# 机场地面拥挤分析及控制研究

# Research on Airport Surface Congestion Analysis and Control

*瞿也丰*

## 第一章 绪论

### 1.1 研究意义及背景

进入21世纪以来，我国民航业迅猛发展，民航飞机数、运输总周转量等数据保持持续、高速发展的势头。据中国民航局公布的数据，2015年，全行业完成运输总周转量851.65亿吨公里，比上年增长13.8%，完成旅客周转量7282.55亿人公里，比上年增长15.0%；完成货邮周转量208.07亿吨公里，比上年增长10.8%。国内航线完成运输总周转量559.04亿吨公里，比上年增长10.0%，其中港澳台航线完成16.22亿吨公里，比上年增长0.3%；国际航线完成运输总周转量292.61亿吨公里，比上年增长21.9%。完成旅客运输量43618万人次，比上年增长11.3%。国内航线完成旅客运输量39411万人次，比上年增长9.4%，其中港澳台航线完成1020万人次，比上年增长1.4%；国际航线完成旅客运输量4207万人次，比上年增长33.3%。完成货邮运输量629.3万吨，比上年增长5.9%。国内航线完成货邮运输量442.4万吨，比上年增长3.9%，其中港澳台航线完成22.1万吨，比上年减少1.0%；国际航线完成货邮运输量186.8万吨，比上年增长10.9%[1]。

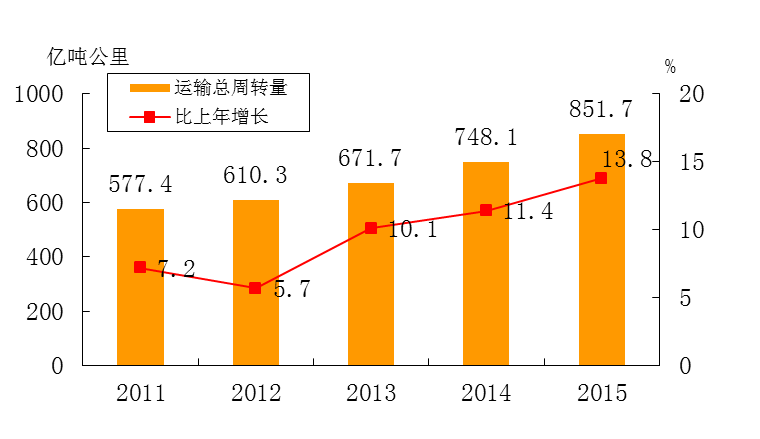


图1-1 2011-2015年民航运输总周转量

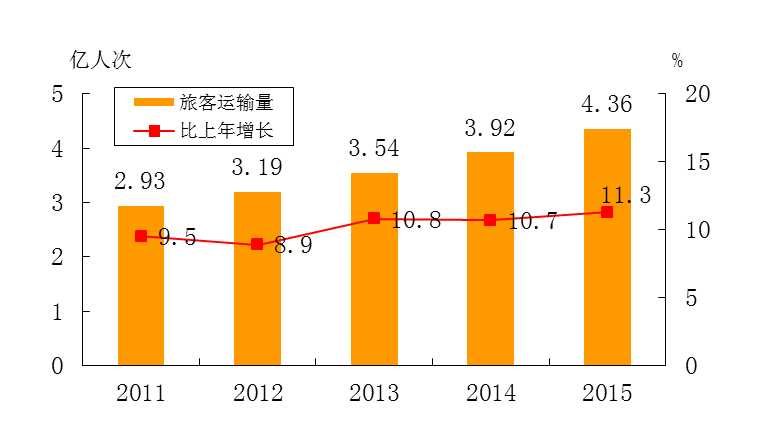


图1-2 2011-2015年民航旅客运输量

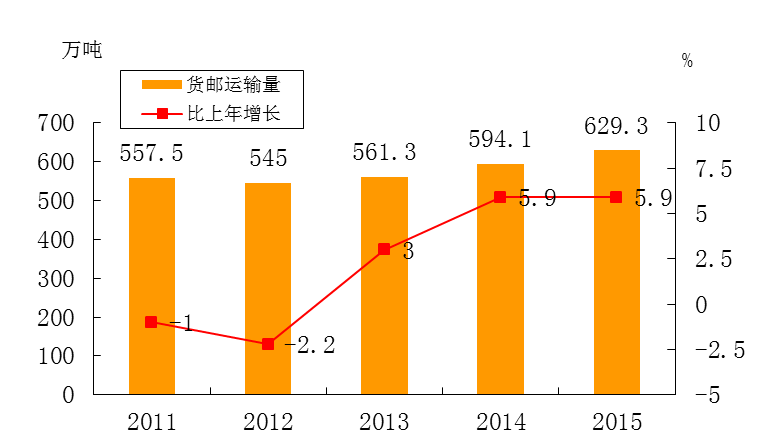


图1-3 2011年-2015年民航货邮运输量

由图1-1~图1-3可以看出，2011年-2015年，我国的民航运输总周转量处于平稳、高速的增长态势。中国商用飞机公司在《中国商飞公司2016-2035年民用飞机市场预测年报》中预测，未来二十年，全球航空旅客周转量将以平均每年4.45%的速度递增。至2035年全球航空旅客周转量将达16.1万亿客公里。年报同时指出，中国地区未来20年航空旅客周转量年均增长率为6.1%，机队年均增长率为5.5%，远高于世界其他地区。至2035年中国航空旅客周转量将达2.7万亿客公里，占全球的16.8%[2]。全世界各大厂商针对中国民航市场发展的预测不尽相同，中国民航的市场尚未达到饱和，且随着经济复苏可能会迎来更大的发展。

高速增长的中国民航市场带来了更高的空中交通流量，进而导致空中交通管理复杂性的提高，事故或事故症候等不安全事件时有发生。同时，空中交通流量大、复杂程度高等特点使得管制员工作负荷日益加剧。

随着地面等待理论的产生和发展，实际运行中相关部门开始利用地面等待的方式将航班的空中等待时间转化为地面等待时间。这一方面降低了空中交通的拥挤程度，减轻了管制员负荷；另一方面，过多的航班进行地面等待，对机场的保障能力提出了新的要求。到场航班由于地面等待的航班过多而无法分配到停机位、同一时段推出航班过多导致机场场面拥挤、跑道入口排队航班导致滑行航班无法穿越跑道等情况，使得机场空侧系统成为机场容量的新瓶颈。场面拥挤问题，会导致额外的航班滑行时间、燃油消耗及尾气排放，损害航空公司的经济效益，同时会影响旅客的行程与评价。

为了解决以上问题，一部分机场选择通过提升机场物理设施，例如新建航站楼、停机坪以及增加跑道等方式，提高机场容量及保障能力。这种方式虽然能够显著增加机场容量及保障能力，但部分航班滑行距离会相应增大，同时需要考虑开发建设、环境影响、资金筹集和建设周期等因素，无法成为及时、有效解决机场拥挤问题的有效途径。因此，需要通过实际运行数据分析导致机场拥挤的成因及关键点，以此为切入点，寻找一套科学有效的技术方法成为解决该类问题的关键所在。

本文基于上述问题，提出场面航班数这一指标作为国内枢纽机场地面拥挤的指标，通过推出率控制的方法，降低航班的额外滑行时间（additional taxi time）。提出符合国内机场运行特点的跑道运行模式划分方法，确定在特定跑道运行模式下推出率控制的具体数量和速度，为管制员提供可视化的推出率建议，减轻管制员的工作负荷，有效降低机场场面拥挤，优化机场运行，提高机场空侧的运行效率。

### 1.2 国内外研究现状

目前，针对机场跑道运行模式的分析和预测方面，国外相关研究比较充分，但国内针对这一方面的研究尚处于起步阶段，对于跑道运行模式的定义仍是基于尾流间隔、雷达间隔等方面。国内关于推出率控制方面的研究刚刚起步。在地面等待策略方面，国内研究重心主要集中于航班队列优化、机场跑道容量以及滑行路径优化等方面。

#### 1.2.1 国外研究现状

1、跑道运行模式研究

1993年，E. Gilbo在对机场容量的研究中提出，跑道运行模式是机场容量的一个重要决定因素，运行模式的不同会影响机场跑滑系统的内部运行时间[3]。

1999年，W. Hall在对跑道运行模式的规划和进离场容量预测的研究中，指出运行模式的选择需要满足机场的运行容量需求[4]。

2006年，Basner, Mathias在对航班噪声预测的研究中开发了名为TNIP Runway Allocator的工具，该系统部署在澳大利亚悉尼和布里斯班机场，能够采集实际运行中使用跑道的组合方式[5]。

2009 年，Jasenka Rakas,Yu Zhang 和Vivek Ramamurthy 提出通过探究机场跑道基本运行模式和这些模式间相互的转移来动态地预测机场系统，使用半马尔可夫过程来分析每个跑道模式的持续时长和转移情况[6]。

2010年，Leihong Li和John-Paul Clarke采用随即动态建模的方法建立了跑道运行模式规划的模型，在一个给定随机风的信息、运行模式容量包线、运行模式切换损失及交通流等参数的时间段内，预测机场能够提供的最大起降流量[7]。

2012年，Krishnakumar Ramamoorthy和George Hunter提出使用确定性和概率性预测模型，对跑道运行模式进行预测。该模型使用2009年和2010年的运行和天气数据对模型进行训练，在给定天气条件和航班时刻的条件下，确定性预测模型能够给出唯一的跑道运行模式，而概率性预测模型能够在给定天气预报的条件下预测跑道运行模式的概率分布。该模型经过实地测试后表明，确定性和概率性预测模型预测的准确性分别为84%和94%[8]。

2014年，MIT林肯实验室在报告中将跑道运行模式作为机场接收率（Airport Acceptance Rate, AAR）选择的一个自变量[9]。实际运行中，管制员根据天气情况（风和能见度）、预计进离场流量及空域状态等要素来选择适当的跑道运行模式。跑道运行模式的切换过程中，管制员、机组和地面人员需要充分协调以保证机场的运行效率。

2016年，Jacob Avery和Hamsa Balakrishnan使用离散选择建模的方法预测跑道运行模式。给定云底高、能见度、起降流量及目前使用的跑道运行模式等条件，该模型能够提供15分钟时间间隔内的跑道运行模式概率预测，同时模型预测时间可以最大扩展到3小时。在SFO、LGA和EWR机场进行的实地测试表明，该模型对3小时时间间隔的跑道运行模式准确性分别为81.2%、81.3%和77.8%[10]。

2、跑道容量研究

1993年，Gilbo提出了经典的机场容量计算方法，基于空中交通管制规则和机场运行的经验数据计算并绘制机场容量包线。使用机场15分钟接收率和起飞率绘制散点图，以一个包含这些数据点的凸集近似估计机场容量包线。通过机场容量包线，对机场的实际运行进行控制，将航班的起降需求控制在容量包线内 [13] 。

1998年，H. R. Idris等人在对机场离场运行中的约束和干扰时指出，跑道系统是影响机场容量的主要瓶颈[11]。Michael Ball等人在2006的研究中对该发现进行研究并得到了相同的结论[12]。

2007年，Milan Janic使用理论模型对近距平行跑道的容量进行计算，得到了这种跑道运行模式下最优的容量。使用该方法得出的机场容量，可以作为使用传统方法计算机场容量的一个重要参考[14]。

2009年，Varun Ramanujam和Hamsa Balakrishnan利用实际运行数据，基于分位数回归的统计方法，系统化分析多机场系统内的到场-离场容量关系。该方法能够识别单一机场和多机场系统的跑道运行模式、天气条件等因素。该方法在EWR、JFK和EWR组成的多机场系统进行实地测试并绘制运行容量包线[15] 。

3、离场进程控制研究

（1）N-Control策略

1997年，Feron和Hansman等人在离场规划的研究中，提出使用虚拟队列理论来减轻机场场面拥挤。虚拟队列理论的实施方案是N-Control策略的理论基础，离场规划中的虚拟队列为离场航班流量定义一个虚拟的等待线，在该范围内的航班能够在下一个时间段内起飞[16]。

2001年，基于N-Control策略的理念，Carr和Feron基于BOS机场的观测数据，在场面处于拥挤状态时，令超出给定控制阀值的航班在停机位等待，当场面拥挤状态下降到标准以下时，立即给停机位等待的航班发出推出指令。使用这种方法能够有效降低跑道排队延误并将其转化为停机位延误，而机场的整体延误水平不会增加[17]。

2008年，Burgain和Feron等人在该理论的基础上，在离场运行拥挤的机场部署相关虚拟队列工具，在机场达到拥挤状态时对机场运行容量进行优化。研究表明，在滑行道处于拥挤状态时，通过优先放行重型机的方法能够降低15%的旅客等待时间[18]。

2009年，Simaiakis和Balakrishnan使用N-Control的思想对美国机场实际运行数据进行观测，发现随着航班持续从停机位推出进入滑行道，起飞率开始呈现增大的趋势。随着推出率继续增大并达到一个阀值N\*后，起飞率不再增大，甚至在某些机场出现起飞率下降的情况。该研究在LGA机场进行实地测试，使用2011年ASPM数据库进行观测，发现在目视气象条件、31丨4跑道运行模式的情况下，推出率超过17架次/15分钟后，起飞率不再增大，此时继续推出航班只会增大航班滑行时间，提高机场场面的运行复杂程度[19]。

（2）推出率控制策略

2010 年，Ioannis Simaiakis 和Hamsa Balakrishnan 基于机场吞吐量和滑行时间，构建了三个综合指标来评价机场拥堵造成的影响，分别是从拥堵机场进港或离港的航班数量、实际滑行时间与空场滑行时间的比较、机场吞吐量与离场队列长度的关系，并将此方法用于评价美国最繁忙的四个机场[20]。

2011年，Nakahara等人开发了多个启发式模型并在JFK机场进行实地测试。量化分析实际运行数据，通过对推出率进行控制，每年可以节省5百万加仑燃油同时减少48000吨二氧化碳排放[21]。

2014 年，Ioannis Simaiakis, Harshad Khadilkar 和Hamsa Balakrishnan 等人提出采用根据统计经验，控制推出率的方法缓解场面拥堵，在停机位处制定策略，避免航班滑行进入拥堵区域，减少滑行时间，并在波士顿机场进行实地测试，验证了模型的可行性[22]。

#### 1.2.2 国内研究现状

1、跑道运行模式研究

目前，国内大型机场均采用多条平行跑道的物理布局方式，以充分满足起降流量为目的，选择相应的跑道运行模式。国内研究人员对于跑道运行模式的研究主要基于民航局相关法规下的运行效率提升，考虑雷达间隔、尾流间隔等约束，将跑道运行模式分为相关平行进近、独立平行进近、独立平行离场以及隔离平行运行几种。

2005年，陈勇、曹义华等人建立了不同起降优先级的单跑道到达/起飞容量评估模型，将该模型应用于北京首都国际机场东西两条跑道的容量评估中，计算得到了不同优先级下首都机场跑道系统的理论容量，并使用2003年春运期间的实际运行数据进行了验证[34]。

2012年，徐肖豪、于跃等人基于各类间隔约束，构建了近距平行跑道容量评估模型，对一起一降和两降运行模式下跑道容量进行了仿真，得出近距平行跑道在不同运行条件下的最优运行模式[35]。

2014年，尹嘉南、胡明华等人提出了多跑道协同运行模式分类方法，建立了多跑道协同运行模式优化模型并对模型进行了精准求解，结果表明，该模型能够显著降低航班延误[36]。同年，该模型被优化并分别应用于独立离场模式与相关进近模式下的优化问题中，均对调度策略的优化具有显著的效果[37]-[38]。

2、地面等待策略研究

2007 年，徐肖豪、臧志恒提出了飞机滑行排序的优化问题，为了最大限度减少滑行时间，提高机场的运行效率，研究中结合飞机的滑行规律，假定滑行路径提前确定，以避免滑行路线冲突为目标，建立了飞机滑行排序问题的整数规划模型并以上海浦东机场为例进行验证[39]。

2008 年，赵嶷飞、姚玲考虑我国空中交通流量复杂的特点，提出了针对我国的空中交通拥挤评价指标体系，以先前研究的综合评价方法为基础，提出了“状态空间分类评价法”与“动态综合评价法”两者相结合的综合评价方法。该方法可以发现飞机运行中发生的拥挤，而且对拥挤时段的交通发展趋势进行预测，为飞机航班的运行控制提供辅助决策信息[40]。

2010 年，汤新民、王玉婷、韩松臣依据跑道、滑行道和停机坪使用规则建立基于Petri 网的场面活动模型及线性不等式约束的活动控制规范，给出了当前规划航空器在满足与场面其他滑行航空器不冲突条件下的极大代数状态方程，并将静态预选路径作为可行解对滑行路径进行动态优化。针对滑行中出现的时间偏差，采用时间窗调整或再规划策略更新路径。最后，仿真实例结果表明，动态路径规划从战术上避免滑行冲突，减少航空器的等待时间，显著提高了场面交通容量[41]。

2011 年，牟德一、刘金凤考虑空中交通管制与滑行中的基本规则，研究了航班的调度策略，将航班在场面的一些定位点的等候时间转移到滑行过程中，并建立求解该问题的混合整数规划模型[42]。

2012 年，陆志伟进行了针对离场航班排序问题的研究，提出了一种简化的终端区位置模型，建立相应的单航路极大代数模型，解决了出港航班调度问题,以及对基于极大代数的无冲突放行时间推测进行研究[43]。

2013 年，李善梅、徐肖豪、王飞研究不确定性机场基于拥挤风险的预测模型和具体的实现方法。将预测机场所需容量的不确定性进行量化处理，从所需容量的不确定性出发，对航班起飞和降落时刻对需求的影响进行了探究，统计不同时间段容量需求变化的随机型，建立不同时间的起降交通需求分布模型。并运用此模型，将起降程序中的容量需求与对应的容量曲线比对，建立了机场拥挤风险预测模型[44]。

### 1.3 研究目标及内容

为了解决大型枢纽机场场面拥挤的问题，需要对机场拥挤状态进行定义，通过对场面航班数进行观测，确定场面航班数的阀值。当机场场面航班数超过这个阀值时，机场处于拥挤状态。在拥挤状态下，航班的额外滑行时间将明显增加，表明此时机场运行效率下降。此时，需要通过推出率控制的方式，将航班的额外滑行时间转化为在停机位的等待时间。通过场面航班数和特定跑道运行模式下机场运行容量，确定下一个时间窗口内可供使用的推出率并为管制员提供可视化参考，从而达到机场场面运行优化、降低管制员工作负荷的目的。

本文内容安排如下：

第一章 绪论。本章首先阐述所需研究课题的背景和研究意义，对国内外在跑道运行模式识别和预测、机场运行容量估计和推出率控制策略等方面现有的研究进展进行介绍，并确定本文需要研究的方法、内容和预期目标。

第二章 机场系统及场面运行。本章对机场物理布局中的各个关键部位进行介绍，对航空器场面运行的关键时间和关键位置进行介绍。提出场面航班数这一指标的计算方法和分布特性，确定机场场面运行拥挤状态的阀值 。

第三章 跑道运行模式研究。本章基于国内外之前的研究，使用传统的跑道运行模式对国内机场的运行模式进行分析。针对国内机场运行的特点，采用K均值算法在单一跑道起降流量高密度散点图中确定聚类中心，通过观察的方式确定聚类半径，以此作为该条跑道主要使用的运行模式。采用北京首都机场实际运行数据，计算首都机场各条跑道主要采用的运行模式。

第四章 平均运行容量研究。本章首先对北京首都机场的起降流量状态进行分析，以起飞率的平均数作为起飞率的代表，确定可能影响起飞率的因素。建立起飞率~推出率以及起飞率~（推出率，接收率）的拟合模型，确定问题是一个凸优化问题并采用最小二乘的方法拟合曲线。采用训练集以外的数据测试模型的预测能力。

第五章 离场航班排队模型研究。本章确定排队模型的输入与输出数据，确定跑道的服务方式，针对排队问题建立数学模型。根据已有的畅通滑行时间，对各状态下航班的额外滑行时间进行预测。利用建立的排队模型，预测航班的排队延误。通过两个延误时间，最终确定航班的预计起飞时间。最后，使用实际数据进行验证。

第六章 推出率控制方法研究。本章基于前文的场面航班数计算、起飞流量预测和航班延误时间预测，最终确定每个时间窗口内能够推出的航班数并采用可视化的方式提供给管制员。

第七章 总结与展望。总结全文的研究内容、研究成果及创新点。同时，指出目前论文尚有不足的部分，为之后的研究指出方向、提出建议。

## 第二章 机场系统及场面运行

机场是航班起降的主要场所，具有链接空中交通运输与地面交通运输的功能，是空地联运的枢纽和关键节点。飞行活动的关键阶段例如滑行、起飞、进近、降落等均与机场有关，机场的正常运行是保障飞行活动安全、高效的关键。机场的运行方式受到机场设施物理布局、当地气象条件、起降航班流量、空域及航路航线状态等多方面因素影响。对机场的运行进行详尽、准确的分析可以在现有的条件下寻找机场运行中的关键节点，对提高机场运行效率、保障机场运行安全具有重要意义。本章主要对机场系统、机场场面运行和机场拥挤状态进行了简要介绍。

### 2.1 机场系统

#### 2.1.1 机场

机场，亦称飞机场,、空港或航空站，是飞行场的一种，供固定翼飞机、直升机、飞艇等中大型飞行器起飞、降落。国际民航组织（ICAO）对机场的定义是，供航空器起飞降落和地面活动而划定的一块地域或水域，包括域内的各种建筑物和设备装置。按照用途的不同，机场可以分为民用机场与军用机场。其中，用于商业运输的民用机场也称航空港或空港。机场主要为航班提供航班运行服务、旅客及货物运输等功能。机场的运行效率是航班运行效率的重要约束因素，航班的起飞、降落以及过站保障等运行均依赖于机场。

机场系统由空域系统和地面系统两部分组成。空域系统是由塔台提供管制服务的区域，包括空中等待区、净空区等。地面系统分为空侧（airside）和陆侧（landside）两个子系统。空侧子系统为航空器的起飞、着陆、装卸客货及维修等功能的实现提供支持，包括跑道、滑行道和机坪三大关键部分，以及其他的附属设施。陆侧子系统为客货的地面运输、飞行服务等提供支持，包括航站楼、通讯展以及塔台等。

#### 2.1.2 跑道

机场跑道的性能及相应的配套设备决定了可以使用该机场起降的航空器类型，可由跑道所在的飞行区等级代码表示。在飞机等级等于或者低于机场飞行区等级时，航空器可以在该机场起降。当航空器等级高于机场飞行区等级时，机场无法提供航空器运行所必需的硬件条件，航空器不能使用该机场起降。

ICAO以及FAA采用相同的飞行区等级代码，飞行区等级代码由一个数字和一个字母两部分组成。其中，数字部分由在海平面、标准大气、无风条件下航空器使用最大起飞重量起飞所需要的最短跑道长度决定，即使用该飞行区的航空器的基准飞行场地长度，分为1~4四个等级；字母部分由使用该飞行区的航空器的翼展以及主起落架外轮外侧边间距决定，分为A~F六个等级，如表2-1所示。例如，波音747-800型飞机的基准飞行场地长度为3000米，因此其分类代码的数字部分为“4”；该型号飞机的翼展为68.5米，因此字母部分为“F”，其主起落架外轮外侧边间距为12.7米，字母部分应为“E”。综上，波音747-800型飞机的ICAO等级代码为“4-F”[23]。

表2-1 飞行区等级代码

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 数字部分 | 跑道长度（米） | 字母部分 | 翼展（米） | 主起落架外轮外侧边间距（米） |
| 1 | L < 800 | A | WS < 15 | d < 4.5 |
| 2 | 800 < L < 1200 | B | 15 < WS < 24 | 4.5 < d < 6 |
| 3 | 1200 < L < 1800 | C | 24 < WS < 36 | 6 < d < 9 |
| 4 | L ≧ 800 | D | 36 < WS < 52 | 9 < d < 14 |
|  |  | E | 52 < WS < 65 | 9 < d < 14 |
|  |  | F | 65 < WS < 80 | 14 < d < 16 |

根据机场跑道条数的不同，跑道系统可以分为单跑道系统与多跑道系统，其中多跑道系统又可以按照物理布局的不同分为平行多跑道系统和交叉多跑道系统。我国多跑道运行机场的跑道系统大多采用平行跑道的布局。国际民航组织将平行跑道定义为：跑道中线相互平行或跑道中线延长线之间的夹角小于15°的非交叉跑道[24]。

### 2.2 机场场面运行

#### 2.2.1 进离场航空器场面运行流程

机场场面拥挤问题分析的关键，在于寻找场面运行中可供观测的变量，作为机场场面是否处于拥挤状态的指标。观测在拥挤指标变化时，机场空侧部分运行参数的变化，以判断场面拥挤的阀值。例如，滑行时间增大、场面某节点通过时间增大、待推出航班数增大以及波道拥挤等现象，能够说明机场场面处于拥挤的状态。在定义拥挤指标之前，首先对场面运行的流程进行描述，如图2-1所示。



图2-1 场面运行流程图

到场航班安全降落在机场后，在得到塔台管制员的许可后脱离跑道进入滑行道，此时航空器移交给地面管制席位。航空器根据地面管制员的指令通过规定的滑行路径到达预定停机位，通过廊桥或摆渡车卸载乘客和货物。通常，机场场面的进出港航空器滑行路径相互独立，尽可能避免共用滑行道，通过这样的方式避免出现航班滑行冲突，导致机场场面拥挤的情况。航空器进入停机位后，地面工作人员放置轮挡，进场滑行过程结束。

在经过一段时间后，航空器完成检修、补给、装载客货等过程，关闭舱门。此时飞行员需要根据提前制定好并交由管制部门备案存档的航班飞行计划，向管制员申请推出许可。管制员根据当时的机场气象条件、周边空域通行能力以及当时的流量控制方案等限制决定是否放行该航班。得到管制员的放行许可后，飞行员向地面管制员申请推出许可，地面管制员根据场面的运行情况及拥挤程度，决定是否给予航空器推出许可。当机场当前的起飞率无法满足航空器持续推出的需求，继续推出航班会增大机场场面运行的复杂程度、造成机场场面拥挤。因此，此时管制员会要求航空器继续在停机位等待。当机场拥挤程度下降，地面管制员给予飞行员推出许可，地面工作人员撤除轮挡，由推车将离港航空器推出停机位，飞行员开启引擎，航空器进入滑行道，开始向跑道滑行。

滑行过程中，航空器需要遵守管制员的要求，依照指定的滑行路径滑到跑道入口等待许可。此时航空器由地面管制席位移交给塔台管制席位，离场滑行阶段结束。当塔台管制员向飞行员发布起飞许可，飞行员可以进入跑道并在起飞准备完成后起飞，之后航班移交给进近管制员，机场所负担的保障任务结束。

#### 2.2.2 重要时刻

在对机场场面运行进行研究之前，首先需要对重要的场面运行时刻进行定义。通过对场面运行时刻的定义，建立起航班进离场滑行时间架构，以此为基础对进离场航班运行中关键时间，如滑行时间、跑道排队时间、延误时间等进行计算。

航空公司在每日执行航班之前，需要制作飞行计划并提交管制部门批准，得到允许的航班才能够进行正常运行。在恶劣天气条件、流量控制、其他用户占用空域或航空器滑行过程和预期有差别等情况出现时，航班的实际运行时刻不能严格遵循飞行计划的要求。因此，需要对航空器在机场场面运行过程中的重要时刻进行定义，如图2-1所示。



图2-2 场面运行时间轴

图2-2是航空器在机场场面运行过程的时间轴，包含以下重要时刻：

1、预计滑出时刻（Estimated Off-Block Time, EOBT），航班计划中预计的滑出时刻。该时刻是预计的离场活动开始时刻。

2、实际滑出时刻（Actual Off-Block Time, AOBT），航空器在该时刻由推车推出停机位，同时ACARS状态变为“OUT”。

3、预计起飞时刻（Estimated Take Off Time, ETOT），航班计划中预计的起飞时刻。通过对航空器从停机位到跑道滑行时间进行估计，从而计算得出的起飞时刻。

4、实际起飞时刻（Actual Take Off Time, ATOT），航班实际抬前轮、脱离跑道的时刻，此时ACARS的状态为OFF。

5、计划降落时刻（Estimated Landing Time, ELDT），航班计划中预计的落地时间，即预计的航空器接地时间。

6、实际降落时刻（Actual Landing Time, ALDT），航班的实际接地时刻。此时ACARS的状态为ON。

7、计划进机位时刻（Estimated In-Block Time, EIBT），航班计划中航空器进入停机位，关闭发动机并开始卸载旅客及货物的时刻。

8、实际进机位时刻（Actual In-Block Time, AIBT），航班的实际进机位时刻，此时ACARS的状态为IN。

#### 2.2.3 场面运行队列

航空器从触地时刻开始，直到下一次起飞离地期间，均需要在机场场面运行。场面运行过程中会形成不同的排队队列，这些队列是将场面各运行子系统的进出点处的航空器虚拟成一个队列，通过队列进入时刻、服务时间以及离开时刻的控制，达到控制场面运行的效果。

跑道、滑行道和停机位是机场空侧的重要组成部分，这几个子系统的进出点位置容易发生拥挤与冲突，降低场面运行效率，增大运行复杂度，增加管制员负荷。因此，需要对场面运行过程中的重要点进行控制。场面运行中有以下几个较为重要的队列：

1、等待机位队列：航空器降落后脱离跑道，通过滑行道滑到停机位附近时，需要进入等待机位队列，等待地面席位的许可。航空器在未进入停机位之前，会对场面航空器的滑行和其他航空器的推出造成影响。

2、等待推出队列：将在停机位等待推出许可的航班虚拟成航班推出队列，等待推出的航班需要持续占用停机位，等待推出队列与等待机位队列长度增加导致机场场面拥挤。

3、跑道排队队列：航班推出后经过离场滑行，在跑道入口处排队等待起飞。离场跑道排队队列可以采用排队模型建模，即D(t)/Ek(t)/1排队模型[19]。其中到达时间服从确定型分布，服务时间服从k阶爱尔朗分布，同一时间内服务台（即离场跑道）只能为一架航空器提供服务。

### 2.3 场面航班数

#### 2.3.1 定义

Harshad Khadilkar和Hamsa Balakrishnan等人在研究中对场面航班数的定义是在时间窗口内，已推出尚未起飞的航班数与已降落尚未进机位的航班数之和[22]，如下所示：



(2-1)



(2-2)



(2-3)

其中，为当日第T个时间窗口的场面航班数，该时间窗口是一个左闭右开区间。根据之前的研究，，，，分别为航班的推出时刻、起飞时刻、降落时刻和脱进位时刻[25]。式(1)、(2)分别为离场场面航班数和到场场面航班数，两式之和即为时间窗口内场面航班数，如式(3)所示。考虑运算次数、数据灵敏度等原因，选取15分钟作为统计场面航班数的时间窗口。

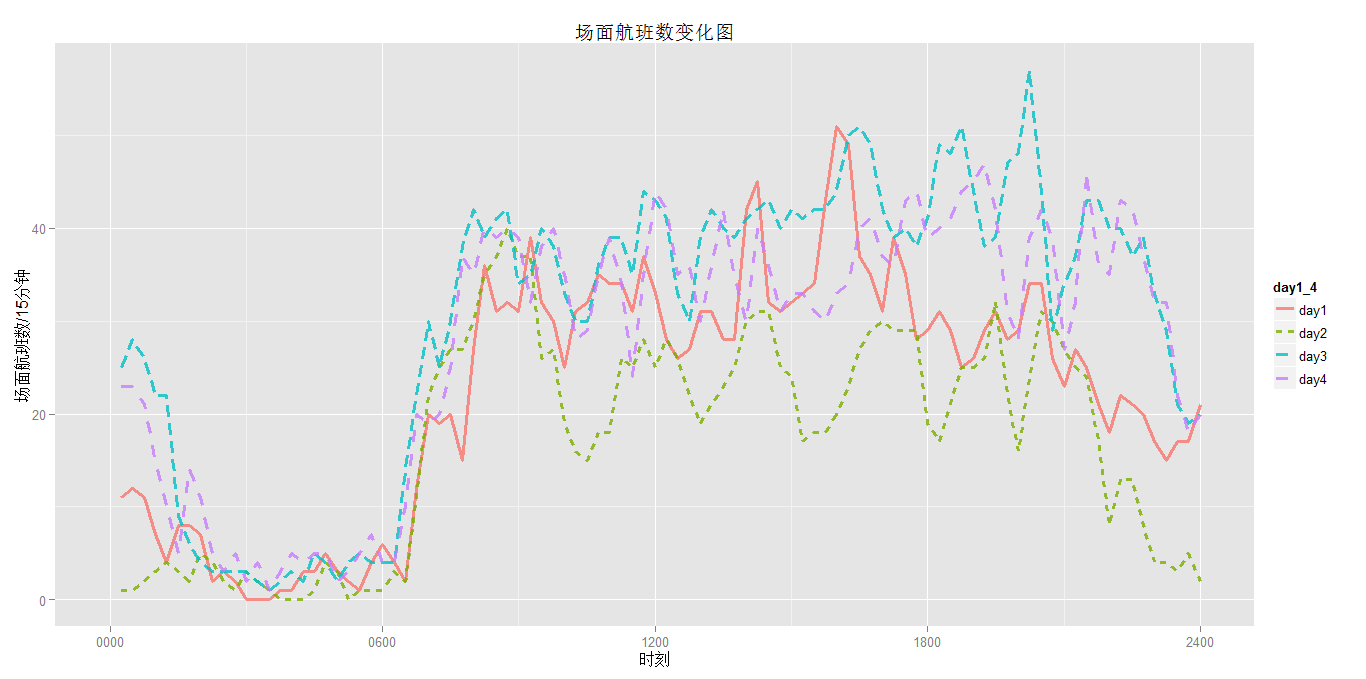


图2-3 各时刻场面航班数变化图

图2-3为任意选取日期的北京首都国际机场全天场面航班数变化图，其中，场面航班数的计算间隔为15分钟。从图中可以看出，从早上0600开始，北京首都机场的早班航班开始推出、滑行、起飞，机场场面航班开始增加。在上午1030左右，机场场面航班数达到较高的水平并将持续保持在这个范围内。晚上2200后，基地在北京首都机场的航班进入停机位进行修正，而外地的航班离开北京首都机场返回过夜基地，此时场面航班数开始下降。凌晨0100，机场场面航班数在较低的范围内变化，直到第二天继续类似的变化趋势。

根据连续多日运行数据的跟踪分析，对同一个机场来说，在没有恶劣天气、严重流量控制等影响因素时，场面运行的变化趋势基本相同。因此，想要基于数据确定处于严重拥挤状态的日期，首先需要对场面航班数的最大值进行研究，通过场面航班数最大值的分布规律，根据统计学原理确定场面拥挤的阀值。

#### 2.3.2 分布研究

对场面航班数最大值的概率分布进行观察，能够直观地看出场面航班数最大值的分布规律，与经验分布进行对照分析，确定可以适用的统计方法，以场面航班数为参数，量化机场场面运行状态。

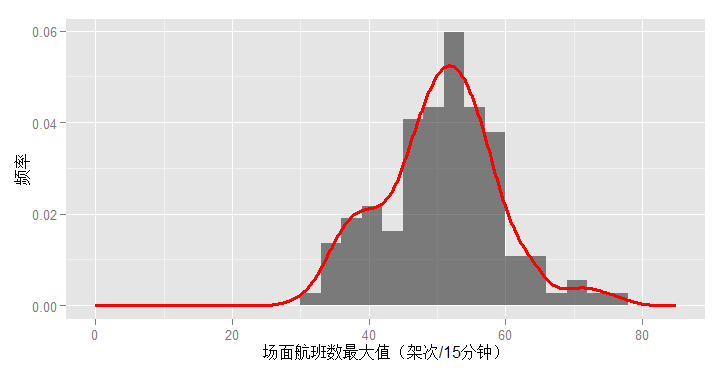


图2-4 场面航班数最大值分布

图2-4为北京首都机场2014年2月至5月场面航班数最大值的分布图，每日的场面航班数最大值的上下四分位点为47架次/15分钟和55架次/15分钟。从图中可以看出，表明场面航班数最大值的分布较为集中，主要集中在46架次/15分钟~60架次/15分钟的区间内。从概率密度图可以看出，场面航班数最大值的分布与正态分布的形态相仿。

对场面航班数最大值进行Kolmogorov-Smirnov检验（K-S检验），确定其是否符合正态分布。首先提出假设，即：场面航班数的分布符合正态分布。经K-S检验得到的p-value值为2.2\*e-1，明显小于指定的显著水平（5%），因此原假设被拒绝。

对场面航班数最大值的原始数据进行分析，导致假设被拒绝的原因可能是场面航班数最大值的数值较少，同一个数值对应的事件数较多导致K-S检验不通过。因此，为场面航班数最大值添加数字噪声，使其数值不再重复。在原数据上增加时基误差（jitter）[26]，不会影响原数据的均值与方差，如表2-1所示。

表2-1 原数据与处理后数据对比

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 数据项 | 原数据 | 添加数字噪声后的数据 |
| 1 | 51 | 51.14022 |
| 2 | 48 | 47.90758 |
| 3 | 47 | 47.12499 |
| 4 | 49 | 48.93848 |
| 5 | 52 | 52.13193 |
| 6 | 55 | 55.10047 |
| … | … | … |
| 均值 | 54.45 | 54.45 |
| 方差 | 6.03 | 6.03 |

对处理后的数据再次进行K-S检验，得到的p-value值为0.09，大于指定的显著水平（5%），如表2-2所示。因此，不能拒绝原假设，即场面航班数最大值的分布服从正态分布。在对场面航班数最大值分布的分析中，可以使用正态分布的特性与规律。

表2-2 数据处理前后K-S检验结果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 处理前 | 处理后 |
| D | 0.992 | 0.109 |
| p-value | < 2.2\*e-16 | 0.09 |

#### 2.3.3 拉依达法则

拉依达准则，又称3σ准则，是用来剔除异常数据的重要准则。该准则假设一组一组检测数据只含有随机误差，对其进行计算处理得到标准偏差，按一定概率确定一个区间，认为凡超过这个区间的误差，就不属于随机误差而是粗大误差，含有该误差的数据应予以剔除。对于正态分布，其数值分布在(μ - σ, μ + σ)中的概率为0.6826，分布在(μ - 2σ, μ + 2σ)中的概率为0.9544，分布在(μ - 3σ, μ + 3σ）中的概率为0.9974。因此认为，正态分布的取值几乎全集中在(μ - 3σ, μ + 3σ)的区间内，超出这个范围的可能性不超过0.3%。拉依达准则认为，在数据分析中，超出该范围的数据不属于含有随机误差的数据，而是含有粗大误差的坏值，应予以剔除。

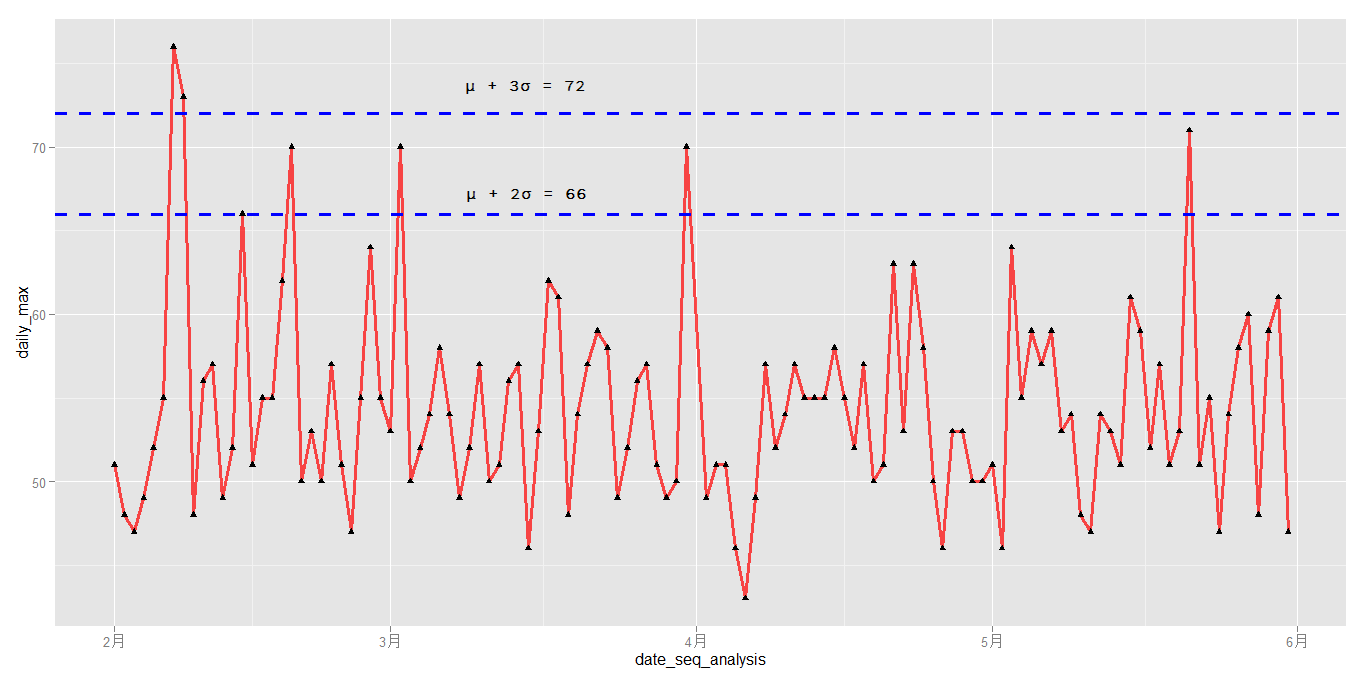


图2-5 场面航班数日最大值变化图

场面航班数的日最大值表征了当日机场场面最拥挤时刻的状态，连续日期间的场面航班数日最大值间影响较小，如图2-5所示。图中标出了两条水平线，分别为66架次/15分钟和72架次/15分钟，这是根据拉依达法则计算得出的μ + 2σ基准线以及μ + 3σ基准线。可以看出，日最大值超出μ + 2σ（简称“2σ日期”）的有6天，超出μ + 3σ（简称“3σ日期”）的有2天。对这些日期的机场运行数据进行分析，如表2-3所示。

表2-3 特殊日期机场离场运行分析

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 类型 | 日期 | 离场流量 | 平均延误时间 | 平均滑行时间 | 平均跑道排队时间 | 15分钟场面航班数最大值 |
| 2σ | 0219 | 800 | 39.59 | 22.3 | 9.32 | 70 |
| 2σ | 0302 | 777 | 36.67 | 23.15 | 7.78 | 70 |
| 2σ | 0331 | 743 | 62.56 | 21.39 | 7.14 | 70 |
| 2σ | 0521 | 792 | 46.98 | 20.55 | 7.53 | 71 |
| 3σ | 0207 | 737 | 73.88 | 32.23 | 18.72 | 76 |
| 3σ | 0208 | 831 | 73.04 | 28.37 | 15.11 | 73 |

以2014年2月为例，该月日平均离场航班777架次，到场航班778架次。平均离场延误时间为32.14分钟，平均离场滑行时间为16.07分钟，平均跑道排队时间为4.25分钟。而在该月场面航班数日最大值超过66架次/15分钟和72架次/15分钟的日期，离场航班的平均延误、滑行以及排队时间均明显高于月平均水平，表现出机场场面运行效率下降，由于额外的燃油消耗导致航空公司经济效益受到损失，同时尾气排放的增加对环境产生不利影响。

#### 2.3.4 3σ日期拥挤分析

根据上文的分析得到，2014年2月7日与2月8日，北京首都机场的场面运行出现不正常的情况，大量航班积压在场面，导致场面运行效率的降低。查询2014年2月的METAR气象报文[27]，在3σ日期，北京首都机场遭遇降雪天气。由于积雪量、气温、除雪除冰设备等因素的影响，使得机场容量下降，进而导致航班延误、额外滑行时间增加及额外的燃油消耗和排放。在这两日北京首都机场有中雪，机场除冰除雪设备限制以及降雪天气运行标准的提高的导致场面产生拥挤现象。

Tim Myers 等人利用高斯滤波器处理机场起飞率数据，建立基准起飞率模型。[28]将实际起飞率与基准起飞率的比值作为降雪天气下机场运行效率的指标。高斯滤波是一种线性平滑滤波，广泛用于高斯信号的减噪过程。高斯滤波信号中的每一个点都是由其本身和邻域内的点经过加权平均后得到，即：

 （2-1）

式(2-1)是一维高斯滤波函数。其中，高斯分布参数σ决定了高斯函数的宽度。

利用这种方法，将机场小时起飞率看作一维输入数据，通过高斯滤波得到机场实际起飞率的变化曲线。经过高斯滤波后，起飞率曲线变得平滑，极端值对曲线的影响被剔除，能够直观显示起飞率与其理论值的波动情况，判断当日机场是否出现了与历史数据不相符合的情况。

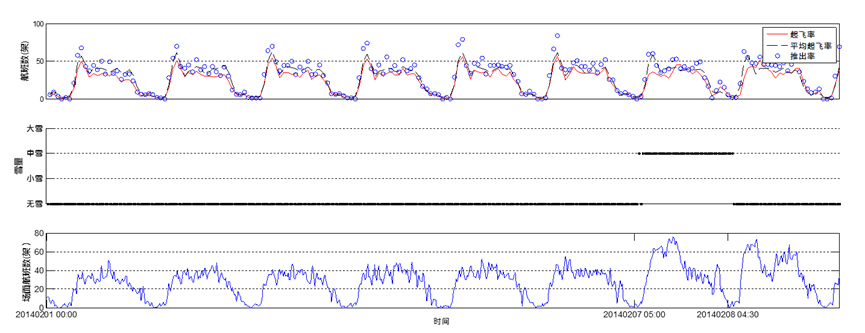


图2-6 降雪天气机场起飞率变化图

图2-6(上)中，散点表示的是机场的小时推出率，实线表示的是经过高斯滤波后的实际起飞率曲线，虚线表示的是每周同一天起飞率的平均曲线。由于我国航班时刻采用冬春航季和夏秋航季来进行安排航班时刻，航季变换会影响机场整体的起降时刻，因此只使用二月和三月的数据计算平均起飞率。从图中可以看出，在2月7日和8日，实际起飞流量曲线不再跟随平均起飞流量曲线变化趋势，持续推出航班而起飞率无法增加，导致场面航班数持续增加，场面航班数日最大值远超其他日期，如图2-6(下)所示。此时，管制员开始通过控制航班的推出以缓解场面保障的压力。

图2-6(中)是根据机场METAR报文得到的机场降雪量图，2月7日0500开始出现中雪，此时航班仍正常推出。持续的降雪导致机场除雪保障能力无法满足全部航班的要求，航班在推出后，需要在除雪点排队等待除雪。机身除雪时间与跑道除雪时间需要严密配合才能保证航班安全起飞，同时降雪天气机场运行安全标准提高，航空器滑行速度降低，航空器间隔增大。因此，降雪天气下的航空器需要有额外的等待时间与滑行时间。

机场的航班时刻安排通常以周为单位，因此每周的同一天计划航班时刻大致相同。选取2014年2月7日、8日的机场运行数据与其对照日期进行对比分析。

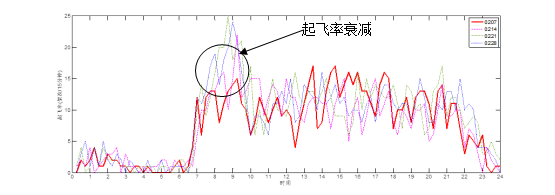


图2-7 2月7日和对照日期起飞率变化图

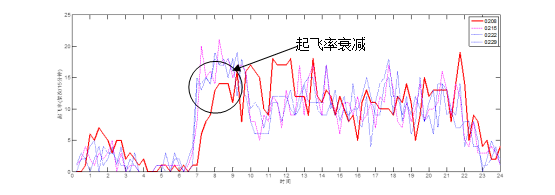


图2-8 2月8日和对照日期起飞率变化图

图2-7、图2-8中实线为有降雪日期的起飞率曲线，虚线为对照日期的起飞率曲线，由于以北京首都机场作为基地的航空公司较多，正常的日离场高峰出现在早7点至10点间。在有降雪出现的日期，雪季保障能力限制了机场的离场容量，导致起飞率出现衰减的现象。降雪从2月7日早5:00持续到2月8日早4:30。降雪对2月7日的影响是持续性的，全天机场起飞率都保持在较高的位置以保证所有受影响的航班能够尽快起飞。而2月8日停止降雪后，机场在中午12:00左右将因为道面除雪、机身除冰等因素导致积压的航班放行，之后机场恢复正常运行。

### 2.4 本章小结

本章首先介绍了机场和跑道的相关知识，对机场场面运行的流程进行描述，介绍场面运行过程中的关键时刻与关键队列。定义场面航班数并将场面航班数与机场拥挤联系起来，通过场面航班数寻找机场场面运行不正常的日期，结合天气条件对降雪天气下的场面运行进行分析。

## 第三章 跑道运行模式研究

跑道运行模式（Runway Configuration）是研究机场容量限制、流量预测、场面滑行时间预测等问题的重要影响要素。实际运行中，管制员根据天气情况（风和能见度）、预计进离场流量及空域状态等要素来选择适当的跑道运行模式。跑道运行模式的切换过程中，管制员、机组和地面人员需要充分协调以保证机场的运行效率[10]。确定适应国内枢纽机场实际运行情况的跑道运行模式计算方法，基于跑道运行模式计算机场出现频率较高的运行参数，为场面运行控制提供参考。本章对国内外跑道运行模式计算方法进行介绍，基于北京首都机场的实际运行参数，采用K聚类的算法，确定以起降流量为参数的运行模式并针对运行模式进行数据分析。

### 3.1 传统的跑道运行模式

跑道运行模式通常表示为“R1, R2丨R3, R4”的形式，其中R1和R2为该运行模式下的离场跑道，R3和R4为进场跑道，进离场可以使用同一条跑道。以波士顿洛根机场（BOS）为例，如图1-1所示，BOS机场为六条跑道的布局形式，在大部分时间（83%）内处于目视气象条件（VMC）下运行。跑道相互之间有交叉，同时有多条滑行道需要穿越跑道，是世界上地面运行最为复杂的机场之一。根据H. Balakrishnan的研究，在目视气象条件下BOS机场最常使用的跑道运行模式为22L, 27丨22L, 22R、4L, 4R丨4L, 4R, 9和27, 32丨33L三种[5]。实际运行中，在使用27, 32丨33L和22L, 27丨22L, 22R运行模式时，飞机需要滑行穿越使用的跑道，因此会对机场的起降产生影响。同时，终端区和航路的运行情况要求机场能够灵活选用不同的跑道运行模式以达到最优化的运行效率[15]。

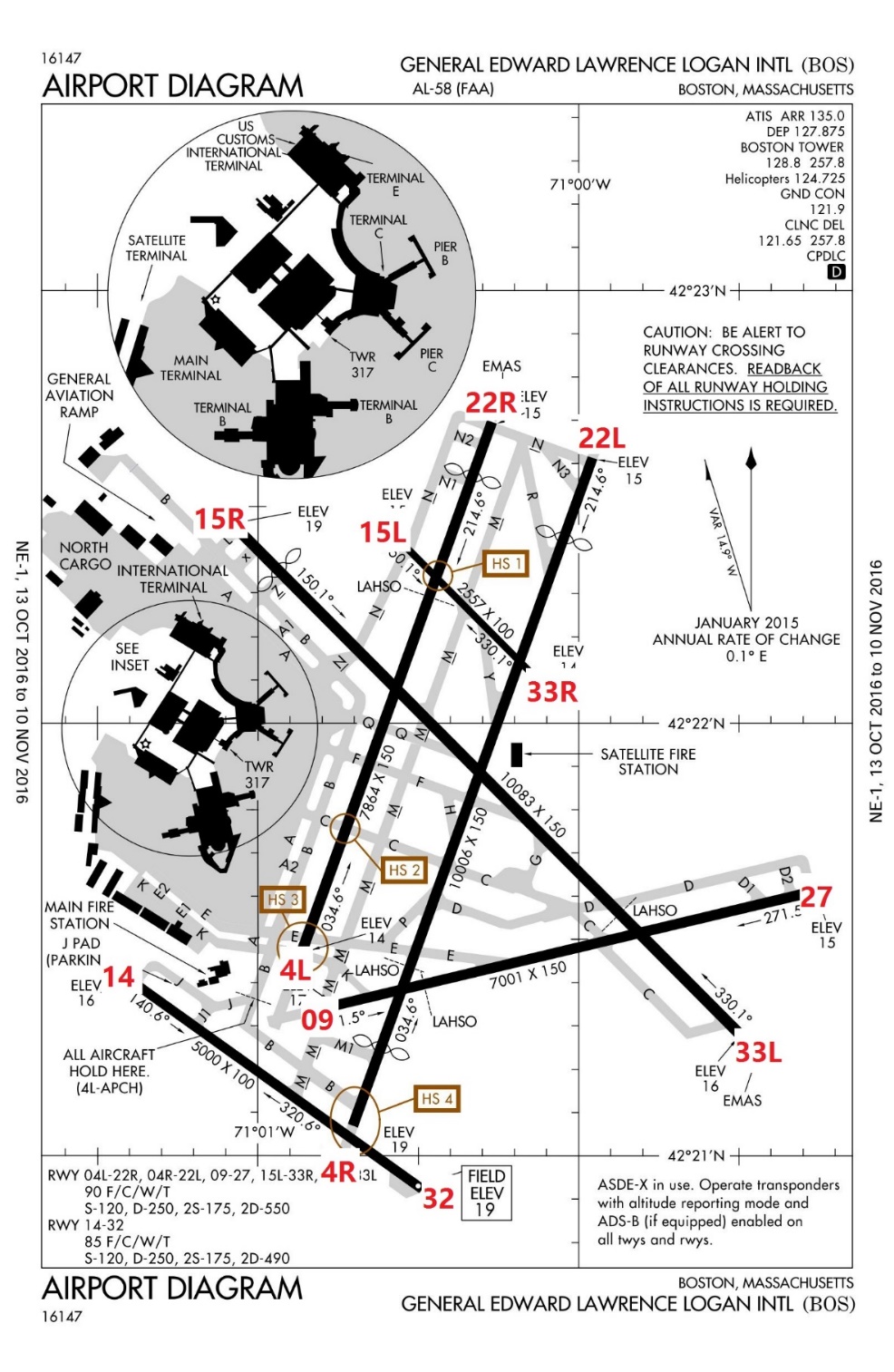


图3-1 波士顿洛根国际机场机场图

北京首都机场采用三条平行跑道的物理布局方式，其中向北运行时使用的跑道号为“01”、“36L”和“36R”，向南运行时使用的跑道号为“19”、“18R”和“18L”，如图3-2所示。根据《2015年全国民航航班运行效率报告》[]，北京首都机场2015年全年起降航班590169架次，日平均起降架次为1617架次，是世界上起降排名第五的机场，且近年来的保持较高的增长态势。三条远距跑道能够保证将跑道间相互干扰情况降到最低，同时能够避免交叉跑道布局带来的过多穿越跑道航班造成的场面拥挤。

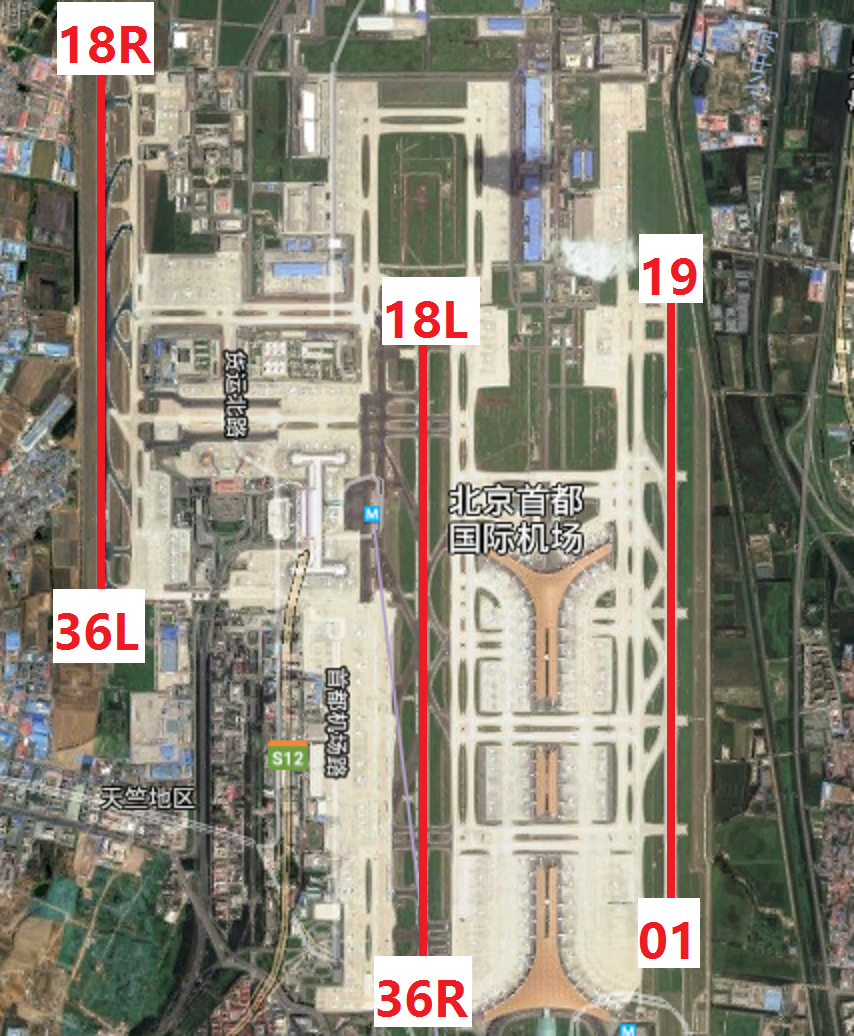


图3-2 北京首都机场跑道布局

图3-3为2014年2月至5月北京首都机场各跑道的起降流量柱状图。从图中可以明显看出，北京首都机场主要使用的跑道是36L、36R和01三条，即向北运行的模式。其中，跑道36R主要用来保障航班起飞而36L主要用来保障航班降落，跑道01的起降流量相差不大。

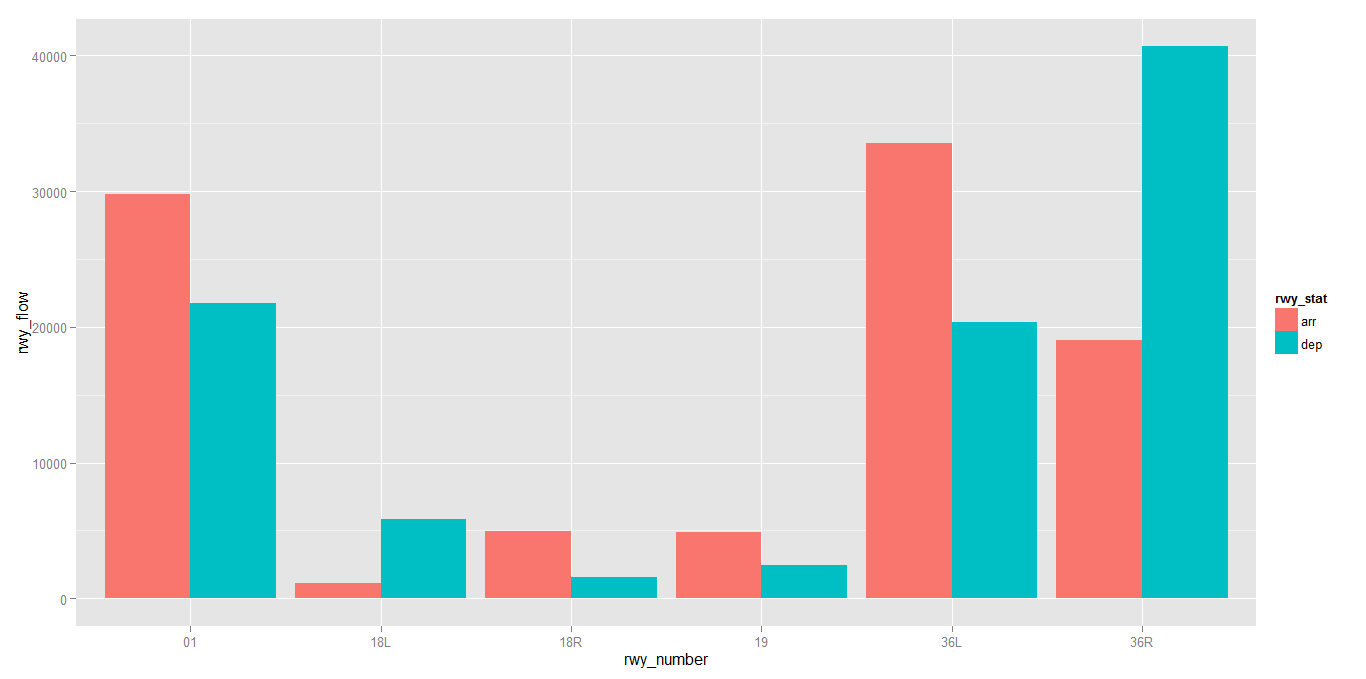


图3-3 北京首都机场跑道起降流量

选取北京首都机场2014年2月的实际运行数据，以60分钟为观测单位，使用之前研究中的方法计算得到的北京首都机场主要使用的跑道运行模式。由Balakrishnan对跑道运行模式的定义可知，三跑道机场可能使用的运行模式有(6!)2种[22]。根据统计，2014年2月，北京首都机场使用过的运行模式共58种，表3-1列出了使用频率最高的六种运行模式。从表中可以看出，北京首都机场主要使用的是三条平行跑道同时运行的模式，即01、36L和36R同时满足起飞和降落的需要。同时，使用频率较高的运行模式，全部为向北运行，与各跑道起降流量的分析吻合。因此，使用过去的研究方法不能有效地对北京首都机场跑道的实际运行方式进行划分，从而研究其他机场运行的要素。

表3-1 北京首都机场主要运行模式

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 跑道运行模式（60分钟） | 使用次数 | 使用频率 |
| 01, 36L, 36R丨01, 36L, 36R | 393 | 58.5% |
| 01, 36L, 36R丨01, 36L | 55 | 8.2% |
| 36L, 36R丨36L, 36R | 48 | 7.1% |
| 36R丨36R | 30 | 4.5% |
| 36R丨36L, 36R | 17 | 2.5% |
| 01, 36L, 36R丨36L, 36R | 17 | 2.5% |

### 3.2 单一跑道运行模式

#### 3.2.1 跑道起降流量分布

在无法对整个机场的跑道运行模式进行定义的情况下，考虑到跑道的起降流量是表征该跑道运行情况的可观测变量，对单条跑道的起降起降流量进行研究，通过基于数据的分析方法，确定能够代表一种运行模式的起降流量组合，作为该条跑道的运行模式。

基于上文的分析，北京首都机场主要使用的是向北运行的模式，即跑道01、36L和36R为主要使用的跑道。选取2月份机场实际运行数据，分别做跑道01、36L和36R的起降航班高密度散点图，如图3-4、3-5和3-6所示。根据高密度散点图的定义，图中颜色的深浅表征了数据点出现频率的高低。从图中可以看出，各条跑道的起降流量在某一个位置表现出高度聚集的状态，即高密度散点图的颜色较深。这说明，单条跑道的起降流量分布具有聚集的特性，可以将该聚集范围作为跑道运行的一种模式，对处于该模式下机场运行的状态进行研究。

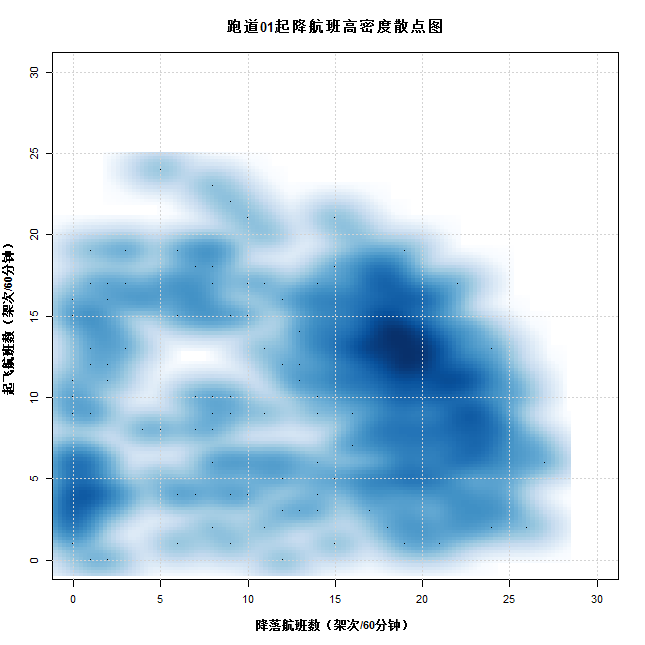


图3-4 跑道01起降流量高密度散点图

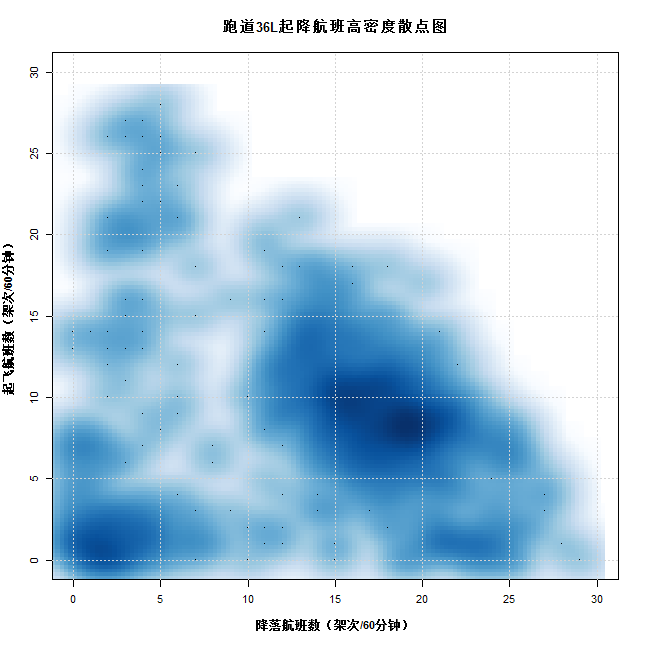


图3-5 跑道36L起降流量高密度散点图

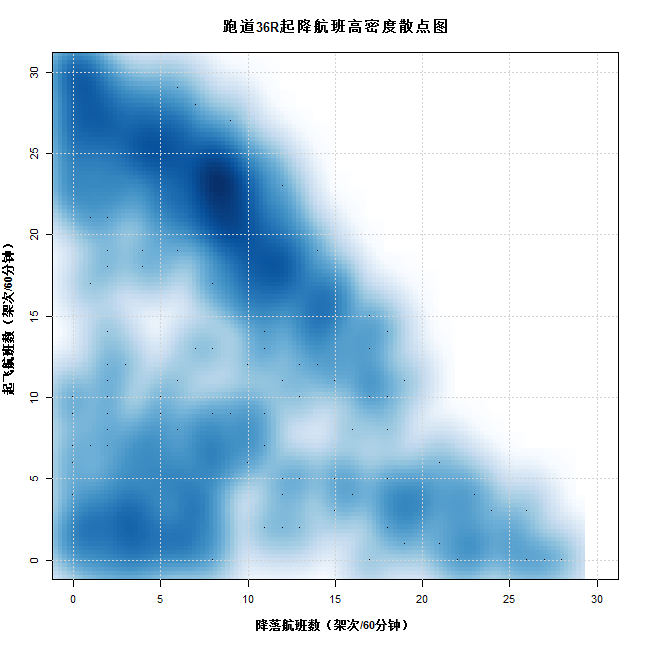


图3-6跑道36R起降流量高密度散点图

基于上文的分析，定义一种新的跑道运行模式，即对单独一条跑道的航班起降情况进行分析，将单一跑道运行模式（Single Runway Configuration）定义为在某一时间段的起降航班数组合，即(D1, D2)丨(A1, A2)，其中D1,D2为运行模式离场航班数区间的上下限，A1,A2为到场航班数区间的上下限。例如，跑道的起飞流量集中于(10, 15)这个区间，而降落流量集中于(5, 8)这个区间，那么该跑道的运行模式为(10, 15)丨(5, 8)。

#### 3.2.2 K均值方法

K均值（K-means）算法是最为经典的基于划分的聚类方法。基本K均值算法的基本思路是：首先，选择K个初始质心，其中K是用户指定的参数，即所期望的簇的个数。每个点指派到最近的质心，而指派到一个质心的点集为一个簇。然后，根据指派到簇的点，重新计算每个簇的质心。重复指派和重新计算的步骤，直到簇不再发生变化，或者质心不再发生变化，算法停止[30]。

以跑道36L为例，使用K均值算法对2014年2月机场起降航班数进行聚类分析。根据对图3-2的观察，设定初始质心为2个。本文使用R语言实现K均值算法。计算得到两个质心的坐标分别为(17.858, 8.390)和(3.194, 7.688)。因为数据点的实际意义为起降航班数，因此质心坐标选为(18, 9)和(4, 8)，如图3-4所示。

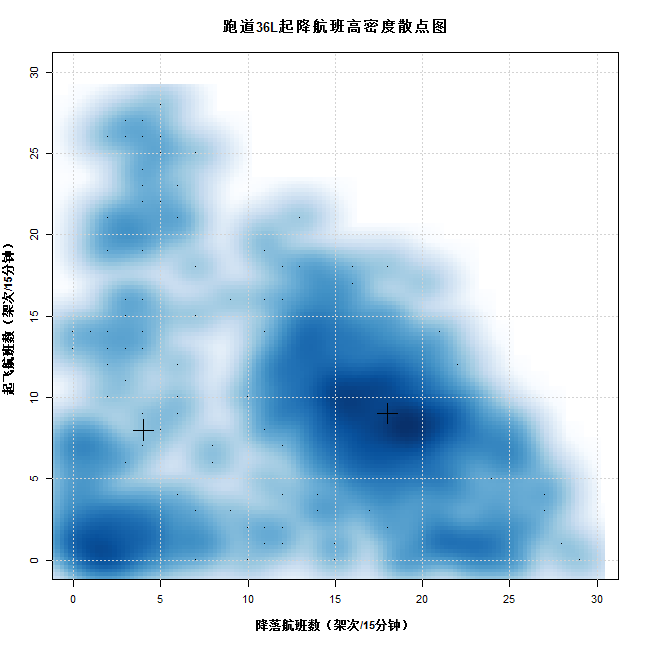


图3-7 跑道36L起降航班K均值聚类中心

为提高运行模式选取的准确性，加入人工判断。由图3-4可以明显辨别出，每小时降落航班数为18架次，每小时起飞航班数为9架次的位置，数据点的密度非常大，显示出明显的聚集特征。因此，选择该点作为主运行模式取值的中心点。

以聚类质心为圆心，以5架次为半径做圆，以此区域作为跑道36L的单一跑道运行模式，如图3-5（左）所示。该区域内包含2月份跑道36L所有数据中35.5%的观测，用来代表跑道36L的一种起降运行状态。用同样的方法为跑道36R和01选择单一跑道的运行模式，如图3-5（中）、（右）所示。

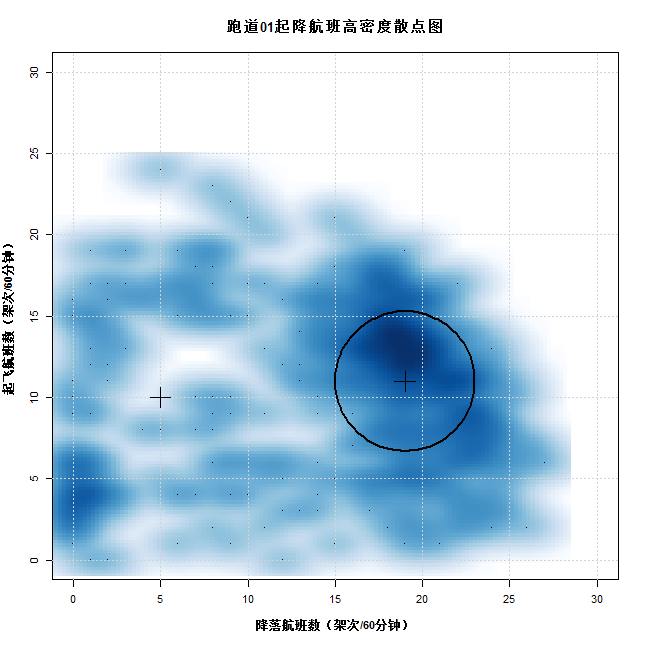
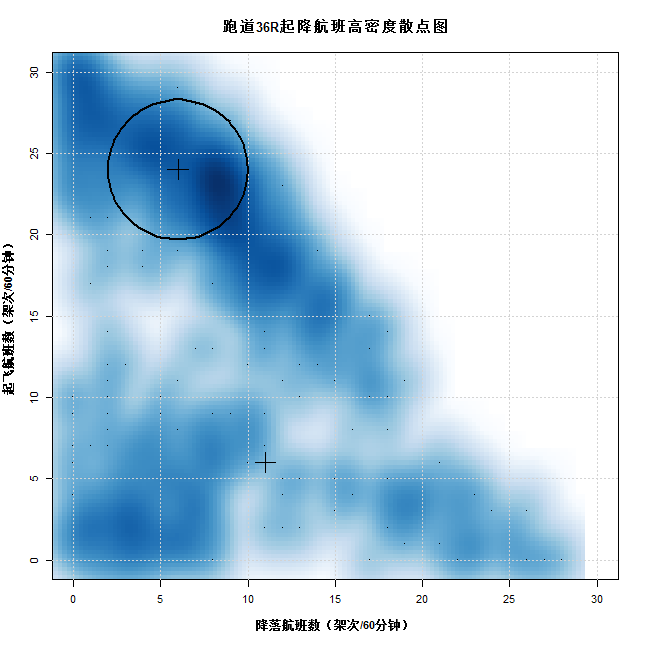
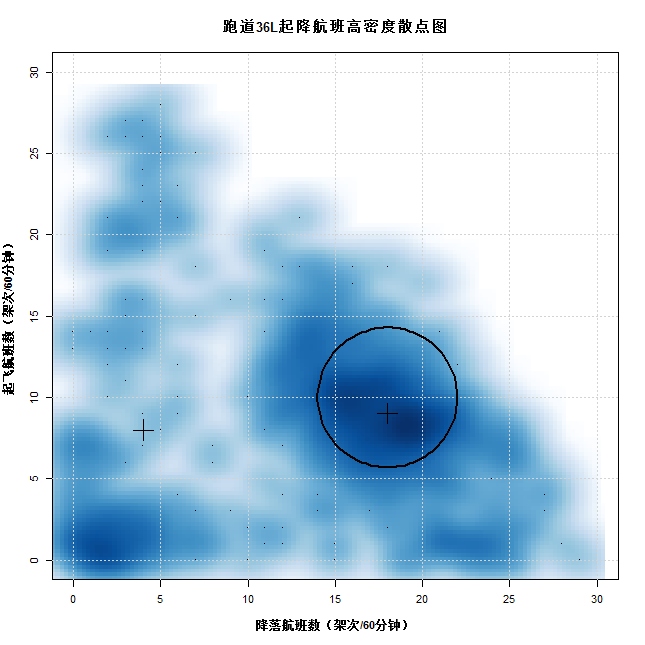


图3-8 三条主要使用跑道的单一跑道运行模式

### 3.3 基于运行模式的运行分析

单一跑道运行模式对航班进行划分，用较小的变化区域代表了较多的航班运行。如图3-6所示，单一跑道运行模式代表了跑道36L、36R和01离场航班的45.9%、44.4%和49.2%，进场航班的55.2%、26.4%和56.1%。离场航班主要使用跑道36R，因为跑道容量限制，导致离场高峰时刻使用36R进场的航班数较少，因此该运行模式分类的方法只能包纳较少的36R进场航班（26.4%）。

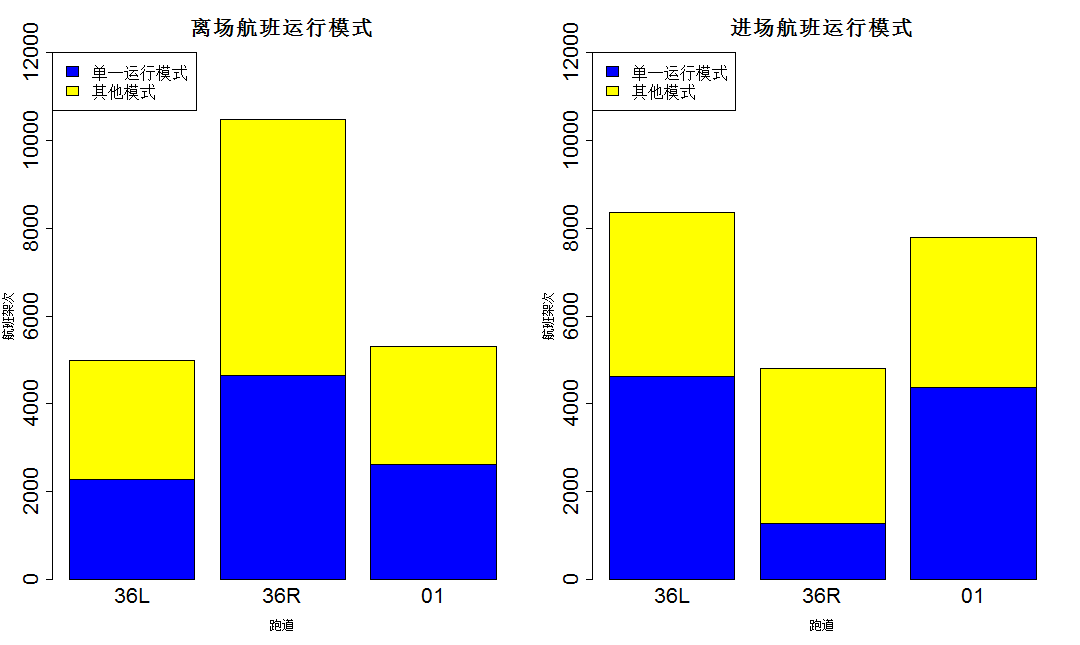


图3-9 单一跑道运行模式航班占比

根据之前的研究，跑道运行模式是影响机场地面运行的重要因素，而滑行时间能够比较明显的表现出地面运行状态。分别计算使用三条跑道航班进离场的滑行时间，由表3-2可以看出，使用跑道36R进场的航班在选定的运行模式下，航班的到场滑行时间分布明显更加集中，这是因为在高起飞率的状态下，到场航班数量较少且机场运行状态较为稳定。

表3-2 航班滑行时间对比

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 使用跑道 | 航班数 | 平均滑行时间（分钟） | 方差 | 单一运行模式下使用跑道 | 航班数 | 平均滑行时间（分钟） | 方差 |
| 36L离场 | 4982 | 13.53 | 10.40 | 36L离场 | 2289 | 12.54 | 9.43 |
| 36R离场 | 10484 | 17.99 | 11.83 | 36R离场 | 4655 | 20.18 | 12.81 |
| 01离场 | 5318 | 14.18 | 10.10 | 01离场 | 2617 | 15.20 | 10.50 |
| 36L进场 | 8365 | 9.72 | 6.66 | 36L进场 | 4624 | 9.90 | 5.56 |
| 36R进场 | 4799 | 6.08 | 7.84 | 36R进场 | 1269 | 5.83 | 3.09 |
| 01进场 | 7793 | 7.59 | 4.22 | 01进场 | 4369 | 7.61 | 4.30 |

### 3.4 本章小结

本文使用原有的跑道运行模式定义对北京首都机场的运行模式进行划分，发现由于机场物理布局和空域结构上的区别，导致原先的定义无法明显划分出北京机场的跑道运行模式。本文提出一种新的跑道运行模式定义，即将每一条跑道的起降率范围作为该跑道的运行模式。运行模式的质心使用K均值算法计算得到。通过数据分析，表明这种划分方法能用较小的子集表示较多时段的跑道运行状态。计算得出，可以用±5架次的范围归纳跑道36L到场55.6%的航班。

## 第四章 平均运行容量研究

机场容量通常通过在出现持续推出航班时跑道系统能够服务的平均航班数来定义。跑道系统能够保障航空器的起飞和降落，因此跑道系统的容量由特定的起飞率与接收率组合来表示，即机场容量包线[31]。本章提出了一种跑道系统容量包线的估计和表现方法。同时，在不同影响变量下对离场容量进行可视化分析，确定不同影响因素对机场离场容量的影响，如推出率、到场流量等。

### 4.1 机场流量分析

图4-1是北京首都机场各时段的平均小时流量随时间变化曲线。从图中可以看出，从早上5时开始起降流量增大，之后保持在较高的数值，直到晚22时开始下降。长时间处于高负荷运行状态，对机场保障能力、管制员负荷、尾气排放及噪声控制提出较高的要求。

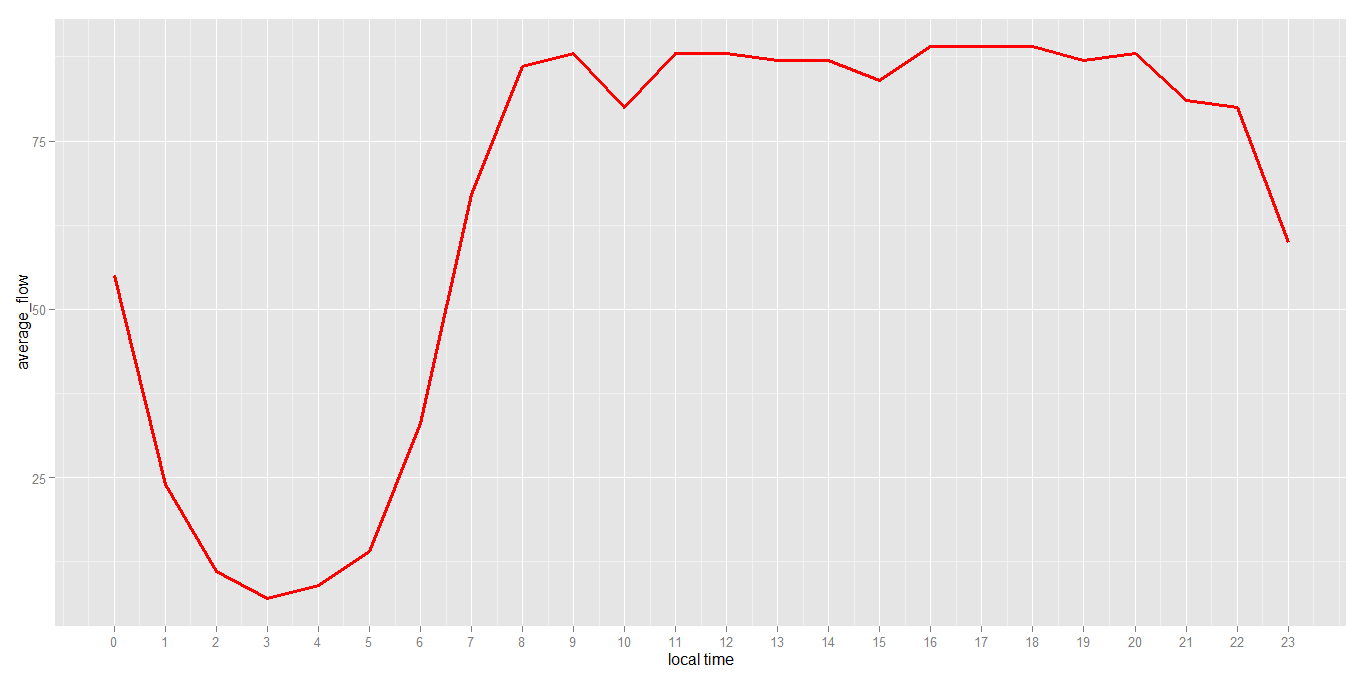


图4-1 北京首都机场时刻平均流量

根据中国民航局公布的协调机场小时容量，北京首都机场的容量为88架次/小时[32]。在实际运行中，北京机场的小时流量常超过规定的容量值。如图2-1所示，虚线的位置为88架次/小时，实际运行中，北京机场有23%的小时流量超过规定容量，机场处于高负荷运行状态。从图中可以看出，小时流量分布有两个峰值，说明小时流量值主要分布于两个位置，小部分集中在低流量值（0-15架次/小时）区域，代表北京首都机场在凌晨处于低负荷运行时的状态。而小时流量大部分集中在高流量值（60-120架次/小时）区域，说明北京首都机场每日长时间处于较高负荷的运行状态中。

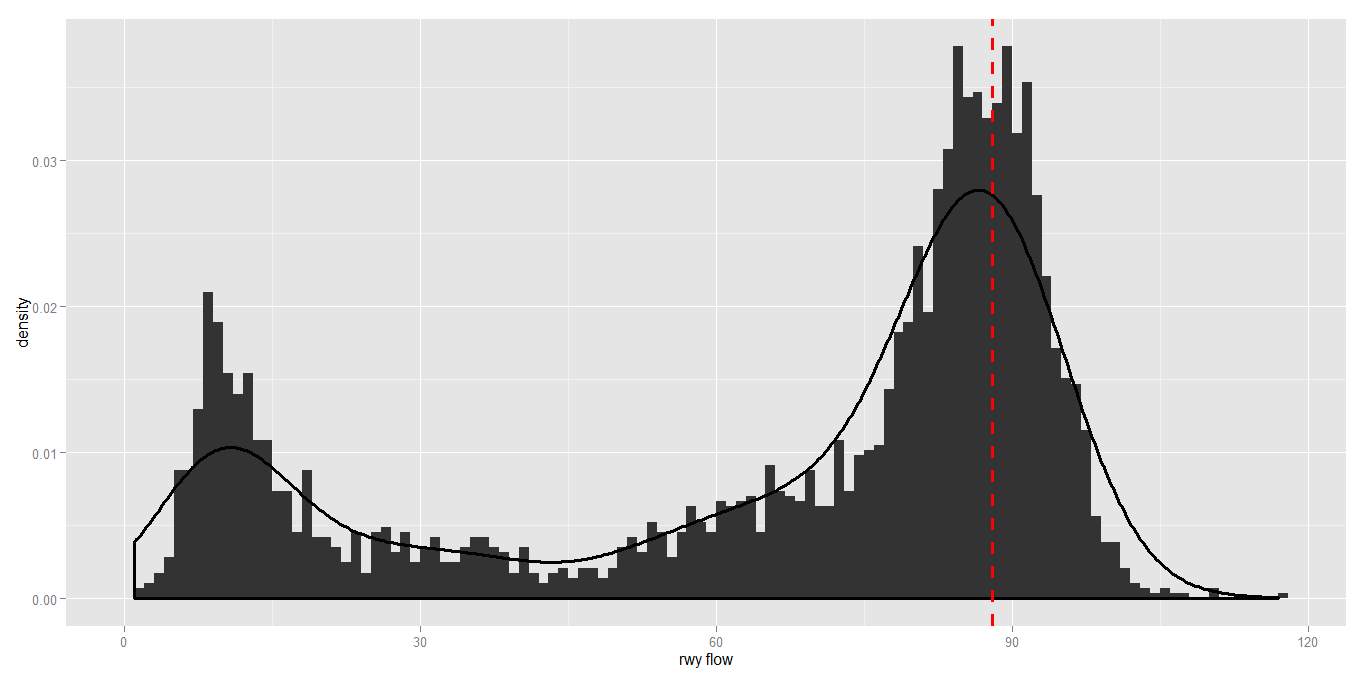


图4-2 机场小时流量分布图

### 4.2 平均离场流量模型

为了表征机场容量，需要建立平均离场流量预测模型。因此，以15分钟起飞率为因变量，离场场面航班数为自变量建立方程。离场场面航班数（N(t)）定义为在t时间段内处于离场滑行阶段的航班数，即该时间段内已经推出、尚未起飞的航班数。15分钟起飞率（T(t)）定义为t时刻开始的15分钟时间段，即[t, t+15]区间内，起飞的航班数。

图3-1为北京首都机场2014年2月至2014年5月的离场场面航班数-起飞率平均数、中位数的变化曲线及误差线，同时对两个统计量分别进行拟合得到的趋势线。观测的4个月共有92,661个(N, T)数据对。图3-1(a)描述了在不同15分钟离场场面航班数的情况下跑道15分钟起飞率的平均数、中位数。误差线表示了每个推出率值对应的起飞率波动情况。随着航班推出率的增大，跑道起飞率也随之增加，直到推出率达到临界值N\*时，起飞率的增加趋势结束，起飞率开始在一个区间内波动，没有明显的增长。从3-1(a)中可以看出，N\*在38架次/15分钟附近，此时的起飞率饱和值为17架次/15分钟。

同时，从图4-3中可以看出，当机场场面航班数较多时，继续推出航班不能提高场面运行效率，较多的离场航班间的相互冲突会导致起飞率不再增大，甚至在离场场面航班数超过45架次/15分钟时，起飞率开始下降。

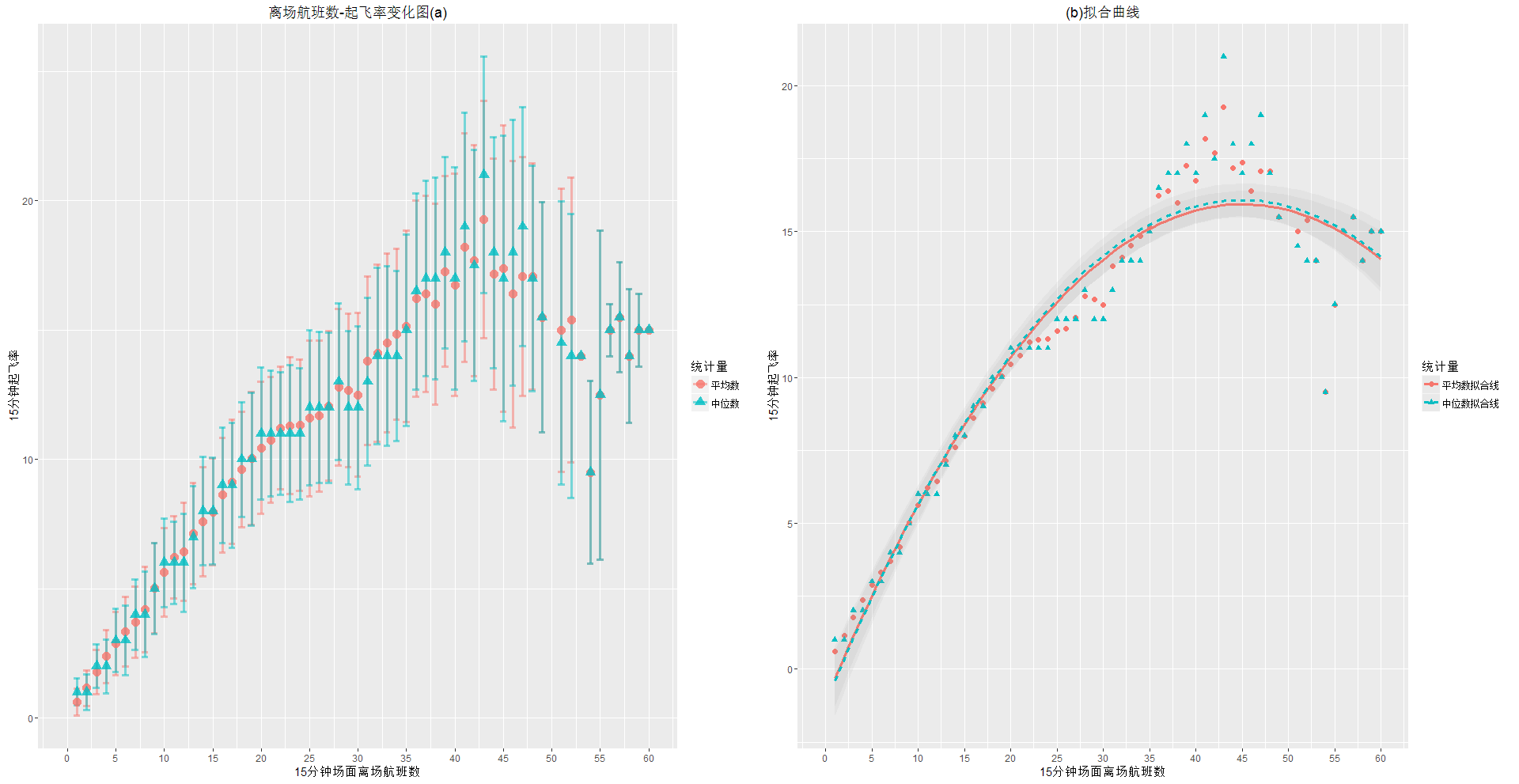


图4-3 机场运行流量包线研究

#### 4.2.1 起飞率~离场场面航班数拟合模型

回归分析通过建立一条能够最好代表所有观测的函数，用该函数代表因变量与自变量的关系，通过自变量的变化来预测因变量的变化。通过回归分析，建立以起飞率的平均数和中位数为因变量、离场场面航班数为自变量的拟合方程。和分别代表平均数和中位数的拟合方程，该方程遵循以下假设：

1、起飞率是推出率的单调非减函数；

2、起飞率是推出率的凸函数。

从离场场面航班数-起飞率变化曲线可以看出其具有凸函数的特性，凸函数的问题可以转化为最优化问题，在凸优化中的局部最优值必定是全局最优值。因此，接下来对起飞率是离场场面航班数的凸函数这一假设进行证明：

1、由物理意义可知，离场场面航班数和起飞率的值显然均为自然数；

2、设离场场面航班数从(x-1)架次/15分钟增加到x架次/15分钟时，起飞率的变化量为y架次/15分钟，其中y小于等于1。增量y可以看作下一个15分钟内第x架次航班起飞的概率。

3、当离场场面航班数从x架次/15分钟增加到(x+1)架次/15分钟，设此时起飞率的变化量为z架次/15分钟，z大于y。若容量允许，第x+1架次航班起飞的概率为z。在这种情况下，若第x架次航班未能起飞，显然第x+1架次航班必然不能起飞。因此，第x架次航班起飞的概率不小于z。此时z小于等于y。

4、综上所述，2、3得到的结论相互矛盾，因此起飞率是离场场面航班数的凸函数。

通过图4-3(a)可以看出，当离场场面航班数持续增大直到超过阀值，起飞率不再增大甚至出现下降。导致这一现象的原因是，在机场场面运行处于饱和状态时，当航班持续推出使得离场场面航班数达到较高的值，机场场面运行达到阀值同时跑道容量开始下降。例如，当跑道入口处有离场航班排队时，需要穿越跑道的航班滑行将受到影响，因此机场场面运行效率降低，直接对起飞率产生影响。

除此之外，除离场场面航班数外还有其他变量会影响起飞率。例如，风向风速的变化使得机场需要改变跑道运行模式，已推出的航班需要等待切换过程完成，起飞率因此降低。航班持续推出使得场面航班数增大，机场跑道容量无法满足全部离场滑行进程的航班。

综上所述，建立起飞率平均数关于离场场面航班数的凸优化问题：



(4-1)

subject to:



(4-2)



(4-3)



(4-4)

同理可得起飞率中位数关于离场场面航班数的凸优化问题：



(4-5)

subject to:



(4-6)



(4-7)



(4-8)

回归拟合的结果如图4-4与图4-5所示，平均离场流量平均数在离场场面航班数N=45架次/15分钟后达到饱和值16架次/15分钟，而此时的离场流量中位数为19架次/15分钟。因此，通过观测得出，该运行模式下的跑道系统，在离场场面航班数达到45架次/15分钟后的平均离场容量为16架次/15分钟，或64架次/小时。离场场面航班数在40~50架次/15分钟附近变化的时候，离场流量达到稳定值。而当离场场面航班数超过50架次/15分钟时，离场流量的平均数和中位数均发生明显下降，表明场面拥挤导致机场运行能力的下降。

可以发现，该方法也可以扩展到对离场流量上分位数的研究[33]。通过建立分位数回归模型，同样可以建立以下凸优化问题：



(4-9)

subject to:



(4-10)



(4-11)



(4-12)

这里的p代表需要用来分析的分位数值，例如对中位数的研究，p值为0.5，而对90%分位数，p值为0.9。

#### 4.2.2 起飞率~(推出率, 接收率)的影响

根据之前研究中绘制的北京首都机场容量包线，在机场降落率增大到一定程度后，起飞率不能继续随推出率增大而增大[34]。降落率和推出率同时影响机场的起飞率。建立起飞率关于降落率和推出率的模型来进行分析。

定义降落率A(t)为15分钟时间段[t, t+15]内机场降落的航班数，T(t)为15分钟时间段[t, t+15]内机场起飞的航班数，N(t)为15分钟时间段[t, t+15]内机场推出的航班数。二元拟合模型增加以下约束：

1、根据机场容量包线可知，在一个确定的推出率下，起飞率是降落率的非增凹函数。该假设由机场的容量包线特性决定，Morisset在2010年的研究中对其进行了证明；

2、对任意接收率的取值，起飞率是推出率的函数，且其不能在接收率较低时保持较大的增长率；

3、对任意推出率的取值，起飞率是接收率的函数，且其不能在推出率较低时保持较小的下降率。

因此，该问题可以转化为以下模型：

给定m个三维数据对N(t)、A(t)及T(t)，标记为(u1, v1, y1),…,(um, vm, ym)。建立方程 ，该方程估计了起飞率的均值，即得到：



(4-13)

其中，N(t)、A(t)的取值均为自然数。因此只需要对g(0, 0),…,g(n, l)的值进行估计，n和l的的取值为N(t)和A(t)的最大值，即：，。由上述分析可知，g为N(t)和A(t)的分段线性函数，这样就将三维的问题降维成了一个二维问题：



(4-14)

subject to:



(4-15)



(4-16)



(4-17)



(4-18)



(4-19)



(4-20)



(4-21)

下面对该模型进行简要解释。方程(4-16)和(4-17)代表接收率和起飞率是推出率的单调非减凸函数。方程(4-18)和(4-19)代表推出率和起飞率是接收率的非减凸函数。最后，方程(4-20)表示在增大推出率时起飞率的边际收益随接收率的减小而增大，而方程(4-21)则表示减小接收率时起飞率的边际收益随推出率的减小而减小。

通过以上约束条件，将起飞率定义为推出率和接收率的方程。（图）是不同接收率条件下的起飞率-推出率曲线，由图可知，接收率会对起飞率造成影响。（图）为不同推出率条件下的起飞率-接收率曲线，从图中可以看出，接收率是起飞率的影响因素。

### 4.3 运行容量包线

## 第五章 离场过程排队模型研究

为了减轻机场场面拥挤，首先需要量化拥挤与离场滑行延误之间的联系。 对联系进行量化，有助于开发拥挤控制与优化算法，减少滑行延误时间以及其他相关消耗，例如燃油消耗、尾气排放以及管制员负荷等。在本章的研究中，不考虑航班推出时刻的不确定性，认为在较短的时间间隔内（15分钟）航班的推出时刻已知且不受其他因素影响。

### 5.1 离场排队模型

#### 5.1.1 输入与输出

为了预测机场运行效率，假设推出时刻已知且不考虑不确定性，完整的排队模型输入参数如下所示：

（1）每架航班的推出时刻；

（2）t时刻开始15分钟时间间隔内的到场流量，记为A(t)；

（3）气象条件（MC）与跑道运行模式（RC）组合，记为（MC, RC）；

（4）t时刻开始15分钟时间间隔内空域的可接受能力，记为SRAPT(t)。

根据模型的计算，可以得到以下输出参数：

（1）t时刻开始15分钟时间间隔内的起飞流量，记为T(t)；

（2）t时刻开始15分钟时间间隔内的推出率（场面拥挤指标），记为N(t)；

（3）t时刻开始15分钟时间间隔内跑道排队等待航班数，记为Q(t)；

（4）t时刻开始15分钟时间间隔内场面离场航班数，记为R(t)；

（5）航班L的离场滑行时间期望E[τ(L)]；

（6）航班L在跑道队列中等待的延误时间期望E[DL]与方差Var[DL]；

（7）航班L从推出时刻到起飞时刻间机场的离场航班数NQ(L)；

（8）到达跑道时刻（航班进入离场排队队列的时间）。

#### 5.1.2 模型架构

离场过程排队模型由两部分组成，如图5-1所示。第一部分为滑行时间预测模型，对航班从停机位推出到进入离场跑道排队队列的过程进行模拟，预测滑行需要的时间。第二部分为排队延误模型，通过建立排队模型，计算航班在离场跑道排队队列中需要消耗的时间。对模型两部分计算出的时间相加，即得到航班从推出到起飞所需的时间，从而达到根据推出时刻表得出起飞时刻表的目的。

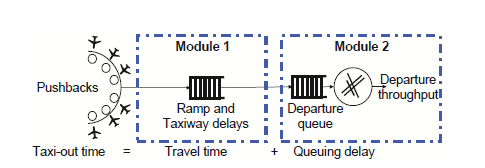


图5-1 离场过程排队模型

根据模型架构介绍，可知航班L的离场时间可以表示为：



(5-1)

方程(5-1)中的是航班L从推出到进入离场跑道排队队列的滑行时间，为航班L在离场跑道排队队列中等待消耗的时间。模型两个部分之间的联系是第一部分的输出变量，即跑道时刻表。本章中对推出的定义为在航班离开停机位的时刻，离场时间定义为从推出到航班抬轮离地间的时间间隔。

### 5.2 滑行时间预测

离场模型的第一部分为航班从推出到起飞过程中滑行时间的预测。相关进程的描述如下：

航班根据给定的推出时刻从停机位推出，进入停机坪区域并开始自主滑行。通过地面管制员给定的滑行路线，经由滑行道系统滑行至跑道入口处的离场跑道排队队列中。在这个过程中，不同航空器之间会发生干扰与冲突。例如，航空器推出进入停机坪较为狭窄的区域、穿越处于使用中的跑道、进入有航空器正在滑行的滑行道中或是为了避免进入场面拥挤区域而选择的绕行路线。可想而知，在这个过程中，航空器的实际滑行时间将大于从停机位到起飞离地的理论滑行时间，出现滑行延误。

航空器的离场滑行时间可以由下面的方程表示：



(5-2)

其中，为理论上航空器所需要的滑行时间，即畅通滑行时间。而反映了在滑向离场跑道的过程中，由于停机坪和滑行道系统中其他航空器造成的滑行延误。可能产生影响的航空器即为离场场面航班数R(t)，其值等于N(t)与Q(t)的差值。其中，畅通滑行时间是航空器在不受阻碍的情况下的自由离场滑行时间。FAA将一架航空器在不考虑天气状况、地面航空器相互影响等滑行影响因素干扰的条件下，航空器从停机位推出到起飞离地的理论滑行时间，定义为畅通滑行时间[45]。赵嶷飞、唐华龙利用回归模型，对北京首都机场从停机位531至536推出、使用跑道36R起飞的航班畅通滑行时间进行计算[46]。

#### 5.2.1 离场滑行时间估计

采用回归模型计算畅通滑行时间，与停机位和使用跑道的关系非常大。畅通滑行时间受航空公司、停机位、机型、目的地、天气条件、跑道运行模式以及使用的跑道等因素影响[19]。根据上文的研究，北京首都国际机场的主要跑道运行模式均采用跑道36R、36R和01三条。因此，为了简化问题，在研究中只考虑使用这三条跑道离场的航班。本节提出一种新的畅通滑行时间定义方法，通过离场滑行时间历史数据，对畅通滑行时间进行估计。

根据上文的研究，场面航班数定义为在时间窗口内，已推出尚未起飞的航班数与已降落尚未进机位的航班数之和。此时的畅通滑行时间定义为当场面航班数继续增加，而滑行时间不再继续增加时的值。当场面航班数较低时，航空器的滑行是畅通的、不受阻碍的。而当航空器进入离场跑道排队队列后，在该航空器之后到达的航空器都不会对其产生影响。

假设离场滑行时间是场面航班数的非减凸函数，每架航空器都有抵达离场跑道的最短滑行时间。当航空器在低场面航班数的条件下滑出，其受到其他航空器阻碍的概率较低，这个概率随着场面航班数的增加而增大。场面航班中在指定航空器前推出、尚未被超越的航空器，以及比指定航空器滑行速度更快的航空器，可能在滑行过程中超越该指定航空器，更早到达离场跑道排队队列。每架在滑行中超越的航空器，其跑道服务时间接近于指定航空器所增加的离场滑行时间。

Clewlow在2010年的研究中，对场面航班数的定义进行调整，提出了修正场面航班数（adjusted traffic）的概念[25]。修正场面航班数Nadj(L)，定义为航班L推出时已经处于离场滑行阶段的航班数与航班L滑行过程中推出的航班数之和。在场面航班数较少的情况下，航班在离场跑道排队队列中的等待时间较短，此时的实际场面航班数与修正场面航班数值也基本相同。

建立以修正场面航班数为自变量、离场滑行时间为因变量的非减凸函数模型。给定m对参数(Nadj(L), τ(L))，记作(u1, y1),…,(um, ym)，目标函数是一个非减的凸函数f，用来估计离场滑行时间τ的平均数，即：



由于Nadj的取值为自然数，因此只需要计算f(0), f(1),…,f(n)的值，这里的n是Nadj的最大值。函数f由下面的凸优化问题求解而来：



(5-3)

subject to:



(5-4)



(5-5)



(5-6)

#### 5.2.2 停机坪与滑行道影响

在之前的研究中，停机坪与滑行道上的其他航班会对目标航班的滑行时间产生影响[19]。将这个影响时间定义为滑行延误，与(5-2)式结合，得到：



(5-7)

方程(5-7)中，项是用来表征离场航班间相互影响的线性修正。其中，参数与机场和跑道运行模式相关，可以近似等于航班滑行过程中停止的次数（例如通过场面拥挤位置）与每次停止时间期望值的乘积。航班停止滑行的概率随着场面航班数的增加而增大。本文中，使用该参数来预测离场滑行时间。

#### 5.2.3 跑道时刻表

由上文的研究，离场排队模型第一部分的输出为跑道时刻表，即每个航班到达离场跑道排队队列的时间。设畅通滑行时间等于期望值，航班L的离场滑行时间由下式表示：



(5-8)

这里的是航班L的畅通滑行时间期望值，是航班L推出时刻处于滑行状态中的航班数。结合(5-8)式与(5-1)式，航班L的离场时间为：



(5-9)

### 5.3 排队延误预测

离场过程排队模型的第二部分为航班在离场跑道入口排队的时间预测。离场容量受到到场流量、风速风向等条件的影响而动态变化。离场过程是一个多因素影响的随机过程，例如管制员和飞行员的决策、飞机性能、跑道限制等。

#### 5.3.1 跑道排队模型

根据排队理论，服务率μ(t)定义为15分钟离场航班数，服务过程由下列四个基本假设构成：

1、到达离场跑道等待队列的时间由第一部分中计算得出的跑道时刻表确定；

2、假设服务率服从基于时间的（动态）爱尔朗分布；

3、等待区域的容量是有限的；

4、起飞等待队列中的航空器服从先到先服务（FCFS）的原则。

由上述假设可以看出，针对单跑道系统，该排队系统为D(t)/Ek(t)/k排队模型，其排队容量为C。采用有限排队容量C的目的是为了减小计算量，而不是对离场跑道附近的一个较小的区域进行建模。

将跑道排队系统建模成一个离散时间马尔可夫链。其中，爱尔朗过程的形状参数为k，尺度参数为μ，其概率密度函数为：



(5-10)

累积分布函数为：



(5-11)

每一个服务过程称为一个相位（stage），相位q的含义是仍有q个相位需要在跑道系统中完成。此时，系统中有min(1, q)架航班被服务，即此时占用跑道的航班数为min(1, q)，而离场排队队列中有max[(q-k)/k, 0]架航班等待。模型中的参数如下所示：

：每架飞机的编号；

：时间间隔，本文中为15分钟；

：每个时间间隔的编号；

：第i个时间间隔内爱尔朗服务时间分布的形状参数和尺度参数；

：排队系统的容量；

：第L架航班到达后需要完成的相位；

：的概率；

：第j-1架航班与第j架航班到达跑道间隔的时间；

：第L架到达的时间；

：第L架航班在排队系统内的时间，包括排队时间和服务时间；

：第L架航班的排队延误；

：第1个时间间隔开始前队列中的航班数。

#### 5.3.2 服务时间分布

静态跑道服务过程可以表示为以为参数的爱尔朗分布。图5-2是航班L到达后马尔可夫链的状态转移图。

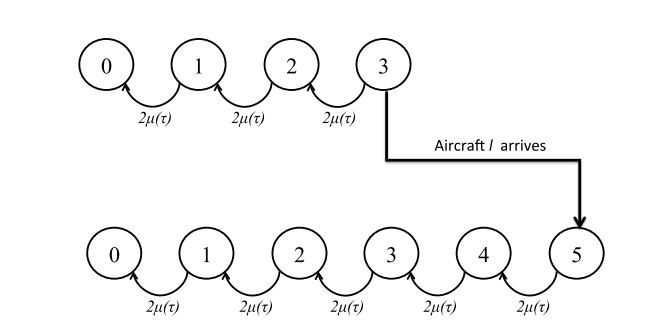


图5-2 航班L到达后的状态转移图

假设在航班L到达前有3个相位的工作需要完成，离场跑道流量爱尔朗分布的形状参数为2。因此，当航班L到达排队系统时，系统需要增加2个相位的工作时间，状态转移到了5。

接下来对的概率进行计算。定义为在第架航班到达时需要完成个相位工作，在第架航班到达时需要完成个相位工作的概率。由泊松过程可以得到，在内的概率分布函数：



(5-12)

对上述理论进行分析，在方程(5-12)中，事件被定义为排队系统马尔可夫链一个相位的完成。两个相邻时间间隔的时间服从参数为的指数分布。两个相邻航班的到达时间服从独立同分布。设z是时间段的事件数，可以看出。在内最多只能完成j个相位，因此。由于航班L的到达会增加k个相位，因此。

综上，时事件的概率服从参数为的泊松分布。的限制条件说明清空排队系统（事件数）的概率等于1减去发生事件数为。最后，若，系统内有足够的空间提供给第L架航班。因此，对于，系统转移到状态i的概率为事件数等于的和。与标准排队系统不同，在排队系统达到容量后，本文的排队系统将不拒绝接下来的航班进入。根据国外的研究，综合考量计算时间与准确性，令，能够使得模型近似接近于无限空间[47]。令，方程(5-12)可以改写成以下矩阵形式：



(5-13)

其中，随机矩阵的行数和列数均为kC，矩阵所有元素相加之和为1。由(5-12)同时可得：



(5-14)

即：



(5-15)

其中，。初始状态表征了第一架航班进入离场排队队列时的情况。若，第一架航班到达时排队系统将进入状态。当初始状态非零时，跑道运行模式改变会影响到已经在跑道入口排队的航班。因此，第一架航班进入排队系统时的状态为：



### 5.4 算例

## 第六章 推出率控制研究

### 参考文献

[1] 中国民用民航局. 2015年民航行业发展统计公报[R]. 发展计划司. 2016.

[2] 中国商用飞机股份有限公司. 中国商飞公司2016-2035年民用飞机市场预测年报. 2016.

[3] Gilbo E P. Airport capacity: Representation, estimation, optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(3): 144-154.

[4] Hall W D. Efficient capacity allocation in a collaborative air transportation system[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1999.

[5] Basner M, Samel A, Elmenhorst E M, et al. INTER-NOISE 2006[J]. 2006.

[6] Rakas J, Zhang Y, Ramamurthy V. Airport Performance Predictability Model[C]//9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO) and Aircraft Noise and Emissions Reduction Symposium (ANERS). 2009: 7084.

[7] Li L, Clarke J P. A stochastic model of runway configuration planning[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. 2010.

[8] Ramamoorthy K, Hunter G. An empirical airport configuration prediction model[C]//AIAA Modeling and Simulation Conference. 2012.

[9] DeLaura R A, Ferris R F, Robasky F M, et al. Initial assessment of wind forecasts for Airport Acceptance Rate (AAR) and Ground Delay Program (GDP) planning[J]. Lincoln Lab., Lexington, MA, USA, Tech. Rep. ATC-414, 2014.

[10] Avery J, Balakrishnan H. Data-Driven Modeling and Prediction of the Process for Selecting Runway Configurations[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016 (2600): 1-11.

[11] Idris H, Delcaire B, Anagnostakis I, et al. Identification of flow constraint and control points in departure operations at airport systems[C]//Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. 1998: 4291.

[12] Ball M, Barnhart C, Nemhauser G, et al. Air transportation: Irregular operations and control[J]. Handbooks in operations research and management science, 2007, 14: 1-67.

[13] Gilbo E P. Airport capacity: Representation, estimation, optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1993, 1(3): 144-154.

[14] Janic M. Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2008, 16(6): 704-730.

[15] Ramanujam V, Balakrishnan H. Data-driven modeling of the airport configuration selection process[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2015, 45(4): 490-499.

[16] Feron E R, Hansman R J, Odoni A R, et al. The departure planner: A conceptual discussion[J]. 1997.

[17] Carr F R. Stochastic modeling and control of airport surface traffic[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2001.

[18] Burgain P, Feron E, Clarke J P. Collaborative Virtual Queue: Fair management of congested departure operations and benefit analysis[J]. arXiv preprint arXiv:0807.0661, 2008.

[19] Simaiakis I, Balakrishnan H. Queuing models of airport departure processes for emissions reduction[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. 2009, 104.

[20] Simaiakis I, Balakrishnan H. Impact of congestion on taxi times, fuel burn, and emissions at major airports[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010 (2184): 22-30.

[21] Nakahara A, Reynolds T G, White T, et al. Analysis of a surface congestion management technique at New York JFK airport[C]//AIAA Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference, Virginia Beach, VA. 2011.

[22] Simaiakis I, Khadilkar H, Balakrishnan H, et al. Demonstration of reduced airport congestion through pushback rate control[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2014, 66: 251-267.

[23] De Neufville R, Odoni A, Belobaba P, et al. Airport systems: planning, design and management[M]. 2013.

[24] Simpson R W, Odoni A R, Salas-Roche F. Potential impacts of advanced technologies on the ATC capacity of high-density terminal areas[J]. 1986.

[25] Clewlow R, Simaiakis I, Balakrishnan H. Impact of arrivals on departure taxi operations at airports[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2010.

[26] Wolaver, Dan H. (1991). Phase-Locked Loop Circuit Design. Prentice Hall. ISBN 0-13-662743-9. pages 211–237.

[27] Weather Underground. [http://www.wunderground.com/history/airport. 2011](http://www.wunderground.com/history/airport.%202011).

[28] Myers T, Andrews M, Krozel J. Winter Weather Airport Capacity Model[C]//12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. 2012: 5535.

[29] 中国民用航空局.《2015年中国民航航班运行效率报告》[R], 2016年7月.

[30] PANG-NING TAN(美). 数据挖掘导论: 完整版[M]. 人民邮电出版社, 2011.

[31] De Neufville R, Odoni A, Belobaba P, et al. Airport systems: planning, design and management[M]. 2013.

[32] 中国民用航空局. 《关于公布协调机场航班时刻容量的通知》（局航明发〔2012〕1990 号）,2012 年6月

[33] Koenker R. Quantile regression[M]. Cambridge university press, 2005.

[34] 陈勇, 曹义华, 周勇. 北京首都国际机场容量评估研究[J]. 飞行力学, 2005, 23(4): 86-89.

[35] 徐肖豪,于跃,黄宝军,王涛波,杜伟军. 不同运行模式的近距平行跑道容量分析[J]. 中国民航大学学报,2012,(06):34-39.

[36] 尹嘉男,胡明华,张洪海,马园园,吴凡. 独立离场模式下多跑道时空资源优化调度方法[J]. 航空学报,2015,(05):1574-1584.

[37] 尹嘉男,胡明华,彭瑛,唐勇,马园园. 相关进近模式下多跑道时空资源优化调度方法[J]. 航空学报,2014,(11):3064-3073.

[38] 尹嘉男,胡明华,张洪海,马园园. 多跑道协同运行模式优化方法[J]. 航空学报,2014,(03):795-806.

[39] 徐肖豪,臧志恒. 基于MILP的飞机滑行排序的优化[J]. 交通与计算机,2007,(02):142-145+148.

[40] 赵嶷飞,姚玲. 扩容空中交通管理研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2008,(04):10-13.

[41] 汤新民,王玉婷,韩松臣. 基于DEDS的A-SMGCS航空器动态滑行路径规划[J]. 系统工程与电子技术,2010,(12):2669-2675.

[42] 牟德一,刘金凤. 基于理想滑行路径的机场滑行道调度策略模型[J]. 大连交通大学学报,2011,(06):41-45.

[43] 陆志伟. 基于极大代数的航空器无冲突放行时间推测[J]. 中国民航飞行学院学报,2012,(04):9-13.

[44] 李善梅,徐肖豪,王飞. 基于需求不确定性的机场拥挤风险预测模型与方法[J]. 西南交通大学学报,2013,(01):154-159.

[45] http://aspmhelp.faa.gov/index.php/ASPM\_Taxi\_Times :\_Definitions\_of\_Variables

[46] 赵嶷飞, 唐华龙. 北京首都机场畅通滑行时间研究[J]. 中国民航大学学报, 2016, 34(4):1-5.

[47] Simaiakis I, Balakrishnan H. A queuing model of the airport departure process[J]. Transportation Science, 2015, 50(1): 94-109.