班在时间上冲突, 对原机位分配方案造成影响。如图 4-1 所示, 原分配至停机位的航班 $B(j)$ 其计划到港时刻 (ETA_j) 与计划离港时刻 (ETD_j) 分别为 8: 40 与 9: 30, 过站时间为 50 分钟, 但由于其提前到达目的地机场导致实际到港时刻 (ATA_j) 变为 8: 10, 这将与分配至同机位的紧后航班 $B(j-1)$ 在时间上发生冲突, 原机位分配方案受影响, 需进行停机位实时调配生成新的机位分配方案。

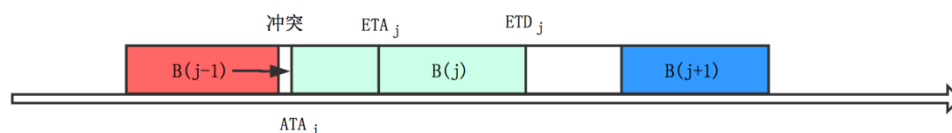


图 3-5 航班提前到达对机位分配的影响

Figure 3-5 The advance of arrival delay on gate assignment

3.3.2 航班延误时长的分布函数与参数估计

本文数据来源于昆明长水国际机场 2016 年 4 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日三个季度的实际生产运行数据, 航班记录 14 万条左右。该机场日均航班量可达 1000 架次以上, 已基本呈现饱和状态。

分别对该机场航班到达延误与起飞延误时长进行粗略统计并作出直方图进行观察, 发现航班到达延误与起飞延误的分布存在显著差异。进港航班到达延误直方图呈现出大致的对称性, 中间高、两边低, 进港航班提前到达与延误到达的航班数量大致相同; 而离港航班起飞延误直方图则呈明显右偏规律以及厚尾现象, 延迟起飞的航班数量远大于提前起飞的航班数量。这主要是由于离港航班的起飞时间依赖前行进港航班, 进港航班延迟到达目的地机场并造成相应离港航班的起

飞延误的可能性增加。鉴于这种到达延误与起飞延误时长这种明显的分布差异，我们可以假定航班的到达延误符合正态分布规律，而起飞延误符合混合正态分布规律。

1. 航班到达延误规律分析

假定航班到达延误时长服从正态分布，则：

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x \in (-\infty, +\infty) \quad (3-1)$$

式中， μ 和 σ 分别为航班到达延误时长的均值和标准差。

在众多检查总体是否符合正态分布的方法中，本文选取 JB 检验来验证样本数据是否符合正态分布， JB 检验的方法及步骤如下：

Jarque-Bera 检验简称为 JB 检验，它是利用正态分布的偏度 g_1 和峰度 g_2 ，构造一个包含 g_1 、 g_2 且自由度为 2 的卡方分布统计量 JB ，即

$$JB = n\left(\frac{1}{6}J^2 + \frac{1}{24}B^2\right) \sim \chi^2(2) \quad (3-2)$$

其中： $J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right)^3$ ， $B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right)^4 - 3$ 。

假设显著性水平为 α ，则当 JB 统计量小于 χ^2 分布的 $1-\alpha$ 分位数 $\chi^2_{1-\alpha}(2)$ 时，接受原假设，即认为总体服从正态分布；否则拒绝原假设，即认为总体不服从正态分布。这个检验适用于大样本数据。

JB 检验的检验结果为 H ，总体服从正态分布的前提条件是 $H=0$ ；若 $H=1$ ，则不能认为该总体的分布服从正态分布。

对样本数据进行参数估计的方法为极大似然法，对于单个正态分布参数，极大似然的估计方法如下：

设 X_1, X_2, \dots, X_n 为来自同一正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的随机样本， x_1, x_2, \dots, x_n 为其观测值。则其似然函数为：

$$L = L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta) \quad (3-3)$$

式 (3-3) 中， $L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta)$ 是观测值 x_1, x_2, \dots, x_n 而参数 θ 未知的似然函数的一般写法， $p(x_i; \theta)$ 是其概率密度函数：

$$p(x_i; \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-4)$$

将 (3-4) 代入 $p(x_i; \theta)$ 得到：

$$L = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^n e^{-\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-5)$$

所谓极大似然估计，就是 μ 和 σ 的估计值 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 以满足 L 最大为唯一条件，为便于计算，对式 (3-5) 取自然对数，得到：

$$\ln L = -\frac{n}{2}(\ln \sigma^2 + \ln 2\pi) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_i (x_i - \mu)^2 \quad (3-6)$$

对 (3-6) 中的 $\ln L$ 取极大，并对 μ 和 σ^2 取偏导数得到：

$$\begin{cases} \sum_i (x_i - \mu) = 0 \\ \frac{-n}{2\sigma^2} + \frac{1}{2(\sigma^2)^2} \sum_i (x_i - \mu)^2 = 0 \end{cases} \quad (3-7)$$

于是解得 μ 和 σ^2 的极大似然估计值为：

$$\hat{\mu} = \sum_i x_i / n \quad \hat{\sigma} = \sqrt{(\sum_i (x_i - \mu)^2) / n} \quad (3-8)$$

因此，对航班到达延误时长的分布规律的研究分为以下几步：

Step1: 对样本数据进行 *JB* 检验并判断总体是否服从正态分布。若 $H=0$ ，则判定总体服从正态分布；若 $H=1$ ，则可以否定总体服从正态分布。

Step2: 采用极大似然估计法对总体分布进行参数估计，得到其概率密度函数的相关参数取值。

Step3: 采用 χ^2 拟合优度检验法进行假设检验。当 $H_0=0$ 时表示假设成立； $H_0=1$ 表示拒绝原假设。显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

航班到达延误概率密度函数估计实验在 Matlab7.1 平台上进行，以某航班为例，首先对航班到达延误的样本数据作 *JB* 检验，得到 $H=0$ 。因此判定航班到达延误总体服从正态分布，并采用极大似然估计法进行参数估计，得到其概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{7.8489\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.1749)^2}{2*(7.8489)^2}} \quad (3-9)$$

式中， x —航班到达延误时长；

$f(x)$ —概率密度函数；

采用 χ^2 拟合优度检验法对以上结论进行检验，得到 $H=0$ ，证明航班到达延误时长服从正态分布。拟合结果如图 3-6 所示，其中，航班到达延误为负表示为相对于计划到港时间提前到达，为正则表示相对于计划到港时间延迟到达。

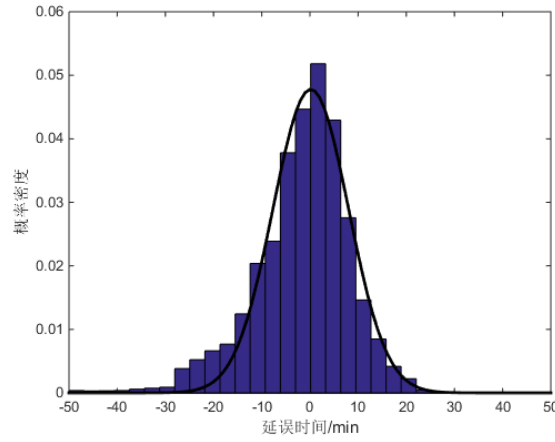


图 3-6 航班到达延误时长分布图

Fig.3-6 The flight arrival delay distribution diagram

2. 航班起飞延误规律分析

假定航班起飞延误时长服从混合正态分布：

$$\phi(x) = \rho\phi_1(x) + (1-\rho)\phi_2(x) \quad (3-10)$$

这里 ρ 为 0 到 1 之间的实数， $\phi_i (i=1,2)$ 为以 μ_i 为均值， σ_i^2 为方差的正态分布概率密度函数。因此， x 以 ρ 的概率服从以 $\phi_1(x)$ 为密度函数的正态分布，以 $1-\rho$ 的概率服从以 $\phi_2(x)$ 为密度函数的正态分布。混合正态分布的最大似然估计方法如下所示：

设 X_1, X_2, \dots, X_n 为来自同一分布的随机样本， x_1, x_2, \dots, x_n 为其观测值。则其似然函数为：

$$L = L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta) = \prod_{i=1}^n \left[\sum_j \rho_j * p(x_i; \theta) \right] \quad (3-11)$$

式 (3-11) 中， $L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta)$ 是观测值 x_1, x_2, \dots, x_n 而参数 θ 未知的似然函数的一般写法， $p(x_i; \theta)$ 是其单个正态分布的概率密度函数：

或：

$$\ln L = \sum_i \ln \left[\sum_j \rho_j * p_j(x_i; \theta) \right] \quad (3-12)$$

为使 (3-12) 极大，一般采取一种快捷且易于计算的 EM 算法通过迭代循环来进行逼近，EM 算法是一种迭代方法，主要用来求解验后分布的众数（即极大似然估计），它的每一次迭代由两步组成：E 步（求期望）和 M 步（极大化）：

E 步：在给定 t 轮参数 $\theta^t = (\rho_j^{(t)}, \mu_j^{(t)}, \sigma_j^{2(t)})$ 的条件下，计算每一 x_i 属于第 j 正态分布的条件概率 $\omega_{ij}^{(t)}$ ：

$$\omega_{ij}^{(t)} = \rho_i^{(t)} p_i^{(t)} / \sum_j \rho_j^{(t)} p_j^{(t)} \quad (3-13)$$

M 步: $\omega_{ij}^{(t)}$ 和 x_i , 给出 θ^{t+1} 的极大似然估计:

$$\rho_j^{(t+1)} = \omega_{j\cdot}^{(t)} / n \quad \omega_{j\cdot}^{(t)} = \sum_i \omega_{ij}^{(t)} \quad (3-14)$$

$$\mu_j^{(t+1)} = \sum_i \omega_{ij}^{(t)} x_i / \omega_{j\cdot}^{(t)} \quad (3-15)$$

$$\sigma_j^{2(t+1)} = \sum_i \omega_{ij}^{(t)} (x_i - \mu_j^{(t+1)})^2 / n \quad (3-16)$$

将 (3-14) 到 (3-16) 的结果代入 (3-13) 又可得 $\omega_{ij}^{(t+1)}$, 将 $\omega_{ij}^{(t+1)}$ 和 x_i 代入式 (3-14) 到 (3-16) 又可得 $\theta^{(t+2)}$,。如此将 E 步和 M 步迭代循环, $\ln L$ 将逐步收敛, 当达到某一收敛标准, 则计算结束, 所得 θ 即为有关参数的极大似然估计。

由于一般正态分布的检验方法并不能用于检验混合正态分布, 本文采用下述方法对其进行检验, 操作流程如下所示:

Step1: 确定概率区间 $[p_1, p_2]$;

Step2: 根据给定概率区间, 在 Matlab 中利用 norminv() 函数计算每个正态混合成分的延误时间区间 $[a_i, b_i] = \text{norminv}([p_1, p_2], \mu_i, \sigma_i)$;

Step3: 对混合正态分布的延误时间区间进行计算 $[a, b]$, 其中 $a = \sum_i \rho_i a_i$, $b = \sum_i \rho_i b_i$;

Step4: 在测试数据上计算属于区间 $[a, b]$ 的值所占的比例。

因此, 对于离港航班起飞延误时长分布函数的估计, 采取交叉验证对其进行检验, 首先将数据分为训练数据和测试数据, 利用 EM 算法在训练集上对模型进行参数估计, 然后在测试集上验证混合正态分布概率密度函数模型的泛化能力。根据上述方法对起飞延误时长的 2 阶混合正态分布模型进行估计, 得到了, 拟合后的概率密度分布函数为:

$$f(x) = 0.4911 \frac{1}{6.4029\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0.2554)^2}{2*(6.4029)^2}} + 0.5089 \frac{1}{14.9624\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-15.33)^2}{2*(14.9624)^2}} \quad (3-17)$$

式中, x —航班到达延误时长;

$f(x)$ —概率密度函数;

本文取 $P=90\%$, $[p_1, p_2]=[0.05, 0.95]$ 以及 $P=80\%$, $[p_1, p_2]=[0.1, 0.9]$ 两种情况, 对模型的泛化能力进行检验, 检验结果如表 3-1 所示:

表 3-1 航班起飞延误时长概率密度模型泛化能力检验结果

Table 3-1 The generalization results of the delay probability density models

阶数	P	
	90%	80%
2	92.17%	85.65%

二阶混合正态分布的拟合结果如图 3-7 所示。

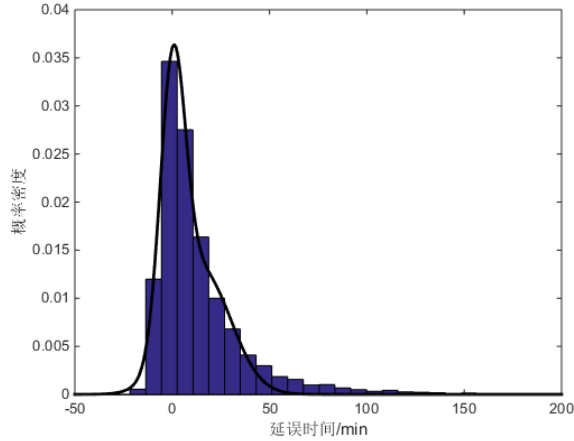


图 3-7 航班起飞延误时长分布图

Fig.3-7 The flight departure delay distribution diagram

3.3.3 同机位航班冲突概率计算方法

为计算分配至同一机位的前后 2 航班的冲突概率，如下图 3-8 所示，在机位分配计划中，航班 1 和航班 2 为分配至同一机位的航班，假定航班 1 先进入机位，计划于 ETA_1 时刻进港，进行相关地面作业后于 ETD_1 时刻离港，若用 t_1^a 和 t_1^d 分别表示航班 1 的到达延误和起飞延误，则其到达延误和起飞延误的概率密度函数为 $f_1^a(t_1^a)$ 和 $f_1^d(t_1^d)$ 。经过一段时间间隔后，航班 2 后进入机位，假定航班 2 计划于 ETA_2 时刻进港，进行相关地面作业后于 ETD_2 时刻离港，若用 t_2^a 和 t_2^d 分别表示航班 2 的到达延误和起飞延误，则其到达延误和起飞延误的概率密度函数分别为 $f_2^a(t_2^a)$ 和 $f_2^d(t_2^d)$ 。如图 3-8 所示，在航班 1 的实际起飞时间大于航班 2 的实际到达时间，即 $ETA_1 + t_1^d > ETA_2 + t_2^a$ 时，航班 1 和航班 2 发生冲突。

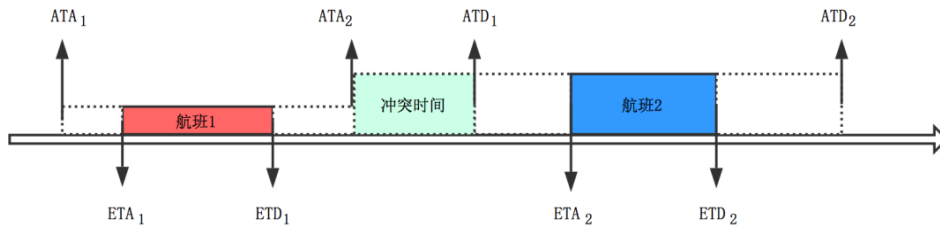


图 3-8 同机位连续航班冲突示意图

Fig.3-8 The gate occupation confliction

则航班 1 和航班 2 发生冲突的概率 $P(\text{conflict})$ 为：

$$\begin{aligned}
P(\text{conflict}) &= P(ETA_2 + t_2^a < ETD_1 + t_1^d) \\
&= P(t_2^a - t_1^d < ETD_1 - ETA_2)
\end{aligned} \tag{3-18}$$

假设 $X = t_2^a - t_1^d$ ，则 X 的分布函数为：

$$\begin{aligned}
F_X(x) &= P(X \leq x) \\
&= \iint_{t_2^a - t_1^d \leq x} f(t_2^a, t_1^d) dt_2^a dt_1^d
\end{aligned} \tag{3-19}$$

又由于航班 1 和航班 2 相互独立，因此航班 1 的起飞延误和航班 2 的到达延误事件也相互独立， t_2^a, t_1^d 的联合概率密度函数 $f(t_2^a, t_1^d) = f(t_2^a)f(t_1^d)$ ，则式 (3-19) 可以写为：

$$F_X(x) = \iint_{t_2^a - t_1^d \leq x} f(t_2^a)f(t_1^d) dt_2^a dt_1^d \tag{3-20}$$

以 4.2.2 节中航班到达延误和起飞延误分布规律为例，即航班到达延误符合正态分布，航班起飞延误符合混合正态分布，则：

$$f(t_2^a) = \phi_2(t_2^a : \mu_2, \sigma_2^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(t_2^a - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \tag{3-21}$$

$$\begin{aligned}
f(t_1^d) &= \rho\phi_{11}(t_1^d : \mu_{11}, \sigma_{11}^2) + (1-\rho)\phi_{12}(t_1^d : \mu_{12}, \sigma_{12}^2) \\
&= \rho \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{11}} e^{-\frac{(t_1^d - \mu_{11})^2}{2\sigma_{11}^2}} + (1-\rho) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{12}} e^{-\frac{(t_1^d - \mu_{12})^2}{2\sigma_{12}^2}}
\end{aligned} \tag{3-22}$$

将式 (3-21) 及式 (3-22) 带入式 (3-20) 得到：

$$F_X(x) = \rho \iint_{t_2^a - t_1^d \leq x} \phi_2(t_2^a)\phi_{11}(t_1^d) dt_2^a dt_1^d + (1-\rho) \iint_{t_2^a - t_1^d \leq x} \phi_2(t_2^a)\phi_{12}(t_1^d) dt_2^a dt_1^d \tag{3-23}$$

又根据定理：对于 n 个独立正态随机变量，若 $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2) (i=1, 2, \dots, n)$ ，且它们相互独立，则它们的差 $Z = X_1 - X_2 - \dots - X_n$ 仍然服从正态分布，且有 $Z \sim N(\mu_1 - \mu_2 - \dots - \mu_n, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2)$ ，因此对式 4-23 两边求导得：

$$f(x) = \rho \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_2^2}} e^{-\frac{(x - \mu_2 + \mu_{11})^2}{2\sigma_{11}^2 + 2\sigma_2^2}} + (1-\rho) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_2^2}} e^{-\frac{(x - \mu_2 + \mu_{12})^2}{2\sigma_{12}^2 + 2\sigma_2^2}} \tag{3-24}$$

因此：

$$\begin{aligned}
F_X(x) &= \iint \rho \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_2^2}} e^{-\frac{(x - \mu_2 + \mu_{11})^2}{2\sigma_{11}^2 + 2\sigma_2^2}} dx + \iint (1-\rho) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_2^2}} e^{-\frac{(x - \mu_2 + \mu_{12})^2}{2\sigma_{12}^2 + 2\sigma_2^2}} dx \\
&= \rho * \Phi\left(\frac{x - \mu_2 + \mu_{11}}{\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_2^2}}\right) + (1-\rho) * \Phi\left(\frac{x - \mu_2 + \mu_{12}}{\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_2^2}}\right)
\end{aligned} \tag{3-25}$$

由上式可得，指派至同一机位的两连续航班间发生时间冲突的概率不仅与 2 航班间的机位空闲时间有关，还取决于这 2 个航班的延误分布。且前后两航班发生机位冲突的概率可用下式计算：

$$\begin{aligned}
 P(\text{conflict}) &= F_x(ETD_1 - ETA_2) \\
 &= \rho * \Phi\left(\frac{ETD_1 - ETA_2 - \mu_2 + \mu_{11}}{\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_2^2}}\right) + (1 - \rho) * \Phi\left(\frac{ETD_1 - ETA_2 - \mu_2 + \mu_{12}}{\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_2^2}}\right)
 \end{aligned}
 \quad (3-26)$$

式(3-26)中 $ETD_1 - ETA_2$ 即为分配至同一机位两连续航班间的时间间隔的相反数, 若以 4.2.2 节中拟合得到的航班到达延误和起飞延误分布规律为例, 设置空闲时间间隔从 0 分钟增加至 50 分钟, 带入式(3-26)进行计算得到冲突概率和空闲时间间隔的关系如表 3-2 所示, 冲突概率和空闲时间间隔的关系如图 3-9 所示。

如图 3-9 所示, 同机位连续航班的空闲时间间隔从 1 分钟到 15 分钟时, 冲突概率变化了 0.343, 同机位冲突概率随空闲时间增加下降较为显著; 从 15 分钟到 30 分钟, 冲突概率变化了 0.194, 同机位冲突概率随空闲时间增加下降幅度变小; 随着空闲时间继续增加, 同机位冲突概率随空闲时间增加变化的显著程度进一步降低。

表 3-2 同机位连续航班空闲时间 (min) 与机位冲突概率关系表

Table 3-2 The relation for the buffer time (min) and the gate occupation confliction probability

空闲时间	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
冲突概率	0.634	0.606	0.579	0.551	0.524	0.497	0.470	0.445	0.420	0.396
空闲时间	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
冲突概率	0.373	0.351	0.330	0.310	0.291	0.273	0.256	0.239	0.224	0.209
空闲时间	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
冲突概率	0.195	0.182	0.169	0.157	0.146	0.135	0.125	0.115	0.106	0.097
空闲时间	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
冲突概率	0.089	0.082	0.074	0.068	0.061	0.055	0.050	0.045	0.040	0.036
空闲时间	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
冲突概率	0.032	0.029	0.025	0.022	0.020	0.017	0.015	0.013	0.011	0.009

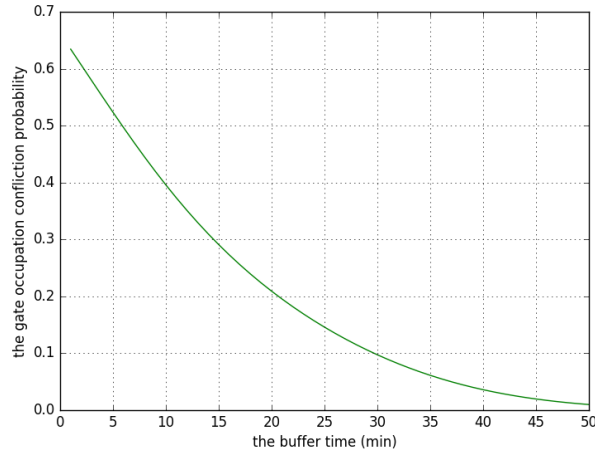


图 3-9 同机位连续航班空闲时间（min）与机位冲突概率关系图

Fig.3-9 The relation for the buffer time (min) and the gate occupation conflict probability

3.4 基于冲突概率的停机位分配鲁棒性设计

3.4.1 基于冲突概率的停机位分配鲁棒性设计

第二章模型通过设置同机位最小安全时间间隔来吸收航班的实时随机延误，但由于不同航班在航班延误分布上的差异，同机位连续航班间空闲时间大小并不能完全反映两个航班可能实际面临的机位冲突的大小。因此，本文在第二章模型的基础上，根据机位冲突概率理论增加机位分配鲁棒性约束条件，使得优化后的航班计划在实施过程中具有较好的抗延误特性，保持机位计划的稳定性。

为了避免由于恶劣天气、机场流量控制以及地面保障工作等随机因素造成航班延误，并产生机位占用冲突使得机位分配计划不能照原计划实施，提升机位分配方式的鲁棒性，本文做了如下处理：规定分配至同一个机位相邻航班之间的最大冲突概率 r 来避免冲突的发生，根据机场的实际情况不同， r 可取 0.05 或 0.1 等不同取值。对于分配至同一机位上的航班 i 与航班 j ， $Conflict_{ij}$ 表示这两个航班可能实际面临的机位冲突概率的大小，计算公式见式（3-26）。则只要满足 $Conflict_{ij} \leq r$ ，就能避免可能发生的机位占用冲突。

引入中间变量 R_{ij} 来表示航班 i 与航班 j 的机位冲突概率 $Conflict_{ij}$ 与 r 的大小关系，若 $Conflict_{ij} \geq r$ 则为 1，否则为 0。则机位分配鲁棒性约束条件可表达为冲突概率大于 r 的两航班不能分配至同一机位。该约束的数学表达为：

$$x_{ik} + x_{jk} \leq 1 \quad \forall R_{ij} = 1, \forall i, j \in F, \forall k \in G \quad (3-27)$$

3.4.2 数据定义

1. 输入变量

在基于冲突概率的停机位分配鲁棒性模型中，输入变量与 2.2.2 节大致相同，但需要通过对各航班历史数据的分析，依据 3.3.2 节方法对各航班数据进行预处理从而得到航班实际起降时刻与计划起降时刻偏差分布规律，最后将各航班的到达延误时长以及起飞延误时长的概率密度函数模型的相关参数添加至模型的输入变量中。因此，需要增加的相关参数如下表所示：

表 3-3 输入变量

Table 3-3 Input variables.

输入变量符号	表达含义
r	同机位连续航班间的允许最大冲突概率
μ_i^a	航班 i 的到达延误概率密度函数模型参数——均值, $i \in F$
σ_i^a	航班 i 的到达延误概率密度函数模型参数——标准差, $i \in F$
μ_i^{d1}	航班 i 的起飞延误概率密度函数模型参数——第一个混合分支均值, $i \in F$
σ_i^{d1}	航班 i 的起飞延误概率密度函数模型参数——第一个混合分支标准差, $i \in F$
μ_i^{d2}	航班 i 的起飞延误概率密度函数模型参数——第二个混合分支均值, $i \in F$
σ_i^{d2}	航班 i 的起飞延误概率密度函数模型参数——第二个混合分支标准差, $i \in F$
ρ	航班 i 的起飞延误概率密度函数模型参数——第一个混合分支权重, $i \in F$

2. 中间变量

在基于冲突概率的停机位分配鲁棒性模型中，中间变量与 2.2.2 节大致相同。但由于第 2 章模型是通过设置分配至同机位连续航班间的最小安全时间间隔来吸收航班的实时随机延误，提升机位分配方式的鲁棒性，并不能完全反映 2 个航班可能实际面临的机位冲突的大小。而本章模型则是通过对航班延误的分布规律进行量化研究，通过控制同机位连续航班的机位冲突概率从而提升机位分配方式的鲁棒性。因此，需要增加或改变的相关参数如下表所示：

表 3-4 输入变量

Table 3-4 Input variables.

输入变量符号	表达含义
R_{ij}	假设航班 i 与航班 j 分配至同一机位时，若其机位冲突概率 $\leq r$ ，则为 1，否则为 0

3. 决策变量

基于冲突概率的停机位分配鲁棒性模型中的决策变量与 2.2.2 节相同，在此不进行赘述。

3.4.3 模型建立

模型优化目标与第二章式 (2-1) 相同, 除了第二章约束条件式 (2-2) 以及式 (2-4) ~ 式 (3-14) 外, 本章模型创新性地增加基于冲突概率的机位鲁棒性约束条件来提升机位分配方式的鲁棒性, 使得优化后的航班计划在实施过程中具有较好的抗延误特性, 保持机位计划的稳定性。

因此, 基于冲突概率的停机位分配鲁棒性模型的数学表达如下:

$$\max \frac{\sum_{k=1}^{n_g} \sum_{i=1}^{n_f} x_{ik} f_k^{bridge} N_i^p}{\sum_{i=1}^{n_f} N_i^p} \quad (3-28)$$

$$\sum_{k=1}^{n_g} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in F, \forall k \in E \quad (3-29)$$

$$x_{ik} + x_{jk} \leq 1 \quad \forall R_{ij} = 1, \forall i, j \in F, \forall k \in G \quad (3-30)$$

$$x_{ik} = 0 \quad \forall Q_{ik} = 0, \forall i \in F, \forall k \in G \quad (3-31)$$

$$x_{ik} + x_{jl} \leq 1 \quad \forall N_{kl} = 1, \forall M_{ij} = 0, \forall i, j \in F, \forall k, l \in G \quad (3-32)$$

$$x_{ik} + x_{jk} \leq 1 \quad \forall N_{kl} = 1, \forall P_{ij} = 1, \forall i, j \in F, \forall k, l \in G \quad (3-33)$$

$$x_{ik} = 0 \quad \forall k \in \left\{ k \mid x'_{ik} = 0 \text{ 且 } f_k^{bridge} = 0 \right\}, \forall i \in F_d \quad (3-34)$$

$$x_{ik} = 0 \quad \forall k \in \left\{ k \mid x'_{ik} = 1 \text{ 且 } f_k^{bridge} = 1 \right\}, \forall i \in F_d \quad (3-35)$$

$$x_{ik} B_{ij} + x_{jl} B_{ij} \leq 1 \quad \forall g_k = g_l, \forall i, j \in F, \forall k, l \in G \quad (3-36)$$

其中, 式 (3-29) 表示唯一性约束, 即对于每个进出港航班必须且仅能分配一个停机位; 式 (3-30) 表示机位分配鲁棒性约束条件, 即不允许两架以上冲突概率大于 r 的航班分配至同一停机位; 式 (3-30) 表示匹配性约束, 即飞机机型与停机位可容纳机型相互匹配, 飞机的国际国内属性与停机位的国际国内属性相互匹配; 式 (3-32) 表示滑入推出冲突、双出冲突、和双推冲突约束, 飞机在推出以及滑入机位的过程中, 可能与相邻机位上的飞机产生冲突, 为了避免这三种冲突, 两架分配在相邻机位上准备推出的飞机, 其推出时间间隔应大于等于最小安全时间间隔; 同理, 对于两架分配在相邻机位的飞机, 其滑入机位的时间间隔, 以及一架滑入机位时间与另一架推出机位的时间间隔应小于最小安全时间间隔; 式 (3-33) 表示相邻机位机型限制约束。即机型冲突的航班对不能同时分配至相邻机位; 式 (3-33), (3-36) 表示飞机拖曳约束, 为了提高机位分配的靠桥效益, 对于停场过夜航班, 如果当天停靠近机位, 则第二天的始发航班安排在同一近机位; 如果当天停靠远机位, 第二天的始发航班只能拖曳至有空闲的廊桥机位或安排在同一远机位。式 (3-37) 表示登机口冲突约束, 考虑到在机场实际运作中存在多个机位共

用登机口的情况，且旅客下机、登机对登机口具有空间上和时间上的独占性，因此不允许两架以上登机口占用时间范围冲突的航班对分配至登机口相同的停机位；

3.5 本章小结

本章首先就机位分配的鲁棒性进行综述，包括机位分配鲁棒性的定义、既有研究中提升机位分配鲁棒性的一般方法；

其次介绍了停机位分配鲁棒性设计中待解决的问题，提出本文旨在建立机位分配鲁棒性模型使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性；

最后建立基于冲突概率的机位分配鲁棒性分配模型。首先分析航班延误对机位分配方案造成的影响，接下来根据航班到达延误以及起飞延误的差异化分布特征，以历史航班数据为基础，采用概率论数理统计相关分析方法建立航班到达延误以及起飞延误的概率分布密度函数模型，通过分析航班随机延误对同机位连续航班机位占用冲突机理的研究，推导出同机位连续航班间冲突概率计算公式。最后在第 3 章模型的基础上增加基于机位冲突概率的鲁棒性约束条件，建立基于冲突概率的机位分配鲁棒性分配模型，对航班时刻表中那些最易扩散延误的敏感航班合理分配航班时隙。使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性。

4 模型求解

本文第2章和第3章分别建立了停机位调度的多目标数学优化模型。经证明，该问题一个大规模复杂的组合优化问题，由于精确算法不可避免会导致维数灾难的发生，因此多项式时间的算法难以用于求解此类问题。目前，出现了许多智能优化算法或启发式算法，此类算法能够十分迅速的给出一个逼近最优解的近似解。与此同时，上述算法能够十分有效地应对包含组合优化问题在内的NP问题。通过对模型进行深入分析，本章对传统的遗传算法进行了改进，设计改进后的免疫遗传算法求解该模型，使得该算法在兼顾全局和局部搜索能力提高的基础上，同时拥有了更快的寻优速度。本章首先对遗传算法及免疫遗传算法进行了介绍，然后细致地论述了改进免疫遗传算法在求解优化模型时的具体过程。

4.1 遗传算法

4.1.1 遗传算法简介

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种模拟生物进化过程的智能仿生算法，通过采用“优胜劣汰、适者生存”的进化规则从解区间中求算出最优的解。该算法的基本过程是从初始种群出发，通过选择、交叉和变异等遗传操作，迭代产生新的子代，并以个体适应度为指导，依照生物进化中适者生存的准则，不断地逼近解区间内的最优解^[28]。

下面介绍一下遗传算法中常用的术语：

- (1) 染色体：又被称为基因型个体(individuals)，一定数量的个体组成了群体(population)，群体中所包含的个体的数目称为群体大小。
- (2) 基因：指的是待解问题所提供的候选解；
- (3) 初始种群：根据编码规则，从解空间中随机生成个体所构成的种群；
- (4) 适应度函数：反映抗体在接下来操作中存活的概率；
- (5) 遗传算子：反映对最佳抗体基因的估计。

4.1.2 遗传算法基本操作及流程

遗传算法的运算从开始到结束需要很繁琐的计算，所以我们要对算法的流程

进行梳理，遗传算法主要由以下几个步骤组成^[29]：

- (1) 首先根据实际问题，确定优化问题的目标函数及约束条件，以及解的形式；
- (2) 建立优化模型，即确定出目标函数及其数学描述方式；
- (3) 给出染色体的编码方法，即给出个体的基因型及搜索空间；
- (4) 确立解码方法，实现基因型与表现型的相互转换；
- (5) 给出个体适应度的评价方法，建立目标函数值与个体适应度的转换关系
- (6) 遗传算子的具体操作方法，即给出包含选择、交叉、变异等在内的遗传算子的详细操作过程；
- (7) 确定遗传算法中的运行参数。

图 4-1 是基本免疫遗传算法的流程图。由图 4-1 可以看出遗传算法是从潜在解集中的一个初始种群开始，依照“优胜劣汰、适者生存”的生物进化准则，不断地演化出更优的解。在每一代种群中，参考个体的适应度来对个体进行筛选，紧接着借助交叉和变异算子，产生出更加适应环境的新种群。迭代地重复上述过程，并解码最后一代种群中的最优个体，作为问题的最优或近似最优解。

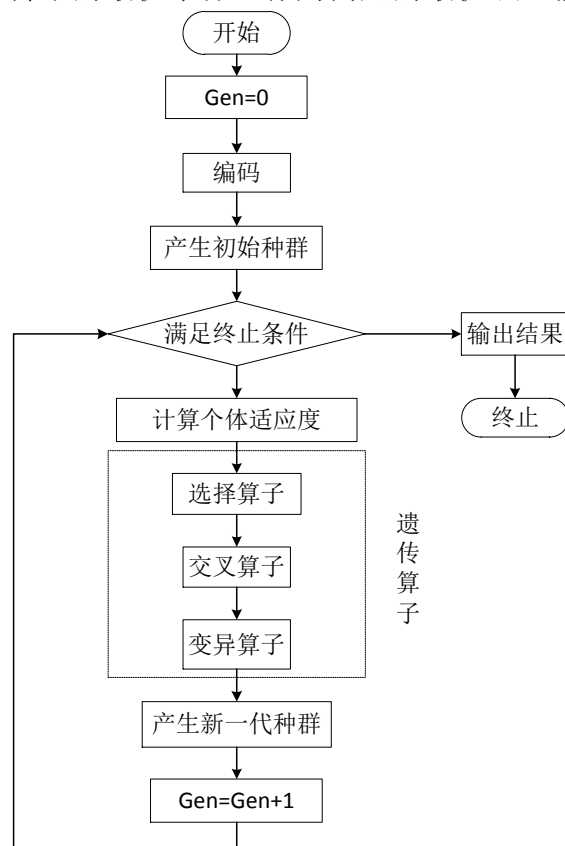


图 4-1 基本遗传算法流程图

Fig.4-1 The basic genetic algorithm flow

4.1.3 遗传算法特点及应用

遗传算法的特点主要包括以下几方面^[30]:

(1) 编码化的工作方式。遗传算法通过将实际问题的求解转换为对编码后种群个体的操作,没有固定的结构和参数,可操作性强。这种编码式的工作方式,使得遗传算法对于各种复杂优化问题都有着很好的适用性。

(2) 遗传算法以概率性传递规则代替确定性规则对种群中的个体进行传递,使得种群的个体逼近能够朝着最优解方向逼近。相较于精确性求解算法,在非连续多最值问题的求解上具有明显优势。

(3) 遗传算法以概率性传递规则代替确定性规则对种群中的个体进行传递,使得种群的个体逼近能够朝着最优解方向逼近。相较于精确性求解算法,在非连续、非可微、多最值问题的求解上具有明显优势。

(4) 遗传算法采用适应度函数 $Fit(x)$ 对种群中个体的优劣进行评估和判断,同时对种群中多个个体进行操作,使得遗传算法可以并行搜索多个峰值,具有较好的全局搜索能力和良好的全局收敛能力。

(5) 遗传算法采用适应度函数 $Fit(x)$ 作为评估标准进行算法的寻优操作,这使得遗传算法不局限与线性模型,在非线性模型的寻优求解上具有明显的优势。

相较于传统优化算法,遗传算法在应用范围和求解时间上有不可比拟的优势。但作为一种优化算法,遗传算法在应用与实践的过程中也其自身的局限性。例如:在求解单最值优化问题中,采用基本遗传算法求解时在算法的运行早期往往表现良好,但在算法不断逼近最优值得过程中,随着种群中最优个体的适应度不断接近接近最值,算法的收敛速度也逐渐变慢。此外,在求解多最值优化问题时,基本遗传算法容易出现未成熟早收敛现象,使得算法求解过早地陷入局部最优的情况。通过对上述问题进行分析,发现产生上述现象的原因主要在于种群多样性的不断降低,会使得算法的搜索范围不断缩小,从而引发收敛过慢甚至局部最优的情况发生。因此,许多学者针对上述问题也对遗传算法进行了适当的改进和优化,其改进和优化策略主要包括:与其他智能优化算法相结合、采用自适应的交叉概率和变异概率提高算法收敛速度、采取多种群策略提升种群多样性从而避免陷入局部最优等。

4.2 免疫遗传算法

4.2.1 免疫遗传算法简介

生物免疫系统的基本机制是指生命体在受到抗原性异物后，免疫系统通过识别抗原并产生相应的抗体来抵御外来抗体的入侵。免疫算法就是通过对生物免疫系统进行模拟，实现类似于生物免疫过程中识别抗原、细胞分化、记忆及自我调节等功能。

基本免疫遗传算法基于生物免疫系统的基本机制，在遗传算法的基础上对其进行优化，通过增加抗体的增强与抑制步骤，克服了遗传算法容易出现不成熟收敛的缺陷，提升了抗体种群的多样性，加快算法的收敛速度，使得抗体不断朝着最优解的方向进化。

下面介绍一下基本免疫遗传算法中常用的术语和概念：

- (1) 抗原：待解决的问题及其约束条件；
- (2) 抗体：优化问题的候选解；
- (3) 抗体与抗原间的亲和力：反映的是问题与所给解相匹配的程度；
- (4) 抗体与抗体间的亲和度：表示抗体之间的相似性；
- (5) 抗体的生存力：表达抗体在免疫遗传算法中生存下来的概率；
- (6) 疫苗：种群中的最佳个体。

4.2.2 免疫遗传算法流程

基本的免疫遗传算法由 5 个主要步骤组成：

Step 1: 抗原识别。将待解决的实际问题转化为免疫系统处理中的抗原形式。

Step 2: 生成初始抗体群体。把抗体的种群定义为问题的解，从解空间中随机生成初始抗体群体。

Step 3: 计算抗原与抗体的亲和力，并将其作为对问题解的评价标准，亲和力越高，解的质量越高。

Step 4: 抗体的促进与抑制作用。为了维持种群的多样性，优先选择与抗原亲和力较好的抗体，并对大量出现的相同抗体进行控制。通过计算抗体与抗体之间的亲和度，从而计算抗体浓度，以实现抗体间的促进和抑制。

Step 5: 抗体的记忆库功能。抗体的记忆库功能是为了保存父代优秀抗体，保持解得优良性且不产生退化解。

Step 6: 产生新抗体。通过选择、交叉、变异和免疫算子，产生新的抗体进入下一代。此时若达到终止条件，则结束整个过程并输出最优结果；反之转 Step 2。

基本免疫算法的算法流程见图 4-2。

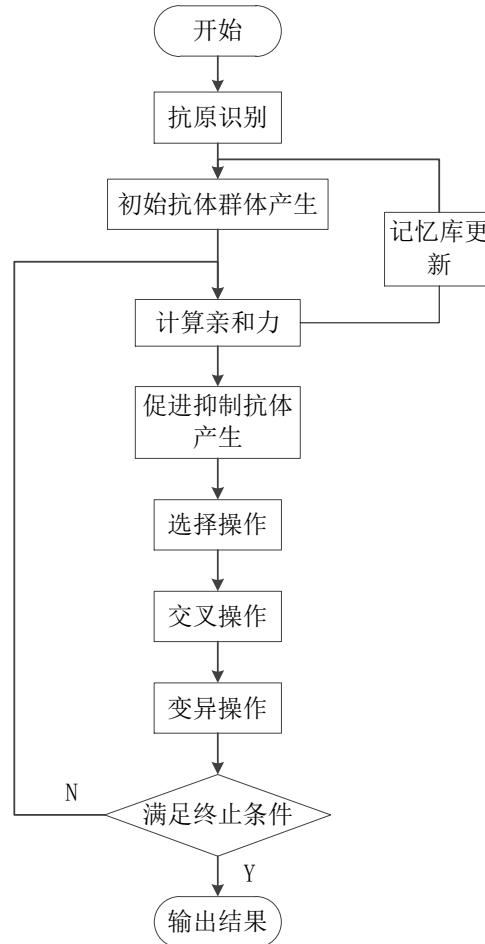


图 4-2 基本免疫算法流程图

Fig.4-2 The basic immune algorithm flow

4.2.3 免疫遗传算法特点

免疫遗传算法的优势和特点包括：

1. 通过抗体的促进与抑制步骤提升抗体种群多样性。以抗体浓度为参考指标，对高浓度的抗体抑制，并相应的对低浓度的抗体进行促进。通过上述操作，提高免疫优化算法的局部搜索能力，加快收敛速度，增强抗体对于环境的适应能力。

2. 通过记忆库功能加快算法收敛、在群体进化过程中，由于选择、交叉、变异等遗传操作的随机性有可能使得当前种群中较优的抗体结构被破坏，这会对免疫遗传算法的运行效率以及收敛性造成不利的影响。为了避免这一问题，可以设计记忆库功能，使得较优的抗体免于遭到交叉、变异算子的破坏，将亲和力好的个体保留到下一代，加快算法的收敛速度。此外，记忆库还可以为同类问题提供优质的初始群体，加快速最优解的收敛。

3. 免疫遗传算法是对遗传算法的继承和改良, 具有遗传算法的优点。通过选择、交叉和变异等遗传操作, 迭代产生新的抗体种群, 并以个体生存力为指标, 依照“优胜劣汰、适者生存”的进化准则, 最终得到最优解。

4.3 改进免疫遗传算法求解机位分配问题

由于基本免疫遗传算法是单种群设计, 所以易陷入局部; 固定不变的交叉算子和变异算子会使得算法不能根据群体的实际情况实时进行调整, 难以得到满意的优化效果。根据机位分配模型的特点, 本文在对其他学者对免疫遗传算法改进策略进行总结并归纳的基础上, 对免疫遗传算法提出以下几点优化策略, 主要包括:

(1) 多种群设计。通过迁移算子引入各子种群的较优抗体, 能够提升种群多样性, 避免种群陷入局部最优, 提升最优解的质量。

(2) 记忆库的设计。引入记忆库功能保留较优的个体, 能够避免抗体退化现象的发生, 提升算法收敛速度。

(3) 设计自适应交叉概率。在免疫遗传算法的前 n 代, 采用较大的固定交叉概率以维持种群多样性, 增强全局搜索能力。到进化后期, 则根据当前个体分布及种群多样性情况确定下一代种群的交叉概率, 增强算法的局部搜索能力, 加快算法收敛速度。

(4) 机位分配模型约束的处理方法。首先, 对于初始抗体群体的生成, 设计启发式算法生成单个抗体以提高初始抗体群体中可行解的概率。此外, 由于遗传过程的随机性, 经过交叉操作产生的子代抗体有可能与约束条件冲突, 导致个体不可用, 进而使得算法寻优效率急剧降低。因此, 为提高算法的收敛速度, 本文对交叉操作后产生的每一个抗体都通过变异操作进行调整, 大大提升其成为可行解的概率。

4.3.1 算法设计

(1) 抗体编码设计

常用的抗体编码方式多为 0-1 二进制编码, 然而在机位分配问题中, 随着航班数量和机位数量的增多, 采用二进制编码会使得个体基因长度和算法搜索范围急剧增长, 且不利于抗体亲和力的计算和交叉、变异算子的操作。故本文采用实数编码, 首先将 N 个配对航班按进港时间排序, 采用 N 维整数数组来表示这 N 个配对航班在 K 个停机位的分配结果, 其中第 i 个基因的含义为第 i 个配对航班所占用

的机位编号。例如抗体编码 5 2 3 1 2 4 5 1 表示 8 个配对航班在 5 个停机位上的机位分配方案:第 1 架航班分配至 5 号机位,第二架配对航班分配至 2 号机位……该抗体编码方式可直接表示机位分配问题的解,且在优化求解完成后,可以很方便地转化为甘特图为机位分配人员提供决策。

(2) 初始抗体群体生成

在机位分配过程中,配对航班之间相互影响制约,航班能否停靠机位受到该机位的停机位空闲状态制约,而机位空闲状况由指派到该机位的前后航班决定。因此在抗体编码过程中,一个基因的取值受到其之前的基因取值的影响,与其后的基因取值也存在一定的制约关系。除此之外,每个航班的可能停机位分配集合还收到机位可容纳机型、机位的国际/国内属性等其他限制条件的影响。这些影响是由机位分配模型中的约束条件所决定的,只有当抗体的基因编码满足约束条件时该抗体才能表示机位分配问题的一个可行解。在产生初始群体以及每一代群体的产生过程中,如果采用随机取值产生抗体,该抗体为可行解的概率很小,从而导致算法寻优效率的急剧降低。因此,为提高算法的收敛速度,在免疫遗传算法初始群体生成过程中,每产生一个抗体都通过约束进行控制,大大提升其成为可行解的概率。

对于单个抗体的生成,其设计思想为首先按照配对航班的优先级对所有配对航班进行排序,然后逐一为其分配当前空闲最小的停机位。本文设计的初始抗体群体生成算法的具体实现步骤如下:

Step 1: 配对航班、停机位初始化。按照配对航班的进港时间排序将所有航班进行初始化,设为集合 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$ 。将停机位集合记为 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_K\}$ 。

Step 2: 随机产生配对航班的优先级顺序。产生 1- N 的整数数组 p ,并对其中元素随机排序,则数组 p 为配对航班的优先级顺序。

Step 3: 按航班优先级顺序为每个航班分配停机位:令 $i = 1$ 。

Step 4: 为第 p_i 架航班分配停机位:设 θ_k 为第 k 个停机位的空闲时长,则 $\theta_k = A_i - H_k^s$,其中 A_i 为当前航班的到港时间, H_k^s 为停机位 k 的空闲开始时间。选择空闲时长最短的机位即 $\theta_k = \min(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K)$ 且 $\theta_k \geq T_b$,将停机位 k 分配给第 p_i 架航班,体现在抗体编码中则将该抗体编码第 p_i 位置元素取值为 k ,机位 k 的空闲状态改变, $i = i + 1$ 。

Step 5: 判断航班是否全部分配完毕,即 $i > N$ 是否成立;若成立,则转 Step6,否则转 Step4。

Step 6: 输出抗体编码。

在该算法中需要对机位空闲状况进行实时更新。设定初始抗体群体规模 M ,

则循环 M 次, 即可得到种群规模为 M 的初始抗体群体。

(3) 抗体抗原之间亲和力

在免疫系统中, 抗体抗原之间亲和力指抗体的抗原结合簇同抗原的抗原决定簇的结合强度, 用以衡量抗体与抗原是否匹配以及匹配程度, 换句话说, 也是为了体现出抗体种群中不同个体的优劣性。亲和力通常与模型的目标函数与约束条件密切相关, 抗体优化程度越高, 则对应的目标函数值越大, 其亲和力也就越大。

亲和力对应遗传算法的适应度函数的选取将直接影响遗传算法的收敛速度, 不适当的适应度函数甚至会导致无法找到最优解。若直接选取目标函数作为遗传算法的适应度函数, 则在遗传算法前几代, 个体适应度分布比较分散, 容易产生超级个体从而搜索的解得范围小或者陷入局部最优, 而迭代后期当适应度比较集中的时候, 又导致算法收敛速度过慢, 因此, 我们要对优化模型的适应度函数进行适当放缩。适应度尺度变换是指为了控制算法收敛速度而对优化模型的适应度函数进行适当放缩的过程。

通常来说, 遗传算法适应度函数的尺度变换包含以下三种基本方法^[31]:

1、线性变换

适应度函数的线性变换可用式 (4-1) 表示, 其中优化求解模型的适应度函数变换前为 f , 变换后为 f' , α 和 β 为变换系数。

$$f' = \alpha f + \beta \quad (4-1)$$

确定 α 和 β 的方法有多种, 包括:

1) 在算法的选择操作中, 为了使适应度为平均值的个体被复制到下一代的可能性为 1, 线性变换前后的适应度函数平均值保持不变, 即:

$$f'_{avg} = f_{avg} \quad (4-2)$$

2) 为了控制当前最优的个体被复制到下一代的概率, 变换后的种群中个体适应度最大值应为变换前种群适应度平均值的指定倍数 c_{mult} 。其中, c_{mult} 可在 1-2 范围内, 则 α 和 β 的计算公式为:

$$\begin{aligned} f'_{max} &= c_{mult} f_{avg} \\ \alpha &= \frac{(c_{mult} - 1)f_{avg}}{f_{max} - f_{avg}} \quad \beta = \frac{(f_{max} - c_{mult} f_{avg})f_{avg}}{f_{max} - f_{avg}} \end{aligned} \quad (4-3)$$

2、幂变换

适应度函数的幂变换可用式 (4-4) 表示:

$$f' = f^k \quad (4-4)$$

3、指数变换

指数变换的公式为:

$$f' = f^{-af} \quad (4-5)$$

根据第二章和第三章建立的模型，本文模型的目标函数为：

$$\max \frac{\sum_{k=1}^{n_g} \sum_{i=1}^{n_f} x_{ik} f_k^{bridge} N_i^p}{\sum_{i=1}^{n_f} N_i^p} \quad (4-6)$$

又由于本文中的目标函数是为了求解全局的最大值，为了满足轮盘赌中概率非负的要求，这里采用（4-6）的公式将目标函数进行线性变换，取 $c_{multi}=1.5$ 。

（3）抗体的促进与抑制

通过抗体的促进与抑制步骤提升抗体种群多样性。以抗体浓度为参考指标，对高浓度的抗体抑制，并相应的对低浓度的抗体进行促进。利用这一特性可以提高免疫优化算法的局部搜索能力，加快收敛速度，增强抗体对于环境的适应能力。

1) 抗体与抗体间亲和度计算

抗体与抗体间亲和度表示抗体之间的相似程度，抗体间亲和度的计算是为了计算抗体浓度以便决定对抗体进行抑制或者促进作用，从而保持种群的多样性。

用基于 shannon 信息熵理论的方法来计算抗体与抗体间亲和度^[32]。假设种群规模为 N ，每个抗体的个体长度为 M ，每个抗体对应着一个解 X_i ，抗体 X_i 和 X_j 的亲和度 A_{ij} 表示抗体间的相似程度。

则位置 j 处的基因信息熵计算公式如下：

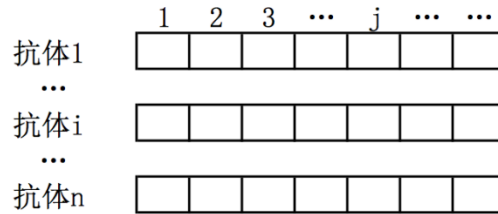


图 4-3 基因的信息熵

Figure 4-3 The Shannon entropy of each gene

$$H_j(N) = - \sum_{i=1}^N p_{ij} \log p_{ij} \quad (4-7)$$

式中 p_{ij} ——抗体上等位基因 i 在第 j 个位置上出现的概率；

如果在位置 j 上的等位基因都相同，则 $H_j(N)=0$ 。多样性的平均信息熵计算如式（4-8）所示：

$$H(M) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N) \quad (4-8)$$

而根据信息熵的计算公式可得抗体 X_i 和 X_j 的亲和度 A_{ij} 公式：

$$A_{ij} = \frac{1}{1+H(2)} \quad (4-9)$$

亲和度越大说明抗体 X_i 和 X_j 的相似性越高，由抗体间亲和力计算抗体浓度，则抗体 i 的浓度 ρ_i 的具体计算公式如下：

$$\rho_i = \frac{\sum_{j=1}^N S_{ij}}{N} \quad (4-10)$$

式中 $S_{ij} = \begin{cases} 1 & A_{ij} \geq \lambda \\ 0 & A_{ij} < \lambda \end{cases}$ 其中 λ 为亲和度常数，一般取值在 0.9-1.0 之间

2) 抗体生存力计算

生存力指抗体在下一步迭代中保存下来的能力，由抗体与抗原间亲和力和抗体浓度共同决定，计算公式为：

$$e_i = \frac{A_i}{\rho_i} \quad (4-11)$$

式中 ρ_i 表示与抗体 i 的抗体浓度， A_i 表示与抗体 i 的亲和力。从上式可知，抗体亲和力越大，抗体生存力越高；抗体的浓度越高，抗体的生存力则越弱。这样既有使得具有优秀适应度的抗体得以保留，同时抑制了浓度高的抗体，保证了种群的多样性，有效地降低了遗传算法在迭代后期陷入局部最优的概率。

(4) 选择算子

采用轮盘赌进行选择操作。其基本思想是生存力越好的个体被选择的概率越大，是一种有放回的随机采样方法，由于操作简单且使用，是遗传算法中经常使用的选择操作。轮盘赌选择方法依据个体的生存力计算每个个体在子代中出现的概率，并按照此概率随机选择个体构成子代种群。轮盘赌的具体操作过程如下：

- 1) 计算出群体中所有个体的生存力 $f(i=1,2,\dots,N)$ ， N 为种群规模；
- 2) 计算所有个体被遗传到下一代的概率；

$$P_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^N e_i} \quad (4-11)$$

- 3) 计算出每个个体的累积概率；

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^t e_i}{\sum_{i=1}^N e_i} \quad (4-13)$$

4) 随机生成[0,1]区间内的一个随机数 r ，并将其与每个抗体生存力的累积概率进行比较，若 $P_{t-1} \leq r < P_t$ ，则抗体 t 将会被遗传至下一代群体中；

- 5) 将步骤 4) 重复 N 次；

(5) 交叉算子

1) 自适应交叉概率设计

交叉概率 P_c 的选择对算法的收敛速度有着直接的影响, P_c 越大, 产生新个体的速度就越快。然而, P_c 过大时亲和力较大的抗体结构被破坏的可能性也越大。然而过小的 P_c , 会导致搜索过程缓慢, 降低算法的搜索效率。

本文在遗传进化初期采用标准免疫遗传算法, 采用固定的交叉概率, 保留种群的多样性, 在遗传进化后期则采用自适应的交叉概率 P_c 。 P_c 的计算公式^[33]如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (4-14)$$

式中 f' ——要交叉个体的亲和力;

f_{av} ——每代群体的平均亲和力;

f_{ma} ——每代群体中最大的亲和力值;

由式 (4-14) 可得: 种群中个体亲和力低于种群平均亲和力的个体属于群体中较差的个体, 因此采用较大的交叉概率对其进行交叉操作以促进基因重组和基因变异; 种群中个体亲和力高于种群平均亲和力的个体属于群体中较优的个体, 根据式 (4-14) 计算出相应的交叉概率。可以看出, 个体亲和力值愈大, 交叉概率值就愈小; 当个体亲和力值最大时, 交叉概率最小。但由于种群进化初期, 群体中的较优个体不一定是优化的全局最优解, 若采用这种自适应的交叉概率调整方法, 容易使算法陷入局部最优, 过早成熟。

因此, 在遗传算法的前 n 代, 采用较大的固定交叉概率进行交叉操作以扩大搜索范围、维持种群多样性, 但由于简单遗传算法收敛速度较慢, 为了达到增加算法收敛速度的目的, 本文在算法迭代后期采取自适应策略对交叉概率进行调整。

2) 抗体交叉方法设计

本文采用两点交叉算子, 首先根据当代的个体交叉概率 P_c , 选出需要进行交叉操作的两个父代抗体, 接下来随机生成交叉操作的两个交叉点, 假定选中的交叉点为点 1 和点 2, 最后交换两个随机交叉点 (点 1 和点 2) 之间的机位号。具体步骤如图 4-4:

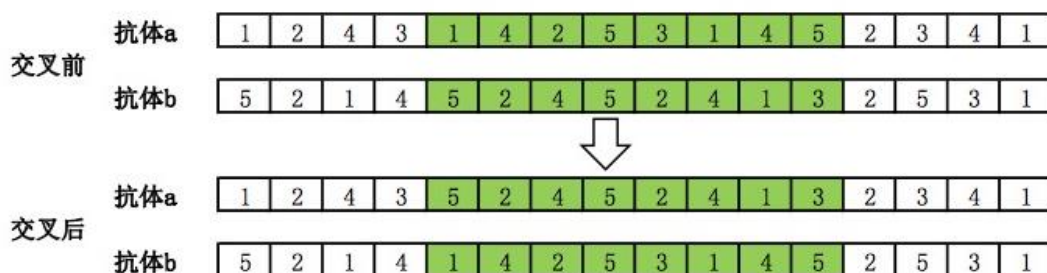


图 4-4 交叉操作示意图

Fig.4-4 The crossover of immune genetic algorithm

(6) 变异算子

由于对种群中的父代抗体进行的交叉操作均为随机选取，故交叉后产生的子代个体极有可能因不满足本文建立模型的约束条件而成为不可行解，因此，通过变异操作对这些抗体进行变异使其成为可行解。操作过程如下：对于交叉后的子代抗体，顺序检查从交叉起点之后的所有基因，若该基因满足本文模型中的约束条件，则该位置基因的取值不变，若不满足则对该位置基因相应的航班按照初始种群生成中单个抗体的生成方法重新为其分配机位，并将分配结果反映在抗体编码中。

如下图所示，以子代抗体 a 的变异操作为例，如下图所示，交叉起点的位置为 5，则顺序检查第 5 个基因位及其之后的编码情况，第 5 架航班被分配至 5 号机位，由于在此之前尚未分配其他航班停靠至 5 号机位，因此该基因位满足约束条件，保留该位置的基因取值；接下来检查第 6 架航班，同样满足模型中的约束条件；……继续检查剩余航班，直至检查到第 14 架航班被分配至 3 号停机位，而该机位之前被分配给第 12 架航班尚未空闲，机位分配发生冲突，因此需要为该航班重新分配机位。而当且空闲且满足匹配性约束的机位集合为{5, 1}，其中 5 号机位的空闲开始时间大于 1 号机位，因此将第 14 架航班分配至 5 号机位，第 15 个基因位取值为 5。继续检查剩余航班。变异操作修正了交叉后子代抗体中不合法的基因编码，使其成为可行解的概率显著提升，从而提高算法的收敛速度。

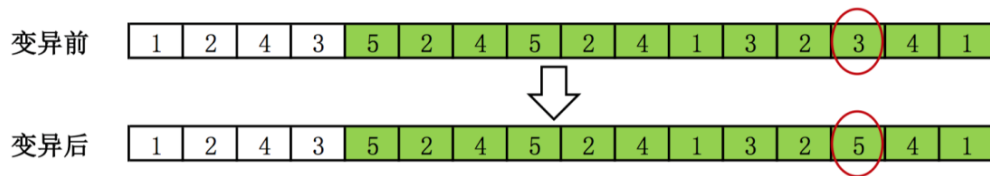


图 4-5 变异修正操作示意图

Fig.4-5 The mutation of IIGA

(7) 基于伪并行思想的多种群设计

基本免疫遗传算法是单种群设计，在种群进化前期，是朝着目标函数优化的方向趋近，然而算法迭代到后期时，算法收敛速度变慢，种群中最优抗体几乎不再发生改变，导致算法全局搜索能力较差，收敛速度慢，容易陷入局部最优。对产生这种现象的原因进行分析，发现：单种群遗传算法的种群规模有限，初始群体生成以及遗传操作的各个步骤都是采取随机的方式，当种群进化到一定程度时，种群多样性急剧降低，算法搜索能力变差，从而导致算法的收敛速度变慢或算法早熟。

针对这些缺陷，在这里引入多种群策略，不但可以保持种群多样性，减少未成熟早收敛的现象发生的可能性，还可以提升种群收敛速度，有利于求解质量的提高。

1) 多种群设计

首先确定并行的种群数量。群体数量的差异对算法的性能具有非常显著的影响，所以多种群设计的关键是确定合理的种群数量。若并行的种群数量取值过小，相对于单种群设计，算法性能不能得到显著提高；若并行的种群数量取值过大，虽然对提升种群多样性有积极影响，还可以防止算法过早收敛以及陷入局部最优，但是增加了求解时间。因此本文将抗体群分为三个子抗体种群，分别为：

先锋种群：将单种群优化算法中求得的交叉概率乘以较高的修正值以提高先锋种群的交叉概率，扩大搜索范围，提升种群的多样性，避免算法陷入局部最优，有利于求解质量的提高。

后卫种群：将单种群优化算法中求得的交叉概率乘以较低的修正值以降低后卫种群的交叉概率，对算法局部的搜索能力进行优化，提升算法的稳定性，并将优秀个体在种群间的传播，促进种群进化。

中间种群：设置较为适中的交叉概率，各项功能处于上述两个种群之间。

2) 迁移算子设计

迁移算子是指在种群迭代过程中，为了增强种群的多样性，每隔固定的代数，

交换各子抗体群中若干抗体的过程^[34]。其中迁移率表示每次迁移的抗体数量或抗体比例。迁移间隔是指当免疫遗传算法的迭代次数为迁移间隔的整数倍时，就将所有个体按个体亲和力由大到小进行排序，按照迁移率发生个体交换，即将最好的个体迁移到其它子抗体群中。种群之间的个体迁移示意图如下图所示。本文将迁移率设置为 3，迁移间隔设置为 5。

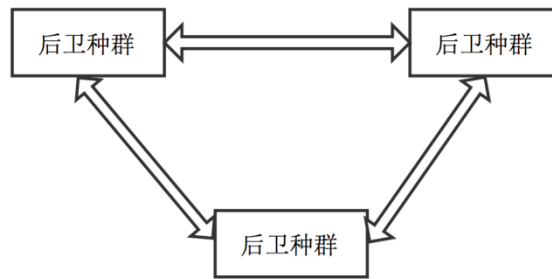


图 4-6 种群间的个体迁移示意图

Fig.4-6 The Migration in IIGA

迁移算子在免疫遗传算法中的具体实现步骤如下：

第一步：将初始抗体种群分为三个子抗体群，分别为先锋种群、后卫种群和中间种群，每个子抗体群的种群规模为 n 。

第二步：三个子抗体群按照各自设定的参数执行免疫遗传算法的各步操作，包括计算亲和力、促进抑制抗体产生、选择操作、交叉操作以及变异操作。

第三步：当进化代数是迁移间隔的整数倍时，将每个子种群中的抗体按照亲和力大小排序，按照迁移率将最好的个体迁移到其它 2 个子抗体群中。

第四步：将迁移的个体和种群中原有的抗体一起按照亲和力大小进行排序，亲和力取值为前 n 个的抗体作为下一代种群。

（8）记忆库设计

在群体进化过程中，由于选择、交叉、变异等遗传操作的随机性有可能使得当前种群中较优的抗体结构被破坏。这会对免疫遗传算法的运行效率以及收敛性造成不利的影响，为了避免这一问题，可以设计记忆库功能避免较优的抗体被交叉、变异算子破坏，将亲和力较大的个体保留到下一代，加快算法收敛。记忆库的具体操作过程如下：

1) 初始化记忆库：假设记忆库规模为 J ，将子抗体群中前 J 个较优的个体作为初始记忆库。

2) 更新记忆库：各子抗体群产生新一代抗体时，分别对新一代抗体种群中的

抗体按照亲和力大小进行排序；依次检查种群中抗体亲和力最大的个体，如果其亲和力值高于原有记忆库内的某些抗体，接下来比较记忆库中是否有其相似性个体，若存在则记忆库保持不变，否则在记忆库中将新抗体代替原来抗体；同时，若新生成的抗体的亲和力比记忆库内的任何一个抗体的亲和力都低，则不进行任何操作。

3) 记忆库抗体保留策略：类似于遗传算法中的精英保留策略，记忆库内的抗体直接保留至下一代。

(9) 算法终止策略设计

终止策略包括：

1) 限定迭代次数：为了在有限时间内得到较好的算法结果，人工设定一个足够大的正整数，使迭代次数限定在有限次内。但如果设置的次数较少时，得到最优解的质量可能不高。

2) 连续多次迭代得到的最优解均无明显提升：在算法迭代过程中，不断计算每代适应度函数值与当前最优解的差值，当收敛的代数大于设定值时，结束算法。

本文采用设定迭代次数终止原则，即运行一定次数后结束算法。

4.3.2 算法基本流程

本文采用优化策略对基本免疫遗传算法进行改良，其具体操作流程如图 4-7 所示。

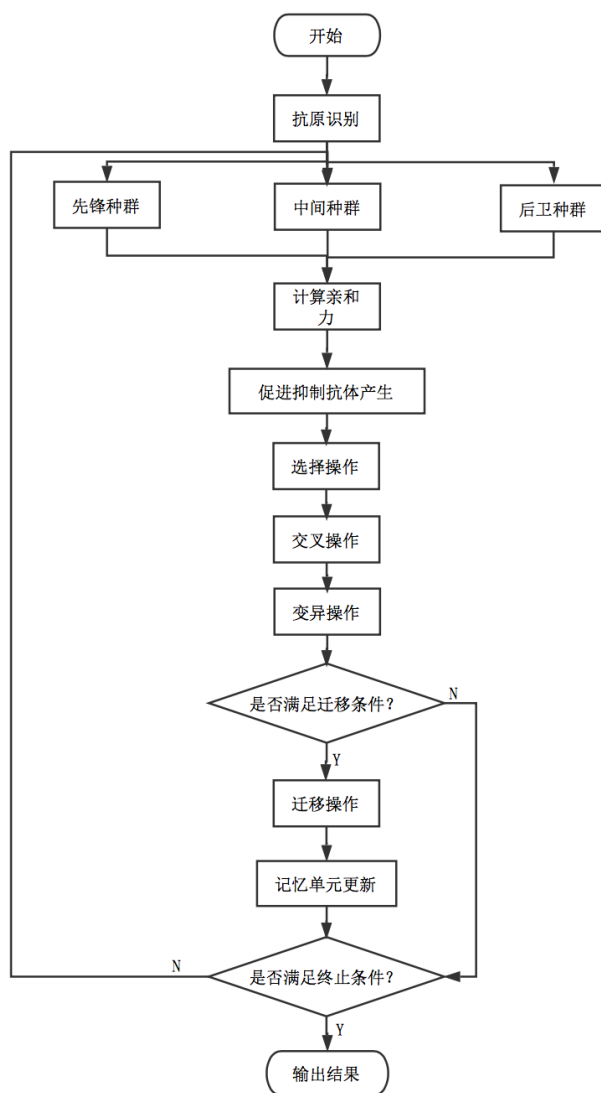


图 4-7 本文免疫遗传算法基本流程图

Fig.4-7 The process of immune genetic algorithm in this paper

4.4 本章小结

首先对基本遗传算法、免疫遗传算法进行简要的概述。接下来在基本遗传算法的基础上采用各种优化策略对其进行改良：通过多种群设计维持种群的多样性从而克服算法早熟，有利于提升解的质量；设计记忆库功能，避免种群退化现象的发生，提升算法运行速度；根据当前种群多样性情况和个体分布情况确定下一代种群的交叉概率，增强算法的局部搜索能力，加快算法收敛速度，避免算法陷入局部最优；对交叉操作后产生的每一个抗体都通过变异操作进行调整以提升其成为可行解的概率，加快最优解的收敛。

5 实例及结果分析

针对上文建立的基于机场实际业务规则机位分配优化模型、基于冲突概率的机位分配鲁棒性优化模型，以昆明长水国际机场实际数据作为算例进行模型验证工作。以往文献已经证明采用精确算法求解该模型无法在多项式时间内求得精确解，只能求得用近似算法求得近似解。针对此本文建立的模型，本论文开发了用改进免疫优化遗传算法来求得近似最优解，利用 Python 为开发语言对该算法进行编程，其中，开发工具 Pycharm，数据存储平台为 Excel。在 Inter (R) Core (TM) i7-4710MQ CPU 2.50GHz 4GB 内存的个人电脑上对算例进行了运算求解。本章同一算例数据分别对上述两模型进行优化建模求解，并与机场实际运营结果进行对比，验证了算法的有效性。

5.1 昆明长水机场机位分配案例概述

5.1.1 昆明长水机场停机位布局

图 5-2 所示，长水机场拥有 1 座航站楼、2 条跑道、站坪停机位共计 198 个，其中近机位 68 个、远机位 133 个。其中近机位包括 C 类机位 23 个，D 类机位 36 个，E 类机位 6 个，以及 F 类机位 3 个。

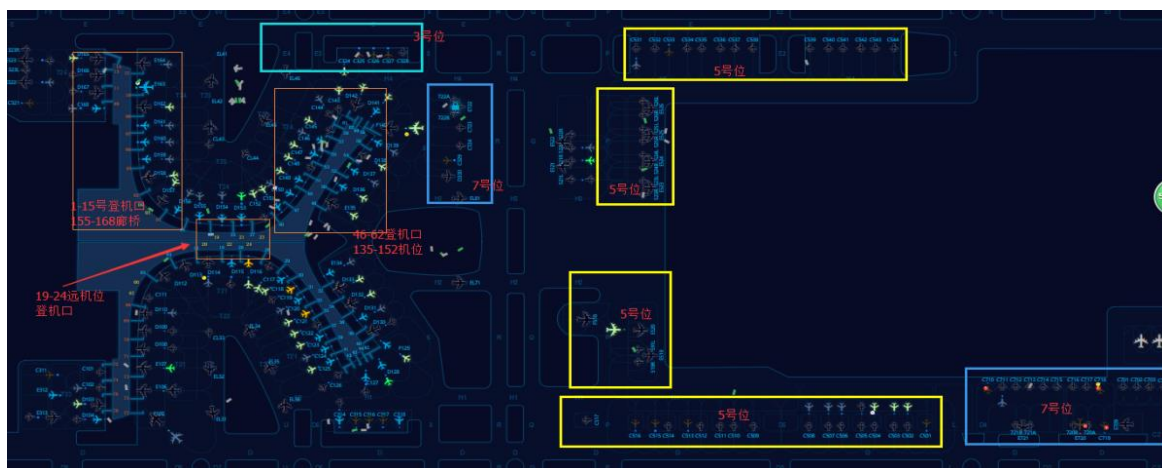


图 5-1 长水机场机坪分布图

Fig.5-1 The flat layout of airport



图 5-2 长水机场近机位分布
Fig.5-2 The gate layout of airport

5.1.2 算例数据概述

本文算例选用长水国际机场某航空公司 12 月 24 日的航班数据进行机位分配运算实验。拟配对航班 81 架次（配对前航班 161 架次），可用停机位 19 个，其中近机位 10 个，远机位 7 个。该例中所有航班均为国内航班，涉及到的机型有 3 种。数据样本见表 5-1 及 5-2。

表 5-1 单出（过夜）航班数据表

Table 5-1 The overnight flight information

航班序号	机型	实际到达时间	预计起飞时间	乘客人数	原分配机位
1	A319	14:48	7:30	117	19
2	A320	16:54	7:00	186	5
3	A320	17:32	6:45	312	18
4	A319	18:27	10:35	253	14
5	B737	18:31	7:50	206	11
6	A320	21:14	11:30	284	12
7	B737	22:46	7:05	232	10
8	A319	23:47	7:45	90	12
9	A320	0:25	7:20	259	15
10	A319	0:37	12:55	136	17

11 A319 0:50 10:30 130 13

5-2 连班航班数据表

Table 5-2 The flight information

航班 序号	机型	实际到达 时间	预计起飞 时间	乘客 人数	航班 序号	机型	实际到达 时间	预计起飞 时间	乘客 人数
12	A320	7:59	9:00	171	47	A320	16:18	17:25	253
13	A319	8:02	8:25	141	48	B737	16:31	18:15	110
14	B737	8:08	8:35	141	49	A319	16:42	17:55	266
15	B737	8:29	9:00	96	50	A319	16:53	17:45	131
16	B737	8:58	9:45	259	51	A319	17:02	17:40	115
17	B737	9:08	9:55	206	52	A320	17:21	18:10	209
18	A320	9:25	10:10	312	53	A320	17:42	18:30	256
19	A320	9:45	10:15	302	54	A320	18:02	18:40	89
20	A319	9:51	11:25	142	55	A319	18:06	18:50	131
21	B737	10:15	11:05	133	56	B737	18:06	18:40	83
22	A320	10:25	11:12	172	57	B737	18:17	19:10	119
23	B737	10:31	11:15	221	58	A319	18:20	19:45	211
24	A320	10:32	11:40	284	59	A320	18:21	19:00	133
25	A320	10:53	12:40	312	60	B737	18:29	19:00	203
26	A319	10:54	12:20	252	61	B737	18:42	19:45	271
27	A320	11:06	11:35	89	62	A320	18:45	19:40	302
28	A320	11:22	12:15	173	63	B737	18:45	19:35	115
29	A320	11:30	12:15	29	64	A320	19:18	19:42	312
30	A319	11:44	13:15	93	65	B737	19:26	20:00	211
31	A320	11:53	13:05	173	66	A319	19:51	20:50	247
32	A319	11:58	13:15	98	67	B737	19:53	20:05	109
33	B737	12:02	13:15	217	68	A320	19:55	20:50	89
34	A319	12:11	13:05	104	69	A319	20:03	21:20	236
35	A320	12:25	13:20	102	70	A319	20:07	21:15	265
36	A319	12:34	13:20	161	71	B737	20:10	21:00	126
37	A320	12:50	13:50	312	72	A320	20:12	20:40	295
38	A319	12:51	13:25	115	73	A320	20:23	23:10	181
39	A320	13:17	16:35	277	74	B737	20:35	21:05	260
40	A319	13:34	18:50	102	75	A319	20:54	21:45	110
41	A319	13:58	14:50	239	76	B737	21:02	21:45	201
42	A320	14:11	15:35	163	77	A320	21:12	21:58	243
43	A319	14:32	16:55	250	78	B737	21:15	22:09	185
44	A320	15:21	17:50	153	79	A320	21:30	22:42	221
45	A320	15:21	21:55	312	80	B737	21:34	22:21	115
46	A319	16:10	20:40	87	81	B737	21:35	22:20	186
47	A320	16:18	17:25	253	82	B737	21:54	23:25	253
48	B737	16:31	18:15	110	83	A320	22:06	22:30	173
49	A319	16:42	17:55	266	84	A319	22:12	23:20	151

50	A319	16:53	17:45	131	85	A319	22:22	23:12	193
51	A319	17:02	17:40	115	86	A320	22:34	0:05	265
52	A320	17:21	18:10	209	87	A320	22:37	23:50	181
53	A320	17:42	18:30	256					

表 5-3 机位数据表

Table 5-3 The gate information

机位 编号	廊桥 属性	国际/ 国内	可容纳 机型	默认 登机口	机位 编号	廊桥 属性	国际/ 国内	可容纳 机型	默认 登机口
1	桥位	国内	737/319/320	7 号	11	远机位	国内	737/319/320	1 号
2	桥位	国内	737/319/320	8 号	12	远机位	国内	737/319/320	10 号
3	桥位	混合	737/319/320	1 号	13	远机位	国内	737/319/320	11 号
4	桥位	国际	737/319/320	1 号	14	远机位	国内	737/319/320	11 号
5	桥位	混合	737/319/320	1 号	15	远机位	国际	737	3 号
6	桥位	国内	737/319/320	1 号	16	远机位	国际	737	3 号
7	桥位	国内	737	1 号	17	远机位	国内	737/319/320	3 号
8	桥位	国内	737/319/320	2 号	18	远机位	国内	737/319/320	3 号
9	桥位	国内	737/319/320	4 号	19	远机位	国内	737/319/320	10 号
10	桥位	国内	737/319/320	5 号					

5.2 基于机场实际业务规则的机位分配模型求解算例

本例中，依照对长水机场运行控制中心的实际调研情况，设定同机位连续航班间的最小安全时间间隔为 10 分钟，设定相邻机位飞机滑入、推出最小安全时间间隔为 5 分钟。改进免疫遗传算法的相关参数设置分别为：种群大小设置为 100，进化代数设置为 200 代。Inter（R）Core（TM）i7-4710MQ CPU 2.50GHz 4GB 内存电脑上采用本文设计的改进免疫遗传算法对该实例进行计算，完成上述算例并求得满意解的求解时间为 68 s。

该算例的机位分配结果见表 5-4，图 5-3 为该算例分配结果的甘特图。由表 5-3 可知，在提升近机位资源利用率方面，待分配航班中分配至近机位的航班数量为 78，分配至远机位的航班数量为 9 个，经计算得出该机位分配方案的航班靠桥率为 89.65%。靠桥乘客人数为 15407 人，经计算得出乘客靠桥率达到 93.92%。经过统计，当天机场手工分配停机位情况下，87 个航班中有 68 个航班分配至近机位，

19 个航班分配至远机位，航班靠桥率为 78.16%，靠桥乘客人数为 15046 人，乘客靠桥率达到 76.15%，比长水机场实际人工分配的航班靠桥率提升了 11.49%，乘客靠桥率提升了 17.77%，可以看出乘客靠桥率和航班靠桥率都有了较明显的提升。机位分配结果的甘特图如图 5-5 所示，分配至近机位的航班密度较大，分配至远机位的航班则大都分布在高峰时段且有数量较少。上述与手工分配结果的对比表明，通过对第二章建立模型求解得出的机位分配方案不仅可以增加对机位分配的合理性，提高乘客靠桥率的同时降低机场的运营成本。但通过计算该模型求解结果的机位冲突概率，可以发现，相对机场当天实际运营情况，虽然该模型的近机位利用率大幅提上，但机位分配方式鲁棒性指标——机位冲突概率总和低于手工分配结果。该模型免疫遗传算法求解过程的收敛曲线见图 5-4。

表 5-4 模型分配机位计算结果表

Table 5-4 The result of gate assignment

机位编号	停靠航班	冲突概率	乘客人数
1	6, 31, 39, 53, 61, 70, 81	0.8875	1712
2	11, 26, 45, 83	0.5919	867
3	9, 15, 27, 36, 44, 55, 64, 68, 76, 84	0.5216	1642
4			
5	2, 13, 20, 32, 41, 51, 57, 69, 79	0.1437	1497
6	3, 18, 24, 34, 47, 63, 73	0.0303	1561
7	14, 17, 23, 33, 48, 60, 67, 74, 82	0.4914	1720
8	1, 16, 21, 29, 38, 50, 62, 66, 80, 86	0.3848	1713
9	4, 25, 37, 42, 49, 58, 71, 77, 87	0.9701	2067
10	7, 12, 19, 22, 28, 35, 43, 52, 59, 65, 72, 78, 85	0.9627	2628
11	5		206
12	8, 40	0	192
13			
14	56		83
15			
16			
17	10		136
18	54		89
19	30, 46, 75	0.3132	290
合计		5.2972	16403

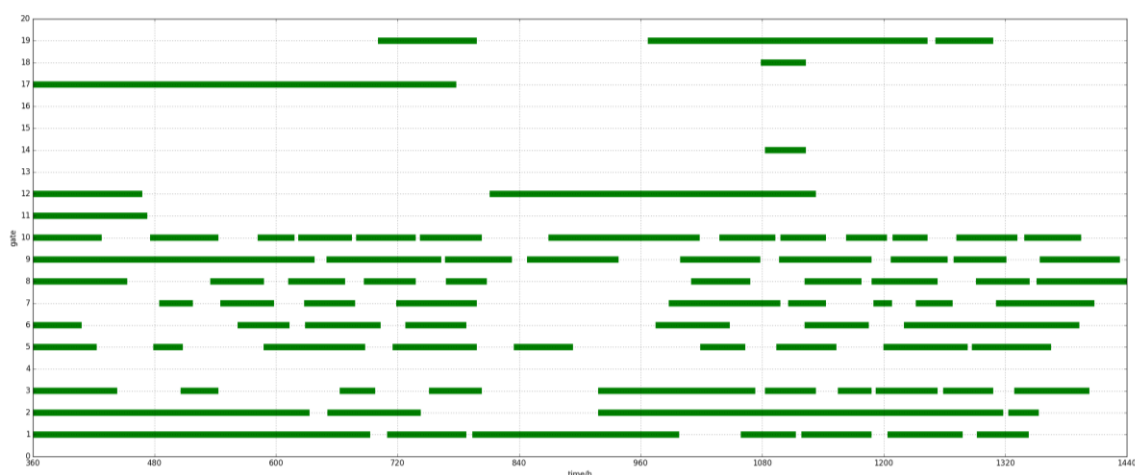


图 5-3 停机位分配甘特图

Fig.5-3 The result of gate assignment

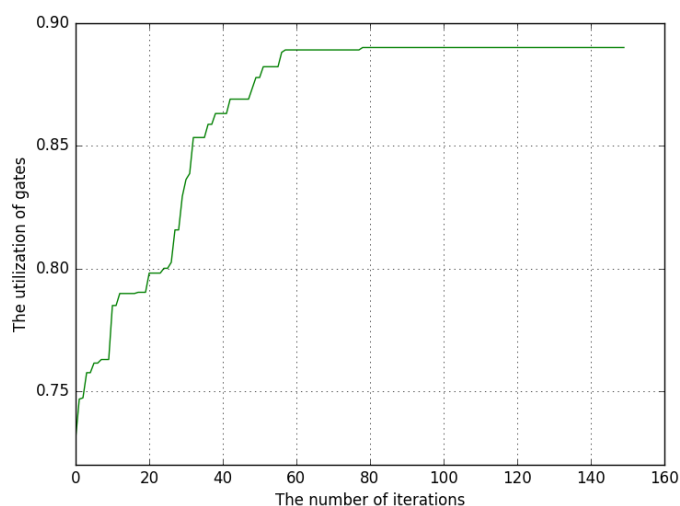


图 5-4 改进免疫遗传算法迭代曲线图

Fig.5-4 The iterative curve diagram of immune genetic algorithm

5.3 基于冲突概率的机位分配鲁棒性模型求解算例

为简化计算,本文设计一种包含数据预处理和模型求解的两阶段计算方法以解决基于冲突概率的机位分配鲁棒性模型求解问题。在数据预处理阶段,通过读取相关数据包括航班的预计到达时间、预计起飞时间、飞机的机型等航班信息以及机位信息作为输入变量,经过数据预处理后得到模型中的中间变量(矩阵形式)。在模型求解阶段,则输入机位分配模型中涉及的中间变量、输入变量以及改进免

疫遗传算法中的相关参数，按照 4.3 的求解顺序对该问题进行求解并输出计算结果。其中，在数据预处理阶段，表 3-3 中航班到达及延误分布的参数是通过统计这 87 个航班从 2016 年 4 月至 2016 年 12 月三个季度在长水机场的预计到达、起飞时刻与实际起降时刻的偏差数据，按照 3.3.2 中的参数估计及假设检验方法分别计算每个航班的到达、起飞延误的概率密度函数模型参数汇总形成（数据较大，此处略去）。其他输入变量则是通过对航班信息表以及机位信息表读取得到。

本例中，依照对长水机场运行控制中心的实际调研情况，设定同机位连续航班间的允许最大冲突概率为 0.1，设定相邻机位飞机滑入、推出最小安全时间间隔为 5 分钟。改进免疫遗传算法的相关参数设置分别为：种群大小设置为 100，进化代数设置为 200 代。Inter (R) Core (TM) i7-4710MQ CPU 2.50GHz 4GB 内存电脑上采用本文设计的改进免疫遗传算法对该实例进行计算，完成上述算例并求得满意解的求解时间为 86 s。该算例的机位分配结果见表 5-5，图 5-5 为该算例分配结果的甘特图。由表 5-3 可知，在提升近机位资源利用率方面，87 个航班中有 77 个航班分配至近机位，10 个航班分配至远机位，航班靠桥率为 88.50%，靠桥乘客人数为 15046 人，乘客靠桥率达到 91.7%。经过统计，当天机场手工分配停机位情况下，87 个航班中有 68 个航班分配至近机位，19 个航班分配至远机位，航班靠桥率为 78.16%，靠桥乘客人数为 15046 人，乘客靠桥率达到 76.15%，比长水机场实际人工分配的航班靠桥率提升了 10.34%，乘客靠桥率提升了 15.55%。在机位分配方式的鲁棒性方面，通过对该模型采用本文设计的免疫遗传算法进行编码求解，迭代结束后得出的机位分配方案中所有机位冲突概率的总和为 1.6176，而经过计算机场手工分配机位方案的机位冲突概率的总和为 3.8756，机位冲突概率的改变值达到 2.258。此外，通过将上述实例分析结果与 5.2 节中的机位分配结果相比，在近机位资源利用率相近的情况下，基于机位冲突概率的机位分配鲁棒性模型所得的满意解的机位冲突概率总和急剧降低，可以在航班随机延误的情况下保持机位分配计划的稳定性，减少其他机场资源计划如摆渡车调度等进行过于频繁的实时调整，具有一定的抗延误特性。同时由于该模型以乘客靠桥率最大化为目标函数，有助于提升机场服务水平，提高旅客满意度。

上述分析表明：与人工分配方案相比，通过对本文第三章建立的模型的求解，其分配方案使得所有机位冲突概率总和较小，具有较强的抵抗随机延误的能力，同时该分配方案的乘客靠桥率也得到了较明显的提升，降低了机场的运营成本，提升了机场的运营效率。

表 5-5 模型分配机位计算结果表

Table 5-5 The result of gate assignment

机位编号	停靠航班	冲突概率	乘客人数
------	------	------	------

1	1, 14, 20, 30, 41, 52, 63, 72, 78, 85	0.1441	1729
2	8, 19, 26, 38, 44, 59, 68, 77, 86	0.1213	1642
3	4, 27, 32, 51, 58, 73	0.2032	947
4			
5	2, 12, 21, 28, 36, 42, 53, 64, 71, 84	0.1677	1832
6	9, 24, 31, 49, 62, 69, 79	0.1900	1741
7	15, 17, 23, 33, 48, 61, 74, 80	0.2165	1496
8	6, 34, 43, 60, 65, 70, 82	0.1614	1570
9	3, 13, 16, 22, 29, 37, 47, 55, 66, 81	0.1410	2042
10	7, 18, 25, 39, 50, 57, 67, 76, 83, 87	0.2724	2047
11	5, 40	0	308
12	56		83
13	11		130
14	54		89
15			
16			
17	10, 45	0	448
18	75		110
19	35, 46	0	189
合计		1.6176	16403

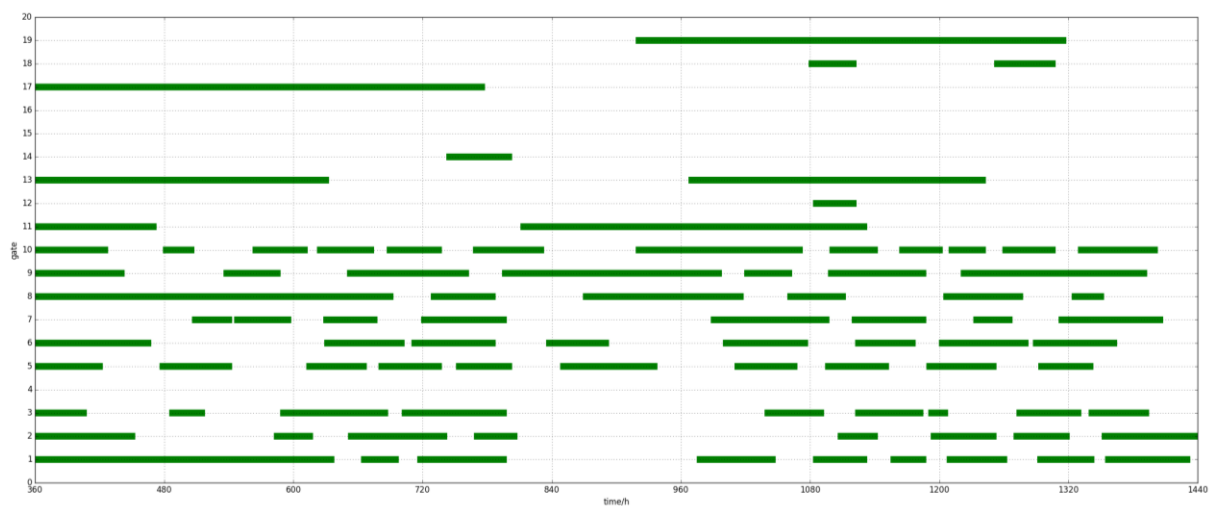


图 5-5 停机位分配甘特图

Fig.5-5 The result of gate assignment

免疫遗传算法收敛曲线见图 5-6。从图 5-6 可以看出,采用本文设计的求解算法,抗体种群中最优个体的亲和力数值收敛速度在改进免疫遗传算法迭代过程的初期较快,但随着迭代过程的持续进行,算法收敛速度逐渐变缓,种群最优个体的亲和力得到不断优化,最终,在第 60 次迭代过程中就达到了高峰。在随后的 140 次迭代过程中,最优解都无明显变化。这证明本文设计的免疫遗传算法在收敛效果上具有较好的表现。

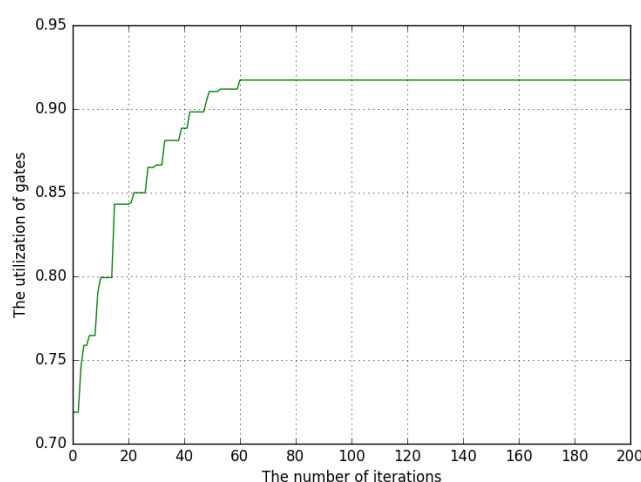


图 5-6 改进免疫遗传算法迭代曲线图

Fig.5-6 The iterative curve diagram of immune genetic algorithm

为反映本文算法的优越性,使用上述算例数据,采用基本遗传算法对模型进行求解并将其与免疫遗传算法进行对比实验。在实验中将基本遗传算法和免疫遗传算法的各项参数设置如下:设上述两种算法的种群进化次数均为 200 次,固定交叉概率均为 0.4。算法在迭代 200 次后,输出模型求解结果并对其进行解码得到机位分配方案。基本免疫遗传算法的迭代曲线图如图 5-6 所示。上述两种算法的优化分配的结果对比表如表 5-7 所示。

由图 5-6、图 5-7 和表 5-6 可见,相较于基本遗传算法,本文设计的免疫遗传算法在各项性能指标(包括实现最优解的运算次数、运行时间和最优解质量方面)均优于基本遗传算法,基本可以应用于生产实践中。此外,虽然两种算法的最优解数值相差不大,但改进免疫遗传算法对模型进行求解仍然表现出较明显的优越性。形成这种差异的主要原因在于,通过对基本遗传算法的改进,基本免疫遗传算法的基础上对算法进行改进,通过多种群设计、记忆库的设计,采用自适应交叉概率等方法,使得算法在搜索速度、全局搜索能力和局部搜索能力上都明显优于基本遗传算法。

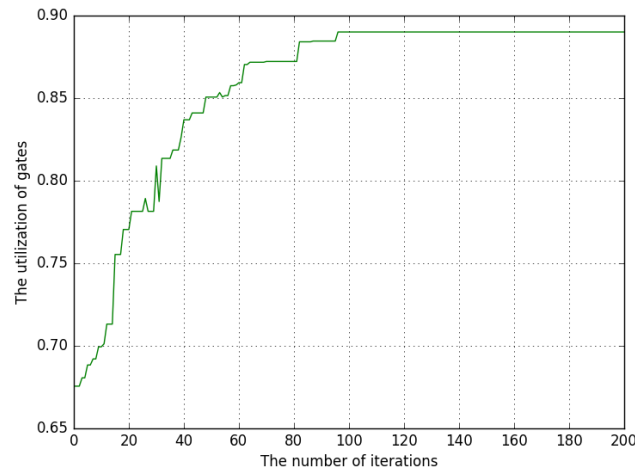


图 5-7 基本遗传算法迭代曲线图

Fig.5-7 The iterative curve diagram of genetic algorithm

表 5-6 两种算法优化结果对比

Table 5-6 Comparison of the optimization results of two algorithms

算法	比较参数			
	达到最优解 迭代次数	运行 时间	初始解	最优解
改进免疫遗传算法	59	86	0.7231	0.9170
基本遗传算法	97	135	0.6765	0.8934

5.5 本章小结

本章以昆明市长水机场航班及机位数据为例，根据第二章、第三章的模型设计，分别运行基本遗传算法及改进的免疫遗传算法求解。结果表明，改进的免疫遗传算法在在实现最优解的运算次数、运行时间和最优解质量方面相对于基本免疫遗传算法而言具有明显的优势。并将基于冲突概率的机位分配鲁棒性模型及改进的免疫遗传算法对昆明市长水机场某航空公司航班数据的求解结果与机场实际手工分配情况从近机位利用效率、机位冲突概率总和等方面进行比较，分析结果证明了基于冲突概率的机位分配鲁棒性模型可以在航班随机延误的情况下保持机位分配计划的稳定性，减少其他机场资源计划如摆渡车调度等进行过于频繁的实时调整，具有一定的抗延误特性。同时由于该模型以乘客靠桥率最大化为目标函数，有助于提升机场服务水平，提高旅客满意度。

6 结论与展望

6.1 主要工作和研究结论

本文在分析停机位分配问题研究现状的基础上，对基于机场实际业务规则的机位分配模型和基于机位冲突概率的机位分配鲁棒性设计进行了研究和优化建模，并设计合适的求解算法，最后采用长水国际机场的实际算例对模型和程序进行验证。本文的主要工作如下：

（1）基于机场实际业务规则的机位分配模型建立。通过将实际业务规则抽象成模型的约束条件和目标函数，以乘客靠桥率最大为优化目标，综合飞机拖曳、相邻机位机型限制、航班滑入推出冲突、登机口冲突限制等约束建立机位分配模型。

（2）基于机位冲突概率的机位分配鲁棒性设计。对航班到达延误以及起飞延误的差异化分布特征进行量化研究，给出机位冲突概率的计算方法。在基于机场实际业务规则的机位分配模型的基础上增加基于机位冲突概率的鲁棒性约束条件，建立机位分配鲁棒性模型，使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，提升机场运营效率的同时具有良好的抗延误特性。

（3）设计改进免疫算法对本文设计模型进行求解，其改进主要体现在：通过多种群设计不仅能提高求解速度，而且使种群多样性得以丰富和保持，减少了早熟的可能性，有利于求解质量的提高；设计记忆库功能，避免种群退化现象的发生，提升算法运行速度；根据当前种群多样性情况和个体分布情况确定下一代种群的交叉概率，增强算法的局部搜索能力，加快算法收敛速度，避免算法陷入局部最优；对交叉操作后产生的每一个抗体都通过变异操作进行调整以提升其成为可行解的概率，加快最优解的收敛。

（4）通过编程实现改进免疫算法对本文设计模型的求解，并将其应用到算例中。程序包含数据输入、数据预处理以及模型求解三部分，使用的编程语言为 Python 语言，对其进行封装成为同一的接口后可以实现各编程语言间互相调用。通过对算例的分析，结果表明，基于冲突概率的机位分配鲁棒性模型可以在航班随机延误的情况下保持机位分配计划的稳定性，减少其他机场资源计划如摆渡车调度等进行过于频繁的实时调整，具有一定的抗延误特性。同时由于该模型以乘客靠桥率最大化为目标函数，有助于提升机场服务水平，提高旅客满意度。

6.2 论文创新点

本论文的创新点如下：

（1）在机位分配基本约束的基础上，加入了飞机拖曳、相邻机位机型限制、航班滑入推出冲突等复杂业务规则约束，并以乘客靠桥率最大为目标函数，建立基于机场实际业务规则的机位分配模型。

（2）在航班随机因素（如航班到达和离开时间的不确定性）存在的前提下，研究机场停机位分配模型构建。首先通过研究随机因素下航班延误对同机位连续航班机位占用冲突的影响机理，基于航班延误的概率分布规律，推导出机位冲突概率的计算公式及方法；其次，考虑航班随机因素，在之前建立机位分配模型的基础上增加基于机位冲突概率的鲁棒性约束，使优化后的机位分配方案在具有较好鲁棒性的同时实现乘客靠桥率最大的优化目标，达到机场运营效率和运行安全的双赢。

6.3 研究展望

对于停机位优化分配建模的研究，还有较多发展方向，但由于时间有限，本论文还存在不足之处，在未来会不断做出改进。论文的后续研究工作应从以下几方面进行：

（1）相邻机位机位冲突理论的研究。本文对同一机位连续航班的机位冲突原理进行了深入研究并推导了机位冲突概率计算公式和方法，后续研究可以参考同机位冲突概率的推导过程对相邻机位航班之间机位冲突概率进行机理分析和公式推导。

（2）模型求解算法的比较验证。应用其它智能优化算法或启发式算法如：模拟退火算法、禁忌搜索算法等对本文提出的机位分配模型进行求解，还需要后期进行深入优化研究。

（3）实际生产中的应用。要将本文模型及算法应用于机场的生产实践中，需要设计开发相关的决策支持系统，需要建立机位分配规则库并对机场实际生产运营中的数据进行采集和测试，后续可以在这方面进行深入研究。

参考文献

- [1]Erico Piazza. Increasing airport efficiency: injecting new technology[J]. IEEE Intelligent System, 2002, 17(3): 10-13.
- [2]马正平, 崔得光. 机场航班延误优化模型. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(4): 474-477.
- [3]Braaksma J P, Shortreed J H. Improving airport gate usage with critical path[J]. Transportation Engineering Journal, 1971, 97(2): 187-203.
- [4] Babic O, Teodorovic D, Tosic V. Aircraft stand assignment to minimize walking[J]. Journal of Transportation Engineering, 1984, 110(1): 55-66.
- [5]Mangoubi R S, Mathaisel D F X. Optimizing gate assignments at airport terminals [J]. Transportation Science, 1985, 19(2): 173-188.
- [6]H Ding, A Lim, B Rodrigues, Y Zhu. The over-constrained airport gate assignment problem[J]. Computers & Operations Research, 2005, 32 (7) :1867-1880
- [7]鞠姝妹, 许俐. 基于 GSAA 的停机位指派优化问题的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(1) : 138-143
- [8]曾琳燕, 姜雨, 罗宇骁. 基于旅客步行距离的停机位均衡优化指派建模[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2014, 38(4): 895-899.
- [9]A Bolat, As-Saifan, K. Procedures for aircraft-gate assignment[J], Mathematical & Computational Applications, 1996, 1(1): 9-14.
- [10]A Bolat. Assigning arriving flights at an airport to the available gates[J], Journal of the Operational Research Society, 1999, 50(1): 23-34.
- [11]A Bolat. Assigning Procedures for providing robust gate assignments for arriving aircrafts[J], European Journal of Operational Research, 2000, 120(1): 63-80.
- [12]A Bolat. Models and a genetic algorithm for static aircraft-gate assignment problem[J] , Journal of the Operational Research Society, 2001, 52(4): 1107-1120.
- [13]Shangyao Yan, Cheunming Huo. Optimization of multiple objective gate assignments[J], Transportation Research-A, 2001, 35(5):413-432.
- [14] Shangyao Yan, Chi-Yuan Shieh, Miawjane Chen. A simulation framework for evaluating airport gate assignments[J], Transportation Research Part A, 2002, 36:885-898.
- [15]卫东选, 刘长有. 机场停机位分配问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 7(1) : 57-69.
- [16]A Lim, B Rodrigues, Y Zhu. Airport Gate Scheduling with Time Windows[J]. Artificial Intelligence Review, 2005, 24 (1) :5-31
- [17] A Lim, F Wang. Robust Airport Gate Assignment[J]. IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence 2005, 2005 :74-81
- [18]杨文东, 朱金福, 许俐. 基于航班联结树的机场停机位指派问题研究[J]. 山东大学学报 (工学版), 2010, 40 (2) :153-158
- [19]卫东选. 基于运行安全的机场停机位分配问题研究[D]. 南京航空航天大学, 2010.
- [20]王岩华. 繁忙机场机位分配的混合集合规划方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2015.

- [21]徐肖豪,张鹏,黄俊祥.基于 Memetic 算法的机场停机位分配问题研究[J],交通运输工程与信息学报,2007,5(4):10-17.
- [22]孔佳玉.机场机位分配建模及其遗传算法研究[D].南京理工大学,2008.
- [23] Andreas Drexl, Yury Nikulin. Multicriteria airport gate assignment and Pareto simulated annealing [J]. IIE Transactions, 2008, 40(4):385-397.
- [24] Yury Nikulin, Andreas Drexl. Theoretical aspects of multicriteria flight gate scheduling: deterministic and fuzzy models[J]. Journal Schedule, 2009, 112(9):26-45.
- [25] Haghani A, Chen M C. Optimizing gate assignments at airport terminals[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1998, 32(6): 437-454.
- [26] Xu J, Bailey G. The airport gate assignment problem: Mathematical model and a tabu search algorithm[C] System Sciences, 2001. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on IEEE, 2001: 10 pp.102-111.
- [27]陈欣,陆迅,朱金福.停机位指派模型的排序模拟退火算法[J].应用科学学报,2007,25(5):520-525
- [28]周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].第一版.北京:国防工业出版社,1996
- [29]眩光男,程润伟.遗传算法与工程设计[M].第一版.北京:科学出版社,2000
- [30]李敏强,寇纪松,林丹等.遗传算法的基本理论与应用[M].北京:科学出版社,2002
- [31]陈国良,王煦法等.遗传算法原理及应用[M].第一版.北京:人民邮电出版社,1996
- [32] Hong J. Lee S. Lee Y. An Efficient Production Algorithm for MulriHead SurFace Mounting Machines Using the Biological Immune Algorithm[J]. International Journal of Fuzzy Systems, (2), 1, 45-53, 2000.
- [33]闫研.一种新的自适应遗传算法[D].哈尔滨工程大学硕士论文,2007
- [34]陈海燕,王建东,徐涛.基于延误波及的航班延误状态空间模型[J].信息与控制,2012,41(2):251-255
- [35]复旦大学编.概率论与数理统计[M].北京:人民教育出版社,1979.
- [36]赵希男等.确定金融资产收益率分布形式的一种方法[J].数量经济技术经济研究,2004,(9).
- [37]茆诗松,王静龙,濮晓龙.高等数理统计[M]北京:高等教育出版社,施普林格出版社,1998.
- [38]郑攀,胡思继.基于安全性目标的机位分配模型及算法[J],物流技术,2010,29(1):51-53.
- [39]曾国荪,丁春玲.并行遗传算法分析[J],计算机工程,2001,27(7):53-55.
- [40]戴晓明,许超,龚向阳,邵惠鹤.并行遗传算法收敛性分析及优化运算[J],计算机工程,2002,28(6):92-95.
- [41] Udo Kohlmorgen, Hartmut Schmeck, Knut Haase. Experiences with fine-grained parallel genetic algorithms[J], Annals of Operations Research, 1999, 90:203-219.
- [42]杨文东,黄鹂诗,刘万明.首都机场航班延误分布规律分析[J],交通运输系统工程与信息,2013,13(2):199-204.
- [43]汪定伟,王俊伟等.智能优化方法[M].北京,高等教育出版社,2006(10): 85-89.
- [44]张晨.基于后效晚点时间的机场近机位容量评估研究[D].北京交通大学博士学位论文,2007,12.
- [45]汪定伟,王俊伟等.智能优化方法[M].北京,高等教育出版社,2006(10): 85-89.
- [46]房祥忠,陈家鼎 EM 算法在假设检验中的应用[J],中国科学,2003,33(2):180-184

- [47] Coello Coello CA. Evolutionary multi-objective optimization: some current research trends and topics that remain to be explored[J], Computer Science of China, 2009,3(1):18-30.
- [48] E. Cantú-Paz, A survey of parallel genetic algorithms. *Calculateurs Parallèles[J], Réseaux et Systèmes Répartis*, 1998, 10(2):141–171.
- [49] Ching-Hui Tang. Real-time gate assignments under temporary gate shortages and stochastic flight delays[C], In 2009 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics, 2009: 267-271.
- [50] 崔红建. 改进免疫遗传算法在组合优化问题中的应用研究[D]. 大连海事大学, 2012.

作者简历及攻读硕士/博士学位期间取得的研究成果

[内容采用五号宋体] 包括教育经历、工作经历、攻读学位期间发表的论文和完成的工作等。行距 16 磅，段前后各为 0 磅。

一、作者简历

二、发表论文

[1]

[2]

[3]

.

.

.

三、参与科研项目

[1]

[2]

[3]

.

.

.

四、专利

[1]

[2]

[3]

.

.

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京交通大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：

签字日期：

年 月 日

学位论文数据集

表 1.1: 数据集页

关键词*	密级*	中图分类号	UDC	论文资助
学位授予单位名称*		学位授予单位代码*	学位类别*	学位级别*
北京交通大学		10004		
论文题名*		并列题名		论文语种*
作者姓名*			学号*	
培养单位名称*		培养单位代码*	培养单位地址	邮编
北京交通大学		10004	北京市海淀区西直门外上园村 3 号	100044
学科专业*		研究方向*	学制*	学位授予年*
论文提交日期*				
导师姓名*			职称*	
评阅人	答辩委员会主席*		答辩委员会成员	
电子版论文提交格式 文本 () 图像 () 视频 () 音频 () 多媒体 () 其他 () 推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版 (发布) 者		电子版论文出版 (发布) 地		权限声明
论文总页数*				
共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 21 项。				