

## 基于模糊评价和未确知数的空管安全风险评估

袁乐平, 孙瑞山, 成 媛

(中国民航大学 民航安全科学研究所, 天津 300300)

摘 要: 结合空管运行的实际情况建立了危险严重程度评价的指标体系, 并利用模糊评价的相关理论, 进行危险发生严重程度的评估。在专家问卷的基础上利用未确知数学理论对危险发生的概率进行估算。最后给出了应用实例。

关键词: 风险; 安全风险评估; 模糊评价; 未确知数学; 空管

中图分类号: V328.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-5000(2006)04-0055-03

## Fuzzy Evaluation and Unascertained Mathematics Based Safety Risk Assessment in ATM System

YUAN Le-ping, SUN Rui-shan, Cheng Yuan

(Research Institute of Civil Aviation Safety, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Hazard severity evaluation index with full consideration of operation characteristics of ATM system is established in this paper. The author assesses the severity of identified hazard by using the fuzzy comprehensive evaluation theory. Unascertained mathematics is adopted to calculate the probability of risk based on the survey. Application example of this model is also provided in this paper.

Key words: risk; safety risk assessment; fuzzy evaluation; unascertained mathematics; ATM

当前, 人为因素已成为航空事故的主要诱因, 只有在传统规范化管理的基础上, 综合考虑人、机、环境, 建立系统的安全管理体系, 才能进一步提高航空安全水平。因此, 西方航空发达国家近些年来力推“系统安全”的概念, 作为充分体现这一思想的安全管理体系(safety management system, SMS), 通过持续开展安全风险评估、安全审计、安全信息管理等活动, 保证系统的安全状况得到有效的监控, 安全水平持续得到提高。安全风险评估是 SMS 的核心部分, 其目的在于建立发现系统隐患, 降低风险机制, 推动安全决策的科学化。

安全、危险和风险是一系列联系紧密的概念, 安全可以表述为一种系统无危险的状态。危险是可能产生潜在损失的征兆, 在一定的条件下危险能够激发造成事故。风险是危险的表征, 风险从危险发生的概率和后果严重程度来综合考虑, 可以定义为: 用危险的可能性(危险发生的概率)和危险的严重性表示在未来某一确定条件下发生事故的可能程度。有的学者直接把风险定义为危险发生的频率和后果严重性的乘积。所谓安全风

险评估就是应用安全系统原理和方法, 对系统中存在危险进行辨识, 分析危险发生的可能性和严重程度, 为制定防范措施和管理决策提供科学依据的过程<sup>[1]</sup>。

安全风险评估通常按以下几个步骤进行: 危险识别; 风险分析; 寻找风险控制的方法; 风险控制措施的费用效益分析; 提出降低风险措施的具体整改方案<sup>[2]</sup>。

风险分析是安全风险评估的重要环节, 它需要估计已识别危险发生后后果的严重程度和可能性大小。传统方法在处理这个问题时, 常常过多地依靠经验, 带有很大的主观性。本文分别用模糊评价和未确知数学理论来解决安全风险评估中风险发生后后果严重性和发生可能性的不确定性问题, 给出了一种定量与定性相结合的方法。

### 1 评价危险严重程度

#### 1.1 模糊评价

模糊评价是一种对不能准确定义的事件进行评价

的方法, 它将某种定性描述和人的主观判断用量级形式表达, 通过模糊运算, 用隶属度的方式确定其等级。该方法可在一定程度上检查和减少人的主观影响, 使评价更科学合理。

对于模糊评价, 需要建立: 评价因素集  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ; 评价集  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ; 从  $U$  到  $F(V)$  的模糊映射:  $U \rightarrow F(V)$ , 再由  $F(V)$  导出模糊矩阵  $R$ ; 确定各因素的权重并选择合适的综合函数进行综合, 做出评判<sup>[3]</sup>。

## 1.2 评价指标的建立

对一个事物进行客观评价, 首先要考虑影响其表现的因素, 也就是要建立评价指标体系。在文献[4]的基础上, 结合空管系统运行的实际情况, 在危险发生后果

的严重程度方面, 主要考虑: 影响程度, 持续时间, 察觉难易程度, 恢复情况。

影响程度主要考虑危险一旦发生对管制员工作负荷的影响和波及的范围; 持续时间也是一个考察项目, 危险持续的时间越长, 造成的后果也越严重; 同样, 危险不同, 其察觉难易程度和恢复情况也都不一样。因此, 取

因素集  $U=\{u_1, u_2, u_3, u_4\}=\{$

影响程度, 持续时间, 察觉难易程度, 恢复情况 $\}$

评价集  $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}=\{$

其中: 为最严重; 为危险严重程度最轻。不同因素对应的各个级别的含义如表 1 所示。

表 1 危险发生后果严重程度划分表  
Tab.1 Classification of severity of hazard consequences

因素集	评价集				
影响程度	影响到所有扇区, 工作负荷很大, 不能继续执行任务, 丧失安全余度	涉及范围大, 工作负荷加大, 对工作影响大, 安全余度很小	涉及较大范围, 带来较大工作负荷, 工作受到影响, 安全余度减小	在有限范围内, 对工作有影响, 对安全产生不利影响	小的波动, 仅在很小范围内, 对工作影响甚微
持续时间	危险在管制区内长期存在	危险在区域内持续很长一段时间, 对多架航空器有影响	危险在交通密度较低的情况下持续一段时间	持续时间短暂, 仅对单个航空器有影响	持续时间短暂, 对安全无影响
察觉难易程度	危险不容易发现, 出现很突然	发现危险较困难, 出现突然	发现危险需要时间	危险易于辨识	危险很容易发现
恢复情况	无法恢复	恢复困难	不容易恢复	容易恢复	可以自动恢复

## 1.3 权重的确定

以上 4 个因素, 或者说 4 个指标对总严重程度的影响是不一样的, 需要相互之间分出孰轻孰重, 从数值上反映就是给出权重。权重的确定有很多种方法, 如频数统计法、层次分析法、环比构权法等, 本文采用直接定权法确定权重。向中国民航大学空中交通管理学院、中国民航空中交通管理研究基地以及多个管制单位的专家发出专家问卷调查表, 请每位专家直接给出每个元素的权重。然后对一个因素的多个权值取算术平均。表 2 列出了专家给出的权值以及最后确定的权值。

表 2 权重专家问卷结果  
Tab.2 Result of weighted expert questionnaire

序号	影响程度	持续时间	察觉难易程度	恢复情况
1	0.25	0.15	0.45	0.15
2	0.55	0.20	0.15	0.10
3	0.50	0.20	0.15	0.15
4	0.60	0.30	0.10	0.05
5	0.65	0.15	0.10	0.10
6	0.40	0.20	0.30	0.10
7	0.30	0.20	0.30	0.20
8	0.40	0.30	0.20	0.10
平均值	0.45	0.21	0.22	0.12

## 1.4 评价过程

评估专家就以上 4 个要素进行评价, 采用等级比重法得到模糊矩阵

$$R = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & \dots & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & \dots & r_{45} \end{pmatrix}$$

式中:  $r_{ij}$  是因素  $u_i$  相对于  $v_j$  的隶属度。取权重向量

$$A=\{a_1, a_2, a_3, a_4\}=\{0.45, 0.21, 0.22, 0.12\}$$

$B=A \cdot R$  就是对危险发生严重度的评价。这里  $B=A \cdot R$  是一种模糊关系的合成, 也称为模糊变换。

模糊矩阵的合成运算按性质通常可以分为“主因素突出型”和“加权平均型”, 这两类典型的代表分别为逻辑加和逻辑乘(或称“取大取小”算子)、常规矩阵运算(即普通的加与乘)。鉴于前者的种种缺陷<sup>[9]</sup>, 本文采用“加权平均型”作为评价函数。得到评价向量  $B$  后, 用最大隶属度原则来反模糊化, 完成对危险严重程度的评价。

## 2 评估危险发生概率

对于硬件设备的失效概率可以通过 FTA、PRA 等方法计算得到, 但是对于空管日常运行中人的差错、系统失效概率就很难确定具体数值, 利用未确知数学理

论可以较好地解决这一问题。

首先发放问卷, 收集评估专家对于某一识别危险发生概率区间的划分和他对此区间的把握(总可信度), 以及总可信度在区间各个取值点上的分布等信息。各位专家给出的未确知有理数分别记为  $l_1, l_2, \dots, l_r, \dots, l_n$ , 设  $l_r (r=1, 2, \dots, n)$  取值区间、总可信度、可信度分布密度函数分别为  $[a, b]$ 、 $r$  和  $r(x)$ , 则

$$r(x) = \begin{cases} r_i & x = x_i \quad i=1, 2, \dots, k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad 0 < \sum_{i=1}^k r_i = 1$$

并且

$$a = x_1 < x_2 < \dots < x_k = b,$$

令

$$l = (l_1 + l_2 + \dots + l_n) / n$$

按带边和的计算法则计算出  $l$  的可能值矩阵和可信度矩阵<sup>[6]</sup>。  $l$  给出了风险概率可能的区间及其相应的可信度, 最后求  $l$  的期望  $E(l)$ , 可以进一步得到一个具体数值。

### 3 应用实例

管制运行过程中, 雷达标牌相关错误可以认为是对于飞行安全有较大影响的一个危险。以 Z 管制区为例, 请 5 位经验丰富的管制人员填写问卷, 归纳结果如表 3 所示。

表 3 专家问卷结果统计表

Tab.3 Statistics of result of expert questionnaire

专家	严重性指标	评语等级	可能值 /次·y <sup>-1</sup>	可信度 /%	专家	严重性指标	评语等级	可能值 /次·y <sup>-1</sup>	可信度 /%
A	$u_1$		5	10	C	$u_1$		10	15
	$u_2$		6	10		$u_2$		11	15
			7	20				12	15
	$u_3$		8	20		$u_3$		13	15
			9	10				14	15
B	$u_4$		10	10	D	$u_4$		15	15
	$u_1$		—	—		$u_1$		10	10
			8	20		$u_2$		11	30
	$u_2$		9	20		$u_3$		12	30
			10	20		$u_4$		13	10
	$u_3$		11	20	E	$u_1$		15	30
			12	20		$u_2$		16	30
	$u_4$		—	—		$u_3$		17	20
			—	—		$u_4$		18	20
			—	—					

由表 3 得到模糊矩阵

$$R = \begin{pmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.6 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \end{pmatrix}$$

采用加权算术平均合成, 得到评价向量

$$B = (0.044, 0.090, 0.332, 0.390, 0.044)$$

按照最大隶属度原则, 其后果严重度属于 级。

同样, 根据表 3 分别得到未确知数 A、B、C、D、E, 做和的运算后得到  $V = [(9.6, 13.6), g(x)] = (0.000\ 09, x = 9.6; 0.000\ 63, x = 9.8; 0.002\ 35, x = 10; 0.006\ 13, x = 10.2; 0.012\ 93, x = 10.4; 0.023\ 22, x = 10.6; 0.036\ 33, x = 10.8; 0.050\ 49, x = 11; 0.063\ 06, x = 11.2; 0.071\ 28, x = 11.4; 0.073\ 2, x = 11.6; 0.068\ 37, x = 11.8; 0.057\ 99, x = 12; 0.044\ 46, x = 12.2; 0.030\ 3, x = 12.4; 0.018\ 09, x = 12.6; 0.009\ 42, x = 12.8; 0.004\ 05, x = 13; 0.001\ 41, x = 13.2; 0.000\ 42, x = 13.4; 0.000\ 06, x = 13.6; 0.425\ 72, x \text{ 为其他})$ 。

求  $V$  的期望, 得

$$E(V) = \begin{cases} 0.574 & x = 11.56 \\ 0.426 & x \text{ 为其他} \end{cases}$$

该一阶未确知数表示: 雷达相关错误一年发生的次数为 11.56 次, 对这个结果的把握是 57.4%。

### 4 结语

风险评估、风险管理在核工业、航天、航海及项目管理等领域已经得到广泛的应用, 作为同样是高风险行业的民航, 风险评估、风险管理的经验很值得学习借鉴。本文应用模糊评价和未确知数学理论初步讨论了在空管系统中进行风险评估的模型, 使风险评估技术更为实用、有效。空管系统的运行有其特点, 应结合实际努力探索更为合理与科学的方法, 使得本文提出的模型更加完善。随着探索的不断深入, 风险理论在民航将有更为广泛的应用。

参考文献:

- [1] 罗云, 樊运晓, 马晓春. 风险分析与安全评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 向阳, 朱永峨, 陈国权, 等. 风险分析与安全评估[J]. 中国船检, 1999(1): 34—35.
- [3] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [4] Eurocontrol. Air Navigation System Safety Assessment Methodology[Z]. Brussels: Eurocontrol, 2004.
- [5] 苏为华. 多指标评价理论与方法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.
- [6] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 盲数的概念、运算与性质[J]. 运筹与管理, 1998, 7(3): 14—17.

(责任编辑: 王纪宽)