基于多目标两阶段的跑道起飞调度模型*

路　晶，何元清，刘期建
（中国民航飞行学院 计算机学院，四川 广汉 618307）

摘　要：为了减少起飞延误，针对优化飞机起飞调度问题，提出一种基于多目标、两阶段的跑道调度模型。该模型由培植器、穿越发生器、一阶段组件、二阶段组件组成。培植器建立机场模型，根据飞机重量类别输出飞机从推出到跑道的最短时间。穿越发生器通过扫描进场航班，计算需穿越飞机时间。一阶段组件计算以上输出，从各种飞机类别序列中选择最优序列。二阶段组件将具体航班指配到最优序列得出飞机推出时间，生成优化的离场航班时刻表。实验表明，该模型较之传统的先来先服务模型，跑道吞吐量加大，延迟减少，可节约可观运营成本。

关键词：跑道起飞调度；多目标；分阶段；飞机重量类别
中图分类号：TP301　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)06-2052-06
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.012

Multi-objective and decomposition-based model for runway takeoff scheduling

LU Jing, HE Yuan-qing, LIU Qi-jian
(*College of Computer Science Technology*, *Civil Aviation Flight University of China*, *Guanghan Sichuan* 618307, *China*)

Abstract: In order to reduce the take-off delay, this paper proposed a runway scheduling model based on multi-objective and two-stage for airplane takeoff scheduling optimization. The model consisted of propagator, X-generator, 1st stage and 2nd stage. The propagator's task was to propagate aircraft through the airport model in order to develop a "propagation" file with the minimum times necessary for each aircraft type to move from its gate to its assigned runway. The X-generator calculated the time at which each arrival expected to become a crossing request. 1st stage computed all the sendout to choose the best class sequence. 2nd stage assigned specific flights to optimal sequence. The experiment shows that, compared with the algorithm of first come first serve, the new model has better runway throughout, less delay and less cost.
Key words: runway takeoff scheduling; multi-objective; decomposition; weight class

0　引言

跑道调度（运营）计划（runway operations planning, ROP）是指在给定的时间段内，针对各个跑道上的主要飞行活动（飞机的着陆、起飞和穿越跑道等），将机场的跑道资源进行优化分配和调度，生成关于这些飞行活动的调度计划，即给定时间段内不同飞机及其飞行活动占用跑道的顺序、时间序列。作为跑道运营管理系统（runway operations management, ROM）的一个主要战术性的计划工具，ROP 的性能直接影响着机场及其终端区的各种运营活动的安全和效率。

由于机场及其终端区的容量限制或调度问题，许多航班不得不在地面等候，从而导致航班延误[1]。根据美国运输部的统计，20% 的航班延误 15 min 以上，其中四分之一超过 1 h。每年由于机场和空域的拥塞造成的经济损失高达 70 亿美元[2]。

许多空中交通管理的研究涉及到了如何提高机场地面和终端区的管理、调度效率，但在这些研究中，更多的是倾向降落计划，没有或只是部分地考虑了起飞计划。Horangic[3] 利用典型的排队模型（M/Er/k）提出了关于降落跑道的排队延误模型。NASA 开发的 CATS（center TRACON automation system）[4] 同样也是一个关于终端区达到航班调度计划的决策支持工具。Shumsky[5,6] 提出了一个机场容量和滑行迟滞的模型用于预测航班起飞时间。Hebert 等人[7] 根据具体的观测数据和概率分布理论提出了一个 Markov 链模型来预测 LaGuardia 机场的起飞延误时间。Pujet 等人[8~10] 分别对上述的排队模型进行了扩展，建立了一个输入/输出的 mesoscopic 机场排队模型，以提供更多的细节来验证起飞调度计划的有效性。德国宇航研究中心（DLR）基于优化理论开发了滑行和停机位管理控制系统（taxi and ramp management and control system）用于优化飞机的地面滑行路线[11]。而 FAA 和 NASA Ames 研究中心联合开发的 SMA（surface movement advisor）试图实现机场地面调度的自动化，却未能成功[12]。

在跑道调度计划优化研究方面，Teixeira[13] 在起飞、着陆共用一条跑道的情况下，为满足飞机的及时起飞提出了一种启发式解决方案。Change[14] 提出了一种启发式搜索算法（起飞搜索、层次搜索和分割搜索算法）用于求解航班排队和停机位分配问题，并按照着陆、停机位分配和起飞的优先顺序进行调度；

收稿日期：2011-10-20；**修回日期**：2011-11-25　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目（60879023）
作者简介：路晶（1983-），女，河北保定人，讲师，硕士，主要研究方向为民航计算机（maoyanqq@163.com）；何元清（1967-），男，教授，博士，主要研究方向为航空计算机应用、并行算法分析与设计、高性能计算；刘期建（1982-），男，讲师，硕士，主要研究方向为民航计算机.

当有多个飞机起飞就绪时,起飞顺序按照每个飞机上的乘客人数降序排列以降低大飞机的延误时间,从而实现最小经济开销的目标。荷兰国家宇航实验室(NLR)通过研究,开发了一个名为“欧洲机场地面交通管理起飞调度系统(MANTEA departure sequencer)”的跑道调度优化系统[15],其主要目的是对起飞飞机的顺序、时间及初始爬升阶段进行优化,以获得更高的跑道利用率、降低航班延误、减轻管制人员的工作负荷并确保飞行安全。Bolander 等人[16,17]试图通过对贪心搜索(greedy search)、A*搜索、遗传算法的研究和应用来寻求最优调度计划。余江等人[18]也尝试了遗传算法的应用。文献[19,20]用软件 CPLEX 对滑行道进行调度优化。文献[21]基于先进先出的方法对滑行道进行了调度研究。文献[22]提出了一种改进的捕食搜索算法来改善航班进场调度。文献[23]讨论蚁群算法在终端区起降航班排序的应用。在跑道容量分析方面,卢朝阳等人[24]采用 T 型系统来推导跑道容量计算模型。文献[25]采用优化解空间的措施并使用贪心策略优化进港排序。

本文提出的两阶段模型不仅能够实现多目标的机场运营调度并满足主要的约束限制,即使没有优化飞机滑行线路的情况下,模型生成的跑道调度计划也能通过提高跑道的利用率和减少整体延误时间来提高机场的运营效率,节约运营成本。

1　ROP 算法概述

机场地面运营调度管理(surface operations management, SOM)分为机场运营调度计划制定和计划执行两部分。前者是指为机场的各种飞行活动制定科学、合理的资源分配和调度的计划,是实现安全、高效的机场调度的前提。它包括跑道调度计划(ROP)和滑行/停机位调度计划(taxi and gate/ramp operations planning,TGOP)的制定,其中 ROP 是整个 SOM 的核心,也是最复杂的部分。考虑到不同类型飞机的起飞间隔标准和空中交通流量限制,起飞计划(departure plans)是影响(决定)跑道运营效率的一个主要因素。

ROP 问题是一个典型的多目标、多约束条件、多变元的复杂的动态运营计划(operations planning)问题,一次性地进行优化往往非常困难,而且效率不高。另一方面,与工程设计问题一样,ROP 优化问题涉及一个功能需求集$\{FR\}$(优化目标)、一个用来描述求解必备条件的设计参数集$\{DP\}$(约束条件)和一个变元集$\{A\}$。因此,在满足一定的条件时,可以采用工程设计中常用的系统分解方法,将优化问题中的$\{FR\}$和$\{DP\}$分别划分为两个或多个子集,这样就可以将优化过程划分为若干个相对独立的阶段,每个阶段针对相应的$\{FR\}$和$\{DP\}$子集进行优化算法的设计。显然,这种分阶段的问题求解方法将使整个问题的求解过程相对简化,提高了问题求解的效率。

根据通用设计理论,若一个多目标优化问题有一个或一组设计参数对某个优化目标的影响明显高于其他参数,并且在时间尺度上的变化相对稳定,同时能够较早获得确定的信息,则有助于将该问题分解为弱偶合或非交互的子集,并分阶段求解,该(组)参数被称为分解中心元素(decomposition pivot element)。为了有效地分解 ROP 问题,就必须按照上述条件对各个设计参数及相应的目标进行分析,找出分解 ROP 问题的最优分解中心元素,构造 *FR* 和 *DP* 子集,对优化过程进行阶段划分,确定各阶段的 *FR*、*DP* 子集和变元之间的数学关系以及各阶段之间的输入/输出关系,建立分阶段的 ROP 问题优化的数学模型。这部分是本项目研究的关键问题之一。

为了建立相应的数学模型,需要对各种功能需求、设计参数、变元及其相互关系进行数学描述,并进行相应的数学变换,以满足通用设计理论中各阶段之间的低偶合要求(包括功能需求和设计参数),即分解后的$\{FR\}$和$\{DP\}$子集应满足如下设计矩阵等式:

$$\begin{Bmatrix}\{FR_1\}\\ \{FR_2\}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\{V_1\} & \\ & \{V_2\}\end{Bmatrix}\times\begin{Bmatrix}\{DP_1\}\\ \{DP_2\}\end{Bmatrix} \tag{1}$$

最终,构建 ROP 问题的分阶段优化的数学模型,简称为分阶段优化模型(multi-stage optimization model,MSOM)。

采用问题分解方法求解 ROP 问题的过程类似于设计一个新系统的过程。因此,必须首先对机场(如北京首都机场)实际运营数据进行收集、分析,确定问题的优化目标,研究各种设计参数、变元的变化规律及相互关系,并将其转换为数学表示形式。本项目中,两个基本的优化目标为跑道利用率的最大化和航班整体起飞延误时间的最小化,其他目标或约束包括各种反映飞行安全要求的重量类型飞机(重型、大型、小型)的最小起飞间隔和降落飞机流优先、反映公平性要求的最大位置变化(maximum position shift,MPS)限制、反映经济性要求的总的飞机滑行及等待时间、反映交通管制约束的空中交通流量限制(如 expected departure clearance time, miles/minutes in tail, EDTC)、跑道分配约束初以及始航班计划及调整约束、空管人员工作负荷等,而变元则涉及基于不同航班属性的调度运行(退出、起飞、落地、穿越跑道等)顺序、时间及飞机退出、滑行、起飞、落地、穿越跑道的时间等。

在降落飞机流确定不变和不考虑交通流量控制的情况下,由于飞机的重量类型直接影响着飞机的最小起飞间隔,而起飞最小间隔是决定跑道利用率的主要因素之一;同时,飞机的重量类型可以从初始航班计划中得到,且比飞机尾号有着更好的稳定性(当航班计划中的飞机发生更换,其重量类型可能不会改变;反之,则飞机尾号必然改变)。如果将初始航班计划中飞机重量类型序列作为分解中心元素,则一种可能的 ROP 问题分解方案是将优化过程划分为两段,第一阶段的目标为跑道利用率的最大化,设计参数为初始飞机重量类型序列,算法输出为基于飞机重量类型的满足最小起飞间隔的跑道调度计划,即优化后的起飞飞机的重量类型顺序和时间序列;第二阶段在第一阶段的基础上,以最小延误时间等作为目标,其他的约束条件作为设计参数,将初始航班计划中飞机尾号分配到飞机重量类型序列中,算法输出为优化后的起飞飞机尾号顺序及时间序列。其计算模型如图 1 所示。这种分步的计算模型比一次性的计算模型有着更高的计算效率。若采用简单搜索方法,前者的搜索空间大小为 $N_H!\times N_L!\times N_S!$,后者是$(N_H+N_L+N_S)!$,其中 N_H、N_L、N_S 分别代表起飞计划中重型、大型和小型飞机的数量。

当条件随时间发生变化时,如空中交通流量限制比较严重和降落飞机流发生变化,其他设计参数对 ROP 目标(如跑道利用率)的影响将可能超过飞机重量类型序列,这样分解中心元素的选择和数学表示形式的确定以及优化过程分解也将发生变化。因此,必须综合考虑各种因素及其变化,对目标和约束

进行合理的划分,深入分析各功能需求之间、各种约束条件之间以及它们相互之间的偶合关系,进行不同的功能分解(functional decomposition)和关系分解(relation decomposition),通过对比、分析,选择合适的分解中心元素(组)及其对应的目标,对 ROP 问题进行合理的分解,进而总结出机场运营调度问题的一般分解方法和原则。

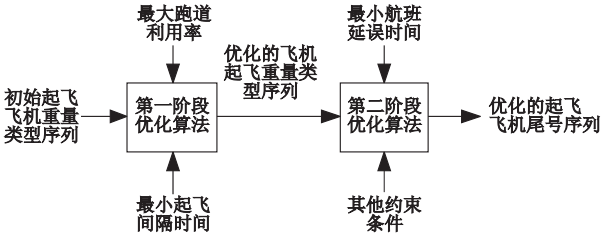

图1 ROP计算模型

2 多目标两阶段跑道起飞调度模型

2.1 基准机场模型

在这里 MATLAB 模型呈现出的基准机场示例见图 2,其中的跑道几何构型常常可以在机场里见到。

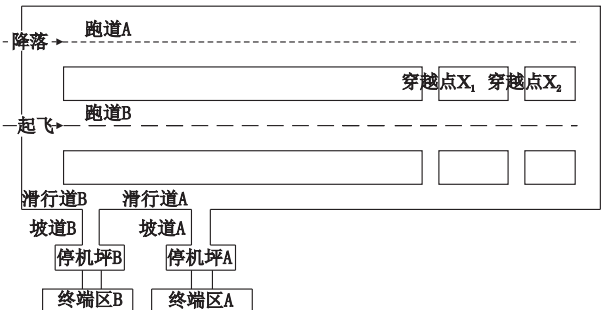

图2 基准机场模型

这个假想的机场有两条平行跑道,一条用于离场起飞,一条用于进场降落。降落的飞机全都集中在两个穿越点 X_1 或 X_2 中的一个,并在此等待离场跑道清场以使飞机横穿过离场跑道到达停机门。离场飞机同样也会在滑行道、坡道和门区与进场飞机相遇。解决问题的第一阶段是设计出最佳的离场队列,也就是说使离场队列完全占用跑道(吞吐量)。

在这里,仿真中完全忽略进场队列中的随机着陆时间,取而代之的是固定的着陆时间表。同时,进场和离场飞机占用跑道的时间设为常数,但是不同重量飞机的该常数有所不同。而地面调度中的其他各方面随机问题都将在下面描述的仿真模型中考虑到,如停机位退出和滑出时间。假设,跑道 A 为 13L,跑道 B 为 13R,如图 2 得出跑道相关性矩阵如表 1 所示。

表 1 跑道相关性矩阵

	13R	31L	13L	31R
13R	1	1	0	0
31L	1	1	0	0
13L	0	0	1	1
31R	0	0	1	1

2.2 仿真模型

仿真模型如图 3 所示。模型的输入包括进场和离场数据结构,以及跑道相关性矩阵。这些数据结构列出了进出港航班的详细信息,如飞机退出的停机门(用于计算滑行时间)、机型和种类、离港航班终点站或者进港航班的着陆时间。

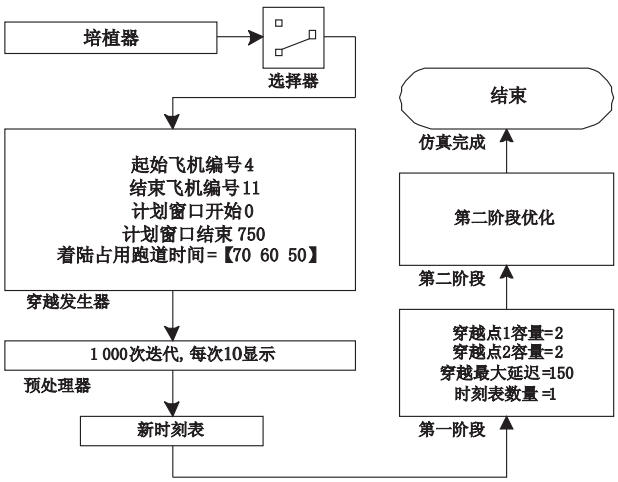

图3 两阶段仿真模型

每一部分都包含进港或者离港航班的特征信息,而这些信息对模型十分重要。时间表文件中采用模块化结构以便于必要时加入新的特征,在实际应用中,这些时间表文件可由 ATC 主机上的时间表输入自动生成。

2.2.1 停机门到跑道时间

培植器为模型第一个模块组件,细节如图 4 所示。

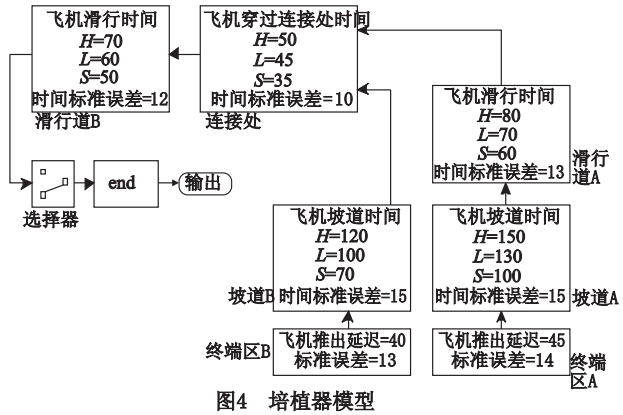

图4 培植器模型

培植器是基于标准模块组件库建立的,如航空集散站、客梯、滑行道和连接处。这种模块化的设计方法使得任何机场的布局都可以通过连接合适的标准模块组件库很快地构建出来。其任务是推演出建立推演时间表文件所需的虚构的飞机从停机门到跑道所需的最短时间(无障碍)。

为了达到研究目的,也为了获得无障碍的滑行时间,本文使用混合型方法得到停机门到跑道所需时间的标准差:a)噪声研究办提供的历史跑道数据;b)针对特定航线和机型以及特定停机门的经验知识。

2.2.2 产生穿越请求

穿越生成器组件扫描航班到达时间表,基于每架进港飞机的着陆时间和跑道占用时间(根据重量不同而种类不同),该组件计算出哪架飞机将需要穿越交叉。在这个问题的范围内,为了简便,到达时间的随机性不再考虑(飞机着陆时间和占用跑道的时间)。

2.2.3 生成重量类别序列

系统计划时间窗口大小为未来的 15 ~ 20 min。要预测未来很长的时间是不现实的,因为时间窗口的长短总是受到系统不确定因素的制约,并且 15 ~ 20 min 是一个空管人员最常使用的预测长度,而这个时间很轻易地大于大多数飞机(平均来

讲)从停机门到跑道的滑行时间。在时间窗口内的飞机退出序列为每种涉及到的重量级别的飞机建立了一个飞机"池"。培植器负责使用这些重量类别建立可能的类别序列。

ROP 算法的第一阶段是在达到目标流量的条件下确定最佳的类别序列。这是通过计算每个计算出的类别队列的流量,并以此为基础对其排序。队列的个数取决于 N_D 的值。特别,如果 N_D 离场由三部分组成,分别是 N_{DH} 重型机、N_{DL} 大型机和 N_{DS} 小型机,那么可能队列的个数为

$$\frac{N_D!}{N_{DH}! \times N_{DL}! \times N_{DS}!} \tag{2}$$

在大多数实际情况中,这个值是非常大的。例如,在计划时间内有 20 架飞机,而与之相对应的重量类别为 3 架重型机(H)、12 架大型机(L)、5 架小型机(S),那么可能序列的大小为 20! /(3! ×12! ×5!) = 7054320。基于这样的原因,系统使用了另一种不同的方法。

常用到的初始推出队列输入的飞机比例为 13.33% 的重型机、66.67% 的大型机和 20% 的小型机,在这样的情况下,产生的可能序列数目是确定的,为 5000。更特别的是,随着培植器的运行,每次运行都得到越来越大的可能序列数目。同时,每次运行后,产生的相同序列将从序列集中被删除,只存储不同序列,那么所有不同的序列集将进行相互比较,在几轮运行后,将得出以下的结论:

a)当培植器设定生成初始(没有去除重复的序列)的多于 5000 个的可能序列得到的唯一序列集,相对于生成 5000 整个序列而得出的,之间的插值只是 4 ~ 5 个序列。

b)甚至还出现以上两者得出的唯一序列集大小完全相同。

c)在以上情况中,大于 5000 个序列和 5000 整个序列所得到的唯一序列集在内容上的差距也非常小,只有 2 ~ 3 个不同的排序。

采用不同的重量类别比例也可以有类似的分析结果。对于每个特定实例,生成的可能序列的数目大于或是小于 5000 取决于重量类别的比例。例如,有一个例子会得到小得多的序列总数,即达不到 5000,其飞机比例为 6.667% 重型机、93.33% 的大型机。在仿真模型中,算法的计划时间窗口也可以设置成以时间为基础,即通过设定开始时间和结束时间;或者以飞机为基础,即计划中从开始到结束所涉及的飞机。

2.2.4　加入离场和交叉穿越

新时间表组件查询时间表文件中的离场航班,并且推演出离场飞机从停机门到其分配的跑道上发出离场请求的时间。这部分能够估算获得这些飞机初始的跑道占用时间。通过研究,滑行时间的可能性分布函数应是对数正态分布,其平均值和标准差值等于传播者组件推演得出的滑行时间的平均值和标准差。那么,新时间表函数混合离场请求和穿越请求,为起飞跑道建立一个全新的时间表。新时间表的输出时间表包含所有离场航班和所有需要交叉穿越的进场航班。它的输出将作为下一个组件:类别排表的输入。

2.2.5　第一阶段

第一阶段组件由两个子组件组成。

第一个子组件是类别排序组件,它的功能是以两架相邻起飞飞机的涡流分离时间为基础,为每一个离场序列表中的类别序列计算出其吞吐量(在穿越时间加入之前)。

其目标函数如下:设 N_A 为到港飞机总数,N_D 为离港飞机总数,那么,$N = N_A + N_D$ 表示当前调度窗口的混合运行总数,则最大化吞吐量(T)可以通过最小化跑道调度时间(T_i)实现:

$$\min T = \max T_i \quad 1 \leqslant i \leqslant N_A + N_D \tag{3}$$

第二个子组件是穿越处理组件,它的功能是在序列中加入必须的穿越时间片,并且根据加入的穿越情况影响离场的流量,调整每个序列的吞吐量值。穿越时间片的位置和大小取决于进场飞机流的结构以及滑行道容量和最大穿越延迟时间,而这些都是第一阶段模型组件的输入。

在处理穿越时,选择一个离场序列作为基础序列,这些分布有助于确定穿越飞机可能占用的时隙、在基础队列中的位置,并处理其他飞机调前或退后一个位置(为了简单,只检查前后的一个位置)。对于每个基础序列,其最终的随机性吞吐量计算方法与所有计算方法相同,只是加入了可能出现的时隙排序表换。例如,假设在预定义的计划窗口中有 14 架离场飞机,同时假设这 14 架飞机中要穿插 4 架进场航班,它们将请求穿越离场跑道的跑道时间,一个可能的离场序列包含的穿越为(穿越以小写字母标示):

L - L - L - H - s/s/h - H - l - L - L - L - L - L - L - S - S - S

在这个作为基础的序列中,只有三个离场时隙发生变化(只考虑移动一个位置)可以影响到序列的吞吐量(X_1 和 X_2 为两个穿越飞机组的简单表示),如图 5 所示。

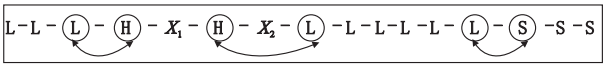

图5　可能的序列交换

考虑所有的这三处变化排列组合的可能性,共有八种可能出现的序列(包含基本序列),如图 6 所示。

L - L - L - H - X_1 - H - X_2 - L - L - L - L - L - L - S - S - S
L - L - L - H - X_1 - H - X_2 - L - L - L - L - L - S - L - S - S
L - L - L - H - X_1 - L - X_2 - H - L - L - L - L - L - S - S - S
L - L - L - H - X_1 - L - X_2 - H - L - L - L - L - S - L - S - S
L - L - H - L - X_1 - H - X_2 - L - L - L - L - L - L - S - S - S
L - L - H - L - X_1 - H - X_2 - L - L - L - L - L - S - L - S - S
L - L - H - L - X_1 - L - X_2 - H - L - L - L - L - L - S - S - S
L - L - H - L - X_1 - L - X_2 - H - L - L - L - L - S - L - S - S

图 6　基础序列及其衍生序列

对于每一个序列,第一个类别时隙开始点的时间值等于所有离场飞机中与序列类别相同的最早的一架飞机的上跑道的时间值。在这个例子中,这个值是最早上跑道的大型(L)机的时间。假设退出序列与剩下的滑行序列无关,所以跑道的可用时间应该为每架飞机的定义退出时间(包含退出延迟)、定义滑行时间(从停机门到跑道)和某个终端时间的总和。一旦第一架离场飞机的类别时隙确定了,那么其他的时隙也就可以根据涡流分离时间和每个时隙大小确定下来。那么,可以刻画出每个时隙的对数正态分布曲线,曲线的起点或者中点是定义值,而标准差为滑行时间的标准差。两个相邻时隙的曲线重叠区域,决定了这两个时隙发生位置互换的概率,如图 7 所示。

基于这些交换概率和所有交换的排列组合,可以计算出事故发生率和某个序列的吞吐量。而基本序列的最终流量可以通过计算基本序列的衍生序列的吞吐量得到。

这样的过程将在每个带有穿越的序列中重复,最终所有列表根据吞吐量降序排列。大部分的带有穿越的离场序列(从排序表的上部开始)从吞吐量角度被认为是最好的,并且将作为第二阶段算法的目标序列的候选序列。

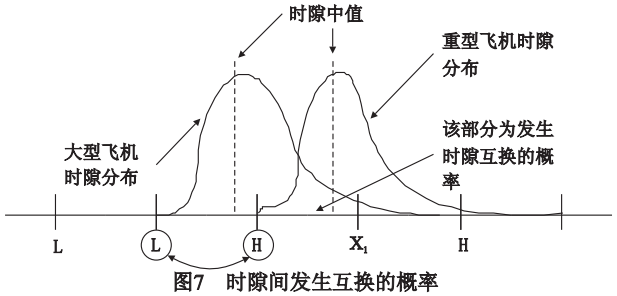

图7 时隙间发生互换的概率

2.2.6 第二阶段

第二阶段组件由两个子组件组成。

第一个子组件准备并陆续显示出两个图形用户界面,在调用优化函数之前,一些 ATC(air traffic control)管制限制将通过以上的用户界面输入系统,如尾流间隔(miles (minutes) in trail, MIT)、预计离港起飞放行时间(estimated departure clearance time, EDCT)、离港排序计划(departure sequencing programs, DSP)等。MIT 尾流间隔规定的数学描述为

$$|P_i - P_j| < k \quad \forall i,j \tag{4}$$

$$|P_i - P_j| \geqslant \Delta P \tag{5}$$

其中:i 和 j 表示两架相同重量类型的飞机;P_i 和 P_j 分别表示各自在起飞序列中的位置;k 是当前优化序列中的飞机数量。

最大位移 MPS 规则的数学描述为

$$|P_{PB} - P_{TO}| \leqslant \Delta P_{\lim} it \tag{6}$$

其中:$\Delta P_{\lim} it$ 为序列中位置的最大值;P_{PB} 为推出位置;P_{TO} 为起飞位置。

第二个子组件是飞机优化器 X 组件,可计算跑道调度中的最小累积时延。其数学描述为:设降落时间 T_{oni}、跑道穿越时间 T_{xi} 和起飞的时间 T_{offi},以及对应的每架飞机的初始时刻 E_{oni}、E_{xi} 和 E_{offi}。

最小总延误为

$$\min\left(\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{N_p}|T_{off\,i}(P_{TO_i}) - E_{off\,i}|^{k_{D_i}} + \sum_{j=1}^{N_A}|T_{on\,j} \\ -E_{on\,j}|^{k_{A_j}} + \sum_{m=1}^{N_A}|T_{x\,m} - E_{x\,m}|^{k_{X_m}}\end{array}\right) \tag{7}$$

最小起飞延误为

$$\min\sum_{i=1}^{N_D}|T_{offi}(P_{TOi}) - E_{offi}|^{k_{Di}} \tag{8}$$

其中:P_{TOi} 是离港时刻飞机 i 的位置;k_A、k_D 和 k_x 为正值,且 $k_A \geqslant 1$, $k_D \geqslant 1$, $k_X \geqslant 1$。

3 实验结果

实验机场模型如图 2 所示,实验以 15 架起飞航班构成的目标类型序列,其中 3 架小型机、10 架大型机、2 架重型机,与 16 架降落飞机进行算法模拟,保证最大穿越延迟和滑行道容量。表 2 给出了第二阶段优化后输出的飞行时刻表,其中带“*”的时刻表示跑道穿越活动。该时刻表采用第一阶段的飞机重量类型序列为{L, S, L, s, s, s, L, L, l, s, s, L, L, s, s, s, L, S, H, s, s, s, s, L, H, s, s, s, L, S, L},其中小写字母表示机场穿越。

实验参数设置如下:最大穿越延迟为 200 s;滑行道容量设置为 4 架小型飞机,或者 2 架大型飞机,或者 1 架重型飞机与 1 架小型飞机;假设所有小型机只使用同一个穿越点,并且当其他穿越点有大型机或重型机时优先离港。在仿真过程中,为了简化研究,暂不考虑各阶段的随机变量。表 2 为仿真结果输出的飞行时间表,表 3 为采用 FCFS 模型输出的飞行时间表。

表 2 两阶段 ROP 算法输出的飞行时刻表

时刻	航班号	重量类型	推出顺序	到达顺序	起飞顺序	耗时/s	穿越延迟/s
10:37	DEP003	L	4		1	600	
10:38	DEP007	S	1		2	924	
10:39	DEP006	L	5		3	690	
10:40 *	ARR001	s		13		0	174
	ARR002	s		14		0	114
	ARR003	s		15		0	54
10:41	DEP002	L	3		4	870	
10:42	DEP001	L	2		5	990	
10:43 *	ARR004	l		16		0	159
	ARR005	s		17		0	104
	ARR006	s		18		0	39
10:44	DEP004	L	6		6	942	
10:45	DEP008	L	8		7	852	
10:46 *	ARR007	s		19		0	154
	ARR008	s		20		0	94
	ARR009	s		21		0	24
10:47	DEP005	L	13		8	678	
10:48	DEP010	S	10		9	942	
10:49	DEP011	H	7		10	1 212	
10:50 *	ARR010	s		22		0	194
	ARR011	s		23		0	139
	ARR012	s		24		0	74
	ARR013	s		25		0	4
10:51	DEP009	L	11		11	1 089	
10:52	DEP015	H	9		12	1 260	
10:53 *	ARR014	s		26		0	129
	ARR015	s		27		0	64
	ARR016	s		28		0	4
10:54	DEP012	L	14		13	1 044	
10:55	DEP013	S	12		14	1 194	
10:56	DEP014	L	15		15	1 188	

表 3 FCFS 算法输出的飞行时刻表

时刻	航班号	重量类型	时刻	航班号	重量类型
10:37:00	DEP001	L	10:49:20 *	ARR012	S
10:38:00 *	ARR001	S	10:50:00 *	ARR013	S
10:38:40 *	ARR002	S	10:50:40	DEP006	L
10:39:20 *	ARR003	S	10:51:40 *	ARR014	S
10:40:00	DEP002	L	10:52:20 *	ARR015	S
10:41:00 *	ARR004	L	10:53:00 *	ARR016	S
10:41:40 *	ARR005	S	10:53:40	DEP007	S
10:42:20	DEP003	L	10:54:40	DEP008	L
10:43:20 *	ARR006	S	10:55:40	DEP009	L
10:44:00 *	ARR007	S	10:56:40	DEP010	S
10:44:40 *	ARR008	S	10:57:40	DEP011	H
10:45:20	DEP004	L	10:58:40	DEP012	L
10:46:20 *	ARR009	S	10:59:40	DEP013	S
10:47:00 *	ARR010	S	10:00:40	DEP014	L
10:47:40	DEP005	L	10:01:40	DEP015	H
10:48:40 *	ARR011	S			

表 3 说明,由于进场飞机的优先级较高,若出现飞机连续降落时,将出现进场飞机长时间持续占用离场跑道。假设每架飞机穿越跑道的时间为 40 s,由于没有采用分组穿越,故跑道穿越时间开销为 640 s。然而采用两阶段 ROP 算法的开销为

310 s,比 FCFS 算法减少 330 s。由于进场飞机的优先级较高,即使离场飞机已经到达跑道,只要有飞机降落,离场飞机就必须等待。FCFS 算法中的穿越时间及跑道空闲时间将全部累加到离场飞机的起飞延迟上,从而导致离场跑道使用效率和机场吞吐量的下降。

将表 2 中两阶段 ROP 优化算法与表 3 的 FCFS 算法仿真结果比较发现,两阶段 ROP 优化算法产生的跑道调度计划通过对飞机重量类型序列的优化设计及飞机编号在重量序列上的分配优化,有效地提高了跑道的吞吐量,其中起飞吞吐量提高了 8.55 架次/h,跑道总吞吐量提高了 17.59 架次/h,有效减少了离场延误,如表 4 所示。同时,在保证进场飞机一定优先级及穿越点容量允许的前提下,采用成组穿越交叉的原则避免了离场飞机长时间等待的状态。从节约角度来比较,采用两阶段模型进行调度可以节约成本以及减少污染效果,如表 5 所示。

表 4　二阶段 ROP 优化算法调度与 FCFS 调度结果比较

名称	两阶段 ROP 算法	FCFS 算法
起飞时间	20 min	24.67 min
起飞吞吐量	45 架次/h	36.45 架次/h
跑道总吞吐量	93 架次/h	75.41 架次/h

表 5 两阶段模型可节约成本及减少污染效果

名称	公斤/年	美元/年
飞机燃油	48 576	241 890
减少一氧化碳 CO	10 180	814
减少二氧化碳 CO_2	1 251 203	37 536
减少污染节省支出总计		62 859

4　结束语

基于多目标两阶段的跑道起飞调度模型,不同于近年来国内外的跑道调度研究,以往的模型大都只研究进场飞机序列而忽略了离场飞机。本文模型重点研究起飞飞机序列,并将起飞调度计划分解为两个阶段,第一阶段以吞吐量的最大化为目标,生成一个最优的重量类型序列;第二阶段通过最小化延迟时间,以达到提高运营效率的目的,将第一阶段输出的最优重量类型序列翻译为推出时间表,最终输出航班时刻。通过仿真实验证明,两阶段的跑道起飞调度模型与传统的 FCFS 模型相比,有效地提高了起飞吞吐量及跑道总吞吐量,并一定程度地减少了离场延迟,节约了飞机燃油,减少了污染物排放量,为航空公司节省了可观的运营成本。但是该模型还有很多需要进一步研究的问题,如本文在仿真中为了简化研究,没有考虑各阶段的随机变量;如何设置第二阶段生成停机位推出时间调整量,从而令跑道穿越调度方法更为有效。

参考文献:

[1] IDRIS H. R. Observation and analysis of departure operations at boston logan international airport[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2000.

[2] BUSHINELL D M. Civil aeronautics: problems, solutions and revolutions[J]. Aerospace America,2003,41(4):28 - 32.

[3] HORANGIC B R. Some queuing models of airport delays[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology,1990.

[4] Aviation systems division[EB/OL]. (2011). http://www. ctas. arc. nasa. gov/publications/index. html.

[5] SHUMSKY R A. Dynamic statistical models for the prediction of aircraft takeoff times [D]. Boston: Operations Research Center, MIT, 1995.

[6] SHUMSKY R A. Real-time forecasts of aircraft departure queues [J]. Air Traffic Control Quarterly Journal,1997,5(4):281-308.

[7] HERBERT J E, DIETZ D C. Modeling and analysis of an airport departure process[J]. Journal of Aircraft,1997,34(1):43-47.

[8] PUJET N, FERSON E. Input-output modeling and control of the departure process of congested airports[J]. Air Traffic Control Quarterly Journal, 2000,8(1):1-32.

[9] CARR F, EVANS A, CLARKE J P. Modeling and control of airport queuing dynamics under severe flow restrictions[C]//Proc of American Control Conference,2002.

[10] IDRIS H, CLARKE J P, BHUVA R, *et al*. Queuing model for taxi-out time estimation [J]. Air Traffic Control Quarterly Journal, 2002,10(1):63.

[11] BOHME D. Airport capacity enhancement by planning of optimal runway occupancies [C]//Proc of the 39th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium der TU Ilmenau. 1994:250-256.

[12] GLASS B J. Automated data exchange and fusion for airport surface traffic management[C]//Proc of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 1997: 904-911.

[13] TEIXEIRA R. An heuristic for the improvement of aircraft departure scheduling at airports [D]. Loughborough :Loughborough Technical University, 1992.

[14] CHANGE C. Flight sequencing and gate assignment at airport hubs [D]. College Park: University of Maryland College Park,1994.

[15] HESSELINK H H, PAUL S. Planning aircraft movements in airports with constraint satisfaction[C]//Proc of the 3rd IMA Conference on Mathematics in Transport Planning and Control. 1998.

[16] BOLANDER M A, SLATER G L. Analysis and optimization of departure sequences[C]//Proc of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2000.

[17] GOTTELAND J B, DURAND N, ALLIOT J M. Aircraft ground traffic optimization[C]//Proc of the 4th USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar. 2001.

[18] 余江,罗晓利. 遗传算法在飞机着陆调度问题上的应用[J]. 航空计算技术, 2007,37(3):1-4.

[19] KEITH G,RICHARDS A. Optimization of taxiway routing and runway scheduling [EB/OL]. [2009-07-01]. http://pdf. aiaa. org/preview/CDReadyMGNC08_1853/PV2008_6827. pdf.

[20] 陈世林,胡明华. SMS 中基于冲突探测的滑行道轨迹预测算法研究[J]. 四川大学学报:自然科学版,2008,45(6):1357-1361.

[21] WOOD Z,KISTLER M,RATHINAM S. A simulator for modeling aircraft surface operations at airports[C]//Proc of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. 2009:162-172.

[22] JIANG Yu, YANG Ying-bao, ZHOU Hang. Innovative predatory search algorithm for aircraft arrival sequencing and scheduling problems[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2010,27(4):361-366.

[23] 刘丹,韩松臣. 多跑道起降航班排序模型和算法研究[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,2011,33(1):27-31

[24] 卢朝阳,赵新灿. 基于到达流特性的跑道容量分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2011,43(1):30-34

[25] 应圣钢,孙富春,胡来红,等. 基于多目标动态规划的多跑道进港排序[J]. 控制理论与应用, 2010,27(7):827-835.