

文章编号: 1674-8190(2021)01-030-09

基于组合赋权的空管系统安全风险物元评价

唐家文, 董兵

(中国民用航空飞行学院 空中交通管理学院, 广汉 618307)

摘要: 空管系统的安全风险状况对航空运输安全运营有直接的影响。综合考虑空管系统安全运行管理的特点, 构建空管系统安全风险的评价指标体系; 应用欧几里得距离函数对空管系统安全风险评价指标进行组合赋权, 确定空管系统安全风险评价指标的组合权重; 引入物元分析方法建立空管系统安全风险评价物元模型, 并进行实例验证。结果表明: 物元分析方法能够评估空管系统整体的安全风险状况, 得到了各个评价指标的安全风险状况, 有助于采取针对性的有效措施提高空管部门的安全风险管理水平。

关键词: 空管系统; 安全风险评价; 物元模型; 组合赋权; 欧几里得距离函数

中图分类号: V355.1; X92

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Safety Risk Evaluation of Air Traffic Management System Based on Combination Weights Method and Matter Element Model

TANG Jiawen, DONG Bing

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: The safety risk situation of the air traffic management system directly affects the safe operation of air transportation. Comprehensively considering the safety operation characteristics of air traffic management system, the evaluation index system of safety risk is constructed. The combination weights of the air traffic control system evaluation index are determined by means of the Euclidean distance function. The matter-element analysis method is introduced to establish the matter-element model, and verified with instances. The results show that the matter-element analysis method can obtain the overall safety risk status of the air traffic management system, and obtain the safety risk status of each evaluation index, which is helpful to take effective measures to improve the safety risk management level of the air traffic management department.

Key words: air traffic management system; safety risk evaluation; matter-element model; combination weight; Euclidean distance function

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(U1233105); 中国民航飞行学院科研基金(J2018-22, Q2015-074)

通信作者: 唐家文, tangjiawencafuc@163.com

引用格式: 唐家文, 董兵. 基于组合赋权的空管系统安全风险物元评价[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 30-38.

TANG Jiawen, DONG Bing. Safety risk evaluation of air traffic management system based on combination weights method and matter element model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 30-38. (in Chinese)

0 引言

安全运营一直都是民航运输业发展追求的目标,也是全社会关注的焦点。空管系统在航空运输安全运营中起着非常特殊的作用,航空运输安全事故的发生直接或间接地与空中交通管理存在一定关系,特别是随着航班增多导致空中拥挤,空中交通管理面临的安全风险压力越来越大,有必要对空管系统开展安全风险科学评价,保证航空运输系统的安全、正常、高效。

针对空管系统安全风险问题,国外,S. Ternov等^[1]建立了基于事故的空管安全风险程序模型,运用扰乱作用障碍分析法对空中交通管理运行风险进行了研究;S. Huan-Jyh^[2]首次采用比例风险模型对航空事故和安全指标进行了分析,得出人为失误是造成安全风险事故的主要原因;L. Flavior等^[3]通过随机 Perti 网对空管系统安全进行了评价。但是障碍分析法是一种定性分析方法,不能对空管安全风险进行量化研究;比例风险模型在使用时各危险因素的作用不能随时间而变化,不能反映安全变化趋势;Perti 网所具有的精确性不能反映空管安全风险所存在的模糊性。国内,丁松滨等^[4]采用了层次分析法建立了空中交通管理安全预警指标体系;杜红兵等^[5]采用模糊综合评价法对空管系统安全风险进行了评价;文兴忠^[6]建立了空管安全风险评价的灰色多层次模型;袁丁等^[7]应用证据合成理论对空管安全开展了评价;赵焱飞等^[8]引入集对论对空中交通管制运行风险进行了分析;Chang Y H^[9]应用数理统计方法对台湾地区的空管安全状况进行了研究。但是层次分析法受限于评价对象不能太多,否则计算量过大,且对评价目标经验数据要求较高;模糊综合评价法容易受到评价者主观性的影响,造成评价精度较低;灰色理论中白化函数的确定缺乏可信的理论依据;数理统计方法高度依赖于事故发生样本,需要与空管系统安

全风险样本之间保持一致性,限制了数理统计方法在该领域的应用;证据合成理论由于缺乏理论基础使得其合理性与有效性存在较大的争议,在计算方面存在指数爆发的可能性;集对论还未形成较为完整的理论体系,特别是差异度系数限定在 $[-1, 1]$ 之间不仅简单粗糙,而且不能对客观事物或系统的演化规律进行充分展示,在评价中存在不相容的问题,容易遗漏所需的评价信息。物元理论是研究不相容问题的常用方法^[10],具有计算量相对较小,计算比较简单,对于复杂的多指标问题,易于用计算机进行编程处理,能够把事物的质和量很好地结合等优点,近年来逐渐受到重视并得到了广泛的应用^[11-14]。

本文根据空管系统安全运行的实际,构建空管系统安全风险评价指标体系,引入欧几里得距离函数确定评价指标的组合权重,采用物元分析方法,建立空管系统安全风险评价物元模型,并进行实例验证。

1 空管系统安全风险评价指标体系

1.1 安全风险评价指标体系构建

对空管系统进行安全风险评价的先决条件是构建科学合理的评价指标。遵循系统性、科学性、全面性、可比性和可行性等评价指标构建原则^[15],结合中国民航局已经实施使用的《空管安全审计》和《空中交通服务安全评估系统》等管制规定^[16-17],综合考虑空管系统安全风险的产生会受到人为因素(空中交通管制员)、设备因素(管制设施设备)、环境因素(空管系统的工作环境)以及管理因素(空管系统安全管理以及制度建设)等因素的影响,构建基于“人、机、环境与管理”等因素的空管系统安全风险评价指标体系(如表 1 所示),该评价指标是由 4 个一级指标和 22 个二级评价因子组成的递阶层次结构。

表 1 空中交通管理系统安全风险评价指标体系

Table 1 Assessment index system of safety risk in air traffic management system

一级评价指标	权重	二级评价因子	权重	很安全 I	安全 II	较安全 III	不安全 IV	很不安全 V	实得分
人为因素 指标 C_1	0.383 2	管制敬业精神 C_{11}	0.259 7	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	88
		身心健康状况 C_{12}	0.159 5	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	81
		班组资源管理能力 C_{13}	0.062 5	[85,100)	[75,85)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	78
		预测和统筹能力 C_{14}	0.093 0	[90,100)	[75,90)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	80
		管制专业知识技能 C_{15}	0.129 6	[85,100)	[75,85)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	85
		安全责任意识 C_{16}	0.208 8	[85,100)	[75,85)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	84
		决策应变能力 C_{17}	0.086 9	[90,100)	[75,90)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	86
设备因素 指标 C_2	0.278 2	管制设施设备建设 C_{21}	0.446 7	[90,100)	[75,90)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	77
		设施设备完好程度 C_{22}	0.271 5	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	83
		设施设备运行管理能力 C_{23}	0.142 4	[85,100)	[75,85)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	75
		设施设备维护保养能力 C_{24}	0.139 4	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	75
环境因素 指标 C_3	0.138 7	管制空域环境状况 C_{31}	0.287 2	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	85
		管制区地理环境复杂度 C_{32}	0.174 7	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	84
		气象环境复杂度状况 C_{33}	0.136 9	[90,100)	[70,90)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	79
		管制指挥流量大小 C_{34}	0.101 5	[90,100)	[75,90)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	81
		管制通信导航环境 C_{35}	0.229 7	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	83
		管制电磁干扰环境 C_{36}	0.069 9	[85,100)	[75,85)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	82
管理因素 指标 C_4	0.199 9	安全文化管理建设 C_{41}	0.327 2	[90,100)	[75,90)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	72
		组织机构设置合理性 C_{42}	0.140 0	[85,100)	[70,85)	[60,70)	[45,60)	[0,45)	75
		管制培训管理制度化 C_{43}	0.249 2	[90,100)	[75,90)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	72
		管理制度建设执行力 C_{44}	0.183 0	[85,100)	[75,85)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	77
		信息沟通有效性 C_{45}	0.100 6	[90,100)	[75,90)	[60,75)	[45,60)	[0,45)	83

1.2 评价指标权重的组合赋权法

在评价空管系统的安全风险时,评价指标权重的确定将直接影响评价结果的准确性。权重计算方法主要有主观赋权法和客观赋权法。常用的主观赋权法为层次分析法,也是目前研究空管系统安全风险时确定权重的主要方法^[4,6-8,18]。尽管层次分析法存在受限于评价对象的数目会产生计算量过大的问题,但是由于空管系统安全风险的评价指标数目都在合理的范围内,加之层次分析法具有将定性问题转化为定量研究,以及原理简单易理解的特点,因此选择层次分析法作为确定空管系统安全风险评价指标的主观权重。

考虑评价者的主观意愿会对层次分析法结果产生影响,使得评价指标权重的主观性太强,引入客观赋权方法有序加权平均(OWA)算子^[19-22],与主观赋权方法层次分析法相结合。通过组合赋权的方法确定空管系统安全风险评价指标权重,组合赋权既能够有效弥补层次分析法存在的缺陷,又能够考虑到 OWA 算子可能会因过于依赖指标数据而出现的偏差,能相对客观准确地反映评价指标之

间的权重关系。

采用组合赋权方法确定评价指标权重时,通过线性加权组合方法确定评价指标的权重,有:

$$\begin{cases} w_i = \alpha x_i + \beta y_i \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_i 为层次分析法确定的评价指标的主观权重值; y_i 为 OWA 算子确定的评价指标的客观权重值; α 、 β 分别为评价指标的主、客观权重的偏好系数。

应用线性加权组合法最关键的步骤是确定主、客观权重的偏好系数 α 、 β 。在目前研究中,偏好系数的取值通常由评价者的经验来决定,具有一定的主观性和随意性,既不客观也不合理,给评价结果带来不利影响。为了尽可能地缩小由于主观随意性对组合权重值的影响,本文引入欧几里得距离函数^[23-24],使得主、客观权重之间和偏好系数间的差异程度保持一致性,避免某一种赋权方法在组合赋权中出现影响显著的问题。

采用欧几里得距离函数 $d(x_i, y_i)$ 确定评价指标的主、客观权重的偏好系数 α 、 β ,为此欧几里得

距离函数 $d(x_i, y_i)$ 与偏好系数 α, β 之间具有如式 (2) 所示的关系:

$$\begin{cases} d(x_i, y_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \\ d(x_i, y_i)^2 = (\alpha - \beta)^2 \end{cases} \quad (2)$$

根据公式 (2), 可以得到层次分析法和 OWA 算子的偏好系数 α, β , 进而得到空管系统安全风险评价指标的组合权重值。

2 空管系统安全风险评价物元模型

2.1 物元的基本概念

假设 N 表示事物, 事物 N 关于特征 C 的特征量值为 X , $R = (N, C, X)$ 是用于表示事物 N 的有序基本三元组, 被称为物元^[10-14]。当事物 N 具有 n 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n , 其对应的特征量值为 X_1, X_2, \dots, X_n 时, 则 n 维物元被用于描述事物 N 。

物元理论用于空管系统安全风险评价的思路为: 第一步由构成空管系统安全风险评价的相应指标组成评价备选集; 第二步计算空管系统安全风险评价指标的特征值, 通过将评价指标按照不同等级进行物元变换, 得到所评价的空管系统安全风险的物元; 第三步计算空管系统安全风险评价指标和对应的风险评价等级集合的关联度, 并在关联度计算结果中根据最大隶属度原则选取最大值, 其值就为空管系统安全风险所隶属的等级。

2.2 物元模型的表示方法

以空管系统安全风险评价为事物, 评价指标 C_i 为特征, 评价指标的取值为特征值 X_i , 空管系统安全风险评价物元可描述为

$$R = (N, C, X) = \begin{bmatrix} N & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N 为对象, 即空管系统安全风险; C_i 为事物特征, 即人为因素、设备因素、环境因素和管理因素等; X_i 为各特征对应的特征值。

2.3 单项评价指标评价物元

空管系统安全风险评价指标体系中的一级评

价指标集合 $C = (C_1, C_2, \dots, C_f)$, ($f = 4$), 评价指标 C_f 对应的二级评价因子集合 $C_f = (C_{f1}, C_{f2}, \dots, C_{fn})$, C_{fi} 表示第 f 类评价指标中的第 i 个评价因子, n 在 4 个评价指标中对应的取值分别为 7、4、6、5。

在评价空管系统安全风险时, 需要先评价安全风险中的每一个单项指标, 再对空管系统的整体安全风险状况进行综合评价。单项指标评价就是对表 1 中四个一级指标进行物元评价, 分别构建四个评价指标的经典域、节域以及待评物元, 同时计算各等级对应的关联度。

四个指标关联度计算分别为:

(1) 确定空管系统安全风险评价经典域

$$R_{fj} = (N_{fj}, C_{fj}, X_{fji}) = \begin{bmatrix} N_{fj} & C_{f1} & X_{fj1} \\ & C_{f2} & X_{fj2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{fn} & X_{fjn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{fj} & C_{f1} & \langle a_{fj1}, b_{fj1} \rangle \\ & C_{f2} & \langle a_{fj2}, b_{fj2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{fn} & \langle a_{fjn}, b_{fjn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: R_{fj} 为安全风险等级为第 j 级时, 空管系统安全风险状况对应的物元模型; N_{fj} 为评价指标 C_f (如人为因素等) 对应的第 j 级安全风险等级 ($j = 1, 2, \dots, m$); X_{fji} 为空管系统的安全风险等级在第 j 级时第 i 项评价因子的取值范围, 就是评价因子在安全风险等级为第 j 级时所对应的特征 C_{fi} 的经典域, 取值范围为 $\langle a_{fji}, b_{fji} \rangle$ 。

(2) 确定节域

$$R_{fp} = (N_{fp}, C_{fp}, X_{fpi}) = \begin{bmatrix} N_{fp} & C_{f1} & X_{fp1} \\ & C_{f2} & X_{fp2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{fn} & X_{fpn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{fp} & C_{f1} & \langle a_{fp1}, b_{fp1} \rangle \\ & C_{f2} & \langle a_{fp2}, b_{fp2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{fn} & \langle a_{fpn}, b_{fpn} \rangle \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: R_{fp} 为空管系统安全风险物元评价模型的节域; N_{fp} 为空管系统安全风险等级的集合; X_{fpi} 为 N_{fp} 对应于特征 C_{fi} 的特征值, 取值范围为 $\langle a_{fpi}, b_{fpi} \rangle$ 。

(3) 确定待评物元

当待评物元对象为 N_f (如人为因素等) 时, 通过对 N_f 进行数据处理, 用物元表示为

$$R_f = (N_f, C_{fi}, X_{fi}) = \begin{bmatrix} N_f & C_{f1} & Y_{f1} \\ & C_{f2} & Y_{f2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{fn} & Y_{fn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: R_f 为空管系统安全风险中单项评价指标的待评物元; N_f 为需要评价的指标; Y_{fi} 为 N_f 对于特征 C_{fi} 的量值, 具体取值由空中交通管理安全风险专家评分处理后得到。

(4) 单因子关联度

评价指标相对于安全风险各个等级 j 的关联度为

$$K_j(Y_{fi}) = \begin{cases} \frac{\rho(Y_{fi}, X_{fji})}{\rho(Y_{fi}, X_{fpi}) - \rho(Y_{fi}, X_{fji})} & (Y_{fi} \notin X_{fji}) \\ \frac{-\rho(Y_{fi}, X_{fji})}{|X_{fji}|} & (Y_{fi} \in X_{fji}) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\rho(Y_{fi}, X_{fji}) = \left| Y_{fi} - \frac{1}{2}(a_{fji} + b_{fji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{fji} - a_{fji}) \quad (8)$$

$$\rho(Y_{fi}, X_{fpi}) = \left| Y_{fi} - \frac{1}{2}(a_{fpi} + b_{fpi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{fpi} - a_{fpi}) \quad (9)$$

(5) 单指标的综合关联度

确定待评物元 N_f (如人为因素) 在安全风险的等级为 j 时的关联度 $K_j(N_f)$:

$$K_j(N_f) = \sum_{i=1}^{n_f} \omega_{fi} K_j(Y_{fi}) \quad (10)$$

式中: ω_{fi} 为评价指标 C_{fi} 所属的权重值, 由组合赋权计算得到。

2.4 综合评价

对于待评事物 N (空管系统安全风险), 当其安全风险的等级为 j 级时的关联度 $K_j(N)$ 通过式 (11) 得到:

$$K_j(N) = \sum_{f=1}^n \omega_f K_j(N_f) \quad (11)$$

式中: ω_f 为评价指标 C_f 的组合赋权权重值。

通过计算空管系统对应不同安全风险等级的

关联度, 基于最大隶属度原则, 得到空管系统安全风险的实际安全风险状况。具体为

$$\bar{K}_j(N_f) = \frac{K_j(N_f) - \min_j [K_j(N_f)]}{\max_j [K_j(N_f)] - \min_j [K_j(N_f)]} \quad (12)$$

$$J = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{K}_j(N_f)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(N_f)} \quad (13)$$

式中: J 为所评的物元—空管系统安全风险 N_f 所对应的风险等级特征值, 即空管系统的安全风险等级。

3 实例分析

将组合赋权方法和物元理论对某空中交通管制单位的空管系统安全风险进行评价, 本文将空管系统的安全风险划分为 5 个 (取 $m=5$) 等级, 分别对应为 I 级 (很安全)、II 级 (安全)、III 级 (较安全)、IV 级 (不安全)、V (很不安全), 每个评价指标所对应的各等级取值范围如表 1 所示, 通过邀请 8 位空管领域的安全管理专家进行专家评分, 经整理得到每项评价因子的原始数据 (如表 1 所示)。

3.1 评价指标权重的组合赋权

应用层次分析法 (AHP) 和有序加权平均 (OWA) 算子, 分别对空管系统的安全风险评价指标进行主、客观权重计算, 然后根据公式 (1) 和公式 (2) 进行组合权重计算, 限于文章篇幅所限, 评价指标的组合权重值表如 2 所示 (其中偏好系数 $\alpha=0.6066, \beta=0.3934$), 人为因素、设备因素、环境因素以及管理因素所对应的评价因子的组合权重值如表 3 所示。

表 2 一级评价指标组合权重值

Table 2 Combination weight of first-level evaluation indicators

评价指标 (一级指标)	权重		
	AHP	OWA	组合赋权
人为因素指标 C_1	0.446 3	0.286 1	0.383 2
设备因素指标 C_2	0.290 0	0.260 0	0.278 2
环境因素指标 C_3	0.092 9	0.209 3	0.138 7
管理因素指标 C_4	0.171 0	0.244 6	0.199 9

表 3 二级评价指标组合权重值
Table 3 Combination weight of second-level evaluation indicators

评价指标	评价因子	权重		
		AHP	OWA	组合赋权
人为因素指标 C_1 ($\alpha=0.6024, \beta=0.3976$)	管制敬业精神 C_{11}	0.3173	0.1724	0.2597
	身心健康状况 C_{12}	0.1688	0.1454	0.1595
	班组资源管理能力 C_{13}	0.0360	0.1026	0.0625
	预测和统筹能力 C_{14}	0.0645	0.1363	0.0930
	管制专业知识技能 C_{15}	0.1109	0.1580	0.1296
	安全责任意识 C_{16}	0.2380	0.1645	0.2088
	决策应变能力 C_{17}	0.0645	0.1208	0.0869
设备因素指标 C_2 ($\alpha=0.6504, \beta=0.3496$)	管制设施设备建设 C_{21}	0.1405	0.0571	0.4467
	设施设备完好程度 C_{22}	0.4463	0.0003	0.2715
	设施设备运行管理能力 C_{23}	0.2727	0.0176	0.1424
	设施设备维护保养能力 C_{24}	0.1405	0.0154	0.1394
环境因素指标 C_3 ($\alpha=0.5964, \beta=0.4036$)	管制空域环境状况 C_{31}	0.3434	0.2041	0.2872
	管制区地理环境复杂度 C_{32}	0.1772	0.1710	0.1747
	气象环境复杂度状况 C_{33}	0.1158	0.1682	0.1369
	管制指挥流量大小 C_{34}	0.0700	0.1480	0.1015
	管制通信导航环境 C_{35}	0.2535	0.1946	0.2297
	管制电磁干扰环境 C_{36}	0.0401	0.1140	0.0699
管理因素指标 C_4 ($\alpha=0.6061, \beta=0.3939$)	安全文化管理建设 C_{41}	0.3876	0.2342	0.3272
	组织机构设置合理性 C_{42}	0.1077	0.1897	0.1400
	管制培训管理制度化 C_{43}	0.2713	0.2152	0.2492
	管理制度建设执行力 C_{44}	0.1744	0.1962	0.1830
	信息沟通有效性 C_{45}	0.0590	0.1647	0.1006

3.2 单项评价指标的物元综合评价

由于对每个单项评价指标进行物元综合评价过程是相同的,因此以人为因素评价指标为例,具

体介绍评价过程。

(1) 确定人为因素评价指标的经典域、节域、待评物元

①经典域物元

$$R = \begin{bmatrix} \text{人为因素指标} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} & \text{V} \\ \text{管制敬业精神} & 85 \sim 100 & 70 \sim 85 & 60 \sim 70 & 45 \sim 60 & 0 \sim 45 \\ \text{身心健康状况} & 85 \sim 100 & 70 \sim 85 & 60 \sim 70 & 45 \sim 60 & 0 \sim 45 \\ \text{班组资源管理能力} & 85 \sim 100 & 75 \sim 85 & 60 \sim 75 & 45 \sim 60 & 0 \sim 45 \\ \text{预测和统筹能力} & 90 \sim 100 & 75 \sim 90 & 60 \sim 75 & 45 \sim 60 & 0 \sim 45 \\ \text{管制专业知识技能} & 85 \sim 100 & 75 \sim 85 & 60 \sim 75 & 45 \sim 60 & 0 \sim 45 \\ \text{安全责任意识} & 85 \sim 100 & 75 \sim 85 & 60 \sim 75 & 45 \sim 60 & 0 \sim 45 \\ \text{决策应变能力} & 90 \sim 100 & 75 \sim 90 & 60 \sim 75 & 45 \sim 60 & 0 \sim 45 \end{bmatrix}$$

②节域物元

$$R_{fp} = \begin{bmatrix} N_{fp} & C_{f1} & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_{f2} & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_{f3} & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_{f4} & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_{f5} & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_{f6} & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_{f7} & \langle 0, 100 \rangle \end{bmatrix}$$

③待评物元

$$R_f = \begin{bmatrix} \text{人为因素指标 } N_f & C_{f1} & 85 \\ & C_{f2} & 82 \\ & C_{f3} & 75 \\ & C_{f4} & 78 \\ & C_{f5} & 82 \\ & C_{f6} & 83 \\ & C_{f7} & 83 \end{bmatrix}$$

(2) 计算待评物元的评价因子关联度和评价指标综合关联度

根据组合赋权方法得到评价指标组合权重值后,根据式(7)~式(10),计算空管系统安全风险中人为因素指标的关联度。同理的计算过程,可以分别得到设备因素、环境因素和管理因素对应的评价因子的关联度和评价指标的综合关联度,结果如表 4 所示。

3.3 整体综合评价

从底层到顶层逐层递归,根据式(11)~式(13),最终得到空管系统安全风险的综合关联度、安全风险等级以及对应的特征值,结果如表 5 所示。该空管系统的安全风险综合特征值为 2.096 8,意味着其准确的安全风险等级为二级,说明其安全风险状况属于 II 级,即安全的状况。

表 4 评价指标关于各等级的关联度

Table 4 Correlation degree about varous categories of evaluation indicators

评价指标	评价因子	关联度				
		K_{1i}	K_{2i}	K_{3i}	K_{4i}	K_{5i}
人为因素	管制敬业精神 C_{11}	0.086 6	-0.051 9	-0.155 8	-0.181 8	-0.203 0
	身心健康状况 C_{12}	-0.027 7	0.042 5	-0.058 5	-0.083 7	-0.104 4
	班组资源管理能力 C_{13}	-0.015 1	0.009 9	-0.007 5	-0.028 1	-0.037 5
	预测和统筹能力 C_{14}	-0.031 0	0.031 0	-0.018 6	-0.046 5	-0.059 2
	管制专业知识技能 C_{15}	0.010 0	-0.008 6	-0.057 0	-0.084 2	-0.096 6
	安全责任意识 C_{16}	-0.012 3	0.013 9	-0.075 2	-0.125 3	-0.148 1
	决策应变能力 C_{17}	-0.019 3	0.034 8	-0.038 2	-0.056 5	-0.064 8
	综合关联度	-0.008 9	0.071 5	-0.410 8	-0.606 2	-0.713 6
设备因素	管制设施设备建设 C_{21}	-0.161 3	0.042 5	-0.035 7	-0.189 8	-0.259 9
	设施设备完好程度 C_{22}	-0.028 6	0.036 2	-0.117 7	-0.156 1	-0.187 6
	设施设备运行管理能力 C_{23}	-0.038 8	0.006 2	-0.005 7	-0.057 0	-0.080 3
	设施设备维护保养能力 C_{24}	-0.039 8	0.034 9	-0.023 2	-0.052 3	-0.076 0
	综合关联度	-0.268 6	0.119 8	-0.182 3	-0.455 2	-0.603 8
环境因素	管制空域环境状况 C_{31}	0.022 1	-0.019 1	-0.153 2	-0.186 7	-0.214 1
	管制区地理环境复杂度 C_{32}	-0.010 3	0.011 6	-0.081 5	-0.104 8	-0.123 9
	气象环境复杂度状况 C_{33}	-0.047 1	0.102 7	-0.041 1	-0.065 0	-0.084 6
	管制指挥流量大小 C_{34}	-0.032 6	0.046 8	-0.024 4	-0.053 3	-0.066 4
	管制通信导航环境 C_{35}	-0.024 2	0.030 6	-0.099 5	-0.132 1	-0.158 7
	管制电磁干扰环境 C_{36}	-0.010 0	0.014 0	-0.019 6	-0.038 4	-0.047 0
综合关联度	-0.102 0	0.186 6	-0.419 2	-0.580 3	-0.694 8	
管理因素	安全文化管理建设 C_{41}	-0.128 0	-0.031 7	0.039 3	-0.098 2	-0.160 6
	组织机构设置合理性 C_{42}	-0.040 0	0.035 0	-0.023 3	-0.052 5	-0.076 4
	管制培训管理制度化 C_{43}	-0.097 5	-0.024 1	0.029 9	-0.074 8	-0.122 3
	管理制度建设执行力 C_{44}	-0.047 2	0.017 4	-0.014 6	-0.077 8	-0.106 5
	信息沟通有效性 C_{45}	-0.035 5	0.015 9	-0.012 1	-0.045 3	-0.060 4
	综合关联度	-0.348 3	0.012 5	0.019 1	-0.348 5	-0.526 2

表 5 空中交通管理系统安全风险综合评价结果

Table 5 Results of comprehensive evaluation about safety risk in air traffic management system

评价指标	综合关联度					等级 j	等级特征值 J
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5		
人为因素	-0.008 9	0.071 5	-0.410 8	-0.606 2	-0.713 6	2	1.901 5
设备因素	-0.268 6	0.119 8	-0.182 3	-0.455 2	-0.603 8	2	2.235 4
环境因素	-0.102 0	0.186 6	-0.419 2	-0.580 3	-0.694 8	2	1.952 6
管理因素	-0.348 3	0.012 5	0.019 1	-0.348 5	-0.526 2	3	2.502 1
风险综合评价	-0.161 9	0.089 1	-0.262 5	-0.509 1	-0.643 0	2	2.096 8

从表 5 可以看出:该空管系统设备因素和管理因素的安全等级值分别为 2.235 4 和 2.502 1,均高于综合安全等级值 2.096 8,应重点关注空管系统中的设备因素和管理因素,尤其要加强影响空管系统安全风险的管理因素。可见物元方法既可以得到空管系统的整体安全风险水平,又可以得到各个评价指标的安全风险等级。相关管理部门可以针对不同评价指标存在的安全风险问题进行相应的整改,从而提高空管系统的安全风险管理能力,保障航空运输的安全运行。

4 结 论

(1) 将物元分析理论应用于空管系统安全风险评价,构建了空管系统安全风险物元评价模型,不仅解决了空管系统安全风险评价中的不相容问题,而且能够正确反映空管系统安全风险中事物与量之间的内在联系与演变规律。

(2) 基于欧几里得距离函数的组合赋权方法确定空管系统安全风险评价指标的权重,能够更真实地反映出空管系统安全风险的实际,使研究结论更能体现空管系统安全风险现状。

(3) 空管系统安全风险的物元评价,既可以得到空管系统安全风险的整体安全风险等级,又可以得到每个评价指标的安全水平状况,可以找到空管系统中存在安全风险的不足之处,为指导空管系统改进安全风险提供了理论依据。

(4) 物元评价方法能够充分利用评价指标的信息,使得评价结果准确可靠,并与空管系统安全风险的可拓物元特征相适应,为开展空管系统的安全风险评价提供了一种新思路。

参考文献

[1] TERNOV S, AKSELSSON R. A method DEB analysis for

proactive risk analysis applied to air traffic control[J]. Safety Science, 2004, 42(7): 657-673.

[2] HUAN-JYH S. A quantitative model for aviation safety risk assessment[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008, 54(1): 34-44.

[3] FLAVIOR L, CAMARGO J J B. A safety assessment methodology applied to CNS/ATM-based air traffic control system[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96(7): 727-738.

[4] 丁松滨, 王飞. 空中交通管理安全预警指标体系及权重[J]. 中国民航学院学报, 2005, 23(4): 50-54.

DING Songbin, WANG Fei. Weights and safety forwarding criteria of air traffic management system[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2005, 23(4): 50-54. (in Chinese)

[5] 杜红兵, 李晖, 袁乐平, 等. 基于 Fuzzy-ANP 的空管安全风险评估研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(12): 79-85.

DU Hongbing, LI Hui, YUAN Leping, et al. Risk assessment model for air traffic control based on Fuzzy-ANP method[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(12): 79-85. (in Chinese)

[6] 文兴忠. 基于灰色多层次的空中交通管理安全风险评价研究[J]. 科技导报, 2011, 29(32): 5-9.

WEN Xingzhong. Safety risk evaluation of air traffic management based on grey hierarchy method[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(32): 5-9. (in Chinese)

[7] 袁丁, 雷昱, 杨楠. 基于 Dempster 合成法则的空管安全评价方法研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 1014-1019.

YUAN Ding, LEI Yu, YANG Nan. Approach to the aviation and air traffic and transportation safety evaluation based on the Dempster's combination rule[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(3): 1014-1019. (in Chinese)

[8] 赵巍飞, 万俊强. 基于集对分析的空中交通管制运行风险评价[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 871-875.

ZHAO Yifei, WAN Junqiang. On the operational risk assessment of the air traffic control based on the set pair analysis method[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(3): 871-875. (in Chinese)

- [9] CHANG Y H. The status and perspective of Taiwan's civil aviation safety[J]. *Civil Aviation Journal Quarterly*, 1999, 1(1): 1-24.
- [10] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1998.
CAI Wen. Matter elements model and application[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1998. (in Chinese)
- [11] 门宝辉, 梁川. 城市环境质量综合评价物元模型及其应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2003, 22(3): 134-139.
MEN Baohui, LIANG Chuan. Establishment and application of matter element model for evaluating urban environmental quality[J]. *Systems Engineering Theory & Practice*, 2003, 22(3): 134-139. (in Chinese)
- [12] 游温娇, 徐志胜, 刘顶立. 基于物元分析法的古建筑火灾风险评估[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(1): 873-878.
YOU Wenjiao, XU Zhisheng, LIU Dingli. On the fire risk assessment for the ancient buildings based on the matter element analysis[J]. *Journal of Safety Environment*, 2017, 17(1): 873-878. (in Chinese)
- [13] 牛国成, 胡贞, 胡冬梅. 基于物元信息熵的生产线健康度评估及预测[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 36(7): 1639-1646.
NIU Guocheng, HU Zhen, HU Dongmei. Evaluation and prediction of production line health index based on matter element information entropy [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 36(7): 1639-1646. (in Chinese)
- [14] 罗凤娥, 李珊, 千富荣, 等. 基于飞行签派员的航空公司运行效率提升研究[J]. *航空工程进展*, 2020, 11(1): 132-139.
LUO Feng'e, LI Shan, QIAN Furong, et al. Research on airline operation efficiency improvement based on flight dispatcher[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(1): 132-139. (in Chinese)
- [15] 秦寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
QIN Shoukang. The principle and application of comprehensive evaluation [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [16] 中国民用航空局. 空管安全审计[R]. 北京: 中国民用航空局, 2008.
Civil Aviation Administration of China. Safety audit of air traffic management[R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2008. (in Chinese)
- [17] 中国民用航空局. 空中交通服务安全评估系统[R]. 北京: 中国民用航空局, 2000.
Civil Aviation Administration of China. Services safety assessment system of air traffic management [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2000. (in Chinese)
- [18] 姚光明, 曹悦琪. 基于大数据的空中交通管制运行安全预警研究[J]. *航空工程进展*, 2016, 7(4): 452-458.
YAO Guangming, CAO Yueqi. Research on ATC operation safety warning based on big data[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2016, 7(4): 452-458. (in Chinese)
- [19] CHEN C T. Extension of TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment[J]. *Fuzzy Sets and System*, 2000, 114(3): 1-9.
- [20] YAGER R R. Families of OWA operators[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1993, 59: 125-148.
- [21] XU Zeshui. Dependent OWA operators[J]. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2006(2): 172-178.
- [22] 王煜, 徐泽水. OWA 算子赋权新方法[J]. *数学的实践与认识*, 2008, 38(3): 51-61.
WANG Yu, XU Zeshui. A new method of giving OWA weights[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008, 38(3): 51-61. (in Chinese)
- [23] 雷从英, 夏良华, 林智崧. 基于相似性的装备部件剩余寿命预测研究[J]. *火力与指挥控制*, 2014, 39(4): 91-94.
LEI Congying, XIA Lianghua, LIN Zhisong. Research on similarity-based remaining life prediction of equipment components[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(4): 91-94. (in Chinese)
- [24] 强跃, 李莉, 李绍红, 等. 基于改进组合赋权物元可拓模型的泥石流危险性评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(5): 104-109.
QIANG Yue, LI Li, LI Shaohong, et al. Debris flow hazard assessment based on improved matter-element extension model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(5): 104-109. (in Chinese)

作者简介:

唐家文(1985—),男,硕士,讲师。主要研究方向:空中交通安全管理。

董兵(1978—),男,博士,教授。主要研究方向:系统复杂性。

(编辑:丛艳娟)