# 第一章 绪论

## 1.1研究背景

2015年4月25日下午，与中国接壤的旅游国度尼泊尔发生了8.1级的大地震，震级甚至超过了汶川和唐山。千千万万来自世界各地的游客们，不得不聚集在尼泊尔首都加德满都的机场避难、等待救援。然而，加德满都机场设施简陋，运输能力较差，导致大量的航班无法及时进离，大量旅客无奈滞留。在我们为我国政府反应迅速、行为迅速、第一时间派遣航班将中国旅客接送回国鼓掌的同时，也要注意到因机场交通管制的落后带来的空中交通堵塞。据媒体报道，东航的航班在加德满都机场上空盘旋了30多圈，飞行了7个多小时才得以落地。对飞机来说，造成的是时间、资源等损失，而对于滞留的旅客来说，危及到他们的，则是他们的生命安全。

就目前加德满都而言，机场设备的简陋，运载能力的先天不足在一定程度上是现在旅客大面积的滞留的直接原因。但是无论如何，需要让飞机被迫在空中盘旋30多圈7个多小时，寻找停机位犹如在饭点的人民广场找停车位，飞机进离港如同在高峰期间的北京，不得不说，加德满都国际机场的飞机进离港存在严重甚至非常严重的问题，相对甚至绝对落后的管理机制导致了各国旅客回国避难的低效率。

近年来，我国民航机飞行量快速增加，而原有的飞机调度管理系统较为落后，使得机场的工作运行效率日益下滑，航班的延误率成为每个机场及航空公司不得不面对的问题。而严重的空中交通延误问题不仅导致大量的经济损失，也影响着人们对选择飞机作为交通工具的信心。

在2003年，我国民航运输机共有661架，据美国波音公司预计，到2020年我国民航对各种类型客机的需求将达到3000架左右。快速地空中流量增长使各机场的运行负担越来越重，目前，京、沪、穗机场到达终端区和华东部分区域空中交通容量已基本处于饱和状态，经常发生空中交通拥挤现象，严重干扰了航班的正常运行，致使航班延误率正大幅度提高。因此，如何减少航班延误从而提高空中交通系统运行效率是空中交通管制所面临的一个重要问题。

空中交通运输量的持续高速增长，使得原有的空中交通管理系统已经不能满足日益增长的交通需要，尤其是在出现天气和其它的一些意外事件时，终端区会出现短时间的流量阻塞，严重干扰航班的正常运行，从而造成大量的航班延误。尽管民航部门不断投入大量的人力物力进行机场扩建和设备更新，但仅仅通过空中交通管制设施的改善已经不能作为提高空中交通管制容量的主要增长点，而应从空中交通管制的方式入手，建立并优化终端区的调度模型，给空中交通管制提供必要的决策支持。

在航班进离港调度系统中，飞机频繁地进离机场。飞机实体具有动态性，飞机实体与系统的连接是动态绑定的，飞机实体之间的通信也是动态建立的。而且，当外界环境或功能需求发生变化时，系统还应能够动态地调整其原有的决策规范。另外，作为交通运输的服务行业，调度系统还应具有服务质量的需求，如安全性、可靠性、实时性等。因此，航班进离港调度系统应具有开放性﹑动态性﹑服务性等特征，而这些特征也给当前调度系统带来诸多需要解决的问题。

1. 实体的动态绑定

飞机频繁地进出机场，不断地占用跑道资源并释放跑道资源。因此，研究如何将飞机与跑道绑定并解除绑定是本课题要解决的一个关键问题。

1. 决策规范的动态配置

当遇到大风雨雪天气，或突发意外事件时，应及时调整修改系统原有的决策规范，并强加到飞机实体上，以适应突发事件及外界环境的变化。

1. 实体间的动态交互以及相互通信

在航班进离港调度系统中，飞机实体完成其自身的飞行任务，协调者实体则负责分配跑道发布飞机起降指令等各项协调任务。因而，两类实体之间如何交互以及相互之间如何通信也是比较关键的问题。

## 1.2研究问题的目的和意义

我国的交通管制系统较于国外开展较晚，发展较慢，随着经济的发展，航空的普及，人们对于出行的需求增加，空中交通流量处于暴增状态，因此改善航班调度系统，解决系统效率低下等问题，对于未来航空发展有着重要意义。

调查表明，在大多数情况下，机场是整个航空运输系统的瓶颈环节。如何最大程度地使机场的调度系统顺利地运转，则成了整个空中交通系统的重中之重。一旦机场的调度系统出现差错，则会导致整个空中交通系统的奔溃，甚至出现飞机失事等重大事故。

目前，与世界民航发达强国相比，我国航班调度管理方面的研究起步比较晚，起点较低。我们应当投入更多地精力进行研究，探索比较高效的控制手段科学调度，提高调度效率，这必将对民航的高速、顺利发展带来巨大的效益。提高科学调度能力，不但可以提高机场利用率，还可以改善终端区的拥挤状况，减少经济运营成本。

本文将着力于对航班调度系统的改善，减少航班进港时空中等待的时间及经济损失，优先考虑航班的进港调度，导致离港航班滞留造成地面航路拥挤、离港航班的延误、航班调度不公平等问题，旨在提高机场运行效率、解决航班延误、提高人们的出行体验。

## 1.3研究思路与论文结构

作为空中交通系统的唯一枢纽，机场的调度工作是整个系统的核心，是所有飞机必须经过的中转站。因此，解决机场交通堵塞问题，增加机场的运行效率，就是完成对空中交通拥挤问题的疏通。本文将目前国内机场航班所使用的空中交通管理系统工具进行分析总结。并对模型进行改进并通过仿真实验验证其有效性和可靠性。

本文分六个章节来对航班调度影响因素进行研究和模型分析，具体内容安排如下:

第一章为绪论，主要表述本论文的研究背景、本论文研究问题的目的和意义、国内外研究的现状以及研究的思路和论文的结构；第二章为文献综述，介绍目前为止，国内外学者对此课题或类似课题的研究状况；第三章是理论基础，叙述本文所选择分析的机场航班调度模型，并对其进行简单的分析研究；第四章为数据分析与处理，收集所需数据，对模型进行改进，并进行仿真实验；第六章为结论及展望，是对全文的概况总结。

# 第二章 文献综述

## 1.1国外研究现状

国外的空中交通管理的理论研究工作开始得比较早。八十年代，麻省理工学院的 Odoni 教授首次对空中流量管理进行了系统的描述，提出战术管理和战略管理的管理模式。在战术管理方面，八十年代中后期，美国的HeinzErzberger 等研究了基于时间的空中航班实时调度问题，并把在此基础上设计出的自动着陆系统在丹佛机场进行了试用。在欧洲，九十年代后德国的 Klaus Platz 等也作了这方面的研究工作，并在德国法兰克福机场进行了实验。在战略管理方面，以 Amedeo R.Odoni 为首的一批外国学者进行了多年的研究。1990 年，StephanE .K olitz 和 MostafaT errab 完整地对单机场的地面等待问题进行了研究。之后，Peter B.Varans, Dimitris 和Amedeo ROdoni 对静态的多机场地面等待问题进行了研究。1992 年，他们又研究了多机场的动态地面等待问题，探讨了地面等待策略的实时性问题。在理论研究的基础上，美国已把地面等待策略用于实际的空中交通流量管理并取得了很好的效果。1995 年，Dimitris Bertsimas 和 Sarah Stock Paterson 又把受限元扩展到了航路上，使这个理论更趋完善。1997 年，Sarah Stock Paterson 首次提出以拉格朗日乘子法求解改航问题。

在终端区到达航班的动态排序问题的研究中,Andreussi等在1981年提出排序问题,用离散事件模型对它进行了描述,并且用具体的算例进行了验证。1991年,Dear和Sherif研究了终端区飞行器的动态和静态排序问题,并且在单跑道的基础上提出了位置约束算法,即为参加排序的飞行器指定降落次序时,飞行器位置的改变和调整不能超过一定的范围。Brinton通过枚举所有可能的航班队列,提出一个深度优先树搜索算法。Abela等以遗传算法理论为基础,提出一个0-1混合整形规划问题,并给出了包括20架航班的计算结果。Venkatakrishnan,Barnett和odoni修改了Psaraftis此前的研究成果中的启发方法,考虑了时间窗,并且研究了Logan机场所采用的降落时间间隔,把这些数据运用到该方法,取得了较好的结果。他们使用两种方法研究,一种保持时间窗不变,另一种是时间窗随着飞行器的接近着陆过程而减少。1997年,Milan把该问题归结为给一批到达的航空器(指在比较接近的时间段内到达的飞行器)制定优先级,优先级的制定考虑到以下影响因素：旅客数量、乘客的延误费用、以及换乘旅客的比率,一旦一批航空器的优先级确定以后,这些航空器就按照优先级顺序来降落。Bolender和Slater通过排队论和离散事件仿真来解决航空器动态着陆问题,他们假定航空器的到达服从泊松分布,这样航空器的到达时间就服从指数分布。他们的研究主要集中在用不同的方法来指定新到的航空器的降落跑道,航空器指定了降落跑道后就按照先到先服务的顺序降落。B.S.Tether和J.S.Metcalfe针对繁忙的Heathrow机场提出了到达航班动态排序法。首先,管制员必须事先得到最先到达的大型航班,使之排在第一位,然后选择下一架大型航班,如果5架中没有大型航班就选择中型航班,如果也没有中型航班,那就选择小型航班,即按照大、中、小的顺序排列,同类机型的航班按照先到先服务规则排队。

在终端区空中交通管理的研究成果方面,目前已经投入运行的系统有:荷兰阿姆斯特丹的ASA系统,德国法兰克福的COMPAS系统,它采用分支界定算法对进港航班流进行优化调度和法国巴黎的MEASTRO系统等。其共同特点是通过某种手段预测航班的飞行轨迹,以此来计算指定航路点的预计到达时间；然后由一个排序算法利用这些估计值,照不同的排序规则和优化标准来制定到达航班的着陆次序,以文字的或图形的形式输出。美国由NASA主持设计的CTAS系统无疑是这方面最大,最为完善的系统。其调度优化采用启发式算法,它搜寻进港航班流的类型组合,与预存的组合进行比较,然后确定一个新的序列,使同类航班在满足MPS二1限定的前提下,得以聚合绑定。目前正在研究或完善中的系统有EUROCONNTROL的ZOC,原理同美国航天局的CTAS。

## 1.2国内研究现状

我国对此研究起步较晚。1995年，南京航天航空大学的胡明华、陈爱民开始了对单机场地面等待问题模型的研究，提出了确定性容量和随机性容量两种情况的数学模型、算法和仿真结果，给出了确定性多元受限地面等待策略问题的数学模型，并提出了一个以人工智能方法为基础的算法。2000年，胡明华，钱爱东，朱晶波等人针对我国空中交通流量管理现状，提出了多元受限航班时刻表优化计算法，以确定性地面等待策略为基本的流量管理方法。把昂贵的空中等待转化为成本相对较低的地面等待，并应用于航班时刻表的制订中，开发出一套航班

时刻的决策支持系统软件。该软件对全国两季航班时刻表的航班进行流量分析和优化，为航班提供了科学的起降时间和依据。

另外国内的一些航空公司也陆续引进了不同的商用管理软件系统,取得一定的应用效果:南航的运行管理与控制系统是国内建成的第一套最先进的系统,目前拥有航班动态控制、航班载重平衡、飞行计划、航班跟踪及机组管理系统五大模块功能,同时建立了气象情报、运行分析、航前通告、信息发布、电话查询、旅客服务等辅助系统以及支持系统运作的导航数据库。目前,该信息系统已经推广覆盖到南航所有运行基地。该系统的实施,将会在促进优化服务、提高资源利用率、降低飞行运行成本方面起到很大作用。

2.1 空中交通管理

空中交通管理的任务是有效地维护和促进空中交通安全，维护空中交通秩序，保障空中交通畅通。它包括空中交通服务、空中交通流量管理和空域管理三大部分。

2.2 空中交通服务

空中交通服务是指对航空器的空中活动进行管理和控制的业务，是空中交通管制服务、飞行情报服务和告警服务的总称。空中交通管制员向航空器提供空中交通服务。空中交通管制服务的任务是：

(1)防止航空器与航空器相撞，防止航空器与障碍物相撞；

(2)维护和加速空中交通有秩序地流动。

空中交通管制服务是的主要工作，包含区域管制、进近管制、塔台管制和空中交通报告服务四部分。其中区域管制又包含高空区域管制和中低空区域管制，在有些地方，这两项职能由同一部门承担；在空中交通流量较小的地区，进近管制和塔台管制是合二为一的。 管制方法分为程序管制和雷达管制。

空中交通管制工作在民用航空运输中发挥着重要的作用。它的主要职责是负责拟定飞行计划，承办飞行审批，组织各种勤务保障；对航空器的滑行、起飞、着陆和空中飞行实施监督和管理；提供安全间隔和安全保证措施。目的是使航空器按计划飞行，使各种保证工作有条不紊：维护飞行秩序，使空中交通加速和流畅，防止航空器与航空器之间、航空器与障碍物之间相撞；对来历不明的航空器和违反飞行管制的现象，查明情况进行处理，保证飞行安全。

2.3 空中交通流量管理

为防止和纠正航路、机场区域内出现航空器过度集中超过规定限额的现象，必须对航空器的运行采取适当的措施。

空中交通流量管理的任务是：在空中交通流量接近或达到空中交通管制的可用能力时，适当地进行调整，保证空中交通量最佳地流入或通过相应的区域，尽可能提高机场、空域可用容量的利用率。

空中交通流量管理是指科学地安排空中交通流量，使系统总的交通量与其容量相适应，目标是当某空中交通管制系统的需求超过或即将超过其可用能力时，保证空中交通流量最佳地流入或通过相应的区域。所谓空中交通流量是指单位时间和空间范围内的航空器的数量。

流量控制是根据航路和机场的地形、天气特点、通信、导航和雷达设备等条件，以及管制员的技术水平和有关管制间隔的规定，对某条航路和某个机场在同一时间所能容纳的飞机数目加以限制。

流量控制的依据：空中交通管制有关管制间隔的规定；机场地形、跑道、停机坪、通信、导航和雷达设备的条件；管制员的技术水平和能力所能承担的负荷。

# 第三章 理论基础

3.1.1 协同模型

协同模型是基于协同理论的研究提出的。协同论是20世纪70年代以来在多学科研究基础上逐渐形成和发展起来的一门新兴学科，是[系统科学](http://baike.baidu.com/view/80024.htm)的重要分支理论。协同论主要研究远离平衡态的开放系统在与外界有物质或能量交换的情况下，如何通过自己内部协同作用，自发地出现时间、空间和功能上的有序结构。协同论以现[系统论](http://baike.baidu.com/view/62521.htm)、[信息论](http://baike.baidu.com/view/15076.htm)、[控制论](http://baike.baidu.com/view/62820.htm)、[突变论](http://baike.baidu.com/view/290926.htm)等为基础，吸取了结构耗散理论的大量营养，采用统计学和动力学相结合的方法，通过对不同的领域的分析，提出了多维相空间理论，建立了一整套的数学模型和处理方案，在[微观](http://baike.baidu.com/view/251133.htm)到[宏观](http://baike.baidu.com/view/563962.htm)的过渡上，描述了各种系统和现象中从无序到有序转变的共同规律。

协同理论有三个主要内容，包括：协同效应、伺服原理、自组织原理。

在机场调度系统中的协同模型中，飞机飞临目的机场所在的终端区，申请进入此终端区，系统向飞机发布一个放行许可，并根据传回的飞行数据对飞机实行实时管制，直至飞机脱离进近管制，安全着陆后离开系统。离港过程中，系统根据飞机及跑道状态为离港飞机分配跑道，情况正常时，飞机到达起飞时刻起飞，飞离终端区后离开系统。基于以上内容，协同模型需要满足开放性、动态性。服务性三个要求。

因此，在机场调度中使用的协同模型，将系统分为三层，三类不同的实体：参与者层、角色层、协调者层。

这三层是相互分离的。其中，参与者层是系统的功能层，完成系统的功能行为；角色层和协调器层是系统的协同层，完成系统的协同任务。在此模型中协同行为分为两部分，一是全局角色协同，完成角色之间的协作与交互的管理，由协调器完成；二是局部角色协同，完成底层参与者的协作和交互的管理，由角色完成。对于飞机实体行为的协调就是局部角色协同，角色完成对飞机的协同和监控。

参与者是模型底层主动的对象，是自治的、独立运行的活动实体。它们拥有自己的状态，在其生命周期中是动态的而且能够改变自身的操作，负责特定的功能任务，只完成系统的功能行为。参与者通过消息传递与其它实体进行通信。参与者有以下基本操作：向角色发送一定数量的消息；接收消息；改变自身的状态；发布自身信息。

角色作为系统功能行为的抽象，提供实体所执行的功能行为的静态抽象。角色拥有参与者成员资格管理的行为，主要管理底层参与者实体加入和离开系统的资格。同时，角色又是一个有状态的主动实体，能够根据侦听到的事件和参与者行为的变化而改变自身状态。角色还能够颁发和强加协同约束行为到扮演此角色的参与者，从而实现系统的功能和服务质量的需求。

协调者对系统拥有比角色更全面更广阔的监测能力，它们能够根据系统状态动态地调整施加在不同角色上的不同的非功能法则，对角色颁发全局角色协同法则。并能够根据观测到的角色事件动态地改变其自身状态，颁发不同的约束行为和功能行为到被协同角色中，从而改变系统功能行为。

这个模型有四个优点：

1. 实现了系统的功能需求与非功能需求的分离。
2. 屏蔽了底层实体的动态性。
3. 降低了系统的复杂性。
4. 降低了协同的复杂性。

## 3.2.1 应用

参与者实现系统的功能行为。在航班调度系统中，底层参与者具体化为飞机实体及跑道实体。飞机实体是主动的动态的对象，负责特定的飞行任务，跑道实体也拥有自身状态，并根据其自身状态绑定到相应的角色下。飞机驶入目的机场所在的终端区，进入终端区调度系统，绑定到相应的角色下，协调器根据飞机及跑道状态为飞机分配跑道后，由角色对飞机传达指令，并对飞机实行实时管制，同时向飞机发布继续向前飞行的放飞许可及着陆指令，飞机在其分配的跑道上着陆，角色解除对其的绑定，飞机释放跑道资源，离开机场调度系统。离港飞机在其分配的跑道上起飞后，释放跑道资源，解除与角色的绑定，离开系统。

在角色内部定义了三种功能：

1. 成员管理行为。角色对系统完成的功能任务进行抽象规范，然后对完成这些抽象功能的飞机实体进行管理。角色维持一组成员资格标准，判断飞机实体是否能完成角色描述的某一抽象行为。符合标准的飞机实体可以加入此角色负责协同的组织中，不符合标准的飞机实体会离开这个组织。
2. 协同行为。角色主动协同其下层的飞机实体满足应用的协同需求。作为一个主动的实体，角色也有其一组状态。状态的改变触发角色向自身发送一个事件，这个事件可能也会触发进一步的协同行为。角色能够响应对参与者层监测到的事件，对飞机实体施加协同法则。将每个约束法则和相应的操作之间建立映射关系，这样将协同法则体现出来，完成对飞机实体的协同。
3. 绑定行为。角色绑定符合其成员资格标准的飞机实体，根据描述的抽象功能和定义的绑定策略、约束策略，查找合适的飞机实体完成系统既定的任务。

在机场调度系统中，角色根据雷达传来的和自身监测到的信息适当地调整自身的状态，进而引发一系列的协同行为，按成员资格管理标准动态调整底层飞机实体，绑定及解绑相应的飞机，从而实现了系统底层结构的动态调整和飞机实体的动态绑定，实现了航班调度系统的开放性要求。角色内部定义了七种模块：绑定管理器、成员管理器、抽象行为、约束策略、绑定策略以及监视器和事件服务器。

绑定管理器主要根据抽象行为、约束策略以及绑定策略，动态、透明地绑定飞机实体、解绑失效的飞机实体。成员管理器主要存储绑定飞机实体的相关信息，并建立绑定飞机实体与角色描述的抽象行为之间的映射关系。当绑定之后，监视器和事件服务器就开始对已绑定的飞机实体进行监视。如果监听到绑定的飞机实体连接失败或功能失效事件时，绑定管理器则断开与该飞机实体的连接，然后从成员管理器中删除该飞机实体的信息，从映射关系表中删除该飞机实体与抽象行为建立好的映射关系。如果监听到绑定飞机实体的行为变化事件时，检测该飞机实体是否仍满足角色描述的抽象功能和绑定策略，然后对不满足要求的飞机实体在成员管理器和映射关系表中删除，而满足要求则继续绑定该飞机实体。同时，如果绑定策略发生改变之后，角色能够根据改变后的策略信息，重新绑定符合标准的飞机实体。

协调器作为全局角色的总协调者，负责角色之间的交互连接和约束关系。在航班调度系统中，协调器具体化为地面控制中心。在协调器层定义了4 类协调器：交互协调器﹑时控协调器﹑间距协调器和分配跑道协调器。

1. 交互协调器。主要负责角色之间的通信连接，有更新信息、查找、建立和断开连接等基本操作，建立和断开连接操作主要是根据自身状态和消息的内容动态地创建和取消角色之间的连接；更新操作主要根据侦听到的消息内容改变自身状态，触发调整交互规范，更新角色信息；查找操作根据消息的目的地字段值，在目录管理器中查找与发送者通信的角色实体。在交互协调器中设置目录管理器，主要存储各角色的注册信息如名称、地址、方法等信息。目录管理器作为一个存储信息的仓库为交互协调器提供服务，当协调器收到消息时，根据消息的目的地字段值，在目录管理器中查找合适的消息接收者的相关信息。
2. 时控协调器。在航班进离港调度系统中，实时性是一个非常重要的要求。时控协调器主要负责系统的实时行为。根据发送消息的内容和系统定义的规则对消息强加实时约束条件。与通信协调器相似，它也有自身状态信息和一些基本操作，即更新、强加约束和解除约束等。时控协调器接收内设的侦听器传递的消息，为该消息创建一个定时器，并施加一个时间约束，发布一个事件，如果该消息在超时之前返回，则撤消这个定时器，解除约束，否则触发进一步的协同行为。其中强加约束和解除约束操作是一个强制执行机制，对消息强加和解除时间约束，从而满足系统的实时行为。一般而言，实时约束可以分为最终时限约束和延时约束，可以用两个消息发送的时间点t1t2和时间段d来表达。时限约束表达为t1-t2≤d，t1-t2≥d，d≥0.
3. 间距协调器。飞机在机场进近管制区域飞行时，飞机之间的空间间距与起降时间间距国际上有严格的规定，是保证飞行安全的一个非常重要的指标。本文为此设计成一个独立的间距协调器，专门协调航空器的间距问题。间距协调器根据一套严格的间距规则通过角色协调航空器的间距。与前两类协调器相似，它也有自身状态信息和几种基本操作，包括更新﹑强加约束和解除约束等。间距协调器根据接收到的消息内容改变当前状态信息，更新其相应的约束规则。
4. 分配跑道协调器。为进离港飞机分配跑道以及合理利用跑道资源是机场调度系统的一个主要任务之一，本文为此也设计成一个独立的分配跑道协调器以专门负责跑道的分配。它也拥有自身状态和更新信息等基本操作。在分配跑道协调器中设置跑道管理器，主要存储各跑道的状态信息。各跑道状态的变化触发各跑道角色向分配跑道协调器发送消息，协调器根据消息内容，更新跑道管理器中的跑道信息。当飞角色向分配跑道协调器发来消息请求跑道资源时，协调器根据各跑道状态及相应的约束策略为飞机分配跑道。