

# 证据理论在机场动态容量预测模型中的研究

余 静<sup>1</sup>, 杨红雨<sup>1</sup>, 马博敏<sup>1</sup>, 杜 冬<sup>2</sup>, 邓 兵<sup>1</sup>

(1. 四川大学计算机学院 成都 610064; 2. 中国民航飞行学院民航飞行技术与飞行安全科研基地 四川 广汉 618307)

**【摘要】**针对容量影响因素的不确定性,提出了基于证据理论的机场动态容量预测模型。该模型依据机场最大容量构建识别框架,以专家预测的各种不确定因素的影响程度和发生的可能性为证据,建立基本可信度分配,利用Dempster合成法则融合各种动态因素对机场容量的影响。实验数据分析表明,该模型运算结果合理,可以为空中交通流量管理提供科学的决策支持。

**关键词** 机场跑道; 空中交通管制; 动态容量; 证据理论

**中图分类号** V355.1

**文献标识码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.032

## Study on Application of the Evidence Theory in Airdrome's Dynamic Capacity Prediction Model

YU Jing<sup>1</sup>, YANG Hong-yu<sup>1</sup>, MA Bo-min<sup>1</sup>, DU Dong<sup>2</sup>, and DENG Bing<sup>1</sup>

(1. Computer College, Sichuan University Chengdu 610064;

2. Civil Aviation Technique and Security Research Center, China Civil Aviation Flight University Guanghan Sichuan 618307)

**Abstract** By considering the uncertainty of influence factors, a new dynamic capacity prediction model of airport's runway is proposed based on the Dempster—Shafer theory of evidence. According to the max capacity, this paper analyzes runway's capacity model, designs a recognized frame, takes the probabilities of the influence factors predicted by experts as the basic probability of evidences. At last, the Dempster fusion principles is used to get the probability of the runway's prediction dynamic capacity. Experimental results prove the rationality and feasibility of the proposed mode.

**Key words** airports runways; air traffic control; dynamic capacity; evidence theory

随着我国主要机场的繁忙程度越来越高,机场现有容量已无法满足日益增长的飞行流量需求,机场容量逐渐成为限制空中交通流量的瓶颈。虽然可以通过扩建机场、新修跑道和停机坪等硬件设施来增加容量,但建设周期较长,属于长期的战略建设规划策略。国外研究表明,实施空中交通流量管理(ATFM),以最大限度地利用各种资源,可保障空中交通安全、有序、快速地流动<sup>[1]</sup>。而流量管理的前提和关键是对机场容量的准确评估,评估准确性将直接影响到流量管理实施的效果。

机场容量评估通常以最大容量(又称理论容量)作为研究对象,它是在理想的持续服务请求下,单位时间内所能服务的最大航空器架次<sup>[2]</sup>。理论意义的容量值可以通过理论模型求解和仿真评估得到<sup>[3-4]</sup>,但如果仅仅依靠最大容量来决策流量管理方法而忽略各种不确定因素对容量值的动态影响,将

会与实际情况产生不小的偏差。所以需要在最大容量的基础上结合未来各种可变因素(气象因素、军事活动、人为因素、设备运行状况等等)的影响,预测给定时间段内机场能实际服务的最大航空架次——动态容量,为空中交通流量管理提供实际有效的决策支持。

### 1 机场动态容量的简单计算模型

影响机场容量的动态因素很多,主要有机场天气状况(包括机场上空的云层分布、温度、风速、风向、跑道能见度以及雷雨等)和空域使用情况(包括军用空域的分布及其使用情况,以及危险区、限制区、禁区的分布和激活状态)。

机场天气状况主要来自航空气象情报服务,根据经验值可以将各种气象条件影响机场容量的严重程度分成不同等级,然后为各个影响等级分别分配

收稿日期: 2008-08-14; 修回日期: 2009-05-25

基金项目: 国家863计划(2006AA12A104); 国家自然科学基金民航联合基金(60736046)

作者简介: 余 静(1976-), 男, 博士生, 主要从事信息融合、空中交通流量管理等方面的研究。

对应的影响系数。同样,根据军用飞行计划中的场内和场外飞行训练计划(TPI和TPO)以及炮射计划报STG,可以提取空域活动状况的详细信息,再根据该激活空域内军事活动对机场容量影响的经验值为其指定影响系数。计算动态容量时采用的一种简单模型如下。

在机场最大容量的基础上,通过统计分析各动态影响因素的经验数据确定不同的影响系数,取其最小值(即对容量的影响程度最严重,使得机场容量最小)与最大容量相乘得到动态容量值为:

$$C_{\text{real}}(t) = C_0 \cdot \text{Min}(w_i(t)\rho_i, \phi_j(t)\rho_j)$$

$$0 \leq w_i(t); \phi_j(t) \leq 1; \rho = 0 \text{ or } 1; i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中  $\rho = 0$  表示第  $i$  种天气状况或第  $j$  种军事活动未发生;  $\rho = 1$  表示第  $i$  种天气状况或第  $j$  种军事活动发生;  $w_i(t)$  表示第  $i$  种天气状况发生对容量的影响系数;  $\phi_j(t)$  表示第  $j$  种军事活动发生对容量的影响系数,  $t$  表示该影响系数的有效作用时间;  $C_0$  为最大容量值。当  $w_i(t) = \phi_j(t) = 1$  时,表示影响机场最大容量的因素没有发生,此时  $C_{\text{real}}(t) = C_0$ 。当  $w_i(t) = \phi_j(t) = 0$  时,表明该时段的气象条件已不适合任何飞行或军事活动,导致机场完全封闭,即  $C_{\text{real}}(t) = 0$ 。

这种简单计算模型虽然考虑了各种动态因素的影响,但忽略了多种影响因素的联合作用的影响效果,也没有考虑各种动态因素的不确定性。所以,该模型与机场的实际运行情况还有一定偏差,需要进一步改进。

## 2 基于D-S证据理论的机场动态容量预测模型

### 2.1 模型理论分析

D-S 证据理论 (Dempster—Shafer theory of evidence) 对概率做出了构造性解释,它认为概率是某人在证据的基础上构造出的对某一命题为真的信任程度,称为信度<sup>[5]</sup>。这种解释不但强调了证据的客观性,也强调了证据估计的主观性,满足比概率更弱的公理体系,能够处理由未知引起的不确定性,提供了一个构造不确定性推理模型的一般框架<sup>[6]</sup>。对于具有主观不确定性判断的多属性决策问题和证据冲突问题,证据理论是一个有效的融合手段<sup>[7-10]</sup>。由此,可以利用证据理论融合影响机场最大容量的各种不确定因素的可能性和综合影响程度,求得机场动态容量和该容量值或区间的可信度,为流量管理方法提供决策支持。

证据理论将人们所能认识到的某一判决问题的

所有可能结果的集合定义为识别框架  $\Theta$ , 人们所关心的任一命题都对应于  $\Theta$  的一个子集  $A$ 。如果采用专家咨询的方法向  $n$  个专家提出咨询,则每个专家都可以根据自己的经验、知识和对系统的了解,在框架  $\Theta$  上产生一个对应于  $A$  的基本可信度分配,所以在咨询结束以后,就可以得到  $n$  个基本可信度分配  $m_1, m_2, \dots, m_k$ 。基本可信数  $m$  反映了对  $A$  本身的信度大小,其总信度为 1。然后定义函数  $\text{Bel}$  为  $\Theta$  上的信度函数:

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad \forall A \subset \Theta \quad (2)$$

由证据理论可知在给定几个同一识别框架上基于不同证据的信度函数时,如果证据不是完全冲突的,那么可以利用 Dempster 合成法则计算一个新的信度函数反映证据的联合作用,该信度函数称为原来那几个信度函数的直和<sup>[12]</sup>。利用专家咨询法得到的主观概率估计,体现了一种集体的力量,得到的主观概率合成决策是集体决策的结果。

两个信度函数的 Dempster 合成法则: 设  $\text{Bel}_1$  和  $\text{Bel}_2$  是同一识别框架  $\Theta$  上的两个信度函数,  $m_1$  和  $m_2$  分别是其对应的基本可信度分配, 焦化元分别为  $A_1, A_2, \dots, A_k$  和  $B_1, B_2, \dots, B_l$ 。

设  $\sum_{A_i \cap B_j = \phi} m(A_i)m(B_j) < 1$ ,  $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  是基本可信度分配, 定义函数:

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \phi \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m(A_i)m(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m(A_i)m(B_j)} & A \neq \phi \end{cases} \quad (3)$$

多个信度函数的 Dempster 合成法则: 设  $\text{Bel}_1, \text{Bel}_2, \dots, \text{Bel}_k$  是同一识别框架  $\Theta$  上的信度函数,  $m_1, m_2, \dots, m_k$  是对应的基本可信度分配, 如果  $\text{Bel}_1 \oplus \text{Bel}_2 \oplus \dots \oplus \text{Bel}_k$  存在且基本可信度分配为  $m$ , 则有:

$$\forall A \subset \Theta, A \neq \phi \\ m(A) = K \sum_{\substack{A_1, A_2, \dots, A_k \subset \Theta \\ A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_k = A}} m(A_1)(A_2) \dots m(A_k) \quad (4)$$

其中:

$$K = \left[ \sum_{\substack{A_1, A_2, \dots, A_k \subset \Theta \\ A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_k \neq \phi}} m(A_1)m(A_2) \dots m(A_k) \right]^{-1}$$

### 2.2 模型实现步骤

若已知机场最大容量为  $C$ , 则机场动态容量的可能值为  $c = \{0, 1, 2, \dots, C\}$ , 根据证据理论可得识别框

架为  $\Theta = \{c | 0, 1, 2, \dots, C\}$ 。当容量评估专家对机场动态容量进行预测时, 如果将各种不确定因素对动态容量的影响程度和发生的可能性作为证据, 则命题即为专家根据证据预测的具体的动态容量值或区间 ( $\Theta$  的子集), 再将专家对命题的支持度进行归一化处理作为各命题的基本可信度分配, 并假设各种证据之间是相互独立的, 就可以建立基于证据理论的机场动态容量预测模型, 利用Dempster合成法则求得在不同动态因素影响下的机场动态容量值及其可信度。

设有  $k$  个容量评估专家根据  $n$  批证据对机场动态容量进行评估, 在识别框架  $\Theta$  中可得到  $p$  个两两不同的命题, 则融合各批证据和专家意见对机场动态容量进行预测的具体步骤如下。

步骤 1 第  $i (i = 1, 2, \dots, k)$  个容量评估专家在分析了第  $j (j = 1, 2, \dots, n)$  批证据后, 得到一个属于识别框架的命题集合, 并根据经验和已经得到的证据给出各命题出现的可能性  $M_{ij} (l = 1, 2, \dots, l_i; l_i \leq p; 0 \leq M_{ij} \leq 1)$ , 其中,  $l_i$  是第  $i$  个专家认为最可能发生的命题个数, 每个专家的  $l_i$  可以不相同。将专家预计某一命题发生的可能性定义为该专家对这一命题的支持度。

步骤 2 将支持度  $M_{ij}$  归一化:

$$m_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sum_{l=1}^{l_i} M_{ij}} \quad (5)$$

则可得基本可信度分配:

$$m_{ij} = (m_{ij_1}, m_{ij_2}, \dots, m_{ij_{l_i}}) \quad (6)$$

步骤 3 根据式(2)建立信度函数  $Bel_{ij}$ 。

步骤 4 根据Dempster合成法则融合第  $i$  个容量评估专家对第  $j$  批证据的基本可信度分配, 得到  $m_i$ , 它表示多批证据对同一动态容量的联合支持度, 记为:

$$m_i = m_{i1} \oplus m_{i2} \oplus \dots \oplus m_{ij} \quad (7)$$

步骤 5 根据Dempster合成法则融合  $k$  个容量评估专家的基本可信度分配, 得到  $m$ , 它表示多个专家对同一动态容量的联合信度, 记为:

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_i \quad (8)$$

通过  $m_i$  或  $m$  得到所有证据或专家对各个动态容量评估结果的可信度, 可为进一步的流量管理决策中动态容量值的选取提供量化的参考依据。

### 3 实验数据分析

设某机场最大容量为32 架次/h, 拥有2位容量评估专家和3批证据。

证据 1 未来1 h内某机场附近有军事活动, 对航班进离场程序有限制。

证据 2 未来1 h内某机场有小雨, 能见度为400 m。

证据 3 未来1 h内某机场设备系统维护。

评估过程如下:

(1) 第1位容量评估专家根据数据分析和经验给出命题(容量值范围), 并给出各命题发生的可能性  $M_{l_{j1}}$ , 所有证据和命题表1所示。

表1 专家1给出的证据和命题

| 动态容量/架次 | 支持度 $M_{11}$ | 支持度 $M_{12}$ | 支持度 $M_{13}$ |
|---------|--------------|--------------|--------------|
| 21~22   | 0.65         | 0.75         | 0.65         |
| 23~24   | 0.80         | 0.85         | 0.75         |
| 25~26   | 0.90         | 0.80         | 0.70         |

根据式(4)和(7)将3批证据按照动态容量模型中的步骤经过Dempster合成法则融合以后的结果如表2所示。

表2 专家1的证据融合结果

| 动态容量/架次 | 基本可信度 $m_{11}$ | 基本可信度 $m_{12}$ | 基本可信度 $m_{13}$ | 融合可信度 $m_1$ |
|---------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| 21~22   | 0.276 6        | 0.312 5        | 0.309 5        | 0.238 1     |
| 23~24   | 0.340 4        | 0.354 2        | 0.357 1        | 0.383 2     |
| 25~26   | 0.383 0        | 0.333 3        | 0.333 3        | 0.378 7     |

从表1和表2可看出, 经过Dempster合成法则融合专家1对多批证据的评估结果以后, 容量为“23~24”的可信度分配增加, “21~22”的可信度分配减少, “25~26”的可信度分配在各证据之间。由此可以得出结论: 对可信度较高的证据越来越相信, 对可信度较低的越来越不信任, 对可信度上下摆动的则选择中间值相信, 与实际情况相符。

同理, 第2位容量评估专家给出的证据和命题如表3所示。

表3 专家2给出的证据和命题

| 动态容量/架次 | 支持度 $M_{21}$ | 支持度 $M_{22}$ | 支持度 $M_{23}$ |
|---------|--------------|--------------|--------------|
| 21~22   | 0.65         | 0.55         | 0.50         |
| 23~24   | 0.70         | 0.75         | 0.65         |
| 25~26   | 0.50         | 0.65         | 0.50         |

融合结果如表4所示。

表4 专家2的证据融合结果

| 动态容量/架次 | 基本可信度 $m_{21}$ | 基本可信度 $m_{22}$ | 基本可信度 $m_{23}$ | 融合可信度 $m_2$ |
|---------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| 21~22   | 0.351 4        | 0.297 3        | 0.303 0        | 0.271 9     |
| 23~24   | 0.378 4        | 0.405 4        | 0.393 9        | 0.519 0     |
| 25~26   | 0.270 3        | 0.297 3        | 0.303 0        | 0.209 1     |

从表3和表4可看出,容量“23~24”的可信度分配增加,相反,“21~22”、“25~26”的可信度分配减少。同样满足“信则越来越信,不信则越来越不信”的常理。

(2) 两位容量评估专家利用Dempster合成法则根据式(3)和(8)融合的预测结果如表5所示。

表5 两位专家的证据融合结果

| 动态容量/架次 | 基本可信度 $m_1$ | 基本可信度 $m_2$ | 融合可信度 $m$ |
|---------|-------------|-------------|-----------|
| 21~22   | 0.238 1     | 0.271 9     | 0.188 8   |
| 23~24   | 0.383 2     | 0.519 0     | 0.580 2   |
| 25~26   | 0.378 7     | 0.209 1     | 0.231 0   |

从表5的数据同样可以看出,两位专家都比较支持的命题(“23~24”)可信度变得更高,而两人都把握不大的命题(“21~22”)可信度降低,两人意见偏差较大时采取折衷信度。由此可以得出结论:在未来一小时内,受天气、军事活动、设备等动态因素影响,该机场的动态值最可能为23~24架次/h,其可信度分配为0.580 2。

(3) 为进一步验证模型的合理性,设3位容量预测专家分别对未来10个连续单位时间段的容量进行预测,并给出了基本可信度,则经过融合后的动态容量可信度曲线如图1所示。不难看出,融合后的可信度曲线变化趋势与各位专家预测结果的可信度变化趋势一致,但其变化率更大,也是“信则越来越信,不信则越来越不信”的直接体现。

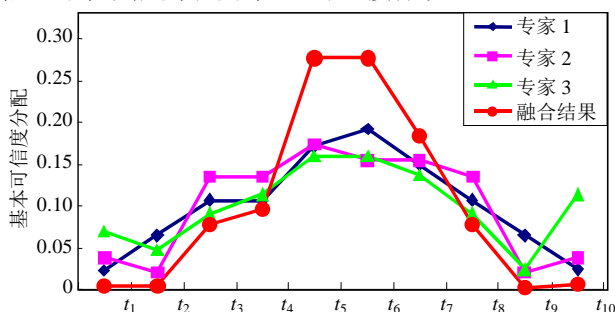


图1 动态容量可信度曲线

## 4 结论

本文在空中交通流量管理领域内提出了基于证据理论的机场动态容量模型。通过试验数据分析表明,利用证据理论融合多种动态因素对机场最大容量的影响,可以更为真实地预测未来某时段的机场动态容量。另外,通过专家咨询法将各种因素的不确定性体现在容量预测结果的可信度上,可以为后继的流量管理提供合理有效的决策支持。实验结果证明该模型的计算结果合理可行,可以很方便地推广到航路动态容量评估和空域动态容量评估模型中,具有不错的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] VRANAS P B, BERTSIMAS D J, ODoni A R. The multi-airport ground-holding problem in air traffic control[J]. *Operations Research*, 1994, 42(2): 1-20.
- [2] 赵焱飞, 金长江, 武哲. 空中交通流量管理系统研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.  
ZHAO Yi-fei, JIN Chang-jiang, WU zhe. A research on air traffic flow management system[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [3] 胡明华, 刘松, 苏兰根. 基于统计分析的单跑道容量估计模型研究[J]. *数据采集与处理*, 2003, 15(1): 74-77.  
HU Ming-hua, LIU Song, SU Lan-gen. Research of airport capacity estimation model based on statistic analysis[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2003, 15(1): 74-77.
- [4] 彭莉娟, 吴鹏, 余静. 机场跑道最大容量评估模型的研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2006, 43(5): 1018-1022.  
PENG Li-juan, WU Kun, YU Jing. The design and research of airport maximal capacity estimation model[J]. *Journal of Sichuan University (Nature science edition)*, 2006, 43(5): 1018-1022.
- [5] DEMPSTER A P. A generalization of bayesian inference[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1968, B(30): 205-247.
- [6] 倪国强, 梁好臣. 基于Dempster-Shafer证据理论的数据融合技术研究[J]. *北京理工大学学报*, 2001, 21(5): 604-609.  
NI Guo-qiang, LIANG Hao-chen. Data fusion technique based on dempster-shafer evidence theory[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(5): 604-609.
- [7] SMETS P. The combination of evidence in the transferable belief model[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(5): 447-458.
- [8] 朱大奇, 刘永安. 故障诊断的信息融合方法[J]. *控制与决策*, 2007, 22(12): 1321-1328.  
ZHU Da-qi, LIU Yong-an. Information fusion method for fault diagnosis[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(12): 1321-1328.
- [9] 郎风华, 谷利泽, 杨义先. 改进的冲突证据组合规则[J]. *北京邮电大学学报*, 2008, 31(3): 84-88.  
LANG Feng-hua, GU Li-ze, YANG Yi-xian. An improved combination rule of conflict evidence[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2008, 31(3): 84-88.
- [10] 关欣, 孙晓明, 何友. 一种冲突证据的融合方法[J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(1): 30-32, 56.  
GUAN Xin, SUN Xiao-ming, HE You. A novel fusion method for conflicting evidences[J]. *Journal of University of Electronic Science Technology of China*, 2007, 36(1): 30-32, 56.
- [11] ZHANG Wei, YU Sheng-lin, ZHANG Gong. An airborne radar clutter tracking algorithm based on multifractal and fuzzy C-mean cluster[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2007, 5(2): 159-162.
- [12] 段新生. 证据理论与决策、人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1993.  
Duan Xin-sheng. Theory of evidence, judgment and artificial intelligence[M]. Beijing: China Renmin University Press, 1993.

编辑 税红