

基于改进的证据理论在机场容量评估中的应用

袁小珂^{1,2}

(1 中国民航飞行学院 计算机学院, 四川 广汉 618307;

2 四川大学 视觉合成图形图像国防重点学科实验室, 四川 成都 610065)

摘 要: 本文针对机场容量评估中的不确定因素影响问题, 在 D-S 证据理论的基础上提出了一种改进的考虑权重和折扣率的信息融合方法, 并将该方法应用到实际的机场动态容量预测过程. 实验结果表明, 该方法进一步降低了评估过程的主观性, 为空中交通流量管理决策提供了更为科学的决策依据.

关键词: 证据理论; 空中交通; 信度; 权重

中图分类号: V355.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)07-0150-04

Application of Airport Capacity Assessment Based on Improved D-S Evidence Theory

YUAN Xiao-ke^{1,2}

(1 Computer School of Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China;

2 State Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision of Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the affection of uncertain factors during airport capacity assessment, this paper puts forward an improved information fusion method which considered weight and discount rate and based on D-S evidence theory. The method is applied to predict the actual dynamic capacity of airport. Experimental result indicates the proposed method further reduced the subjectivity of evaluation process, and provided more scientific decision basis to air traffic flow management decision-making.

Key words: evidence theory; air traffic; belief; weight

1 引言

在目前关于机场容量评估的研究中, 一般采用一定时间间隔内基于理想的持续服务请求所能提供的航空器服务架次的最大值(最大容量)作为研究对象^[1]. 这类评估方法的缺点是没有考虑未来一段时间内多种不确定因素(如军航活动状况、天气状况、设备运行状况、人为因素等)对实际容量的影响; 虽然从数学的角度简化了容量分析问题, 但实际上导致了最大容量的数值一般比实际容量大. 文献[2]充分考虑了上述不确定因素对容量评估的影响, 使得评估得到的容量预测值更接近于实际值, 我们把这类评估方法称为动态容量评估方法. 在上述动态评

估方法当中, 存在的问题是没有把各种不确定因素对实际容量的影响作用进一步量化, 同时各评估专家对实际容量评估的差异也没有得到体现. 为此需对各影响因素的作用进行更科学合理的评价, 并根据评价结果对容量预测值进行实时动态的修正.

2 D-S 证据理论相关知识

在决策论应用中, 如果咨询了 m 个专家, 则决策者将得到 m 个概率分布, 决策者需要将这些概率处理为一个综合的概率分布. 研究表明, 这种概率分布综合问题在概率论框架内是极难处理的. 而 D-S 证据理论正是一类重要的不确定性推理方法. 1967 年 A. P. Dempster 首次提出证据理论的概念, 后来

收稿日期: 2011-11-20; 修回日期: 2011-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(60879022); 中国民航飞行学院青年基金(Q2009-28)

由 G. Shafer 改进推广使之成为了有限离散领域中推理的形式. 作为对贝叶斯概率方法的一种推广, D-S 证据理论已经广泛应用于决策论当中^[3-6].

2.1 D-S 证据理论的基本概念

定义 1 假定 X 为待判决问题; Θ 为问题 X 所有可能答案的集合, 这里仅考虑答案个数有限的情形, 即 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, Θ 中任意两个元素相互独立; 若问题 X 在 Θ 中有且仅有唯一解, 则称 Θ 为 X 的识别框架.

定义 2 基本可信度分配 BPA (Basic Probability Assignment): 对于识别框架 Θ 上的一个集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 若满足:

$$\begin{cases} \sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \\ m(\phi) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

则称 m 为 Θ 上的基本可信度分配; $\forall A \subset \Theta$, $m(A)$ 称为 A 的基本可信数, 反映了对 A 本身的信度大小. 其中, 使得 $m(A) > 0$ 的 A 称为焦元.

定义 3 信度函数 (Belief Function): $\forall A \subset \Theta$, 在识别框架 Θ 上的信度函数定义为

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

定义 4 似然度函数 (Plausibility Function): 在识别框架 Θ 上基于 BPA m 的似然函数定义为:

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \phi} m(B) \quad (3)$$

从定义 3、4 显然可知, $Bel(A) \leq Pl(A)$, 即 $Bel(A)$ 是比 $Pl(A)$ 更保守的估计.

2.2 D-S 证据理论的合成法则

给定同一识别框架 Θ 上基于不同证据的信度函数, 只要证据间不完全冲突, 就可使用 Dempster 合成法则计算出在不同证据联合作用下的信度函数, 该信度函数称为原来各信度函数的直和^[3].

定理 1 两批证据的 Dempster 合成公式: 对于 $\forall A \subset \Theta$, 设 m_1, m_2 分别为 Θ 上的可信度分配, 且焦元分别为 B_i 和 C_j , 则有

$$\begin{aligned} m_1 \oplus m_2(A) &= m_2 \oplus m_1(A) \\ &= \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{B_i \cap C_j = A} m_1(B_i) \cdot m_2(C_j) & A \neq \phi \\ 0 & A = \phi \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

其中, K 为归一化常数:

$$\begin{aligned} K &= \sum_{B_i \cap C_j \neq \phi} m_1(B_i) \cdot m_2(C_j) \\ &= 1 - \sum_{B_i \cap C_j = \phi} m_1(B_i) \cdot m_2(C_j) \quad (5) \end{aligned}$$

定理 2 n 批 ($n > 2$) 证据的 Dempster 合成公

式: 对于 $\forall A \subset \Theta$, 设 $m_1, m_2, \dots, m_n$ 分别为 Θ 上的可信度分配, 且焦元分别为 $A_1, A_2, \dots, A_n$, 则有

$$\begin{aligned} (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) &= \\ \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) & A \neq \phi \\ 0 & A = \phi \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} K &= \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \phi} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) \\ &= 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \phi} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \cdot \dots \cdot m_n(A_n) \quad (7) \end{aligned}$$

分析定理 1 与定理 2 中的 K , K 可以用来表示待融合的证据之间的相互支持程度. 可知: $K=1$ 时, 表示待融合的证据间没有任何冲突, 完全相互支持; 当 $0 < K < 1$ 时, 表示待融合的证据间有一定支持度, 可以相互融合; 当 $K=0$ 时, 表示待融合的证据间没有任何支持, 不能互相融合, 此时不能使用定理 1、定理 2 进行证据合成. Dempster 合成法则满足交换律和结合律, 表明不同的证据相互间不存在先后顺序, 因此在多批证据进行融合时可任意选择融合的次序.

3 改进的机场动态容量预测方法

影响机场容量的因素主要有: 最小间隔规定、进离场飞机比例、机队结构比例、跑道使用策略、进近方式、脱离道的位置、滑行道的布局、登机门/停机位的种类布局、军航活动状况、天气状况、设备运行状况以及各种人为因素等^[7], 其中军航活动状况、天气状况、设备运行状况以及各种人为因素等将对机场容量产生动态的影响. 如果把各因素对机场容量可能产生的动态影响看成是证据, 则机场容量的预测问题即是基于证据的不确定推理问题, 因此可以用 D-S 证据理论进行分析求解.

3.1 权重与折扣率

当考虑各种因素对机场容量的动态影响时, 已有的做法是通过评估专家依据经验根据各种不同影响因素 (即证据) 分别对各种可能的容量取值进行预先估计, 然后通过对各证据条件下的容量估计值进行融合, 从而得到该专家对容量取值的信度预测; 最后将多位不同专家的信度预测进行最终融合, 并得到机场容量取值的最终信度, 这样就根据信度得到机场动态容量的最终预测值. 分析该方法, 不同证据

对容量的影响大小并没有很好的反映在融合过程中;同时不同经验和地位的专家其评估结论对预测容量的影响差异也没有得到体现.因此,本文在容量预测过程中分别引入证据权重和专家权重进行综合预测^[6].

定义 5 设 U 为证据集且 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$; W 为重要程度(权重)集且 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$; u_i 与 ω_i 一一对应;若 $\omega_k = \max\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, 则称 u_k 为关键证据.

各权重系数的设置合理与否将直接决定最终预测结论的准确程度.一般可以通过德尔菲法事先将各种常见影响因素的权重值进行设置,在具体一次容量预测中再根据实际出现的影响因素进行权重值的归一化处理.

定义 6 设 E 为专家集且 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_d\}$; V 为专家权威程度(权重)集且 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_d\}$; E_i 与 v_i 一一对应;若 $v_j = \max\{v_1, v_2, \dots, v_d\}$, 则称 E_j 为权威专家.

对于专家的权威程度,可由决策者根据专家的学术地位 γ_1 、对证据的熟悉程度 γ_2 等综合决定.计算公式为:

$$v_i = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (8)$$

定义 7 设 ξ 为折扣率,表示专家 i 对基于关键证据 u_k 所作评估的自信程度;或者表示决策者对权威专家 E_j 预测结果的相信程度.

3.2 改进的机场动态容量预测方法

将 3.1 节所定义的权重和折扣率引入到机场动态容量的预测过程,得到以下具体的容量预测方法:

步骤 1: 确定容量预测问题的识别框架 Θ . 识别框架的确定使得对问题的研究转化为了对集合的研究.若机场容量的最大值为 C , 则识别框架 $\Theta = \{1, 2, \dots, C\}$.

步骤 2: 基本可信度的确立. 首先建立证据集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 、专家集 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_d\}$; 然后专家 $E_i (i=1, 2, \dots, d)$ 分别根据自己的经验基于证据 $u_j (j=1, 2, \dots, n)$ 给出对各个命题 $q (q=1, 2, \dots, p)$ 出现可能性的基本支持程度 M_{ijq} , 再将 M_{ijq} 按下式归一化为 m_{ijq} .

$$m_{ijq} = \frac{M_{ijq}}{\sum_{q=1}^p M_{ijq}} \quad (9)$$

这样可以得到关于各专家 E_i 的基本可信度矩阵 R_{E_i} :

$$R_{E_i} = \begin{bmatrix} m_{i11} & m_{i12} & \dots & m_{i1p} \\ m_{i21} & m_{i22} & \dots & m_{i2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{in1} & m_{in2} & \dots & m_{inp} \end{bmatrix} \quad (10)$$

步骤 3: 将基本可信度转换为基于证据权重 W 和证据折扣率 ξ_1 的可信度分配. 先建立证据权重集 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, 并根据 $\omega_k = \max\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, 从步骤 2 所建立的证据集 U 中寻找关键证据 u_k ; 然后由专家 E_i 确定自己根据关键证据 u_k 给出的各个命题基本支持度 M_{ij} 的自信程度(即证据折扣率 ξ_{1i}). 最后由关键证据 u_k 的权重 ω_k 以及证据折扣率 ξ_1 就可以计算出转换后的可信度分配:

$$m'_{ijq} = \frac{\xi_{1i} \omega_k}{\omega_k} \cdot m_{ijq} \quad (x=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

这样可以得到关于各专家 E_i 的可信度转换矩阵 R'_{E_i} :

$$R'_{E_i} = \begin{bmatrix} m'_{i11} & m'_{i12} & \dots & m'_{i1p} \\ m'_{i21} & m'_{i22} & \dots & m'_{i2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m'_{in1} & m'_{in2} & \dots & m'_{inp} \end{bmatrix} \quad (12)$$

步骤 4: 按照 Dempster 合成公式将可信度转换矩阵 R'_{E_i} 合成, 融合后的结果为专家 E_i 基于不同批次证据的融合可信度 m_{E_i} . 融合公式为:

$$m_{E_i} = m'_{i1} \oplus m'_{i2} \oplus \dots \oplus m'_{in} \quad (13)$$

步骤 5: 将各专家的融合可信度转换为基于专家权重 V 和专家折扣率 ξ_2 的可信度分配. 先建立专家权重集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_d\}$; 并根据 $v_j = \max\{v_1, v_2, \dots, v_d\}$, 从步骤 2 所建立的专家集 E 中寻找权威专家 E_j ; 然后由决策者确定对权威专家 E_j 评估的相信程度(即专家折扣率 ξ_2). 最后由权威专家权重 v_j 以及专家折扣率 ξ_2 计算出转换后的可信度:

$$m'_{E_i} = \frac{\xi_2 v_j}{v_j} \cdot m_{E_i} \quad (y=1, 2, \dots, d) \quad (14)$$

步骤 6: 将步骤 5 中转化后的多个专家融合可信度进一步按照 Dempster 合成公式进行组合, 融合后的结果即为机场动态容量在多批证据条件下基于多位专家评估结论的联合可信度分配:

$$m_{\text{conclusion}} = m'_{E_1} \oplus m'_{E_2} \oplus \dots \oplus m'_{E_d} \quad (15)$$

步骤 7: 将步骤 6 中最大可信度分配值所对应的容量(或者容量区间)作为最终的机场动态容量预测结果.

4 应用算例

下面运用机场动态容量预测方法对某机场进行

相应的预测. 假设某待评估机场的最大容量 $C=36$ 架次/小时, 则识别框架 $\Theta=\{0,1,2,\dots,36\}$; 建立证据集 $U=\{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ 、专家集 $E=\{E_1, E_2, E_3, E_4\}$; 综合专家意见得到 4 个识别框架 Θ 上的命题 $\{\{25\sim 26\}, \{27\sim 28\}, \{29\sim 30\}, \{31\sim 32\}\}$; 建立证据权重集 $W=\{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4\}=\{0.35, 0.25, 0.2, 0.2\}$.

由实验结果可以看出, 融合后的可信度分配最大值为 0.4481, 所对应的容量区间为 27~28 架次/小时, 即为利用本文方法得到的机场动态容量预测值. 对比融合后的可信度分配数值与融合前的对应数据, 可以看到经过融合后的可信度满足信息融合的基本结论, 即: 原来支持度高的命题经融合后可信度进一步提高, 原来支持度低的命题合成后可信度进一步降低.

基于同样的初始数据, 使用文献[2]中给出的未考虑权重和折扣率的合成方法进行数据融合. 结果表明本文方法与文献[2]方法结论是一致的, 但本文方法进一步降低了预测过程的主观性, 因此更为合理.

5 结束语

文中提出了一种基于改进的 D-S 证据理论进行多批次证据融合和多专家评价融合的方法, 并将该方法实际应用到某机场动态容量的预测过程. 研究表明, 该方法在实际预测过程中, 能够更好的将不同证据的影响大小以及各位评估专家的评价作用差异反映到评价结论中, 降低了评估过程的主观

性, 使得到的预测结果更科学合理. 在该方法的分析和应用过程中, 并没有考虑到不同证据之间的冲突问题以及由此导致的不可融合性^[8], 在进一步的工作中将对其进行研究, 使文中提出的方法得以修正和完善.

参考文献:

- [1] 胡明华. 空中交通流量管理理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 余静, 杨红雨, 马博敏, 等. 证据理论在机场动态容量预测模型中的研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(1): 141-144.
- [3] 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.
- [4] 陆三兰, 程铭东. 基于 D-S 证据理论的组合数据融合算法[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(1): 95-98.
- [5] 李阳, 王朝荣, 郭威武. 粗糙集在数据融合系统灰色评估中的应用[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(7): 106-113.
- [6] 杨春, 李怀祖. 一个证据推理模型及其在专家意见综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001(4): 43-48.
- [7] 田勇. 空中交通流量管理关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [8] 陈炜军, 景占荣, 袁芳菲, 等. D-S 证据理论的不足及其数学修正[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(2): 161-168.

作者简介:

袁小珂 男, (1976—), 博士研究生, 讲师. 研究方向为信息安全、信息融合、空中交通流量管理.