

文章编号:1672-3961(2010)06-0041-07

概率空域拥挤管理模型与方法

田文,胡明华

(南京航空航天大学民航学院,江苏南京210016)

摘要:针对空域拥挤现象日益严重、管理策略与方法缺乏等问题,建立了空域拥挤预测模型和空域拥挤风险解决模型。采用预测模型预测未来可能产生拥挤的空域和时段,基于空域拥挤风险解决模型对具有高风险拥挤空域在预测时段内实施流量管理,在充分考虑延误成本、不同空域用户延误公平性及其对交通流影响程度等因素的情况下,有效降低拥挤风险。实际运行数据表明,所建立的空域拥挤预测模型和空域拥挤风险解决模型能有效地预测未来空域发生拥挤的时段,迅速找到适宜的拥挤解决策略,平衡运行风险控制与成本控制,为空中交通流量动态管理提供了新途径。

关键词:空中交通;空中交通流量管理;风险预测;空域拥挤管理

中图分类号: V355.1 **文献标志码:** A

Probabilistic airspace congestion management model and methodology

TIAN Wen, HU Ming-hua

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: There are still no effective airspace congestion management strategies and methodologies to solve seriously increased airspace congestion. An airspace congestion prediction model and an airspace congestion resolution model were established. The airspace congestion prediction model was used to forecast the time intervals in which the congestion occurred, and the airspace congestion resolution model was used to control the air traffic flow in the airspace with high risk congestion during predicted time intervals. The airspace congestion risk was reduced, and also some factors such as delay cost, delay equity of different airspace users and the influence to the air traffic flow were considered. Based on real flight data, simulation results showed that the two models could effectively predict the time of airspace congestion in the future, rapidly find out suitable strategies, and balance performance risk control and cost control, which provided an innovative new way for dynamic air traffic flow management.

Key words: air traffic; air traffic flow management; risk prediction; airspace congestion management

0 引言

近年来,随着我国航空运输业的不断发展,空中交通流量不断增加,空域拥挤现象日益严重,迫切需要进行拥挤管理。传统的空域拥挤管理研究通常从确定性角度,通过统计预测交通流变化,对比未来某时段内空域中交通需求和容量,一旦预测到需求超过容量就视为空域拥挤发生,将直接采取流量管理

措施^[1-2]。虽然在理论上实现了空域拥挤缓解,但从实际运行角度而言,传统方法侧重基于成本、效能等因素分析优化实施策略,而对空域拥挤的预测与判断过于简化,忽视了交通需求与容量的不确定性,往往造成预测到的拥挤与空域实际运行状况不符。因此,近年来不断有专家提出新的空域拥挤管理决策理念和方法。Meyn初步建立了空中交通需求的随机方法,但是并未建立空域扇区的拥挤风险预测模型^[3];G. Davidson和S. Elefante等人从随机性的

收稿日期:2010-05-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA12A105)

作者简介:田文(1981-),女,山东青岛人,博士研究生,主要研究方向为空中交通管理系统资源优化配置. E-mail: tianwen0665@hotmail.com

角度提出空域拥挤管理决策,但只在战略层面进行了概念性构想,缺乏符合实际运行需求的方法模型^[4-5];R. Hoffman 等人从容量不确定性角度建立了基于事件的空域拥挤管理决策模型,但对交通需求不确定性对空域运行状态的影响尚未分析,从而无法有效地预测空域拥挤^[6];C. Wanke 等人初步建立了空域拥挤风险管理决策方法,但缺乏空域拥挤管理策略整体构建^[7-8]。总之,上述文献并未建立有效的空域拥挤管理模型与方法,缺乏完整的空域拥挤风险预测模型,也没有将风险控制与成本控制相融合建立空域拥挤风险解决模型,更没有整合空域拥挤风险的预测与解决模型,建立需求与管理相互作用下的空域拥挤管理过程,容易造成空域拥挤管理的效率下降和效益损失。

为了解决空域拥挤管理问题,本文从扇区角度出发,建立了空域拥挤风险预测模型和空域拥挤风险解决模型。首先利用预测模型预测未来可能产生拥挤程度及其时段,然后利用预测结果,对高风险拥挤通过解决模型实施流量管理措施加以缓解,在降低空域拥挤风险的同时,考虑延误成本、不同空域用户延误公平性以及航空器飞行计划影响等目标,实现运行风险控制与成本控制的平衡,以及空域拥挤风险预测与解决的整合,为空中交通流量的动态管理提供了新方法。

1 问题的描述

为描述问题方便,本文将航空器飞行的四维空间(时间维和空间维)简化为二维空间,整个网络模型由空域、机场、边界点、扇区和飞行轨迹5个要素构成,如图1所示。整个空域分为目标空域和非目标空域,目标机场所在空域为目标空域,由若干扇区构成;其他机场所在空域为非目标空域,视为一个整体。航空器由起飞机场离场,经边界点进入、离开扇区,至目的机场降落,整个飞行过程近似为从一个边界点到下一个边界点的航路直线飞行,用实线表示,虚线表示航空器实际飞行轨迹(当航空器在某机场起飞或降落时,该机场即为进入或离开所在空域的边界点)。

实际运行中,恶劣天气影响或空中交通管制下计划外的航空器飞行速度/高度/航向改变、航班取消/出现、进/离场时刻延误等诸多不确定因素会造成航空器实际飞行轨迹偏离理想条件下按航路的点到点直线飞行,使其在未来一定时间内的飞行时间和空间都具有不可预测性,表现为航空器进入或离开空

域扇区的时间具有随机性。如果将未来某时间段内占用此扇区的航空器数量视为该扇区的交通需求,则这种随机性表现为未来某时间段内扇区交通流量需求服从一定的概率分布。设定扇区交通需求概率阈值,如果未来某时段扇区交通需求超过容量条件下所对应的概率超过此阈值,就认为该扇区可能发生拥挤,扇区所在空域也就具有拥挤风险(见图2)。

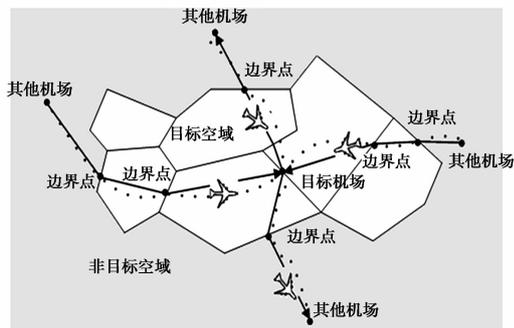


图1 空域网络结构图
Fig. 1 Airspace structure

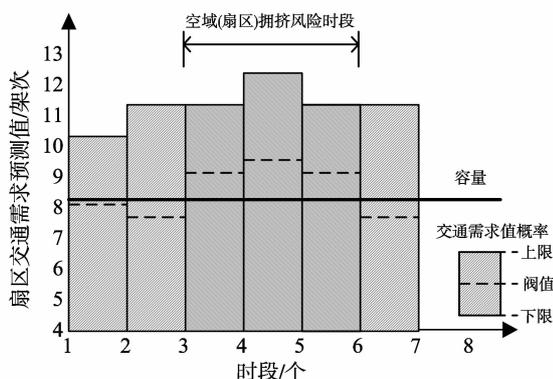


图2 空域(扇区)拥挤风险发生示意图
Fig. 2 Airspace (sector) congestion

如上所述可知,由于空域拥挤的发生具有不确定性,因此需要预测空域拥挤发生的可能性及其程度。本文通过分析航空器进出扇区的随机性特点,计算空域扇区概率需求,结合不确定性空域容量概念,建立空域拥挤风险预测模型,预测某空域发生拥挤的可能性和时段。对具有高风险拥挤空域,综合考虑延误损失、不同空域用户延误的公平性以及航空器飞行计划的影响等因素,通过空域拥挤风险解决模型在预测时段内实施流量管理加以缓解,并基于航班实际运行数据,提出了适宜的空域拥挤解决策略。

2 空域拥挤管理模型与方法

2.1 模型参数及其符号说明

Sec 为目标空域内的扇区 s 集合, $s \in \text{Sec}$ 。

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_M, T_{M+1}\}$ 为 $(M+1)$ 个时段构

成的空域运行时间, $t \in T_i$ 。

N_F 为航空器总数量, 航空器 $f=1, \dots, N_F$ 。

Δ^f 为航空器 f 的起飞时隙数集合, $\Delta^f = \{-\delta_m^f, -\delta_m^f + 1, \dots, -1, 0, 1, \dots, \delta_p^f - 1, \delta_p^f\}$, 其中 $-\delta_m^f$ 和 δ_p^f 分别表示航空器 f 起飞的最大提前时隙数和最大延误时隙数, 设定每架航空器起飞时隙数初始值都为 0。

R^f 为航空器 f 的可选飞行路径集合, $R^f = \{r_0^f, r_1^f, \dots, r_{\max}^f\}$, 其中 r_0^f 和 r_{\max}^f 分别表示航空器 f 的最短飞行路径和最长飞行路径, 设定每架航空器的初始飞行路径都为 r_0^f 。

(δ_j^f, r_i^f) 是空域拥挤解决模型的决策变量, 其中 δ_j^f 表示航空器 f 的第 j 个起飞时隙数, r_i^f 表示航空器 f 的第 i 条飞行路径, 且 $\delta_j^f \in \Delta^f, r_i^f \in R^f$ 。

$p_{\text{IN},f}^s(t)$ 表示航空器 f 在时间 t 进入空域扇区 s 的概率, $p_{\text{OUT},f}^s(t)$ 表示航空器 f 在时间 t 离开空域扇区 s 的概率, $p_f^s(t)$ 表示航空器 f 在时间 t 位于空域扇区 s 内部的概率, $t \in T_i, T_i \subset T, s \in \text{Sec}$ 。

$g_f^s(t)$ 和 $h_f^s(t)$ 分别为航空器 f 到达和离开空域扇区 s 时间的概率密度函数, 且有 $g_f^s(t) = g_f^s(t(\delta_j^f, r_i^f))$, $h_f^s(t) = h_f^s(t(\delta_j^f, r_i^f))$, 其中 $t(\delta_j^f, r_i^f)$ 表示航空器到达或离开空域扇区 s 的时间是该航空器所选起飞时隙和飞行路径的函数。

$P_{N_f}^s[n]$ 表示一定时间区间内空域扇区 s 中同时存在 n 架航空器的概率, 其中 N_f 为该扇区在该时间区间内可能存在的航空器数量, P_n^s 为一定时间区间内空域扇区 s 中存在大于等于 n 架航空器的概率, $s \in \text{Sec}$ 。

$P_{\text{congestion}}^s$ 表示确定性容量约束下一段时间区间内空域扇区 s 中发生拥挤的概率, $s \in \text{Sec}$ 。

$N_{\text{congestion}}^s$ 表示一定时间区间内空域扇区 s 容量可能值的数量, c_i^s 为可能的扇区容量值, Q_i^s 为其对应的概率, 且 $\sum_{i=1}^{N_{\text{congestion}}^s} Q_i^s = 1$ 。

$P_{\text{congestion}}^{s,i}$ 表示一定时间区间内、空域容量为不确定条件下空域扇区 s 发生拥挤的概率, $s \in \text{Sec}, i = 1, \dots, N_{\text{Capacity}}^s$ 。

$U_s = \begin{cases} 1, & \text{如果 } P_{\text{congestion}}^{s,i} > P_{\max}^s; \\ 0, & \text{否则。} \end{cases}$ 表示一定时间区间内空域扇区 s 发生拥挤的概率超过空域拥挤发生概率阈值 P_{\max}^s 。

P_{Airspace} 为一定时间区间内包含若干扇区 s 的空域发生拥挤的概率。

J_{Airspace} 和 J_{Sector} 分别为目标空域拥挤发生概率和扇区拥挤发生概率间的平衡系数, J_{Ground} 和 J_{Air} 分别

表示航空器实施地面延误和空中延误的成本权重系数。

N_m 为航空公司 m 所属航空器的总数量, N_{airline} 为航空公司数量, $\sum_{m=1}^{N_{\text{airline}}} N_m = N_F$ 。

$\bar{D}_m = \{\sum_{i=1}^{N_m} [\delta_j^f + (|r_i^f| - |r_0^f|)/v^f]\}/N_m$, 表示航空公司 m 下属航空器总延误时间的均值。

$D_{N_{\text{airline}}} = \sum_{m=1}^{N_{\text{airline}}} \bar{D}_m / N_{\text{airline}}$, 表示全体航空公司平均延误时间的均值。

$k_f(r_i^f, \delta_j^f, s, t) =$

$\begin{cases} 1 & \text{航空器 } f \text{ 在扇区 } s \text{ 内飞行;} \\ 0 & \text{否则。} \end{cases}$

$g_f(r_i^f, \delta_j^f, s, t) =$

$\begin{cases} 1 & \text{航空器 } f \text{ 在扇区 } s \text{ 边界范围内飞行;} \\ 0 & \text{否则。} \end{cases}$

$|r_i^f|$ 表示航空器 f 选择第 i 条飞行路径所需飞行的距离, $r_i^f \in R^f$ 。

v^f 表示航空器 f 的飞行速度, 由航空器 f 类型决定。

t_0^f 表示航空器 f 的原计划起飞时间。

W 表示滑动窗口长度的一半。

f' 表示执行航空器 f 接续航班任务的航空器, 即 f' 与 f 为先后执行不同航班飞行任务的同一架航空器。

τ 表示航空器 f 与其接续航班任务的航空器 f' 之间的间隔时间。

2.2 空域拥挤风险预测模型

航空器 f 在时间 t 进入和离开空域扇区 s 的概率分别为:

$$p_{\text{IN},f}^s(t) = \int_{-\infty}^t g_f^s(t) dt = \int_{-\infty}^t g_f^s(t(\delta_j^f, r_i^f)) dt,$$

$$p_{\text{OUT},f}^s(t) = \int_{-\infty}^t h_f^s(t) dt = \int_{-\infty}^t h_f^s(t(\delta_j^f, r_i^f)) dt,$$

其中, $g_f^s(t)$ 和 $h_f^s(t)$ 分别为航空器 f 到达和离开空域扇区 s 时间的概率密度函数, 且是决策变量 (δ_j^f, r_i^f) 的函数。

由上可知, 时间 t 航空器 f 在扇区 s 内的概率为:

$$p_f^s(t) = p_{\text{IN},f}^s(t) - p_{\text{OUT},f}^s(t).$$

如果未来一定时间区间内扇区 s 可能有 N_f 架航空器飞行, 第 i ($1 \leq i \leq N_f$) 架航空器在扇区 s 内的概率为 p_i 。设 $p_i = p_f^s(t)$, 则该时间区间内扇区 s 中同时存在 n 架航空器的概率为 $P_{N_f}^s[n]$ ($0 \leq n \leq N_f$), 且有

$$P_0^s[0] = 1, \text{ For } i = 1 \text{ to } N_f;$$

$$\{P_i^s[0] = (1 - p_i) \cdot P_{i-1}^s[0];$$

For $k = 1$ to $(i - 1)$:

$$P_i^s[k] = p_i \cdot P_{i-1}^s[k-1] + (1 - p_i) \cdot P_{i-1}^s[k] \}.$$

因此,该时间区间内扇区 s 中存在大于等于 n

架航空器的概率为 $P_n^s = \sum_{i=n}^{N_f} P_{N_f}^s[i]$ 。

根据当前通用的容量概念,一般将扇区容量视为确定性的值,即某时间区间内该扇区容量为恒值,且概率为1。因此,如果该扇区在未来一定时间的交通需求超过容量值 n ,则认为该扇区具有空域拥挤风险,其风险发生概率为:

$$P_{\text{congestion}}^s = P_n^s = \sum_{i=n}^{N_f} P_{N_f}^s[i].$$

但是,随着对容量认知的更新,有研究提出容量值同样存在不确定性,即未来某时间段内扇区容量值服从一定概率分布^[9]。在此引入该理念,认为某时间区间内的扇区容量为 c_i^s , 概率为 Q_i^s 。如果该扇区在未来一定时间的交通需求超过容量,则认为发生了空域拥挤,并将风险发生概率修正为:

$$P_{\text{congestion}}^{s,i} = Q_i^s \cdot P_{\text{congestion}}^s = Q_i^s \cdot P_{c_i^s}^s = Q_i^s \cdot \sum_{j=c_i^s}^{N_f} P_{N_f}^s[j], \quad i = 1, \dots, N_{\text{Capacity}}^s.$$

因此,当扇区 s 的拥挤发生概率 $P_{\text{congestion}}^{s,i}$ 超过给定的单个扇区 s 拥挤发生概率阈值 P_{max}^s , 就认为扇区 s 发生了拥挤。如果某空域范围内共有 N_s 个扇区发生拥挤,则其中最大的扇区拥挤发生概率视为此空域内发生拥挤的概率,为:

$$P_{\text{Airspace}} = \max_{s \in \text{Sec}} (P_{\text{congestion}}^{s,i} \cdot U_s), \quad i = 1, \dots, N_{\text{Capacity}}^s.$$

2.3 空域拥挤风险解决模型

2.3.1 前提条件

为实现上述飞行计划的优化问题,需要给出以下几点假设:

(1) 航班运行时间区间内的航班运行状况及各扇区的确定性或不确定性容量已知,这是策略得以实现的先决条件;

(2) 对在当前航班运行时间区间内无法分配的交通需求,都可在运行时间区间的下一个额外时段内完成,即假设该额外时段内各扇区的容量值无限,这是确保所研究问题具有可行解;

(3) 一旦目标空域内有扇区发生拥挤的概率超过给定的阈值,则视该目标空域发生了拥挤,需要启动空域拥挤风险解决模型。

2.3.2 实现目标

(1) 实现目标空域拥挤风险概率最小,即尽量降低在实施空域拥挤管理策略后目标空域内扇区拥挤发生的最大概率的同时,针对扇区拥挤发生概率

超过其各自阈值的扇区,尽量降低此类扇区拥挤发生的概率,且实现其分布的均衡,有

$$y_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} J_{\text{Airspace}} \cdot (P_{\text{Airspace}} - \max_{s \in \text{Sec}} P_{\text{max}}^s) + \\ J_{\text{Sector}} \cdot \sum_{s=1}^{N_s} \max[(P_{\text{congestion}}^{s,i} - P_{\text{max}}^s), 0]^2 \end{array} \right\}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{Capacity}}^s.$$

(2) 在尽量降低全体航空器的总延误成本的同时,实现各航空器延误成本的均衡性。其中,总延误成本由总延误时间和延误系数决定,总延误时间包括地面延误时间和空中延误时间:前者是指飞行计划调整后航班的起飞时间与其原定起飞时间之差的绝对值;后者是指航班起飞后,调整其飞行路径,其飞行时间与原计划飞行时间之差,有

$$y_2 = \min \sum_{f=1}^{N_f} [J_{\text{Ground}} \cdot \delta_f^f + J_{\text{Air}} \cdot (|r_f^f| - |r_0^f|) / v^f]^2. \quad (2)$$

(3) 尽量保证分配给不同空域用户延误的公平性,在此公平性通过不同空域用户(即航空公司)之间引入的航空器延误时间体现,即通过计算各航空公司延误均值的样本方差,来降低由空域拥挤解决策略对航空公司引入航班延误时间的差别,有

$$y_3 = \min [\sum_{m=1}^{N_{\text{airline}}} (\bar{D}_m - D_{N_{\text{airline}}})^2] / (N_{\text{airline}} - 1). \quad (3)$$

(4) 尽量保证空域拥挤管理策略对航空器的飞行影响程度最小,即实现受策略影响增加的航空器额外飞行时间最短,有

$$y_4 = \min \sum_{f=1}^{N_f} [(|r_f^f| - |r_0^f|) / v^f]. \quad (4)$$

2.3.3 约束条件

(1) 对每个航班建立离场时隙数集合,且可选离场时隙数不会偏离原始离场时隙数过大,通常在初始离场时间前后 30 min 之内,有 $0 \leq \delta_m^f \leq 15, 0 \leq \delta_p^f \leq 15$ 。

(2) 对每个航班建立飞行路径集合,且可选飞行路径不会过长,通常不超过初始飞行路径的 30%,才能符合航空公司运营实际,有

$$(|r_{\text{max}}^f| - |r_0^f|) / |r_0^f| \leq 30\%.$$

(3) 考虑接续航班问题,接续航空器应在之前的航班任务到达之后的一定时间段后方能起飞,有

$$\delta_p^f > \delta_p^f + \tau, \delta_m^f > (t_0^f + \delta_j^f + r_f^f / v^f) + \tau.$$

(4) 考虑空域拥挤的实施效果,利用滑动窗原理保证空域拥挤管理策略实施后,各扇区的交通需求与空域容量相平衡,有

$$\sum_{i \in T_f} \sum_{j=1}^{N_f} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2W+1} \sum_{x=t-w}^{t+W} k_f(r_i^f, \delta_j^f, s, x) + \\ \frac{1}{2(2W+1)} \sum_{x=t-w}^{t+W} g_f(r_i^f, \delta_j^f, s, x) \end{array} \right\} \leq c_k^s,$$

$$k = 1, \dots, N_{Capacity}^s, Q_k^s = \max_{i=1, \dots, N_{Capacity}^s} Q_i^s, s \in \text{Sec}.$$

3 实例分析

3.1 数据统计

选取广州新白云机场为堵塞机场,简化机场所空域的空域中交通运行状况,生成扇区 AC01 ~ AC06 交通网络结构(图3)。根据广州区域 2010 年 5 月份第 1 周运行数据,共 13 372 架次航班,统计航班过该扇区各边界点的时间,与其过各点的计划时间进行比较,获得航班在各扇区边界点延误时间。统计结果表明,根据边界点的不同,航班所对应的延误时间服从一定概率分布规律。其中,航班在扇区 AC05 边界点处的延误时间的概率密度函数服从正态分布,相应均值和方差如表 1 和表 2 所示。

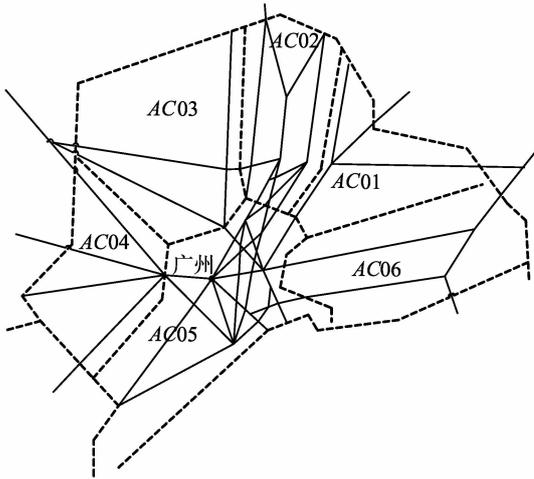


图3 广州区域空域网络结构图

Fig.3 Airspace structure of Guangzhou

表1 航班进入扇区 AC05 边界点的延误时间参数
Table 1 Delay time parameters of the flights entrance AC05

进入扇区边界点	均值 μ/min	方差 σ/min
BEKOL	20.1	13.3
BIGRO	13.2	11.9
BOKAT	19.7	14.1
CON	15.6	13.0
GYA	15.1	13.5
IDUMA	16.1	13.5
NOMAR	20.9	14.4
P269	13.7	12.4
POU	15.0	8.8
SAREX	13.5	12.2
SHL	19.0	18.7
TAMOT	16.9	10.9
VIBOS	22.1	13.8
VIPAP	16.6	14.5

表2 航班离开扇区 AC05 边界点的延误时间参数
Table 2 Delay time parameters of the flights exit AC05

离开扇区边界点	均值 μ/min	方差 σ/min
BIGRO	17.9	14.0
GURIN	13.6	12.1
GYA	16.0	12.8
IDUMA	17.6	10.7
LMN	12.7	12.6
POU	6.9	6.2
SAREX	13.8	10.5
SHL	22.2	13.1
SIERA	21.8	13.2
TAMOT	21.7	14.6
VIPAP	19.6	17.8

根据空域拥挤风险预测模型、延误时间参数和 2010 年 5 月 2 日上午 9:00 - 11:00 共 8 个时段 ($T_1 \sim T_8$) 内 48 架次航班数据,获得未来一定时间内各扇区在 9:00 - 11:00 的交通需求值及其对应概率,其中扇区 AC05 的交通需求及其概率如表 3 所示。根据空中交通容量预测方法^[9]获得该空域内各扇区在各时段的容量值,其中扇区 AC05 由于某些因素(如恶劣天气等)导致容量在 $T_3 \sim T_6$ (9:30 - 10:30) 从 8 架次/15 min 下降至约 4 架次/15 min,且对应概率为 65%(表 3)。从表 3 可知,时段 $T_3 \sim T_6$ 内扇区 AC05 需求大于容量且拥挤风险概率超过阈值 50%,认为该扇区发生拥挤。由于目标空域内其他扇区拥挤风险概率(由于篇幅原因不列出具体的数据)均小于阈值,因此认为目标空域发生拥挤,且空域拥挤概率与 AC05 相同,需要实施空域拥挤管理。

表3 扇区 AC05 概率需求、容量与拥挤分布
Table 3 Probabilistic distribution of traffic demand, airspace and congestion in AC05

$\geq \text{MAP}$	时段							
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
1.0	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
2.0	0.32	0.89	0.98	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99
3.0	0.05	0.64	0.96	0.98	0.96	0.92	0.95	0.98
4.0	0.01	0.34	0.87	0.93	0.85	0.79	0.85	0.93
5.0	0.30×10^{-4}	0.13	0.69	0.80	0.66	0.54	0.66	0.81
6.0	1.30×10^{-5}	0.04	0.48	0.62	0.43	0.32	0.44	0.61
7.0	1.77×10^{-7}	0.01	0.27	0.41	0.23	0.16	0.24	0.39
8.0	1.45×10^{-9}	0.001	0.13	0.22	0.10	0.06	0.11	0.21
9.0	0.50×10^{-11}	0.0002	0.05	0.10	0.04	0.02	0.04	0.09
AC05 容量	8	8	4	4	4	4	8	8
AC05 概率	0.65							
$P_{congestion}^{s,i}$	0.80×10^{-9}	0.60×10^{-3}	0.57	0.60	0.55	0.51	0.07	0.14

以上分析都是基于空域拥挤发生的不确定性,一旦预测到未来某时间该空域的拥挤概率超过给定阈值,就采取流量管理措施。依照传统的确定性空域拥挤解决方法,一旦空域交通需求超过容量就视为拥挤发生,根据表4应当在 T_1 时段就采取流量管理措施缓解拥挤,但实际上由于该时段交通需求概率并未超过阈值,因此无需从此时段开始调整航空器的起飞时间与飞行路径。实际运行中,该时段由于交通需求超过容量限制的时间不长,且数量不多,管制人员通常不将其视为空域拥挤而采取流量管理措施; T_3 时段之后由于有较长的一段时间内交通需求都超过了容量限制,对空域运行产生了较大负荷,因此认为发生了拥挤,需要采取流量管理策略,这也与上述实验结果相一致,证明了较之传统确定性方法,本文所建空域拥挤风险预测模型优越性。

表4 扇区AC05确定性交通需求与容量的变化分布
Table 4 Deterministic traffic demand and capacity variation at AC05

时段	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
需求	9.0	5.0	6.0	7.0	4.0	8.0	4.0	5.0
容量	8.0	8.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	8.0

3.2 实验结果及分析

为了缓解AC05在 $T_3 \sim T_6$ 的拥挤,对 $T_1 \sim T_8$ 其间运行航空器实施流量管理:建立每架航空器的离场时隙数集合,保证离场时间只能在初始离场时间的前后30 min内调整;建立每架航空器飞行路径集合,保证每条飞行路径的额外飞行距离不超过最短飞行路径长度的30%。

(1) 参数选择

$T = 120 \text{ min}$, $T_1 = \dots = T_M = 15 \text{ min}$, $M = 8$; 时隙数范围 $\delta_j^s \in [-15, 15]$, 时隙长度2 min; 接续航班间隔时间 $\tau = 20 \text{ min}$; 滑动窗 $W = 5 \text{ min}$; $P_{\max}^s = 0.50$; $J_{\text{Airspace}} = 1.0$, $J_{\text{Sector}} = 1.0$, $J_{\text{Ground}} = 1.0$, $J_{\text{Air}} = 3.0$; $N_{\text{airline}} = 14$ 。其中, P_{\max}^s 通过与广州区域现场管制人员交流获得, J_{Ground} 和 J_{Air} 根据空中等待与地面等待的延误成本比较获得^[1]。

(2) 实验结果分析

根据实际航班数据及上述参数,采用多目标遗传算法^[10]得到目标函数Pareto解。仿真结束后,在第300代种群中交通需求满足容量约束的优化方案有28个,其中构成非支配解集的解为8个,表5给出了各解的指标函数(①是空域拥挤解决策略实施后目标空域拥挤风险概率;②是全体航班的总延误时间;③是不同空域用户间延误时间分配样本方差;④是受策略影响的航空器额外飞行时间),可以看

到扇区AC05的拥挤风险概率值从原来最高60%下降至给定阈值50%以下,使整个目标空域的拥挤风险得以缓解。

表5 最终方案结果
Table 5 Final pareto results

指标	方案							
	1	2	3	4	5	6	7	8
①	0.31	0.45	0.39	0.43	0.40	0.34	0.37	0.49
②	990	891	692	543	722	641	588	735
③	33	44	23	56	27	29	32	20
④	251	246	219	254	187	268	210	305

以不同目标函数为主要目标,兼顾其它目标函数,从Pareto解集中得到相应的满意解:兼顾目标函数(2)(3)(4)最小的前提下,以实施空域拥挤风险管理解决策略后空域内发生拥挤的概率最小为主要目标,得到方案1;兼顾目标函数(1)(3)(4)最小的前提下,以全体航空器的总延误时间最小为主要目标,得到方案4;兼顾目标函数(1)(2)(4)最小的前提下,以每家航空公司所分配的延误时间公平性最大为主要目标,得到方案8;兼顾目标函数(1)(2)(3)最小的前提下,以受解决策略影响航空器额外飞行时间最短为主要目标,得到方案5。从实际运营角度出发,在其他目标降低的基础上,以总延误时间最小为主要目标,选取优化方案4。由于AC05拥挤所涉及航空器数量比较少,所建空域拥挤风险解决模型从实际运行角度出发,将已有模型^[8]中“最小化受策略影响航空器数量的目标”修改为“最小化受策略影响航空器额外飞行时间”,所得方案4与已有模型相比较(见表6)可知:受策略影响航空器数量仅增加5架,而受策略影响额外飞行时间明显下降,从实际运行角度出发,额外飞行时间的下降不仅表明改航航空器数量的下降,同时降低了运行成本,较之已有模型,更符合实际运行需要。

表6 所建模型与已有模型方案结果指标比较
Table 6 Results of different models

指标	模型	
	所建模型	已有模型
① 空域拥挤风险概率	0.43	0.41
② 全体航班的总延误时间/min	543	581
③ 不同空域用户间延误时间分配/min	56	51
④ 受策略影响航空器额外飞行时间/min	254	381
⑤ 受策略影响的航空器数量/个	37	32

4 结论

本文基于航空器实际运行数据和预测数据,建

立了空域拥挤风险预测模型,获得未来一定时间内扇区空域拥挤发生的概率分布及变化规律;对具有高风险拥挤空域,针对延误损失、不同空域用户延误的公平性以及航空器飞行的影响等目标,结合实际运行中的约束要求,通过所建的空域拥挤风险解决模型,基于航班实际运行数据,最终建立适宜的空域拥挤解决策略,实现了运行风险控制与成本控制的整合与平衡。由于空域容量的不确定性是非常复杂的问题,今后还要做更深入的研究工作。此外由于人的作用在空中交通管理中也不容忽视,因此,如何将人为因素的不确定性融入预测模型和解决模型,对人-机-环境在空域拥挤管理中的不确定性问题将进行更深层次的探讨。

参考文献:

- [1] DELAHAYE D, SOFIANE O, PUECHMOREL S. Airspace congestion smoothing by multi-objective genetic algorithm[C]//ACM Symposium on Applied Computing, Santa Fe, New Mexico, USA: the ACM Press, 2005: 907-912.
- [2] BERTSIMAS D, GUGLIELMO L, ODoni A. The air traffic flow management problem: an integer optimization approach[J]. *Integer Programming and Combinatorial Optimization*, 2008(5035): 34-46.
- [3] MEYN L A. Probabilistic methods for air traffic demand forecasting[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Monterey, CA, USA: AIAA, 2002:44-46.
- [4] DAVIDSON G, KROZEL J, GREEN S M, et al. Strategic traffic flow management concept of operations[C]//AIAA Aircraft Tech, Integration and Operation Conference, Chicago, Illinois, USA: AIAA, 2004:101-108.
- [5] ELEFANTE S. A statistical and probabilistic approach for improving efficiency in air traffic flow management[D]. Scotland, UK:University of Glasgow, 2001.
- [6] HOFFMAN R, KROZEL J, DAVIDSON G, et al. Probabilistic scenario-based event planning for traffic flow management [C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hilton Head, South Carolina, USA: AIAA, 2007:58-61.
- [7] DEARMON J, WANKE C, GREENBAUM D. Probabilistic TFM preliminary benefits analysis of an incremental solution approach[M]. McLean, USA: MITRE/CAASD, 2008:198-201.
- [8] SOOD N, MULGUND S, WANKE C, et al. A multi-objective genetic algorithm for solving airspace congestion problems[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Hilton Head, South Carolina, USA: AIAA, 2007:87-94.
- [9] LIU P B, HANSEN M, MUKHERJEE A. Scenario-based air traffic flow management-from theory to practice[J]. *Transportation Research*, 2008(42):685-702.
- [10] TIAN W, HU M. Study of air traffic flow management optimization model and algorithm based on multi-objective programming[C]//ICCMS 2010-2010 International Conference on Computer Modeling and Simulation, San-ya, China:ICCMS, 2010:210-214.

(编辑:陈斌)