

面向机载网络安全的改进 FAHP-云模型风险评估方法

李国¹, 李静雯^{1*}, 王静¹, 徐俊洁¹, 王鹏²

(1.中国民航大学 计算机科学与技术学院, 天津 300300;

2.中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

(*通信作者电子邮箱 lexi1121h@163.com)

摘要: 机载网络的安全风险评估是保证飞机飞行与信息安全的首要工作, 而现有的风险评估往往只考虑通用网络的风险要素, 因此针对机载网络安全风险特性, 以及风险评估中指标权重难以客观准确计算, 评估结果单一, 可描述性差等问题, 提出了一种基于改进 FAHP-云模型的机载网络安全风险评估方法, 首先考虑机载网络的特殊性建立机载网络安全风险评估指标体系, 然后在传统模糊层次分析法的基础上引入信息熵计算综合权重, 并结合云模型理论构造实际综合云模型, 通过计算实际综合云模型与标准云模型的相似度从而确定机载网络安全的风险等级。仿真实验表明, 与传统层次分析法(AHP)、模糊层次分析法(FAHP)、云模型方法相比, 该方法更能体现指标权重的客观性, 以及评估中的模糊性和随机性, 使评估结果更加直观可靠。

关键字: 机载网络安全; 风险评估; 模糊层次分析法; 信息熵; 云模型

中图分类号: TP393.08

文献标志码: A

Risk assessment method of improved FAHP-cloud model for airborne network security

LI Guo¹, Li Jing-wen¹, WANG Jing¹, XU Jun-jie¹, WANG Peng²

(1.College of computer science and technology,Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2.Civil aircraft airworthiness and repair key laboratory of Tianjin, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The primary task for ensuring the safety of aircraft flight and information security is the safety risk assessment of airborne network. However, the existing risk assessment methods only consider the risk elements of common network. Against the security risk characteristics of airborne network, to focus on the difficulty of accurately calculating the index weights in risk assessment and the simplicity and the weak descriptiveness of assessment result, propose a new airborne network security risk assessment method based on improve FAHP- cloud model. First, consider the particularity of airborne network to establish the airborne network security risk assessment index system. Second, compute the index comprehensive weight on the basis of traditional fuzzy analytic hierarchy process (FAHP), Then, construct an actual comprehensive cloud model by employing cloud model theory. Final, determine the risk level of airborne network security by calculating the similarity between the actual comprehensive cloud model and the standard cloud model. The simulation experiments show that this method can better reflect the objectivity of index weights, as well as the ambiguity and randomness in risk assessment, to make the assessment results more intuitive and reliable, comparing with traditional AHP, FAHP, and cloud model method.

Keywords: airborne network security; risk assessment; Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP); information entropy; cloud model

0 引言

随着信息技术的飞速发展和新一代民机机载电子设备的重要应用, 机载网络安全成为影响飞行安全的重要因素。机

载网络将飞机上分布不同位置的各个系统和设备连接起来, 以实现通信和服务的目的。机载网络安全的风险评估是保证机载网络信息安全的第一步, 对保障飞行安全 and 信息安全均有重要意义^[1]。但目前国内外学者很少有人专门针对机载网

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-05-08; 录用日期: 2018-05-09。

基金项目: 民航安全能力建设项目(AADSA0018); 民航局科技创新引导资金专项项目(MHRD20160109); 中国民航大学中央高校基金资助项目(31220106A001)。

作者简介: 李国(1966—), 男, 河南新乡人, 教授, 硕士, 主要研究方向: 民航智能信息处理、航空物联网、航空物流; 李静雯(1991—), 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 机载信息系统、网络安全; 王静(1980—), 山西太谷人, 女, 博士, 主要研究方向: 民航信息系统、网络安全; 徐俊洁(1985—), 女, 辽宁营口人, 博士, 主要研究方向: 民航信息系统、网络安全; 王鹏(1982—), 男, 天津人, 副研究员, 硕士, 主要研究方向: 民机系统安全性评估、机载电子硬件。

络架构特点进行风险评估研究:傅建新等^[2]针对无线网络安全提出一种层次分析法-灰色聚类的风险评估方法,但只得到风险值,结果单一,无法体现评估过程;刘东飞等^[3]提出一种基于 AHP-云模型的软件过程绩效评价方法,但指标权重的计算过于依赖专家的主观经验,难以科学准确计算;李林^[4]等人采用层次分析法对各层指标权重进行量化,结合逼近理想解排序方法计算风险值,但该方法未考虑风险之间的相互关系,并不适用于复杂的机载网络安全环境,评估结果也过于单一,只得到风险值,无法显示评估过程中的定性因素。针对上述网络安全风险评估方法中存在的问题,以及机载网络安全的特殊性,本文提出改进的模糊层次分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process,FAHP)-云模型的风险评估方法。首先,根据机载网络架构的特点建立指标体系;然后,结合模糊层次分析法和信息熵解决综合权重的客观性和准确性的问题;其次,引入云模型理论确定风险等级,解决评估结果单一,可描述性差的问题,同时显示定性和定量的评估结果,充分体现评估的随机性和模糊性。

1 相关理论

1.1 模糊层次分析算法与信息熵

模糊层次分析法是一种定性与定量分析相结合的多目标决策分析方法,使用三角模糊数或梯形模糊数计算模糊权重,解决了某一层次评价指标较多时,使用传统层次分析法其思维一致性很难保证的问题^[5],其中三角模糊数的定义是:

定义 1 给定论域 U 上的一个模糊集是指对任何 $x \in U$, 都有一个数 $\mu(x) \in [0,1]$ 与之对应, $\mu(x)$ 称为 x 对 U 的隶属度, μ 称为 x 的隶属函数, 设 s 和 u 分别为模糊数的上限和下限, m 为可能性最大的值, 记 M 的隶属函数为:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} (x-s)/(m-s), & x \in [s, m] \\ (x-u)/(m-u), & x \in [m, u] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

对任意的 $\lambda \in (0,1)$, $M_\lambda = \{x/\mu_M(x) \geq \lambda\}$ 是一个凸集, 则称 M 为三角模糊数, 可记作 (s, m, u) 。当评价指标为 k 个时, 构造的模糊判断矩阵为:

$$A_{k \times k} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & a_{k2} & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

a_{ij} 为一个三角模糊数 $M(s_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$, 表示指标 i 与 j 的重要程度比。

信息熵用来测量信源不确定性的量, 信息量越小表示信源所具有的不确定性越大, 熵越大; 相反, 信息量越大表示信源所具有的不确定性越小, 熵也越小^[6]。

1.2 云模型理论

云模型是一种实现定性定量之间相互转换的模型, 其中正向云发生器将定型概念转化为定量数据, 逆向云发生器将定量数据转化为定型概念, 并以云滴的形式直观地展现评估结果^[7], 其中云模型的定义如下:

定义 2 给定论域 X 中的模糊集合 \tilde{A} , 是指对于任意元素 x 都存在一个有稳定倾向的随机数 $\mu_{\tilde{A}}(x)$, 叫做 x 对 \tilde{A} 的隶属度。如果论域中的元素不是简单有序的, 根据某个法则 f , 可将 X 映射到另一个有序的论域 X' 上, X' 中的一个且只有一个 x' 和 x 对应, 则 X' 为基础变量, 隶属度在 X' 上的分布叫做隶属云。

云是从论域到区间 $[0,1]$ 的映射, 它由许多云滴组成。单一的云滴并没有现实的意义, 只有在云滴形成云时, 整个云表现出来的数字特征 (Ex, En, He) , 才能反映定性概念的特征^[8]。其中 Ex (Expected value) 表示期望值, En (Entropy) 表示熵, He (Hyper entropy) 表示超熵。期望 Ex 表示云模型的分布中心, 是最有可能的值; 熵 En 反映了分布的不确定性, 熵越大, 越难定值量化, 即模糊性和随机性也越大; 超熵 He 是熵的不确定性度量, 超熵越大, 隶属度的随机性就越大。

2 改进 FAHP-云模型风险评估模型

本文采用的风险评估模型主要分为三部分: 建立评估指标体系模块、计算综合权重模块、以及构造实际综合云模型模块。具体的详细过程如图 1 所示:

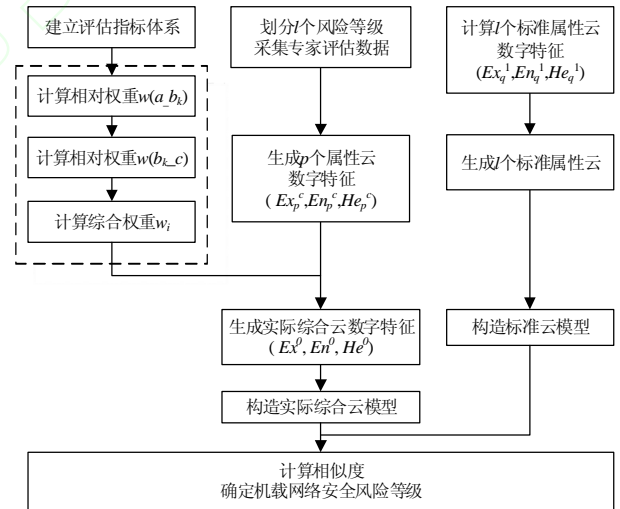


图1 基于改进 FAHP-云模型的风险评估流程

Fig. 1 Risk assessment flow based on improved FAHP-cloud model

其中, 建立评估指标体系模块的主要任务是采用传统层次分析法建立适用于机载网络安全风险评估的三层指标体系; 计算综合权重模块的任务是首先利用传统的模糊层次分析法计算相对权重 $w(a_{bk})$, 之后引入信息熵的概念来计算相对权重 $w(b_{k-c})$, 由这两个相对权重来计算综合权重 w_i , 如图 1 中虚线部分的内容所示; 构造实际综合云模型模块通过

采集专家评估数据生成属性云数字特征(Ex_p^c, En_p^c, He_p^c), 加权计算实际综合云数字特征(Ex^0, En^0, He^0), 并使用云发生器分别构造实际综合云模型, 并同时使用标准属性云数字特征(Ex^1, En^1, He^1)生成标准云属性云, 得到标准云模型; 最终通过计算实际综合云模型和标准云模型二者相似度确定机载网络安全风险等级。

2.1 建立评估指标体系

本文采用传统层次分析法对机载网络建立评估指标体系, 由于机载网络的特殊性, 在建立指标体系时要考虑到民用飞机目前广泛使用的综合模块化航电系统网络架构, 该架构打破了传统飞行控制网域, 航空公司信息服务域, 和机载娱乐域三者之间的物理隔离, 甚至增加了互联网接入机载旅客娱乐网域的相关功能, 在支持更多网络域的交互的同时, 也给网络安全带来了极大的风险。

机载网络安全面临的危险可能是在保密性、完整性和可用性等方面造成损害, 也可能是偶发的或蓄意的事件: 除了地面公共网络安全所遭遇的种种的网络信息安全威胁, 如黑客攻击、病毒感染、信息丢失等, 还包括来自网络域边界接口的安全威胁, 按作用形式分类可具体分为: 获取机载网络信息, 篡改机载网络信息, 利用服务, 拒绝服务和提升权限对机载网络进行非法操作。

根据信息安全风险评估规范和文献[9]的分析对机载网络进行资产、威胁和脆弱性识别, 建立目标-准则-属性三层指标体系如图2所示: 其中目标层 a 为风险等级; 准则层 b 为资产的三个安全属性, 分别是保密性(b_1), 可用性(b_2)和完整性(b_3); 属性层 c 分别对应资产面临的风险, 即获取机载网络信息(c_1), 篡改机载网络信息(c_2), 利用服务(c_3), 拒绝服务(c_4)和提升权限对机载网络进行非法操作(c_5)。

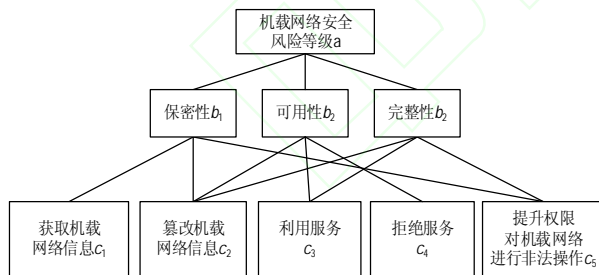


图2 机载网络安全风险评估指标体系

Fig. 2 Risk assessment index system of airborne network security

2.2 计算综合权重

计算综合权重模块的任务分为三部分。首先构造模糊判断矩阵并计算 $w(a_b_k)$, 其次引入信息熵计算 $w(b_k_c)$, 最终得到综合权重 w_i , 具体的过程是:

1) 专家对 b 层指标进行模糊打分, 生成模糊判断矩阵, 并对其进行去模糊化处理得到 b 层指标相对于 a 层指标的判

断矩阵 A ; 根据公式(1)计算 b 层相对于 a 层的模糊权重 $w'(a_b_k)$:

$$w'(a_b_k) = \frac{\sum_{j=1}^k a_{ij}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij}} \quad (1)$$

然后根据三角模糊数比较运算规则^[10]去模糊化处理得到 $w'(a_b_k)$, 并由式(2)进行归一化得到相对权重 $w(a_b_k)$:

$$w(a_b_k) = \frac{\sum_{i=1}^k w'(a_b_k)}{\sum_{i=1}^k w'(a_b_k)} \quad (2)$$

2) 构造 c 层指标相对于 b 层指标的判断矩阵 A , 并根据式(3)计算 c 层指标相对于 b 层指标的熵 H_i , 之后由式(4)进行归一化处理得到相对权重 $w(b_k_c)$:

$$H_i = -\frac{1}{\ln k} \sum_{j=1}^k a_{ij} \ln a_{ij} \quad (3)$$

$$w(b_k_c) = (1 - H_i) / \left(n - \sum_{i=1}^n H_i \right) \quad (4)$$

其中 n 为专家个数。

3) 根据式(5)计算 c 层指标 i 相对于 a 层指标的综合权重 w_i :

$$w_i = \sum w(a_b_k) \times w(b_k_c) \quad (5)$$

2.3 构造实际综合云模型

构造实际综合云模型模块主要分为四部分。首先通过采集专家评估数据生成属性云数字特征(Ex_p^c, En_p^c, He_p^c); 其次通过加权计算实际综合云数字特征(Ex^0, En^0, He^0), 并使用云发生器分别构造实际综合云模型; 再次, 使用标准属性云数字特征(Ex_q^1, En_q^1, He_q^1)生成标准属性云, 得到标准云模型; 最后通过计算实际综合云模型和标准云模型二者相似度确定机载网络安全风险等级。具体过程如下:

1) 假设机载网络的风险等级被划分 l 个, 通过采集 n 位机载网络领域的专家对机载网络风险等级的评估数据, 根据逆向云生成算法^[11]计算 p 个属性云数字特征(Ex_p^c, En_p^c, He_p^c), 其中 p 为 c 层指标个数;

2) 根据式(6), (7), (8)计算实际综合云模型数字特征(Ex^0, En^0, He^0), 并根据正向云发生算法^[11]构造实际综合云模型;

$$Ex^0 = \sum_{i=1}^p (Ex_p^c \times w_i) \quad (6)$$

$$En^0 = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left(\left(En_p^c \right)^2 \times w_i \right)} \quad (7)$$

$$He^0 = \sum_{i=1}^p (He_p^c \times w_i) \quad (8)$$

其中 w_i 表示综合权重, 由式(5)计算得到。

3) 根据式(9)~(11)计算 l 个标准属性云数字特征(Ex_q^1, En_q^1, He_q^1), 由正向云发生算法^[11]生成 l 个标准属性云, 得到标准云模型;

$$Ex_q^1 = \begin{cases} R_q^{min}, q=1 \\ \left(R_q^{min} + R_q^{max} \right) / 2, 1 < q < l \\ R_q^{max}, q=l \end{cases} \quad (9)$$

$$En_q^{-1} = (R_q^{max} - R_q^{min})/3 \tag{10}$$

$$He_q^{-1} = \eta \tag{11}$$

其中, q 取 1~ l 之间的整数; η 为一个常数, 反映了属性值的随机性, 不宜过大。

4) 根据隶属云相似度算法^[11]计算实际综合云模型与标准云模型的相似度, 确定机载网络安全风险等级。

3 仿真实验

本文的实验环境是: Intel Core 2 Quad CPU, 4GB 内存, 64 位操作系统计算机一台, R2016a 版本 Matlab。

3.1 实验数据

邀请五位行业专家对某一机载网络安全风险状况进行分析打分, 并使用本文提出的改进 FAHP-云模型算法评估风险等级。本文采用的实验数据主要包括两部分:

(1) 计算综合权重模块

请五位专家对机载网络安全风险评估指标体系中准则层 b 的三个指标 b_1, b_2, b_3 两两之间相对于目标层 a 的重要程度进行数值打分。

由于飞机机载数据网络与地面公共网络的安保等级不同, 机载系统设备的数据传输接口和网络架构也不同, 因此为了更好地对机载网络安全风险进行打分, 本文将机载网络域细分为五个: 飞机控制域、信息服务域、客舱网络域、地面受信域和公共网络域, 其安保要求逐渐降低。根据不同网络域中机载信息系统的功能, 其对机载网络资产的保密性、完整性和可用性的安保要求各有侧重; 并且安保要求越高的网络域, 其系统和设备的安全等级也越高。

本算法采用 Saaty 标度法^[3]进行三角模糊数打分, 得到机载网络安全风险评估指标体系中指标 b_1, b_2, b_3 的模糊打分, 具体如表 1 所示。

表1 b_1, b_2, b_3 的模糊打分

Tab. 1 Fuzzy scores of b_1, b_2, b_3

a	b_1	b_2	b_3
b_1	(1,1,1)	(1,3/5,7/6)	(2/3,6/7,2)
	(1,1,1)	(1,4/5,3/2)	(1,5/3,7/6)
	(1,1,1)	(5/4,3/5,7/6)	(3/2,5/6,5/4)
	(1,1,1)	(7/6,2/3,7/5)	(2/3,5/4,7/6)
	(1,1,1)	(1,6/7,1)	(1,5/4,7/6)
b_2	(6/7,5/3,1)	(1,1,1)	(3/5,6/7,5/7)
	(2/3,5/4,1)	(1,1,1)	(1,3/2,3/5)
	(6/7,5/3,4/5)	(1,1,1)	(1,5/4,1)
	(5/7,3/2,6/7)	(1,1,1)	(6/7,1,5/7)
	(1,7/6,1)	(1,1,1)	(1,5/6,7/6)

b_3	(1/2,7/6,3/2)	(7/5,7/6,3/5)	(1,1,1)
	(6/7,3/5,1)	(5/3,2/3,1)	(1,1,1)
	(4/5,6/5,3/2)	(1,4/5,1)	(1,1,1)
	(7/6,4/5,3/2)	(7/5,1,7/6)	(1,1,1)
	(6/7,4/5,1)	(6/7,6/5,1)	(1,1,1)

例如, 对指标 b_1, b_2 相对于指标 a 的重要程度进行三角模糊数打分, 五位专家共给出 5 个打分结果, 其中一位专家的打分结果为(1,3/5,7/6)。

使用相同方法, 对属性层 c 中 c_1, c_2, c_5 两两相对于准则层 $b_1; c_2, c_3, c_4$ 两两相对于准则层 $b_2; c_2, c_3, c_5$ 两两相对于准则层 b_3 的重要程度进行三角模糊数打分。

(2) 构造实际综合云模型模块

在对机载网络安全划分风险等级时, 采用十分制, 分数从高到低, 代表风险由大到小。本文根据信息系统安全等级保护基本要求^[12]和定级指南^[13]及专家意见, 将机载网络安全风险等级 l 划分为 5 个, 用 l_1 表示“低风险”、 l_2 表示“较低风险”、 l_3 表示“中等风险”、 l_4 表示“较高风险”、 l_5 表示“高风险”。每个等级的区间和分值分别为: 低风险 [0,2]; 较低风险[2,4]; 中等风险[4,6]; 较高风险[6,8]; 高风险[8,10]。采用这种等级划分, 5 位专家对机载网络安全风险评估指标体系属性层 c 的指标 $c_1 \sim c_5$ 进行评估, 数据如表 2 所示。

表2 专家评估数据

Tab. 2 Expert assessment data

专家	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
1	4.35	6.27	1.52	3.68	2.58
2	5.43	3.45	4.68	5.57	3.27
3	3.77	4.82	3.49	2.56	1.44
4	4.33	2.67	1.91	0.97	4.32
5	3.03	4.65	2.28	2.42	3.66

3.2 实验过程

采用 3.1 节的实验数据数据进行仿真实验的具体过程主要分为两部分, 分别是计算综合权重、构造实际综合云模型。

(1) 计算综合权重

根据表 2 中的数据, 计算 5 位专家的打分平均值, 构建模糊判断矩阵如表 3 所示:

表3 模糊判断矩阵

Tab. 3 Fuzzy judgment matrix

a	b_1	b_2	b_3
b_1	(1,1,1)	(1.08,0.70,1.25)	(0.97,1.17,1.35)
b_2	(0.82,1.45,0.93)	(1,1,1)	(0.89,1.05,0.87)
b_3	(0.84,0.91,1.30)	(1.26,0.97,0.95)	(1,1,1)

对表 3 的数据进行去模糊化处理得到判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.86 & 1.17 \\ 1.26 & 1.00 & 0.99 \\ 0.96 & 1.01 & 1.00 \end{bmatrix}, \text{ 经检验符合一致性要求}^{[14]}.$$

由 2.2 节过程 1) 计算准则层指标 b_1, b_2, b_3 的相对权重 $w(a_{-}b_k)$ 分别为: $w(a_{-}b_1)=0.40$, $w(a_{-}b_2)=0.34$, $w(a_{-}b_3)=0.26$ 。

其次分别构造的 c 层指标 c_1, c_2, c_3 相对于 b 层指标 b_1 的判断矩阵 A^1 , c_2, c_3, c_4 相对于 b_2 的判断矩阵 A^2 ; c_2, c_3, c_5 相对于 b_3 的判断矩阵 A^3 :

$$A^1 = \begin{bmatrix} 0.54 & 0.18 & 0.28 \\ 0.56 & 0.19 & 0.25 \\ 0.54 & 0.20 & 0.26 \end{bmatrix}, \quad A^2 = \begin{bmatrix} 0.26 & 0.35 & 0.39 \\ 0.24 & 0.33 & 0.43 \\ 0.27 & 0.32 & 0.41 \end{bmatrix},$$

$$A^3 = \begin{bmatrix} 0.31 & 0.27 & 0.42 \\ 0.42 & 0.36 & 0.22 \\ 0.23 & 0.47 & 0.30 \end{bmatrix}.$$

由 2.2 节过程 2) 计算得属性层 c 指标分别相对于准则层指标 b_1, b_2, b_3 相对权重 $w(b_k_{-}c)$ 为: $\omega(b_{1-}c)=(0.3320, 0.3646, 0.3034)$, $\omega(b_{2-}c)=(0.2451, 0.4882, 0.2667)$, $\omega(b_{3-}c)=(0.1851, 0.3494, 0.4655)$ 。

根据 2.2 节过程 3) 可得 c 层 5 个指标相对于 a 层指标综合权重向量 $(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)=(0.1328, 0.2773, 0.2568, 0.0907, 0.2424)$ 。

(2) 构造实际综合云模型

构造实际综合云模型主要有三个步骤: 生成实际综合云模型、生成标准云模型以及计算相似度:

步骤一 生成实际综合云模型

根据表 2 中的专家评估数据, 由逆向云生成算法对每一位专家的评估数据, 计算得到一个属性云数字特征, 这里共 5 个属性云的数字特征 (Ex_p^c, En_p^c, He_p^c) , 如表 4 所示:

表4 属性云数字特征

Tab. 4 Number characteristics of attribute cloud

数字特征	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Ex_p^c	4.18	4.37	2.77	3.04	3.01
En_p^c	0.88	1.38	1.29	1.71	1.10
He_p^c	0.53	0.73	0.52	0.95	0.57

由 2.3 节过程 2) 计算实际综合云数字特征 (Ex^0, En^0, He^0) 为: $(3.46, 1.27, 0.63)$ 。

步骤二 生成标准云模型

根据 3.1 节划分的 5 个风险等级以及 2.3 中过程 3) 计算 5 个标准云的数字特征 (Ex_q^1, En_q^1, He_q^1) 为: 低风险云 $(0, 0.67, 0.05)$; 较低风险云 $(3, 0.67, 0.05)$; 中等风险云 $(5, 0.67, 0.05)$; 较高风险云 $(7, 0.67, 0.05)$; 高风险云 $(10, 0.67, 0.05)$ 。为了更好地显示实验结果, 本文中 He 的取值不宜过大, 参考文献[15], 本文 He 取 0.05。

生成实际综合云模型与标准云模型对比图如图 3 所示。

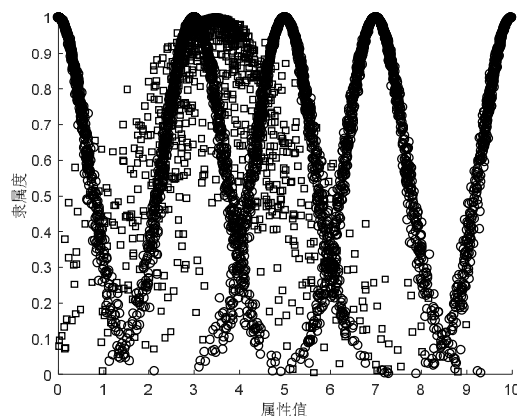


图3 实际综合云模型与标准云模型对比

Fig. 3 Contrast of practical integrated cloud model and standard cloud model

其中由“o”组成的 5 个云滴图形分别对应 5 个标准云, 连续的 5 个标准云构成了标准云模型; 由“□”组成的云滴为实际综合云模型。由图中对比可以看出, 实际综合云模型与标准云模型中“较低风险云”最为接近, 从而确定该机载网络安全风险为 l_2 “较低”等级。

步骤三 计算相似度

根据 2.3 节过程 4) 计算图 3 中实际综合云模型与标准云模型的相似度, 结果如表 5 所示:

表5 实际综合云模型与标准云模型相似度

Tab. 5 Similarity of practical integrated cloud model and standard cloud model

各标准云	相似度
低风险云	0.04952
较低风险云	0.84174
中等风险云	0.49082
较高风险云	0.04118
高风险云	0.00002

从表中可以看出, 实际综合云模型与标准云模型相似度最大的是“较低风险云”, 从而确定该机载网络安全风险为 l_2 “较低”等级, 与图 3 中两个模型的对比结果一致。

3.3 实验结果与对比分析

为了验证本文提出的改进 FAHP-云模型算法能有效解决指标权重难以客观准确计算, 评估结果单一, 可描述性差等问题, 分别同已有的网络安全风险评估方法, 如层次分析法-灰色聚类算法^[2], AHP-云模型算法^[3]进行比较。

1) 使用本文的实验数据, 文献[2]采用层次分析法-灰色聚类算法计算的风险值为 $F=4.2$, 风险等级为 l_2 “较低”, 与本文算法得到结果一致, 说明本文算法合理有效。但文献[2]的评估结果只能得到风险等级。而本文的改进 FAHP-云模型算法通过引入云模型, 能够在判断机载网络安全风险等级的同时, 清晰地看到云模型对比图和相似度数值的定性和定

量结果。而且改进 FAHP-云模型算法通过综合实际云模型与标准云模型的对比,显示出评估过程中的不确定性和随机性,为下一步防护工作的开展提供参考。

2) 使用本文的实验数据,文献[3]采用层次分析法-云模型算法计算得到的实际综合云模型的数字特征是(3.74,1.86,1.05),本文提出的改进 FAHP-云模型算法得到的实际综合云模型的数字特征是(3.46,1.27,0.63)。其中,期望 Ex 表示云模型的分布中心,可以看出两个实际综合云模型的分布中心更接近于“较低风险云”;熵 En 反映评估指标的模糊度,超熵表示评估指标的不确定度,本文算法计算得到的 En 和 He 更小,指标的模糊度和不确定度也更低。

由这两个数字特征分别生成的相应实际综合云模型如图 4 所示:其中“△”组成的图形为使用文献[3]层次分析法-云模型算法得到的实际综合云模型。从上图可以看出本文使用的改进 FAHP-云模型算法结果的模糊度和不确定度均小于文献[3]中的算法,与数字特征反映出的结果相同,提高了评估的准确性和可靠性。并且从图中无法准确判断实际综合云模型与标准云模型中“较低风险云”、“中等风险云”哪个更接近。

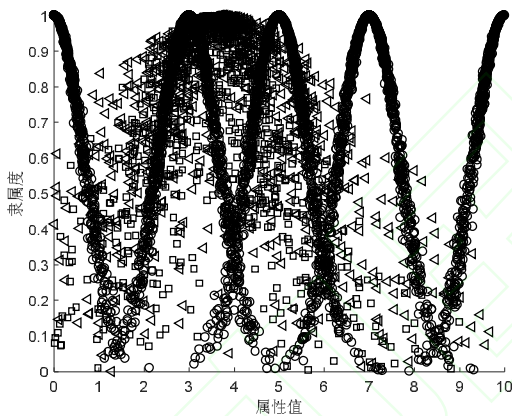


图4 文献[3]算法与本文算法生成实际综合云模型对比

Fig. 4 Contrast of actual integrated cloud model generated by the algorithm and the 3rd's

文献[3]算法的实际综合云模型与标准属性云的相似度结果如表 6 所示。

表6 文献[3]算法实际综合云模型与标准云模型相似度

Tab. 6 similarity of actual integrated cloud model generated by the algorithm and the 3rd's

各标准云	相似度
低风险云	0.16184
较低风险云	0.88168
中等风险云	0.76924
较高风险云	0.23758
高风险云	0.00677

从表中可以看出,“较低风险云”比“中等风险云”存在两个等级的相似度结果接近,可能无法准确判断风险等级的情况。

在使用本文改进的 FAHP-云模型算法计算得到的综合权重向量为: $(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (0.1328, 0.2773, 0.2568, 0.0907, 0.2424)$, 各指标综合权重区分明显,但使用文献[3]算法进行计算的过程中,得到的综合权重向量为 $(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (0.1928, 0.2273, 0.2168, 0.1807, 0.2024)$, 可以看出综合权重区别较小,无法区分机载网络安全风险评估体系中属性层指标的相对重要程度。

4 结语

本文针对机载网络软件高度密集,资源高度共享和数据高度融合等特点,建立了一种适用于机载网络安全风险评估的指标体系,并提出改进 FAHP-云模型风险评估方法,充分考虑各指标在评估中的比重,克服随机性的影响,提高了评估的可靠性和科学性;同时引入云模型,在得到定量数值结果的同时定性显示评估过程中的模糊性和随机性,避免了单一阈值分类的结果表示,或过分依赖某种需要精确计算的数学模型,使评估结果更加直观可靠,提高了模型的可用性。但对于指标的分析仍主要建立在专家的主观经验上,并且当指标增多或变化时需要重新构造评估指标体系进行计算,接下来的工作将对不同机载网络进行分析并完善评估模型。

参考文献

[1] KWAK K J, SAGDUYU Y, DENG H, et al. Airborne network evaluation: challenges and high fidelity emulation solution[J]. Communications Magazine IEEE, 2014, 52(10):30-36.

[2] 傅建新, 黄联芬, 姚彦. 基于层次分析法-灰色聚类的无线网络安全风险评价方法[J]. 厦门大学学报(自然版), 2010, 49(5):622-626.(FU J X, HUANG L F, YAO Y. Risk Evaluation of wireless network security based on ahp-grey clustering method [J]. Journal of Xiamen University (Natural Edition), 2013, 49(16): 232-235.)

[3] 刘东飞. 基于 AHP 与云模型的软件过程绩效评价方法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(3):893-898.(LIU D F. Software process performance evaluation based on AHP and cloud model[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(3):893-898.)

[4] 李林, 刘毅, 杨骏. 无线网络安全风险评价方法的应用研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(9):147-150.(LI L, LIU Y, YANG J. Application of Wireless Network Safety Risk Assessment[J]. Computer Simulation, 2011, 28(9):147-150.)

[5] XU Z, LIAO H. Intuitionistic Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(4):749-761.

[6] 李鹏宇. 基于层次分析法的信息安全风险量化方法研究[D]. 江西财经大学, 2012.(LI P Y. Research on the Quantitative Methods of Information Security Risk Assessment Based on AHP[D]. Jiangxi university of Finance and Economics, 2012.)

[7] 杨玉丽, 彭新光, 付东来. 基于云模型的主观信任评估机制[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(12):4151-4155.(YANG Y L, PENG X G, FU D L. Subjective trust evaluation mechanism based on cloud model[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(12):4151-4155.)

- [8] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995,32(6):15-20.(LI D Y, MENG H J, SHI X M. [J]. Computer Research and Development, 1995,32(6):15-20.)
- [9] 张双, 孔德岐, 李晓东. 机载系统安保风险评估方法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(16):232-235.(ZHANG SH, KONG D Q, LI X D. Security risk assessment methodology for airborne system[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(16):232-235.)
- [10] 李家豪, 刘婧, 吴泽群, 等. 基于模糊层次分析法的社交编程网站开发者评估方法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(1):141-146.(LI J H, LIU J, WU Z Q. Evaluation method of developers in Github based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Computer Application Research, 2016, 33(1):141-146.)
- [11] 张仕斌, 许春香. 基于云模型的信任评估方法研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(2):422-431.(ZHANG S B, XU CH X. Study on the Trust Evaluation Approach Based on Cloud[J]. Computer Journal, 2013, 36(2): 422-431.)
- [12] 国家信息安全标准化技术委员会. GB/T 22239-2008 信息安全技术信息系统安全等级保护基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 国家信息安全标准化技术委员会. GB/T 22240-2008 信息安全技术信息系统安全等级保护定级指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 黄广远, 徐程扬, 朱解放, 等. 基于层次分析法和逼近理想解排序法的高校校园绿地景观评价[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(9):113-115. (HUANG G Y, XU CH Y, ZHU J F. Based on the analytic hierarchy process and the approach to the ideal sorting method, the campus green landscape evaluation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(9):113-115.)
- [15] 张豫翔, 王肖戎, 吴明功, 等. 基于模糊层次分析法和云模型的非常规情况下空管运行风险评估[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4):42-47. (ZHANG Y X, WANG X R, WU M G. Evaluation of the unconventional

operational risks for the air traffic control based on the fuzzy hierarchical analysis process and the cloud model[J]. Journal of Security and Environment, 2016, 16(4):42-47.)

This work is partially supported by the Civil Aviation Safety Capacity Building Project(AADSA0018); Civil Aviation Administration Science and Technology Innovation Guidance Fund (MHRD20160109); Central University Fund of CAUC (31220106A001).

LI Guo, born in 1966, Ph. D., professor. His research interests include research on civil aviation intelligent information processing and aviation Internet of things, key technologies of aviation logistics.

LI Jingwen, born in 1991, M. S. candidate. Her research interests include airborne information system, network security.

WANG Jing, born in 1980, Ph. D., professor. Her research interests include civil aviation information system, network security.

XU Junjie, born in 1985, Ph. D., professor. Her research interests include civil aviation information system, network security.

WANG Peng, born in 1982, Master, Research associate. His research interests include civil aircraft system security assessment, airborne electronic hardware.