

基于协同决策模式的航空紧急运输流量管理优化模型研究

吕荣胜¹ 房京² 刘山杉³

(天津理工大学管理学院 天津 300384)¹ (天津大学管理与经济学部 天津 300192)²

(军事交通学院汽车指挥系 天津 300161)³

摘要 在现有机场设施条件下,如何通过空中流量管理来提高救援效率是一个亟需解决的问题。构建了基于协同决策(CDM)模式的大中型运输机空中流量管理优化模型,对拥挤时段的进离场航班流进行优化处理,通过进离场容量的合理转换来增加机场容量,并通过仿真计算表明方法合理可行。

关键词 CDM 模式,地面等待策略,流量管理,紧急运输

中图法分类号 TP391 文献标识码 A

Research of Emergent Transportation Traffic Management Optimized Model Based on CDM Mode

LV Rong-sheng¹ FANG Jing² LIU Shan-shan³

(School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)¹

(Department of Management and Economy, Tianjin University, Tianjin 300192, China)²

(Department of Vehicle Command, Military Transportation University, Tianjin 300161, China)³

Abstract Under the existing facilities of airdrome, it is an urgent problem that how to improve aid efficiency by air traffic management. The paper put forward an air traffic management optimized model based on CDM mode, disposed and optimized the air traffic in and out the airdrome, whose capacity is increased by proper diversion. The paper also proved its feasibility by simulation algorithm.

Keywords CDM mode, Land waiting strategy, Traffic management, Emergent transportation

1 引言

大、中型运输机作为空中紧急运输的重要力量,在历次重大灾害救援中发挥了不可替代的作用,同时也存在两方面的问题:1)数量巨大的救灾物资和人员要在短时间内从全国各地运往灾区,这种密集的调运工作会对空中流量管理造成巨大的压力;2)灾情的发生往往伴随恶劣的天气状况,灾区周边机场受天气影响滞留飞机增多,如何通过合理调度,在满足救灾运输的同时尽可能减少对民航飞行的影响也是一个需要解决的问题。在现有机场设施条件下,如何通过空中流量管理来提高救援效率就成为一个亟需解决的问题^[1-4]。

2 基于 CDM 模式的空中流量管理研究

2.1 CDM 策略的发展和应用

为解决空中交通拥挤问题,最大限度地满足飞机正常起降需要,国内外的研究机构和学者提出了大量的解决方法,这些方法概括起来主要包括以下几种:

1)长期法(从概念到实现一般要15年左右),包括建造更多的机场,增加机场的跑道数量,改善硬件设备环境,提高空中交通管制技术,如国际民航组织提出的未来新航行系统。这些都需要大量的资金,周期长,见效慢。

2)中期法(从概念到实现一般要6个月到几年),包括增加空中航线,修改空域结构等。这些方法使得空中交通网络的飞行流量从宏观上更加合理,能更加有效地利用空域,相比

之下也更加经济。

(3)近期法,该方法采用地面等待、空中等待、终端区排序、改航等策略直接对空中交通流量进行控制,使得空中交通流量与空域、机场的容量相匹配,从而减少拥挤。由于中期法和长期法的周期长、投资大,同时往往受到巨大的限制,因此,管理者更多地把目光集中在对空中流量的协同管理的研究上,空中交通流量的管理问题不断地在向协同决策(Collaborative Decision Making, CDM)模式的方向转变和发展。CDM最早由美国联邦航空局(FAA)提出^[5],其基本思想是:通过联合FAA提供的信息和国家空域系统(NAS)使用者提供的信息整合出更准确的信息,并且使FAA管理者和NAS使用者共同分享同样的信息,从而协助空中交通控制指挥中心(ATCSCC)、空中交通控制部门(ATC)及航空公司运营中心(AOC)进行信息交流和态势共享,增强系统整体运行的可预见性和改善系统的规划,提高空中交通流量管理(ATFM)的效率。CDM系统在欧美各大机场已得到广泛应用,结果表明其能够在很大程度上降低延误水平。目前,CDM在我国的研究已经历了起步阶段,并取得了一定的成果。协同式空中流量管理的流程如图1所示。



图1 协同式空中流量管理流程

吕荣胜(1951—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为管理创新与企业可持续发展、市场营销管理等;房京(1975—),女,硕士生,主要研究方向为军事交通运输与规划,E-mail:nevi382@163.com;刘山杉(1982—),男,硕士生,主要研究方向为军事交通运输与规划。

在协同决策模式下,流量管理部门、航空公司、机场和研究机构等各个方面不断交流,所有参与协同决策的航空公司将其运行中心的信息及时发送给流量管理部门的指挥中心。这些信息包括:航班取消、机械延误及其它的一些将要影响空域需求的因素。信息的传递方式发生了前所未有的改变,其中最重要的改变莫过于航空公司的运行中心得到了跟流量管理部门一样的数据。这样,军方和航空公司就可以做出有利于他们自己的计划和决策。在 CDM 模式下,每家航空公司必须得到公平的对待,不损害任何一家航空公司的合理利益,公平是协作的前提。目前空中交通流量管理的主要方法仍然是地面等待策略。

2.2 基于 CDM 的地面等待策略分析

地面等待策略(GDP)是为了规避航空器飞往拥挤机场或穿越拥挤空域,不按预定时刻起飞而延迟起飞的一种方法,从本质上说地面流量管理是一种主动的流量管理方法。基于 CDM 的地面等待策略不仅涉及时隙资源分配问题,而且还应考虑进场和离场间的相关性,如图 2 所示。图 2 以 5 个节点(A,B,C,D,E)表示机场模型,来自不同机场的进场航班流进入 A 节点,然后一部分进入节点 B 结束航程,另一部分具有连续航程的航班经 C 节点周转后,再与 E 节点新加入的航班组成离场航班流,飞向各自的降落机场。图 2 中节点处的自环弧表示就地地面等待或周转。由于跑道容量是影响机场接收率的关键因素,进场和离场的相关性也主要体现在跑道上,文中机场容量指的是跑道容量,暂不考虑滑行道、进离场走廊口等因素。目前我国多数机场为单跑道机场,文中以单跑道机场为研究对象[6]。

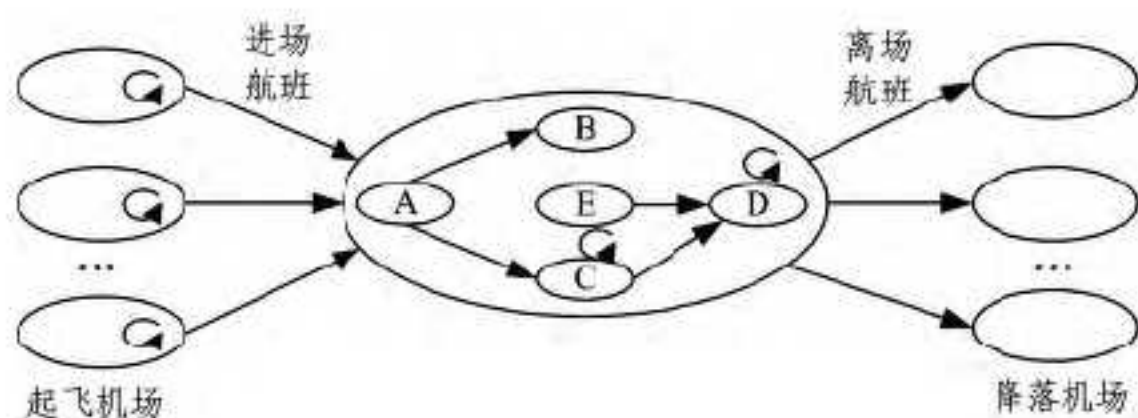


图 2 基于 CDM 的地面等待策略的机场示意图

图 3 中的跑道容量曲线表示的是飞机进场和离场的相关性,进离场容量曲线反映了两种容量之间的函数关系,记作: $v=\phi(u)$ 。图 3 中的 ABC 段为进场和离场的相互转换区,顶点 A 决定了机场限制的最大离场容量 V 和相应的最小进场容量。顶点 C 决定了机场最大进场容量 U 和相应的最小离场容量。在这个区域,进场容量的增加是以减少离场容量为代价并且取代其减少的部分。进场容量和离场容量的总数就是机场的容量。

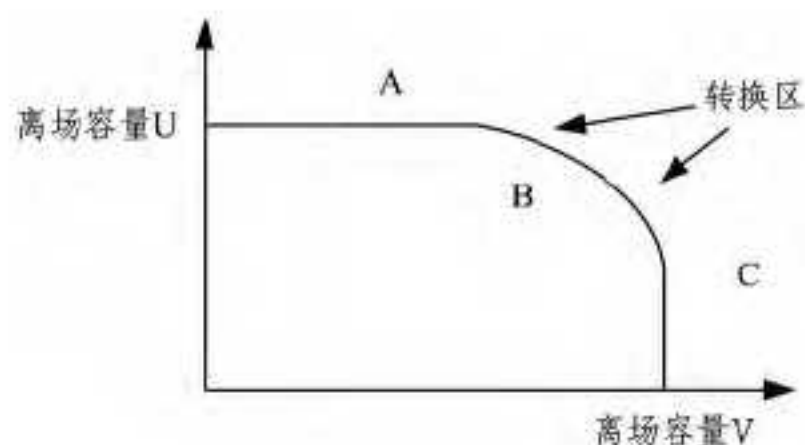


图 3 进离场跑道容量曲线

考虑到机场容量会受到天气影响,也就是说进离场容量会随机场天气的变化而产生动态的变化。为了直观地说明这种情况,用图 4 进行说明。 T_1, T_2, T_3 分别表示在不同天气

情况下的机场跑道容量曲线。

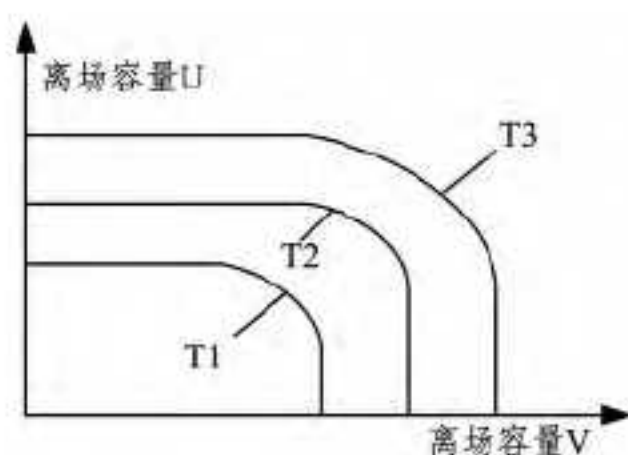


图 4 不同天气影响下的跑道容量曲线

3 协同 GDP 数学模型的建立

在繁忙的机场,尤其是在机场容量下降时,管理进离场航空器通常会大幅度增加管制员的工作负荷,同时管制效率也大大降低。通过多个空中流量管理部门的协同监控,提前对终端区内的航班进行监视,准确预测其到达机场场面的时间,采用快速有效的算法提前安排进、离场航班,对进离场容量进行合理的转化,实现容量与时隙的协同优化配置将会帮助管制员管理机场场面交通流量,提高机场容量、管制效率以及可操作性和安全性。

3.1 满足救灾需要的协同 GDP 问题描述

为解决救灾飞机短时间内在灾区附近机场起降的问题,需要对救灾期间的飞机起降运输问题进行分析,找出需要满足的主要影响因素。建立的数学模型需要满足如下要求:

- 1) 模型在满足救灾需要的同时,尽可能减少对民用机场正常起降航班的影响,并能够公平地安排各航空公司的航班起降。
- 2) 需要考虑不同天气情况下对飞机起降数量即机场容量的影响。
- 3) 优先满足用于救灾的飞机起降要求。
- 4) 为保证飞机的起降安全,需要考虑最小尾流间隔等多种影响因素。采取增加进离场容量的方法来增加进离场时隙数量,然后对进离场时隙进行分配,同等对待进离场问题,在进离场队列混合时可以使用容量转化策略。根据图 3 中进离场容量的关系,进场容量与离场容量可以简化成函数关系 $v=\phi(u)$,由此得到模型的求解思路。

首先将需要进行协同地面等待策略的繁忙时段平均分割成较小的时间段,用 T 表示机场协同地面等待策略的时间长度,根据期间天气状况把它分成若干个连续的时间区间,每个区间对应一种天气状况下的机场容量曲线, $V=\{V_1, V_2, \dots, V_k\}$ 。接下来根据 T 时段内的实际进离场需求量设定进场优先级 α 。将时段 T 分解成 N 个连续时间间隔 $\Delta, T=N\Delta$; 令 u_i 和 v_i 分别为各时间间隔 Δ_i 内的进场容量和离场容量, $v_i=\phi_i(u_i)$ 表示某种天气状况下的进场容量和离场容量的关系。通过计算得到各时间间隔 Δ_i 的最优化的机场容量 (u_i, v_i) , 由此可以计算出每一个 Δ_i 都在调节的最优化的进场数量 ω_{i+1} 和离场数量 Z_{i+1} 。

然后在 T 时段内创建出时隙序列, S 表示机场协同地面等待策略期间的时隙序列集合, $S=\{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\}, s_i \in S, t$ 为 s_i 的时隙时间。每个时隙序列由其对应区间的机场容量(进、离场容量的转化)确定。通过协同地面等待策略就可以得到在需要进行流量控制的繁忙时段的飞机起降数量和顺序,流程如图 5 所示。

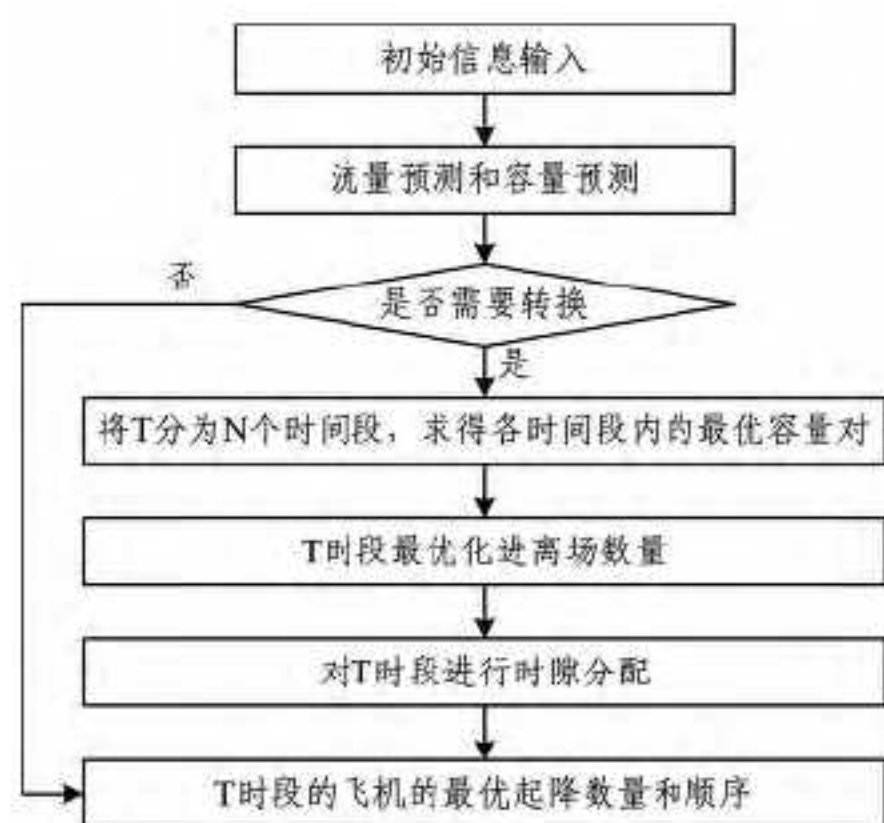


图 5 协同地面等待策略流程

模型优先考虑救灾飞机的起降需求,在安排各航空公司的起降过程中兼顾公平原则,引入天气影响因素。模型在现有机场条件下,对拥挤时段的进离场航班流进行优化处理,从而增加机场容量,通过协同决策为进离场航班分配时隙,合理安排起降顺序和起降数量,使机场流量最大化和延迟最小化,保障飞行安全,减小延误损失,增加公平性。

3.2 符号和参量定义

$T_{ij}(A)$: 两架进场航班在跑道入口的实际间隔时间。

ρ : 天气影响系数, $0 < \rho \leq 1$ (ρ 在天气情况正常下取值为 1; 不正常状况下, 天气越恶劣 ρ 的取值越小)。

$AR(ij)$: 进场航班的跑道占用时间规定。该间隔规定为两架连续进场的飞机提供足够的间隔, 以保证前机 i 清空跑道前后机不会进入跑道。

$AS(ij)$: 进场航班时间间隔规定。该间隔规定为两架连续进场的飞机提供足够的间隔, 以保证前机 i 和后机 j 的空中间隔不违反空管最小间隔规定。

$T_s(A)$: 跑道对进场航班的平均服务时间。

U_A : 跑道进场容量。

p_{ij} : 飞机 j 在飞机 i 之后的概率。

$T_{ij}(D)$: 两架起飞飞机开始滑跑的实际间隔时间。

$DR(ij)$: 起飞飞机的跑道占用时间规定。该间隔规定为先起飞和随后起飞飞机提供足够的间隔, 以保证起飞飞机清空跑道后其他飞机才能进入跑道。

$DS(ij)$: 起飞飞机的时间间隔规定。该间隔规定为先起飞和随后起飞飞机提供足够的间隔, 以保证相继起飞飞机的空中间隔不会违反空管最小间隔规定。

$T_s(D)$: 跑道对起飞飞机的平均服务时间。

V_D : 跑道离场容量。

T : 需要进离场优化处理的一个时间段, 由 N 个连续时间间隔 Δ 组成, $T = N\Delta$ 。

S : 设定的时间间隔序列, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, $s_i \in S$, t 为 S 的时隙时间。

α : 进场优先级。

$a_i^{(s)}$: Δi 时间内拥有第一优先权的总的进场需求, $i \in I$, $0 \leq a_i^{(s)} \leq a_i$ 。

$d_i^{(s)}$: Δi 时间内拥有第一优先权的总的离场需求, $i \in I$, $0 \leq d_i^{(s)} \leq d_i$ 。

a_i : Δi 时间内机场的总的进场需求, $i \in I$ 。

d_i : Δi 时间内机场的总的离场需求, $i \in I$ 。

X_i : Δi 起始时刻机场的进场飞机队列, $i = 1, 2, \dots, n+1$

(将间隔时间 i 内的进场飞机看作一个队列, X_i 即为队列中飞机数量)。

Y_i : Δi 起始时刻机场的离场队列 $i = 1, 2, \dots, n+1$ (将间隔时间 i 内的离场飞机看作一个队列, Y_i 即为队列中飞机数量)。

$a_{i,r}$: Δi 时间内进场需求有第一优先权的第 r 个使用者。

$d_{i,r}$: Δi 时间内离场需求有第一优先权的第 r 个使用者。

u_i : Δi 起始时刻机场的进场容量, $i \in I$ 。

v_i : Δi 起始时刻机场的离场容量, $v_i = \varphi(u_i)$, $i \in I$ 。 $v_i = \varphi_i(u_i)$ 为时间段内的进场容量和离场容量的关系。

3.3 模型的求解

3.3.1 考虑天气因素的最佳进离场容量的计算

1) 进场容量模型

进场容量用飞机对 (两架相邻进入机场的飞机被看作一个飞机对) 在跑道入口的间隔时间的加权计算值的倒数表示, 如果飞机对的最小空中间隔小于前机的跑道占用时间, 则该飞机对的间隔将被调整为前机的跑道占用时间。

$$T_{ij} = \frac{1}{\rho} \max(AR(ij), AS(ij)) \quad (1)$$

$$T_s(A) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} T_{ij} \quad (2)$$

$$U_A = \frac{1}{T_s(A)} \quad (3)$$

式(2)中, p_{ij} 表示飞机对中的后机 j 在前机 i 之后到达的概率, 其中 $i = j-1$ 。飞机到达概率如表 1 所列。飞机的到达概率可以分为确定型、随机型和混合型 3 种类型。确定型指飞机按照预定的到达时间, 假设飞机到达顺序按照 $n > n-1 > \dots > 3 > 2 > 1$ 排列, 那么 $p_{12}, p_{23}, \dots, p_{(n-1)n}$ 取 1, 与之相对应的 $p_{21}, p_{32}, \dots, p_{n(n-1)}$ 取 0。当 $i \neq j-1$ 或 $i = j$ 时默认为 0。随机型指飞机到达顺序受多种因素影响而无法得到准确结果。混合型是部分飞机到达时间可以确定, 其他飞机到达顺序无法确定。混合型的飞机到达概率按照确定型和随机型的方式分别进行, 如果 p_{12} 为确定型, p_{32} 为随机型, 将相应数值分别填入表中, 可得到:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^n p_{ij} = n-1, \text{ 且 } p_{ij} + p_{ji} = 1 \quad (4)$$

表 1 飞机到达概率 p_{ij} 取值表

	1	2	3	...	n-1	n
1	0	P_{12}	0	0	0	0
2	P_{21}	0	P_{32}	0	0	0
3	0	P_{23}	0	...	0	0
...	0	0	...	0	...	...
n-1	0	0	0	...	0	$P_{(n-1)n}$
n	0	0	0	...	$P_{n(n-1)}$	0

2) 离场容量模型

离场容量用飞机对开始滑跑间隔时间的加权计算值的倒数表示, 如果飞机对的最小起飞时间间隔小于前机的跑道占用时间, 则该飞机对的间隔将被调整为前机的跑道占用时间。

$$T_{ij}(D) = \frac{1}{\rho} \max(DR(ij), DS(ij)) \quad (5)$$

$$T_s(D) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} T_{ij}(D) \quad (6)$$

$$V_D = \frac{1}{T_s(D)} \quad (7)$$

3.3.2 进离场容量优化模型

对时段 T 内的 N 个时间间隔 Δ 的进离场容量 (u_i, v_i) 进行优化, 建立进离场容量优化型。

模型需要满足救灾飞行的需求, 也就是说为灾区运送物资和人员的军用飞机或者民用飞机不管进场还是离场都不能延误, 并且总是要在预定的位置为其提供服务。这些具有优先权需求的进离场航班用 a_{ir}, d_{ir} 表示。对所有 a_{ir}, d_{ir} 求和得到:

$$a_i^{(s)} = \sum_{r=1}^p a_{i,r}; d_i^{(s)} = \sum_{r=1}^p d_{i,r}; i \in I$$

进离场容量优化模型的求解目标是通过合理安排进离场飞机数量, 满足飞机的起飞和降落时间要求, 使进、离场飞机数量在各时段内减小波动, 避免忙闲不均的情况发生, 同时要保证有优先权的飞机能够在第一时间满足进离场需求。

在第 $(i+1)$ 个时间间隔 Δ 的初始位置的进离场队列为:

$$X_{i+1} = \max(0, (X_i - u_i + a_i)), X_1 = X_0, i \in I \quad (8)$$

$$Y_{i+1} = \max(0, (Y_i - v_i + d_i)), Y_1 = Y_0, i \in I \quad (9)$$

式(8)和式(9)中的 X_0 和 Y_0 代表前面时段(即时段 T 以前)留下的进离场队列。 X_i 和 Y_i 表示时间段 i 内按照航班起飞和到达时间表以及雷达监控统计得到的飞机进离场队列。 X_{i+1} 和 Y_{i+1} 代表在 i 时刻后的下一时刻按照航班起飞和到达时间表统计得到的进离场队列, X_{i+1} 和 Y_{i+1} 反映了在每一个时间段内进场和离场相应队列的变化。

X_{i+1} 的计算公式的含义为: 在 i 时刻, 通过对进场飞机容量的合理调整, 使得下一时刻的进场队列飞机能够按照计划的时间进场, 避免进场延误。如果在 $i+1$ 时间段内没有进场飞机, 则可以通过调节进场容量, 使得 X_{i+1} 为 0。 Y_{i+1} 的计算公式的含义为: 在 i 时刻, 通过对离场飞机容量的合理调整, 使得下一时刻的离场队列飞机能够按照计划的时间离场, 避免起飞延误。如果在 $i+1$ 时间段内没有离场飞机, 则可以通过调节离场容量, 使得 Y_{i+1} 为 0。经过前面的分析, 在 Δ 组成的时间段 T 内, (u_i, v_i) 的最优分配进离场容量的模型可以用式(10)~式(14)表示:

$$\min \sum_{i=1}^N [\alpha X_{i+1} + (1-\alpha)Y_{i+1}], 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 \leq a_i^s \leq u_i, i \in I \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq d_i^s \leq v_i, i \in I \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} u_i \leq U_i \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} v_i \leq V_D \end{cases} \quad (14)$$

其中, α 为进场优先级, 可人为设定。 $\alpha > 0.5$, 更倾向于进场; $\alpha < 0.5$, 更倾向于离场; $\alpha = 0.5$, 进离场优先等级相等。模型中的参数 α 表示进场容量和离场容量的相互影响。这个参数可以认为是进场的航班与总航班数的比值。通过对 α 值大小的选择, 使决策制按照实际情况调节飞机的进离场比例。约束条件(11)和(12)确保能为具有优先权的航班在时间间隔 Δ 内提供服务。约束条件(13)和(14)用来限定进场和离场容量的取值范围在最优化的机场容量确定之后, 用式(15)、式(6)计算出每一个时间段内都在调节的最优化的进场数量 ω_{i+1} 和离场数量 z_{i+1} [6,7]。

$$\omega_{i+1} = X_1 + a_i - X_{i+1} \quad (15)$$

$$z_{i+1} = Y_1 + d_i - Y_{i+1} \quad (16)$$

3.3.3 进离场容量优化模型的求解

对进离场容量优化模型采用动态规划法进行求解, 模型

求解过程如下:

1) 从机场管理部门获得初始数据。数据包括: 优化时间段内的进离场容量, 每个时间间隔内所有航班的进离场需求, 每个时间间隔内所有具有第一优先权的飞机数量, 实时获取的流量管理部门、机场、航空公司的调整信息。

2) 设定时间段长度 Δ , Δ 的取值可以视实际情况灵活选取, 通常可取 10min、15min、20min、30min 等。输入 X_1 和 Y_1 以及可供选择的容量对 (u_n, v_n) 及 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$, 对每一个 $(u_1, v_1), \dots, (u_n, v_n)$ 求取使得 $\alpha X_2 + (1-\alpha)Y_2$ 最小的容量对。

3) 对于 $i=2, 3, \dots, N$, 将 X_i 和 Y_i 看作为初始状态, 输入可供选择的容量对 (u_i, v_i) 对第三步进行优化, 若某一个容量 (u_n, v_n) , $\alpha X_i + (1-\alpha)Y_i = 0$, 则 $i+1$, 进入下一个时间段 $i+1$ 的决策。对于类似的时间段, 只需搜索一种保证不留有任何队列的策略即可。如果在实际运行中有必要继续选择方案, 可由交通流量管理专家在运行时自行替换备选方案。

3.3.4 进离场分配优化模型的求解

为了优化机场拥挤时段进离场分配问题, 要对时段进行合理分配, 平等地对待进离场航班, 提高进离场航班的吞吐量, 使航班总延误减少到最小, 优化算法如下 [8,9]。

(1) 根据对未来一段时间流量统计结果的分析, 得到需要进行地面等待程序的拥挤机场以及拥挤时段, 从而得到需要处理的进离场航班集合。

(2) 使用动态规划算法求解机场进离场容量转换模型, 得到拥挤时段的进离场容量对值 (u_i, v_i) 。

(3) 基于 RBS 和 Compression 思想的协同航班时段分配算法遵循“先排班先服务”原则, 它的公平性集中体现在按照航班在最初航班时刻表中的位置排队。算法流程如下:

1) 按照某种天气情况下的进、离场容量 V_i 创建机场时段序列集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n\}$ 。

2) 对航班进行排序将所有航班首先按优先级顺序从高到低排列。用 F 表示待分配时段的所有航班, 用 f 表示单一航班。

3) 逐次为每个时段 $s_i \in S$ 配置 F 中第一架可用该时段的航班, 并从 F 中删除该航班。

4) 如果 F 中第一架可用该时段的航班为进、离场航班, 当前区间 V 内配置的进、离场航班总数超过该区间内的进、离场容量, 则为 s_i 配置 F 中第一架可用该时段的进、离场航班; 如果 F 中不存在可用 $s_i \in S$ 的航班, 则为下一个时段配置航班。

5) 如果 F 为空, 将排序后的航班队列信息发送给各相关飞机使用单位——航空公司或军方, 各单位结合自身情况可以做出航班延误或者航班取消的响应。然后转到步骤 6)。

6) 在接收到飞机使用单位的响应后扫描所有时段, 寻找由于航班取消或者飞行过程延迟而未被使用的时段间隔 s_i 。

7) 确定时段 s_i 原来所属的航空公司 A , 扫描 A 公司的后续航班, 若存在 $f \in A$, 且 f 的预计到达时间 $TA_f \leq s_i$, 将航班 f 移至时段 s_i , 跳转至步骤 6); 若不存在, 则跳转至步骤 8)。

8) 从整个航班队列中寻找 $f \in F$ 且 $TA_f \leq s_i$, 将航班 f 移至时段 s_i , 并将空出的时段所有权转给航空公司 A , 跳转至步骤 6)。

(4) 分析进场队列, 如果用户需要进行进一步协同则返回步骤(2), 否则进入步骤(5)。

(5) 程序结束。
算法流程图如图 6 所示。

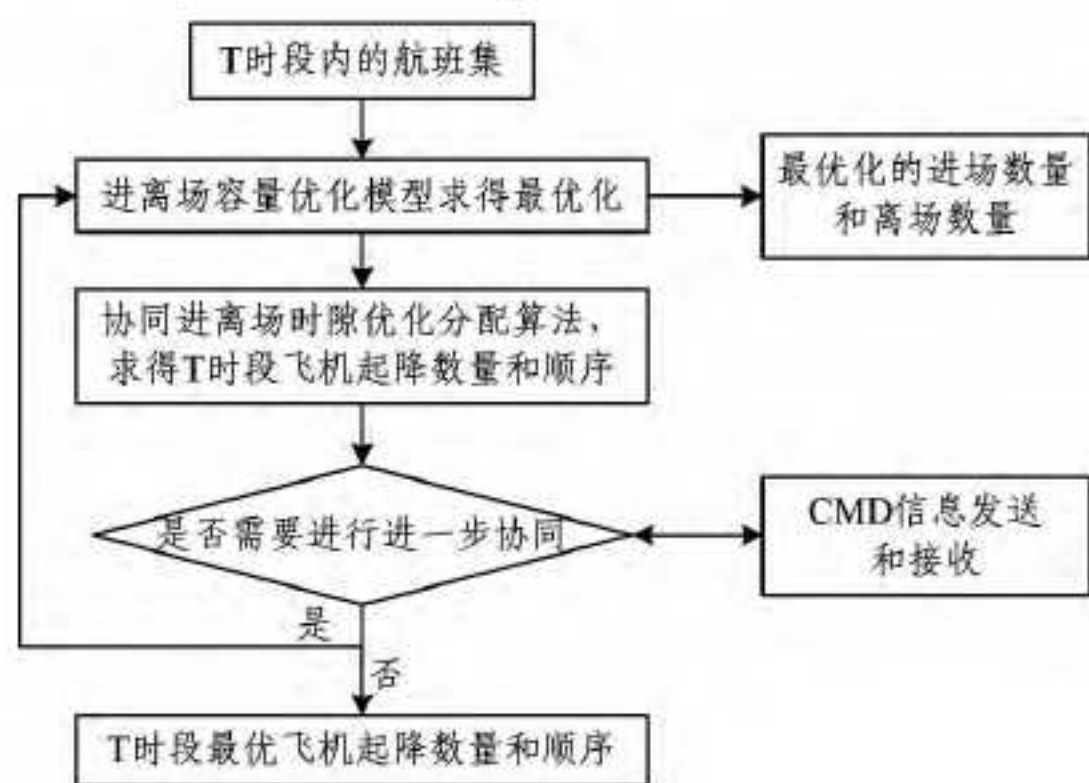


图 6 协同进离场优化分配算法

表 2 时段 $T(10:00-14:00)$ 内的飞机进离场时间

航班编号	1A	2A	3A	a(A)	4D	5A	6A	7D	b(A)	8D	9A	10A	c(D)	11A	12A	d(A)	13D	14D	15A	16A	17A	e(D)	18A	19A
进(离)场时间	10:00	10:10	10:20	10:25	10:40	10:40	11:00	11:15	11:25	11:25	11:40	11:50	11:50	12:10	12:15	12:35	12:45	13:00	13:15	13:30	13:30	13:45	13:55	14:00
AR_{ij} (DR_{ij})(分)	8	10	5	20	7	3	2	5	25	8	4	4	5	10	15	5	6	9	8	6	2	20	6	20

注: 航班编号中用 A 表示进场, 用 D 表示离场。

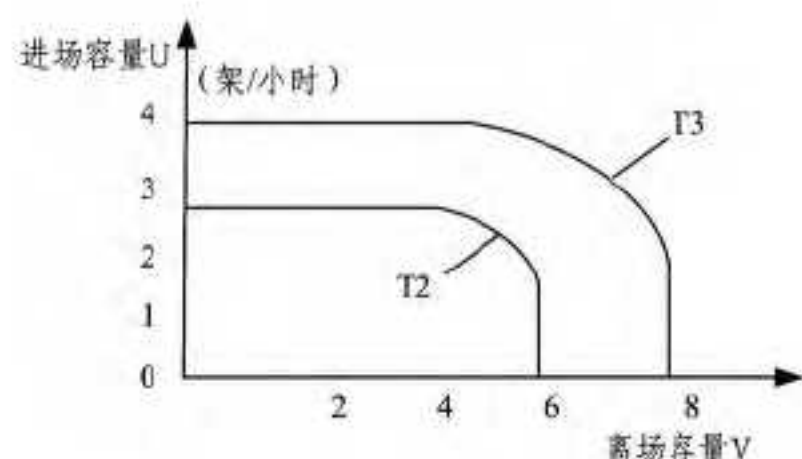


图 7 时段 T 内的机场容量曲线

在得出时段 T 内的机场容量曲线后, 就可以按照协同进离场优化分配算法进行求解计算。通过对表 3 中进离场飞机数量的观察可知, 进场飞机数量相对较多, 因此在进离场容量

4 算例仿真分析

假设某机场在时段 $T(10:00-14:00)$ 的飞机进离场时间如表 2 所列, 表中 a, b, c, d, e 表示救灾的 5 架飞机, 救灾飞机有起降优先级。在时段 T 内, 由于天气原因造成容量下降, 其中, 将时段 T 划分为 2 小时间隔的 2 个区间 T_1 和 T_2 , 天气影响系数 ρ 根据天气变化情况在 T_1 时段为 1.0, 在 T_2 时段为 0.6。假定飞机按照计划的顺序先后到达, 即 P_{ij} 。

按照文中构建的协同 GDP 模型对问题进行仿真计算, 最终结果为时段 T 内最优化的飞机起降时间和起降顺序。在求解过程中首先需要计算区间 T_1 和 T_2 内的进离场容量, 将最小尾流间隔时间要求、飞机到达概率 p_{ij} 取值表以及表 2 中的具体数值代入式 (1) — 式 (6), 得到受天气影响下的 T_1 和 T_2 时段内的进离场容量曲线, 如图 7 所示。

转换上侧重进场优先, 选取容量转换系数 $\alpha=0.6$, 选取的相关数据和结果如表 3 和表 4 所列。

表 3 协同 GDP 模型仿真计算结果

时间段 Δ	初始需求		固定进离场容量		进离场容量转换 $\alpha=0.6$	
	进场需求	离场需求	进场容量	离场容量	进场容量	离场容量
10:00—11:00	5	1	4	2	5	2
11:00—12:00	3	3	4	2	4	2
12:00—13:00	3	2	3	1	4	2
13:00—14:00	5	1	3	1	3	1
延误值	—	—	2	1	0	0

表 4 最优化进离场时间和顺序

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
航班	1A	2A	a(A)	3A	4D	5A	6A	7D	b(A)	8D	9A	c(D)
时间	10:00	10:10	10:15	10:35	10:45	10:50	10:55	11:00	11:25	11:35	11:40	11:45
(续表)												
序号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
航班	10A	11A	12A	d(A)	13D	14D	15A	16A	17A	e(D)	18A	19A
时间	11:50	12:00	12:15	12:25	12:30	12:40	12:50	13:00	13:05	13:25	13:35	13:40

仿真结果表明, 在机场容量下降的情况下, 基于进离场容量转换的协同决策系统能够根据实际情况使机场进、离场容量与需求相匹配, 使机场吞吐率增加且最大限度减小延误。

结束语 为解决大、中型紧急运输飞机短时间内在灾区附近机场起降的空中流量管理问题, 本文构建了基于 CDM 模式的大中型运输机空中流量管理优化模型。模型的建立借鉴了欧美国家空中流量管理中应用的 RBS 和 Compression 的算法思想, 在此基础上, 模型引入了天气影响因素, 优先考虑救灾飞机的起降需求, 并在安排各航空公司的起降过程中兼顾公平原则。模型在现有机场条件下对拥挤时段的进离场航班流进行优化处理, 通过进离场容量的合理转换增加机场容量, 从而增加可分配时隙的数量, 通过协同进离场优

化分配算法为进离场航班分配时隙, 合理安排起降顺序和起降数量, 使机场流量最大化和延迟最小化, 保障飞行安全, 减小延误损失, 增加公平性。通过仿真计算表明该方法合理可行。

参 考 文 献

- [1] 高健, 张兵. 国外航空应急救援现状与启示[J]. 中国民用航空, 2010, 10(3): 22-24
- [2] 万健, 李楠, 李琦. 空中交通管理系统安全评价研究[J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2011, 3(1): 45-51
- [3] Choi S O, Brower R S. Management when practice matters more than government plans: a network analysis of local emergency[J]. Administration & Society, 2012, 37(10): 651-658

- [4] Robert S. Integrated tools for managing the total pipeline [J]. Annual Conference Proceedings (Chicago: Council of Logistics Management), 2012, 15(7): 93-108
- [5] 中国民用航空局. 中国航空运输发展报告 (2012/2013) [OL]. <http://www.caac.gov.cn/H1/H2/201308/t20130828-18587.html>
- [6] 刘浩, 钱小燕, 汪荣. 随机需求 VRP 的一个算法 [J]. 南京工业大学学报 (自然科学版), 2013, 5(3): 9-11
- [7] 陆琳, 谭清美. 一类随机需求 VRP 的混合粒子群算法研究 [J].

系统工程与电子技术, 2013, 28(2): 244-247

- [8] Dethloff J. Relation between vehicle routing problems: An insertion heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up applied to the vehicle routing problem with backhauls [J]. Journal of the Operational Research Society, 2012, 53(6): 115-118
- [9] Tang F A, Galvao R D. Vehicle routing problems with simultaneous pick-up and delivery service [J]. Journal of the Operational Research Society, 2012, 39(8): 19-33

(上接第 27 页)

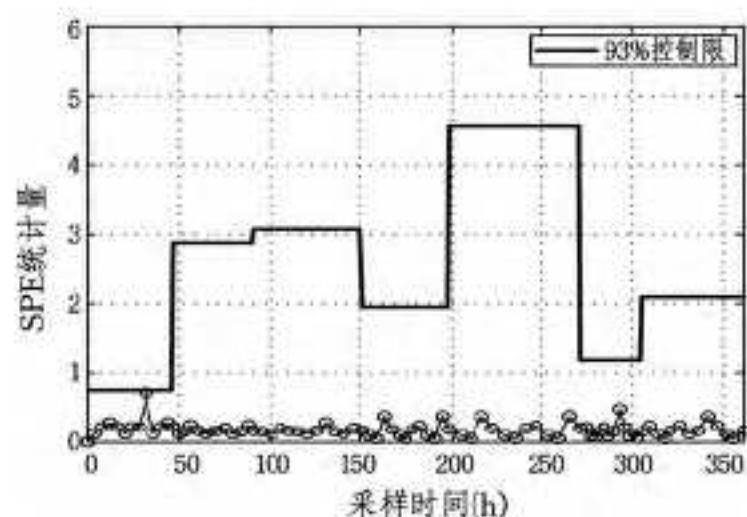


图 5 离线 SPE 统计量控制限

测试数据从第 317 个采样时刻到第 360 个采样时刻引入发酵温度故障, 图 6—图 9 分别示出了采用 MPCA 算法和 MKPCA 算法的检测结果。

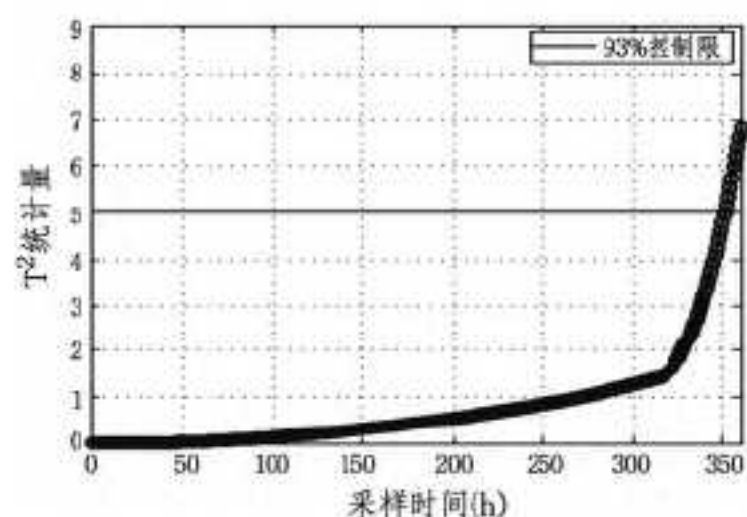


图 6 MPCA T^2 统计量监测图

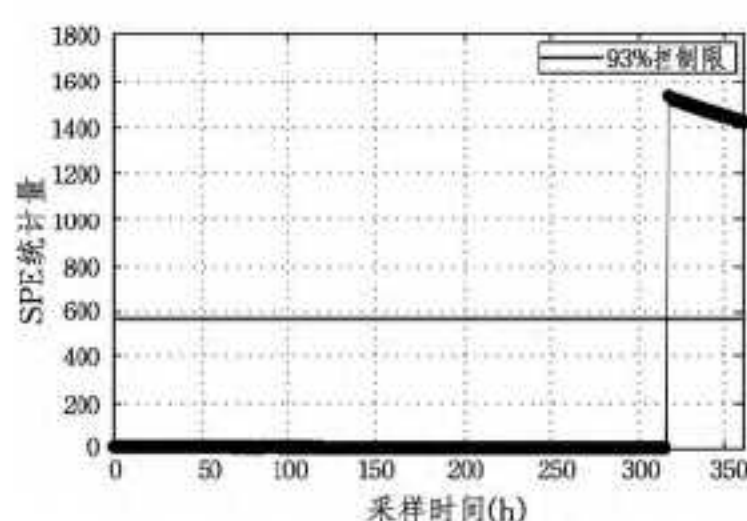


图 7 MPCA SPE 统计量监测图

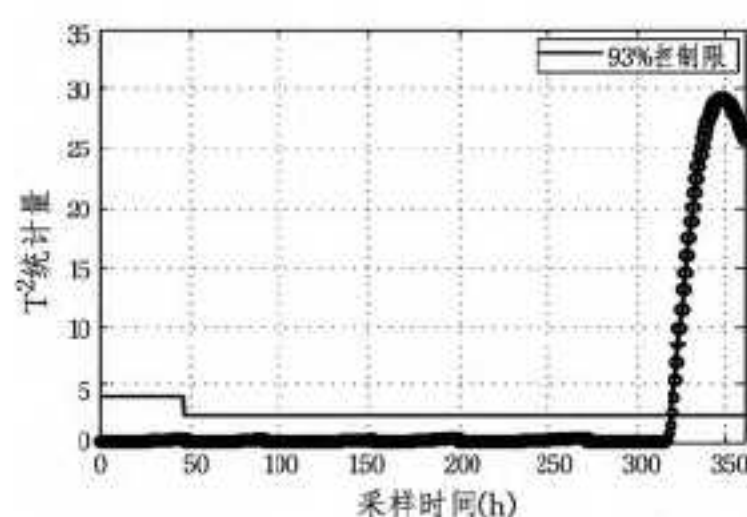


图 8 MKPCA T^2 统计量监测图

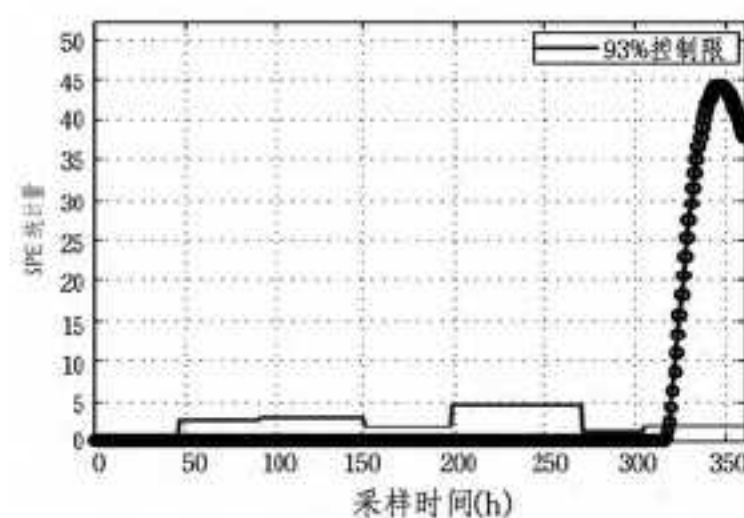


图 9 MKPCA SPE 统计量监测图

在 317 个采样时刻引入发酵温度故障以后, 图 8、图 9 中 MKPCA 的 T^2 和 SPE 统计量均及时准确地检测出故障, 而由图 6、图 7 可以看出, MPCA 的 SPE 统计量及时准确地检测出了故障, 但是 T^2 统计量对于故障的响应表现出明显的滞后, 没能将故障准确及时地监测出。

结束语 为了更好地对这一过程进行故障诊断, 本文根据间歇生产过程的复杂性、非线性等问题, 提出了一种过程分段的多向核主元分析方法 (MKPCA), 通过对整个生产阶段的粗划分与细化分, 建立了一个更加准确的统计模型, 它克服了传统的 MPCA 对间歇过程分析的多种弊端。将这一方法应用到典型间歇过程——啤酒发酵过程中, 通过仿真研究, 不管是在监测的实时性还是准确性上都取得了满意的效果, 验证了该方法对间歇过程故障诊断的优势。

参考文献

- [1] Qi Y S, Wang P, Fan S J, et al. Enhanced batch process monitoring using kalman filter and multiway kernel principal component analysis [C] // 2009 Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2009). 2009: 5289-5294
- [2] Zhang C, Li Y. Study on the fault-detection method in batch process based on statistical pattern analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 2103-2110
- [3] 陆宁云, 王福利, 高福荣, 等. 间歇过程的统计建模与在线监测 [J]. 自动化学报, 2006, 32(3): 400-410
- [4] 潘玉松. 基于主元分析的传感器故障检测与诊断 [D]. 河北: 华北电力大学, 2005
- [5] 孔晓光, 郭金玉, 林爱军. 基于二维主元分析的间歇过程故障诊断 [J]. 计算机应用, 2013, 33(2): 350-352
- [6] 常玉清, 王姝, 谭帅, 等. 基于多时段 MPCA 模型的间歇过程监测方法研究 [J]. 自动化学报, 2010, 36(9): 1312-1320