

空域拥挤风险管理时间决策模型与方法

田文 胡明华

(南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016)

摘要:针对目前日益严重的空域拥挤现象,缺乏有效的空域拥挤风险管理机制,造成拥挤难以应对等问题,建立了空域拥挤风险预测模型、空域拥挤风险解决模型和风险损失成本模型。采用风险预测模型和解决模型预测可能产生空域拥挤的时段、提出不同时段的实施流量管理策略,基于风险损失成本模型给出了不同时段调整拥挤的运行成本,通过比较运行成本和空域拥挤风险管理决策方法确定出解决空域拥挤的最佳时间点。采用实际运行数据进行验证,结果表明:所建立的空域拥挤预测模型、空域拥挤风险解决模型、风险损失成本模型和空域拥挤风险管理时间决策方法能有效地预测未来空域发生拥挤的时段,迅速找到运行成本最小的调整拥挤的时间点,为空中交通流量动态管理提供了新途径。

关键词:空中交通管理;空中交通流量管理;空域拥挤;风险管理

中图分类号:V355.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)04-0566-06

Time Decision Making Model and Methodology for Airspace Congestion Risk Management

Tian Wen, Hu Minghua

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

Abstract: With more and more seriously airspace congestion, there are still no effective airspace congestion risk management mechanisms, thus causing troubled congestion. Thereby, an airspace congestion prediction model, an airspace congestion alleviation model and a risk losing cost model are established. The airspace congestion prediction model is used to forecast the time intervals in which the congestion occurred. Then, the air traffic flow management (ATFM) strategy corresponding to the different time intervals above is performed through the airspace congestion alleviation model, and the performance costs of such strategies are calculated based on the risk losing cost model. Using the time decision making methodology for air congestion risk management, the performance costs of different time intervals are compared. Consequently, the optimal operating time point of the ATFM strategy can be found. Based on the real operation data, the time decision making model and methodology for air congestion risk management can effectively predict the time of coming airspace congestion, and rapidly find the optimal timing of ATFM strategy, which provides an innovative way for dynamic ATFM.

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

近年来,随着中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。利用空中交通流量管理系统虽然在一定程度上缓解

了拥挤问题,但主要关注的仍是具体的流量调配问题,忽略了实施流量管理措施的时间点,如果流量管理措施采取较早,则可能引起不必要的航班延

误;如果措施采取较晚,则可能会导致成本损失过高的问题。因此,及时把握交通需求和容量的不确定性对空域拥挤风险预测的影响,建立战术、预战术级的空域拥挤风险管理时间决策机制,当预测到空域拥挤时,选择正确的时间点切入流量管理措施,对避免或缓解空域拥挤现象,保证空域高效运行具有重要的现实意义。

传统的空域拥挤管理决策方法是通过统计预测交通流,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发生了空域拥挤,直接采取流量管理措施^[1-3]。这种从确定性角度来研究空域拥挤问题的方法,虽然在理论上可以实现拥挤缓解,但从实际运行角度而言,传统方法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风险管理决策理念和方法:Davidson 等人^[4-5]从随机性的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,缺乏符合实际运行的可行方法和模型;Hoffman 等人^[6]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;DeArmon 等人^[7-8]建立了基于情景树的空域拥挤风险管理决策方法,但没有给出流量管理措施实施时间的构建方法。总之,上述文献并未建立有效的空域拥挤风险管理时间决策模型与方法,既缺乏完整的空域拥挤预测模型,也没有从风险管理的角度对解决空域拥挤所产生的成本损失进行分析,从而无法选择正确的时间点切入流量管理措施,容易造成解决空域拥挤过程中管理效率的下降和效益的损失。

本文建立了空域拥挤风险预测模型、空域拥挤风险解决模型、风险损失成本模型和空域拥挤风险管理时间决策方法。首先利用预测模型预测未来可能产生空域拥挤程度及其时段,然后在不同时段利用空域拥挤风险解决模型对所预测的拥挤实施流量管理措施加以缓解,并基于风险损失成本模型给出不同时段缓解拥挤的运行成本,同时利用空域拥挤风险管理时间决策方法比较运行成本,确定解决空域拥挤的最佳时间点。在缓解空域拥挤的同时,有效地降低了延误损失和对全局交通流的影响,为空中交通流量动态管理提出了新方法。

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,目标机场所空域为目标空域,由若干扇区构成;其他机场所空域为非目标空域,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)。

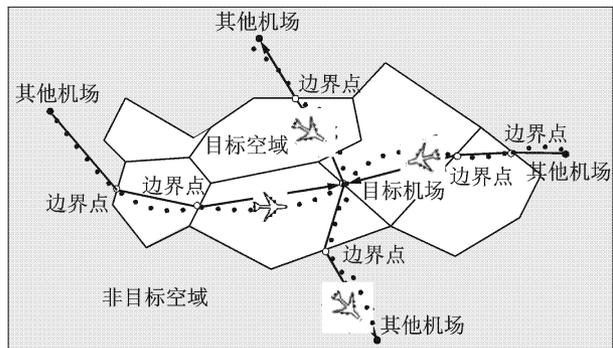


图1 空域网络结构图

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时间具有随机性。如果将未来某时间段内占用此空域的航空器数量视为该空域的交通需求,则这种随机性表现为未来某时间段内某空域交通流量需求服从一定的概率分布;由于容量亦存在不确定性^[6],即未来某时间区间内扇区容量值服从一定概率分布。因此,在容量和流量都存在不确定性的条件下,空域拥挤的发生也存在不确定性。在给定空域交通需求概率阈值 P_{\max}^s 条件下,如果未来某时段交通需求超过空域容量所对应的概率超过 P_{\max}^s ,就认为该空域有发生拥挤的风险,如图2所示。

如上所述可知,由于某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。本文通过对航空器进出扇区的随机性分析,计算空域扇区概率需求,结合不确定性空域容量,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,在预测

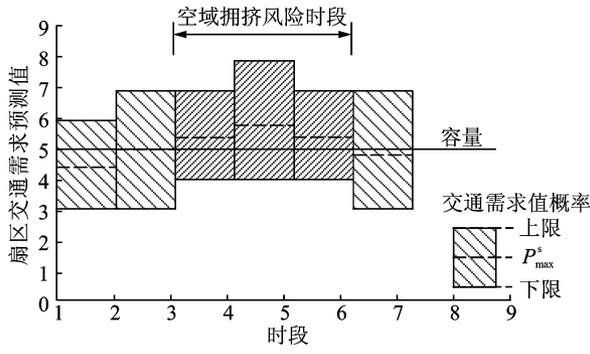


图2 空域拥挤风险发生示意图

时段内实施流量管理加以缓解,并通过风险损失成本模型获得不同时段流量管理的运行成本,结合空域拥挤风险管理方法,比较运行成本,为流量管理措施的实施找到最佳时间点,在缓解空域拥挤的前提下有效地降低了运行成本和对全局交通流影响。

2 决策模型与方法

2.1 空域拥挤风险预测模型

如果在未来空域运行期间,目标空域内的扇区 s 中最多可能有 N 架航空器飞行,设第 i 架航空器 f 在扇区 s 内的概率为 p_i ,则该时间区间内扇区 s 中同时存在 n 架航空器的概率 $P_N^s[n]$ ($0 \leq n \leq N$) 为

$$\begin{aligned} P_0^s[0] &= 1, \quad \text{For } i = 1 \text{ to } N; \\ \{P_i^s[k] &= (1 - p_i) \cdot P_{i-1}^s[k], \\ &\text{For } k = 1 \text{ to } (i - 1); \\ P_i^s[k] &= p_i \cdot P_{i-1}^s[k - 1] + (1 - p_i) \cdot P_{i-1}^s[k]\} \end{aligned} \quad (1)$$

由此可知在空域运行时间内,扇区 s 中存在大于等于 n 架航空器的概率为

$$P_n^s = \sum_{i=n}^N P_N^s[i] \quad (2)$$

根据当前普遍默认的扇区容量确定性概念,将某时间区间内该扇区容量视为恒值且概率为1,则一旦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,且其风险发生概率为

$$P_{\text{congestion}}^s = P_n^s = \sum_{i=n}^N P_N^s[i] \quad (3)$$

但是,随着对容量认知的不断更新,有 Hoffman 等人^[6]提出容量值同样存在不确定性:通过对扇区在运行时间内的各种容量数据进行聚类分析,获得若干容量情景类及其概率,并将概率最大的容量情景类所对应的容量值和概率视为该扇区容量值及其概率。在此引入该理念,认为扇区 s 在空域运行时间内其容量值数量为 N_{capacity}^s ,将其中最大的

概率值 Q_i^s 所对应的扇区容量 c_i^s 视为该扇区的容量值,则风险发生概率修正为

$$P_{\text{congestion}}^{s,i} = Q_i^s \cdot P_{c_i^s}^s = Q_i^s \cdot \sum_{j=c_i^s}^N P_N^s[j] \quad (4)$$

式中 $Q_i^s = \max\{Q_1^s, Q_2^s, \dots, Q_{N_{\text{capacity}}^s}^s\}$ 。

2.2 空域拥挤风险解决模型

如果空域扇区 s 在未来一定时间空域拥挤风险发生概率超过给定阈值,即 $P_{\text{congestion}}^{s,i} > P_{\text{max}}^s$,则认为发生了拥挤,需对该扇区进行流量管理,并给出以下假设:

(1) 航班运行时间区间内各扇区的容量已知,且为最大概率所对应的容量值,这是拥挤得以判断的先决条件;

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

定义 T 为未来连续的空域运行时间,将其划分为 $(M+1)$ 个时段,令 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_M, T_{M+1}\}$,且 t 为 T 内的任意时间, $t \in T_j$; 设目标空域内共有扇区 N_s 个,运行航空器 N_f 架,定义 Dep_f^s , Arr_j^s 和 In_j^s 分别为在 T_j 时段离开、进入空域扇区 s 和在空域扇区 s 内的航空器 f 的集合,且定义

$$\begin{aligned} \text{Dep}_f^s(t) &= \begin{cases} 1 & f \in \text{Dep}_f^s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ \text{Arr}_f^s(t) &= \begin{cases} 1 & f \in \text{Arr}_j^s \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ \text{In}_f^s(t) &= \begin{cases} 1 & f \in \text{In}_j^s (j = 1, \dots, M+1) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \end{aligned}$$

分别表示航空器 f 在 T_j 时段离开、进入空域扇区 s 和在空域扇区 s 内。利用滑动窗原理,以 W 为时间窗的宽度,对目标空域中各扇区内运行的航空器 f 实施流量管理措施,目标函数如下

$$\begin{aligned} f(t) &= \min \sum_{f=1}^{N_f} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{j=1}^M \sum_{t \in T_j, x=t-W}^{x=t+W} \frac{1}{2W+1} \cdot \\ & \left[\max \left\{ \left[\sum_{f \in \text{Arr}_j^s} \text{Arr}_f^s(x) - \sum_{f \in \text{Dep}_j^s} \text{Dep}_f^s(x) + \sum_{f \in \text{In}_j^s} \text{In}_f^s(x) \right] - c_i^s, 0 \right\} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, c_i^s 为 $Q_i^s = \max\{Q_1^s, Q_2^s, \dots, Q_{N_{\text{capacity}}^s}^s\}$ 时扇区 s 的容量值。

同时,根据实际运行规则,规定实施流量管理后航空器在目标空域内的总运行时间 total_f 不得超过原运行时间 e_f 的时间长度为 τ ,即

$$(\text{total}_f - e_f) \leq \tau \quad (6)$$

2.3 风险损失成本模型

为了缓解空域拥挤风险,实施流量管理措施,可能会造成一定的损失,主要元素包括:

(1)直接损失 D ,即实施流量管理后各空域的拥挤程度,有

$$D_s = \sum_{f=1}^{N_f} \sum_{j=1}^M \sum_{t \in T_j, x=t-W}^{x=t+W} \frac{1}{2W+1} \cdot \left[\max \left\{ \left[\left(\sum_{f \in \text{Arr}_j^s} \text{Arr}_f^s(x) - \sum_{f \in \text{Dep}_j^s} \text{Dep}_f^s(x) + \sum_{f \in \text{In}_j^s} \text{In}_f^s(x) \right) - c_i^s \right], 0 \right\} \right] \quad (7)$$

(2)间接损失 I ,即流量管理产生的航空器运行延误成本,有

$$I = \sum_{f=1}^{N_f} \max \{ (\text{total}_f - e_f), 0 \} \quad (8)$$

(3)流量管理实施后各空域拥挤发生的后续概率,有

$$L_s = P_{\text{congestion}}^{s,i} \quad (9)$$

因此,风险损失成本

$$S = \sum_{s=1}^{N_s} [(a \cdot D_s + b \cdot I) \cdot L_s] \quad (10)$$

式中 a 和 b 分别为直接损失和间接损失的权重。

2.4 空域拥挤风险管理时间决策方法

通过空域拥挤风险管理解决措施实施时间的确定以及空域拥挤风险管理解决策略的优化,实现整个空域拥挤风险管理的时间决策过程。利用启发式方法建立空域拥挤风险管理时间决策树,具体步骤如下:

(1)计算目标空域各扇区未来一段时间内拥挤发生的概率 $P_{\text{congestion}}^{s,i}$ 。

(2)给出各扇区拥挤发生概率阈值 P_{max}^s ,与拥挤发生概率 $P_{\text{congestion}}^{s,i}$ 比较。

(3)一旦发现未来某时间该空域的拥挤风险超过给定阈值,就在时间轴上建立状态节点,标明空域拥挤发生的概率 $P_{\text{congestion}}^{s,i}$ 。

(4)对可能发生拥挤风险的空域实施解决措施,并计算其风险损失成本 S 。

(5)计算当前状态节点处空域拥挤解决策略实施后空域拥挤发生的后续概率:如果该后续概率超过给定阈值,则转至步骤(4)进行空域拥挤解决;否则,认为此节点为终节点,确定其风险损失成本 S 。

(6)比较各路径各节点的风险损失成本之和,取最小值。

(7)比较各风险损失成本,取最小值,则该路径所对应的决策点时间为实施流量管理措施的最优

时间点。

3 算例分析

3.1 数据统计

根据广州区域 2009 年 10 月份第 4 周扇区 AC05 内共 3 946 架次的航班运行数据,统计每架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,获得各航班在扇区 AC05 的各边界点延误时间^[9]。统计结果表明,根据边界点的不同,各航班所对应的延误时间服从一定的分布规律:各航班在扇区 AC05 的各边界点处的延误时间的概率密度函数服从正态分布,相应均值和方差见表 1。

表 1 航班进入、离开扇区 AC05 边界点的延误时间参数

进入扇区的 边界点名称	均值/方差/ min min		离开扇区的 边界点名称	均值/方差/ min min	
	BEKOL	20.1		13.3	BIGRO
BIGRO	13.2	11.9	GURIN	13.6	12.1
BOKAT	19.7	14.1	GYA	16.0	12.8
CON	15.6	13.0	IDUMA	17.6	10.7
GYA	15.1	13.5	LMN	12.7	12.6
IDUMA	16.1	13.5	POU	6.9	6.2
NOMAR	20.9	14.4	SAREX	13.8	10.5
P269	13.7	12.4	SHL	22.2	13.1
POU	15.0	8.8	SIERA	21.8	13.2
SAREX	13.5	12.2	TAMOT	21.7	14.6
SHL	19.0	18.7	VIPAP	19.6	17.8
TAMOT	16.9	10.9			
VIBOS	22.1	13.8			
VIPAP	16.6	14.5			

根据表 1,基于空域拥挤风险预测模型的式(2)获得提前 1 h 对扇区 AC05 在高峰运行时间 9:00~11:00 的交通需求值及其概率分布,如表 2 所示。根据实际经验,通常设定该扇区的容量值恒为 8.0 架次/15 min,空域交通需求概率阈值 P_{max}^s 为 50%,则一旦该扇区的容量由于某些因素下降(如表 3 所示,9:30~10:45 期间容量降为 4.0 架次/15 min)。基于空域拥挤风险预测模型的式(4),计算可知 9:30~10:45 扇区拥挤风险超过 P_{max}^s ,则该时段内扇区发生了拥挤,需要实施流量管理。

3.2 实验结果及分析

为了缓解 9:30~10:45 扇区 AC05 的拥挤状况,分别从 9:00 和 9:30 对其后时段内该扇区中的航空器实施以基于风险损失成本模型式(5)为目标的流量管理策略,令 $T_j=15$ min, $W=10$ min,并通过空域拥挤风险管理时间决策方法建立空域拥挤风险管理时间决策树,如图 3 所示。

表2 扇区AC05交通需求及其概率分布

时间	9:00~9:15	9:15~9:30	9:30~9:45	9:45~10:00	10:00~10:15	10:15~10:30	10:30~10:45	10:45~11:00
1.0	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
2.0	0.88	0.90	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99
3.0	0.55	0.64	0.97	0.98	0.96	0.92	0.95	0.98
4.0	0.31	0.34	0.87	0.93	0.85	0.76	0.85	0.93
5.0	0.11	0.13	0.69	0.80	0.66	0.54	0.66	0.81
6.0	0.03	0.04	0.48	0.62	0.43	0.32	0.44	0.61
7.0	0.4×10^{-3}	0.01	0.27	0.40	0.23	0.16	0.24	0.39
8.0	0.5×10^{-5}	0.1×10^{-3}	0.13	0.22	0.10	0.06	0.11	0.21
9.0	0.1×10^{-7}	0.2×10^{-4}	0.05	0.10	0.04	0.02	0.04	0.09

表3 扇区AC05容量变化及空域拥挤风险概率分布

时间	9:00~9:15	9:15~9:30	9:30~9:45	9:45~10:00	10:00~10:15	10:15~10:30	10:30~10:45	10:45~11:00
c_i /架次	8.0	8.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	8.0
Q_i	0.99	0.99	0.80	0.90	0.95	0.80	0.85	0.99
$P_{congestion}$	0.5×10^{-5}	0.1×10^{-3}	0.70	0.84	0.81	0.61	0.72	0.21

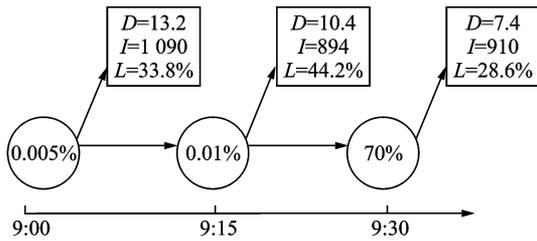


图3 空域拥挤风险管理时间决策树

从图3可知,如果对9:00~11:00的航空器在9:00采取流量管理,取较优策略后空域拥挤程度为13.2,总延误时间为1090 min,空域拥挤发生的后续概率为33.8%;如果对9:15~11:00的航空器在9:15采取流量管理,取较优策略后空域拥挤程度为10.4,总延误时间为894 min,空域拥挤发生的后续概率为44.2%;如果对9:30~11:00的航空器在9:30采取流量管理,取较优策略后空域拥挤程度为7.4,总延误时间为910 min,空域拥挤发生的后续概率为28.6%。

根据风险损失成本模型式(10),调整风险损失成本权重系数,分析总延误时间和空域拥挤指标对风险损失成本的影响:如果 $a=1, b=0.1$,则3种流

表4 扇区AC05确定性交通需求与容量的变化分布

时间	9:00~9:15	9:15~9:30	9:30~9:45	9:45~10:00	10:00~10:15	10:15~10:30	10:30~10:45	10:45~11:00
需求/架次	9.0	7.0	5.0	7.0	4.0	8.0	4.0	10.0
容量/架次	8.0	8.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	8.0

4 结束语

本文根据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,并建立

量管理策略的风险损失成本分别为41.3,44.1和28.1,选择从9:30进行流量管理较优;如果 $a=1, b=0.01$,3种流量管理策略的风险损失成本分别为8.15,8.54和4.72,选择从9:30进行流量管理较优;如果 $a=0.1, b=0.01$,则3种流量管理策略的风险损失成本分别为4.13,4.41和2.81,同样选择从9:30进行流量管理较优。

依照传统的确定性空域拥挤管理方法,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9:00就采取流量管理措施缓解拥挤,但从上述空域拥挤风险分析结果可知,从9:30切入流量管理措施在有效缓解空域拥挤的同时,对运行成本的损失更小,而流量管理措施对全局交通流影响更小。实际运行中,9:00~9:15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;9:30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。

空域拥挤风险解决模型、风险损失成本模型和空域拥挤风险管理时间决策方法,基于空域拥挤所采用的流量管理措施计算其拥挤成本、延误成本和后续空域拥挤概率,对空域运行状况进行风险分析,为流量管理措施的实施选取最佳的调整时间点。如何

实现在流量管理措施切入时间点,分步骤、分阶段合理安排具体流量管理措施,平衡运行风险与运行成本将是今后进一步的研究工作。

参考文献:

- [1] Delahaye D, Odoni A. Airspace congestion smoothing by stochastic optimization [C] // Proceedings of the sixth International Conference on Evolutionary Programming. USA: IEEE, 1997: 163-176.
- [2] Delahaye D, Sofiane O, Puechmorel S. Airspace congestion smoothing by multi-objective genetic algorithm [C] // Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing. Santa Fe: ACM, 2005: 907-912.
- [3] Bertsimas D, Guglielmo L, Odoni A. The air traffic flow management problem: an integer optimization approach [C] // Proceedings of 13th International Conference. Bertinoro: IPCO, 2008: 34-46.
- [4] Davidson G, Krozel J, Green S M, et al. Strategic traffic flow management concept of operations [C] // Proceedings of the AIAA Aircraft Tech, Integration and Operation Conference. Chicago: AIAA, 2004: 1-10.
- [5] Elefante S. A statistical and probabilistic approach for improving efficiency in air traffic flow management [D]. Scotland: Department of Aerospace Engineering, University of Glasgow, 2001.
- [6] Hoffman R, Krozel J, Davidson G, et al. Probabilistic scenario-based event planning for traffic flow management [C] // Proceedings of the AIAA Navigation and Control Conference and Exhibit. Hilton Head: AIAA, 2007: 1-13.
- [7] Liu P B, Hansen M, Mukherjee A. Scenario-based air traffic flow management—from theory to practice [J]. Transportation Research, 2008, Part B(42): 685-702.
- [8] DeArmon J, Wanke C, Greenbaum D. Probabilistic TFM: Preliminary benefits analysis of an incremental solution approach [EB/OL]. 2010-09-20. <http://www.mitre.org/work/tech.papers/tech.papers.08/07.0168/07.0168.pdf>
- [9] 田文,胡明华. 概率空域拥挤管理模型与方法 [J]. 山东大学学报:工学版, 2010, 40(6): 41-47.