

基于属性圆的多属性决策云模型构建与可靠性分析应用

崔铁军^{1,2,3} 李莎莎^{1,2} 王来贵⁴

(辽宁工程技术大学安全科学与工程学院 阜新 123000)¹

(矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室 阜新 123000)²

(大连交通大学辽宁省隧道与地下结构工程技术研究中心 大连 116028)³

(辽宁工程技术大学力学与工程学院 阜新 123000)⁴

摘 要 为了使云模型能直观方便地表示以及计算多属性决策问题,并且适应专家给出的范围数据,对提出的属性圆表示多属性的方法进行了改造,从而通过属性圆来计算云模型的特征参数;给出了改造后属性圆的定义、性质和绘制过程,以及如何通过属性圆计算表示某决策级别的云模型特征参数,包括:定义决策系统、属性归一化、属性圆特征及性质、属性圆面积求法、基于属性圆的云模型计算;通过实例给出了云模型的计算过程和应用方案。根据数据处理和专家分析,计算得到表示系统可靠性风险为可接受决策级别的云模型,进而构成决策云集合,便可用于实际系统的可靠性级别多属性决策。

关键词 系统工程,多因素决策,云模型,属性圆,可靠性分析

中图法分类号 N94,TP18 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.05.020

Multi-attribute Decision Making Model Based on Attribute Circle and Application of Reliability Analysis

CUI Tie-jun^{1,2,3} LI Sha-sha^{1,2} WANG Lai-gui⁴

(College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)¹

(Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Fuxin 123000, China)²

(Tunnel & Underground Structure Engineering Center of Liaoning, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)³

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)⁴

Abstract In order to make the cloud model can be easily and conveniently used to express and calculate the problem of multi-attribute decision, and adapt to the range data that the expert gives, this paper proposed an improved method to transform the attribute circle, and then calculated the characteristic parameters of the cloud model by the attribute circle. The definition, property and drawing process of the attribute circle were given, and how to calculate the characteristic parameters of the cloud model of a decision level by using attribute circle was given, including defining the decision system, attribute normalization, attribute circle feature and property, calculation method of attribute circle area and cloud model calculation based on attribute circle. Through an example, the process and application of cloud model were given. According to the data processing and expert analysis, the acceptable decision level of the cloud model was obtained for the reliability risk of the system. And then this paper made the decision, which can be used to make the reliability level of multiple attribute decision in the actual system.

Keywords System engineering, Multi-factor decision making, Cloud model, Attribute circle, Reliability analysis

多属性决策问题一直是学界研究的热点。该问题一般可分为两个部分:1)基础数据;2)处理方法。基础数据问题一般来源于现场数据和专家数据。现场数据包括各种形式的定性数据和定量数据,这些数据往往累计时间较长,数据量较大,对这些数据的处理是一项较大的工程;专家数据一般较少,是通过专家实地考察和分析得到的,数据的可靠性依靠专家个

人的经验和水平,其中难免掺杂着主观因素。所以对于基础数据的处理方法,一方面要适应大数据分析,另一方面要能处理主观因素,从而适应数据的模糊性和随机性。马庆功^[1,4]、姜广田^[2]、林杨等^[3]、王震等^[5]、刘满凤等^[6]从不同角度对多属性且带有主观模糊性数据的系统的决策方案进行了研究,但仍不能完全且直观地表示不同方案之间的决策关系,也不

到稿日期:2016-04-28 返修日期:2016-08-17 本文受国家自然科学基金(51050003,51674127),辽宁省自然科学基金(201202022)资助。
崔铁军(1983—),男,博士后,讲师,主要研究方向为安全理论、数值模拟、算法, E-mail: ctj_159@163.com(通信作者);李莎莎(1988—),女,博士生,主要研究方向为安全系统工程、系统可靠性;王来贵(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为岩石力学系统稳定性理论、环境岩石学, E-mail: wangyande2421@163.com。

能适应多属性、多专家、多种类型数据,并且缺乏模糊性、随机性、容错性。

对于基础数据中包含的模糊性、随机性以及定性定量转化问题,目前适应性较好的模型是云模型。云模型^[7]是李德毅院士于 20 世纪 90 年代提出的一种能用定性语言与定量数值描述不确定性转换的模型,其应用实效得到了认可和推广。云模型作为定性定量转换的不确定性模型,能够充分体现语言概念的随机性和模糊性,是实现定性定量转换的有效工具^[8]。云模型的研究已取得了一些成果^[9-10],但云模型也存在着许多缺点,目前文献中主要使用一维和二维云模型,因为三维云模型的图形化表达很困难,这样就限定了云模型只能处理两个因素或属性。对于决策问题,一般都是多属性条件下的决策。同时考虑到专家数据的特点,可能得到的数据是一个区间,因为专家不能界定不同决策级别的具体分割点,而只能给出一个较小的范围,所以在计算云模型特征参数时,其基础数据可能并不是一个点,而可能是一个范围(如所举实例)。在多属性情况下如何将这范围数据转化为云模型是一个需要解决的问题。

为解决上述问题,根据对决策算法的研究^[11-14],提出将实际数据和专家意见中属于某个决策级的被分析对象的属性绘制于属性圆中,进而通过所提属性圆表示法来计算表示该决策级的云模型特征参数。文中列举了一电气系统的可靠性风险级别为可接受的云模型计算过程,并进行了应用说明。

1 云模型

1.1 云模型及其数字特征

设 U 为一个用精确值表示的定量论域, C 为 U 上的定性概念,若定量数值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的隶属度 $\mu(x) \in [0, 1]$,是具有稳定倾向的随机数 μ ,即 $\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ 。则 x 在论域 U 上的分布称为云,记作 $C(x)$,每个 x 称为一个云滴($x, \mu(x)$)。

云的数字特征反映了定性概念的定量特征,用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 表征,记作 $C(Ex, En, He)$ 。期望 Ex 表示论域空间最具代表性的定性概念值,反映了论域空间的中心值;熵 En 表示定性概念模糊性和随机性的综合度量,一方面反映了论域空间中可被定性概念接受的云滴的取值范围,另一方面又能反映云滴的离散程度;超熵 He 描述熵的不确定性度量,反映了论域空间中云滴的凝聚程度, He 越大,云滴的厚度就越大^[15]。

1.2 云发生器

生成云滴的算法或硬件称为云发生器,包括正向云发生器、逆向云发生器、 X 条件云发生器和 Y 条件云发生器。正向云发生器实现了预言值表达的定性信息中获得定量数据的范围和分布规律,具有前向、直接的特点;逆向云发生器将一定数量的精确数值有效地转换成恰当的定性语言值,具有逆向、间接的特点。这里采用正向云发生器,其生成所需数量的云滴过程如下:

- 1)生成以 En 为期望、 He 为标准差的正态随机数 En' ;
- 2)生成一个以 En 为期望、 En' 的绝对值为标准差的正态随机数 x_i , x_i 称为论域空间 U 的一个云滴;

3)计算 $\mu_i = \exp[-(x_i - E_x)^2 / (2(En')^2)]$,则 μ_i 为 x_i 关于 C 的隶属度;

4)循环 1)–3),直到生成 n 个云滴为止。

1.3 定量数据云化方法

正向云模型对影响巷道冒顶风险评价指标的定量数值进行云化。云模型的数字特征计算公式^[7]如式(1)所示。

$$\begin{cases} Ex_i = (a_i + b_i) / 2 \\ En_i = (b_i - a_i) / 6 \\ He_i = i \end{cases} \tag{1}$$

其中, i 为常数,可以根据指标变量本身的模糊阈值具体调整。

2 基于属性圆的多属性云模型构建

因素是分析事物属性与因果关联的要素,其被数学地定义为一种映射。它将一个对象(具体事物)映射成为一个属性值(用自然语言中的形容词来描述)的映射称为质映射;同时,映射成为个性态(用有限维欧氏空间中的实向量来表示)的映射称为量映射。例如,身高是一个映射,它把一个对象张三映射成性态‘很高’,同时,也映射成一个量态 1.8m,如图 1 所示^[16]。

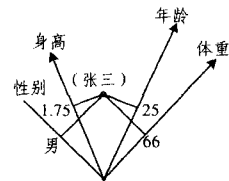


图 1 人的因素空间性态表述

图 1 能表示因素空间的基本建立思想,即对象集中的某一个对象(一个人)与这个对象属性之间的关系,只要属性确定下来,那么一个实例化的人就确定了。但实际问题的研究对象往往属性较多,使用图 1 所示的形式,其属性的大小、方向及它们和属性之间的关系难以确定且不直观。本文提出属性圆的概念,在二维平面内表示无数多个属性。为了使云模型具有处理范围数据和多属性决策的能力,对上述属性圆定义进行改造。以某个决策等级 x_1 为例,来说明属性圆的定义、性质和绘制过程,以及如何通过属性圆计算表示该决策等级的云模型特征参数。其属性圆绘制如图 2 所示。

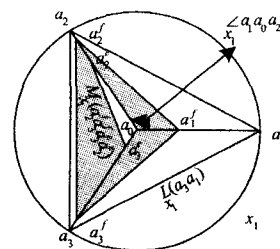


图 2 多属性云模型中的属性圆

定义 1 设系统 (U, A, C) 为决策系统, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为决策级别集合, m 为级别数量; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 为属性集, n 为属性数量; C 表示云模型集合; a_0 表示该属性值域的最小值, a_q 表示最大值, a'_q 表示对于一个决策级的该属性

的最大值, a_q^e 表示对于一个决策级的该属性的最小值; $i \in \{1, \dots, m\}; q \in \{1, \dots, n\}$ 。

定义 2(属性的归一化) a_0, a_q, a_q^f, a_q^e 是经过归一化处理的, 即 $a_0=0, a_q=1, a_q^f$ 和 a_q^e 则是按照对应比例确定的, 且 $0 \leq a_q^e \leq 1, 0 \leq a_q^f \leq 1, a_q^e \leq a_q^f$ 。

定义 3 属性圆是一个单位圆, 即半径为 1, 每个属性圆代表一个决策级别。属性圆周上某一点 a_q 与圆心 a_0 的连线为属性域线(下文简称“域线”)代表了该决策级的一个属性范围, 域线长为 1。 a_q^e, a_q^f 在域线上, a_q^e 表示属性某种状态域值的终点, a_q^f 表示属性某种状态域值的起点。用 $L(\kappa_1, \kappa_2)$ 表示在属性圆中的线段, κ_1, κ_2 表示属性圆中任意的两个点, 如 a_q 域线表示为 $L(a_q, a_0)$ 。属性角 $\angle_{x_1} a_1 a_0 a_2$ 为域线 $L(a_q, a_0)$ 与 $L(a_{q+1}, a_0)$ 之间的夹角。属性圆中的面积用 $M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0)$ 表示, $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n$ 表示属性圆中任意的多个点, 这些点按出现顺序能组成多边形。属性圆定义规则如式(2)所示。

$$M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0) = \begin{cases} M(\kappa_1, \kappa_2, a_0) + \dots + M(\kappa_{n-1}, \kappa_n, a_0), \kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n \in [a_1^f, \dots, a_q^f], [a_1^e, \dots, a_q^e] = 0 \\ M(\kappa_1, \kappa_2, a_0) + \dots + M(\kappa_{n-1}, \kappa_n, a_0) - [M(\kappa_1', \kappa_2', a_0) + \dots + M(\kappa_{n-1}', \kappa_n', a_0)], \\ \kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n \in [a_1^f, \dots, a_q^f], \kappa_1', \kappa_2', \dots, \kappa_n' \in [a_1^e, \dots, a_q^e] \neq 0 \\ M(\kappa_1, \kappa_2, a_0) = \frac{1}{2} L(\kappa_2', a_0) L(\kappa_1', a_0) \sin \angle \kappa_1 a_0 \kappa_2 \\ M(\kappa_1', \kappa_2', a_0) = \frac{1}{2} [L(\kappa_2', a_0) L(\kappa_1', a_0)] \sin \angle \kappa_1' a_0 \kappa_2', [a_1^e, \dots, a_q^e] \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

定义 5(基于属性圆的云模型) 通过对现场数据和专家意见进行综合分析, 对多属性评价问题中的不同级别的情况进行归类, 认为属于同一级别情况的所有属性值组合应绘制于同一属性圆中。使用上述属性圆的性质来确定该级别的云模型特征参数。设某一决策级别为 x , 经过数据整理认为被评价对象有 T 种情况属于该级别, 这 T 种情况在属性圆中的面积为 $M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0), t \in [0, T]$ 。根据云模型特征参数的定义^[7], 期望值 Ex 用以表示论域的中心值, 是最能代表定性概念的点。在属性圆中, 这个中心值就是属于该决策级别的 T 种情况在属性圆中面积的平均值。熵 En 反映了云滴的离散程度以及在论域中可被表达的定性概念接受的数值范围。在属性圆中, 离散程度为 T 种情况的属性圆面积分别与 Ex 的差的平均值, 这个平均值代表了属于该决策级别面积值可能的范围。超熵 He 是对熵的不确定性度量, 由熵的模糊性和随机性共同决定, 在属性圆中, 其表达了相同隶属度下面积的最大波动范围。综上, 云模型 $C(Ex, En, He)$ 的特征参数的计算如式(4)所示。

$$\begin{cases} Ex = [\sum_{t=1}^T M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0)] / T \\ En = \sum_{t=1}^T |Ex - M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0)| / T \\ He = \text{Max}[\text{Max}_x |M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0) - M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0)|, \\ \text{Max}_x |M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0) - M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0)|], \\ \begin{matrix} t_1 & t_2 \\ M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0), & M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0) > Ex, \\ t_3 & t_4 \\ M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0), & M_x(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0) < Ex \end{matrix} \\ t, t_1, t_2, t_3, t_4 \in [1, 2, \dots, T] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L(a_1, a_0) = L(a_2, a_0) = \dots = L(a_n, a_0) = 1 \\ \angle_{a_1} a_0 a_2 = \angle_{a_2} a_0 a_3 = \dots = \angle_{a_{n-1}} a_0 a_n \\ \angle_{a_1} a_0 a_2 + \angle_{a_2} a_0 a_3 + \dots + \angle_{a_{n-1}} a_0 a_n = 360^\circ \\ 0 \leq a_q^e \leq 1, 0 \leq a_q^f \leq 1, a_q^e \leq a_q^f, [a_q^e, a_q^f] \subseteq L(a_q, a_0) \end{cases} \quad (2)$$

$L(a_q^e, a_q^f)$ 或 $L(a_q^e, a_q^f)$ 表示决策级 x_i 在属性 a_q 上作用的特征范围。 $L(a_q^e, a_q^f)$ 越大, 属性 a_q 对决策级 x_i 的影响越小; $L(a_q^e, a_q^f)$ 越小, 属性 a_q 对决策级 x_i 的影响越大。

定义 4(属性圆面积求法) $M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0)$ 可分解为多个两属性之间面积的总和, 即 $M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0) = M(\kappa_1, \kappa_2, a_0) + \dots + M(\kappa_{n-1}, \kappa_n, a_0)$, 图 2 中 $M(a_1^f, a_2^f, a_3^f) = M(a_1^f, a_2^f, a_0) + M(a_2^f, a_3^f, a_0) + M(a_3^f, a_1^f, a_0)$, 实际上其中 $M(a_2^f, a_3^f, a_0)$ 应该为 $M(a_2^f, a_3^f, a_0^e) = M(a_3^f, a_1^f, a_0) - M(a_2^e, a_3^e, a_0)$ 。所以 $M(\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_n, a_0)$ 可表示为式(3)。

3 系统可靠性分析应用

这里研究某电器的系统可靠性决策问题。该电器的系统可靠性主要受电压、温度和湿度的影响, 即属性集 $A = \{a_1, a_2, a_3\}$, a_1 为电压, a_2 为温度, a_3 为湿度。其可能变化的最大范围是 $[a_0, a_1] = [12, 20] \text{V}$, $[a_0, a_2] = [20, 30]^\circ\text{C}$, $[a_0, a_3] = [70, 90]\%$ 。

经过相关数据处理和专家分析, 得到可靠性风险级别为可接受的组合为 136 组, 即这 136 组状态可诠释可接受风险级别的系统工作状态。针对其中一组状态计算其对应属性圆的面积 $M_x(a_1, a_2, \dots, a_n, a_0)$, x 为可接受决策级别, i 表示某一组状态。对于该状态 $[a_1^f, a_1^e] = [14, 16] \text{V}$, $[a_2^f, a_2^e] = [24, 27]^\circ\text{C}$, $[a_3^f, a_3^e] = [78, 83]\%$ 。那么 $L(a_1^f, a_0) = \frac{16-12}{20-12} = 0.5$, $L(a_1^e, a_0) = \frac{14-12}{20-12} = 0.25$, 同理 $L(a_2^f, a_0) = \frac{27-20}{30-20} = 0.7$, $L(a_2^e, a_0) = \frac{24-20}{30-20} = 0.4$, $L(a_3^f, a_0) = \frac{83-70}{90-70} = 0.65$, $L(a_3^e, a_0) = \frac{78-70}{90-70} = 0.4$ 。根据式(3), 因为 $[a_1^f, a_2^f, a_3^f] \neq 0$, 所以 $M_x(a_1, a_2, a_3, a_0) = M_x(a_1^f, a_2^f, a_0) + M_x(a_2^f, a_3^f, a_0) + M_x(a_1^f, a_3^f, a_0) - [M_x(a_1^f, a_2^e, a_0) + M_x(a_2^e, a_3^f, a_0) + M_x(a_1^f, a_3^e, a_0)]$ 。 $M_x(a_1^f, a_2^f, a_0) = \frac{1}{2} L(a_1^f, a_0) L(a_2^f, a_0) \sin \angle a_1^f a_0 a_2^f = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 0.7 \sin 60^\circ = 0.1515$, 应注意 $\angle a_1^f a_0 a_2^f = \angle a_1^e a_0 a_2^e = \angle a_1 a_0 a_2 = 60^\circ$, 同理得到 $M_x(a_1^f, a_2^e, a_0) = 0.1970$, $M_x(a_2^e, a_3^f, a_0) = 0.1407$, $M_x(a_1^f, a_3^e, a_0) = 0.043$, $M_x(a_2^e, a_3^e, a_0) = 0.069$, $M_x(a_1^e, a_3^f, a_0) = 0.043$ 。

代入得 $\hat{M}(a_1, a_2, a_3, a_0) = 0.3342$ 。

根据上述步骤可分别计算决策级别 x 为可接受级别的 136 种系统状态的 $\hat{M}(a_1, a_2, a_3, a_0), i=1, \dots, T, T=136$ 。根据式(4)可计算可靠性风险等级为可接受的云模型 $C_{x_1=\text{可接受}}$ (Ex, En, He), $Ex = (0.3342 + 0.4347 + \dots)/136 = 0.3355$, $En = (|0.3355 - 0.3342| + |0.3355 - 0.4347| + \dots)/136 = 0.094$, $He = \text{Max}(\text{Max}|0.3647 - 0.3356|, \text{Max}|0.3325 - 0.3148|) = 0.0291$ 。所以最终得到在电压、温度和湿度的影响下,系统可靠性风险是可接受的云模型为 $C_{x_1=\text{可接受}}$ (0.3355, 0.094, 0.0291)。

同理可通过实际数据和专家意见采集有条件可接受、不希望和不可接受决策级别的对应系统状态,来确定这些决策级别的云模型,进而构成决策集合 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, $x_1 = \text{可接受}$, $x_2 = \text{有条件可接受}$, $x_3 = \text{不希望}$, $x_4 = \text{不可接受}$, 决策云集合 $C = \{C_{x_1}, C_{x_2}, C_{x_3}, C_{x_4}\}$ 。利用这个决策云集合便可判定该电气系统在某种电压、温度和湿度状态下隶属于各决策级的程度。当然这个判定过程是通过云相似或云距离来确定的,此处不再进行详细叙述,可参见相关文献。

结束语 为了使云模型能方便有效地进行多属性决策,并能适应专家所提供的范围数据,对属性圆模型进行了改造,使其可以适应上述数据特点,并能计算云模型特征参数。主要结论如下:

1) 论述了云模型对多属性决策存在的问题。云模型无法直观地表达高维属性云图;同时专家不能界定不同决策级别的具体分割点,而只能给出一个较小的范围,但云模型不能处理范围性数据。

2) 给出了属性圆的定义、性质和绘制过程,同时也给出了如何通过属性圆来计算表示某决策等级的云模型特征参数。属性圆对多属性对象的表示来源于因素空间理论。这里将所提出的属性圆根据云模型的特点进行了改造,包括:定义决策系统、属性归一化、属性圆特征及性质、属性圆面积求法、基于属性圆的云模型计算。

3) 通过实例给出了基于属性圆的云模型计算过程和应用方案,研究了某电器系统可靠性决策问题。该电器的系统可靠性主要受到电压、温度和湿度的影响。根据数据处理和专家分析,计算了属于可靠性风险可接受决策级别下的一组状态的面积,进而计算属于该决策级别下的 136 组面积,得到表示可接受决策的云模型为 $C_{x_1=\text{可接受}}$ (0.3355, 0.094, 0.0291)。同理可得到有条件可接受、不希望和不可接受决策级别云模型,构成决策云集合 $C = \{C_{x_1}, C_{x_2}, C_{x_3}, C_{x_4}\}$, 便可用于实际系统的可靠性级别决策。

参 考 文 献

[1] MA Q G. Hesitant fuzzy multi-attribute group decision-making method based on prospect theory[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20150707.1527.001.html>. (in Chinese)
马庆功. 基于前景理论的犹豫模糊多属性群决策方法[J/OL].

<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20150707.1527.001.html>.
[2] JIANG G T. Method for Multiple Attribute Decision Making Considering Decision Maker's Dynamic Aspiration Under Bounded Rationality[J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(3): 20-26. (in Chinese)
姜广田. 有限理性条件下考虑决策者动态期望的多属性决策方法[J]. 运筹与管理, 2015, 24(3): 20-26.
[3] LIN Y, WANG Y M. Approach for multi-period and multi-attribute matching decision based on perceived expectation[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(6): 1628-1632, 1648. (in Chinese)
林杨, 王应明. 基于感知效用的多阶段多属性匹配决策途径[J]. 计算机应用, 2015, 35(6): 1628-1632, 1648.
[4] MA Q G. Generalized hesitant normal fuzzy information aggregation and their application to multi-attribute group decision making[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20150527.1053.001.html>. (in Chinese)
马庆功. 广义犹豫正态模糊信息集成及其多属性群决策[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20150527.1053.001.html>.
[5] WANG X, DANG Y G. Dynamic multi-attribute decision-making methods with three-parameter interval grey number[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1124.TP.20150520.1633.002.html>. (in Chinese)
王霞, 党耀国. 三参数区间灰数信息下的动态多属性决策方法[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1124.TP.20150520.1633.002.html>.
[6] LIU M F, REN H P. Intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making based on a new intuitionistic fuzzy entropy measure[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20150512.1039.034.html>. (in Chinese)
刘满凤, 任海平. 基于一类新的直觉模糊熵的多属性决策方法研究[J/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2267.N.20150512.1039.034.html>.
[7] 李德毅, 杜鹞. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
[8] LI J, WANG M W, XU P, et al. Classification of stability of surrounding rock using cloud model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 83-87. (in Chinese)
李健, 汪明武, 徐鹏, 等. 基于云模型的围岩稳定性分类[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 83-87.
[9] ZHANG J, CHEN Z Z, LIU D F. Stability evaluation of a rock slope based on the cloud model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(6): 44-50. (in Chinese)
张军, 陈征宙, 刘登峰. 基于云模型的岩质边坡稳定性评估研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 44-50.
[10] JIA X L, XU J L. Colud model-based seismic risk assessment of road in earthquake region[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(9): 1352-1358. (in Chinese)
贾兴利, 许金良. 基于云模型的地震区公路震害风险评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(9): 1352-1358.
[11] CHEN W, LU S C, CUI T J. Research on safety level of highway tunnel based on AHP-Extension synthesis method[J]. China Safety Science Journal, 2014, 44(7): 158-163. (in Chinese)

- 陈炜,路世昌,崔铁军. 基于 AHP 可拓综合方法的公路隧道安全等级判定研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(7): 158-163.
- [12] CUI T J, MA Y D, BAI R C. Selection of Blast Scheme Based on Coupling of Genetic Algorithm and Artificial Neural Network [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(2): 64-68. (in Chinese)
- 崔铁军, 马云东, 白润才. 基于 ANN 耦合遗传算法的爆破方案选择方法[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(2): 64-68.
- [13] HE F, LIU J, CUI T J. Selection of Blast Schemes Based on Both Structure Element Intuitive Fuzzy Set and Genetic Algorithm[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(12): 60-65. (in Chinese)
- 赫飞, 刘剑, 崔铁军. 基于结构元直接模糊集和 GA 算法的爆破方案选择[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 60-65.
- [14] CUI T J, MA Y D, BAI R C. Optimization of blast parameters using genetic algorithm optimized by artificial neural network [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(2): 258-262. (in Chinese)
- 崔铁军, 马云东, 白润才. 基于神经网络优化遗传算法的爆破参数优化[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 258-262.
- [15] LUO Y Q, XIA J B, CHEN T P. Network performance comprehensive evaluation model based on cloud model and entropy weight[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2009, 21(6): 771-775. (in Chinese)
- 罗铸霖, 夏靖波, 陈天平. 基于云模型和熵权的网络性能综合评估模型[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2009, 21(6): 771-775.
- [16] WANG P Z. Factor spaces and Factor Data-bases[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2013, 32(10): 1-8. (in Chinese)
- 汪培庄. 因素空间与因素库[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(10): 1-8.
- (上接第 110 页)
- [2] RISTENPART T, TROMER E, SHACHAM H, et al. Hey, you, get off of my cloud: exploring information leakage in third-party compute clouds[C]// ACM Conference on Computer and Communications Security(CCS 2009). 2009: 199-212.
- [3] ZHANG Y, JUELS A, OPREA A, et al. HomeAlone: Co-residency Detection in the Cloud via Side-Channel Analysis[C]// Security and Privacy. IEEE, 2011: 313-328.
- [4] ZHANG Y, JUELS A, REITER M K, et al. Cross-VM side channels and their use to extract private keys[C]// ACM Conference on Computer and Communications Security. 2012: 305-316.
- [5] KOCHER P C. Timing Attacks on Implementations of Diffie-Hellman, RSA, DSS, and Other Systems [C] // International Cryptology Conference on Advances in Cryptology. 1996: 104-113.
- [6] PERCIVAL C. Cache missing for fun and profit[J]. Proc of Bsd-can, 2005.
- [7] ACIİÇMEZ O. Yet another microarchitectural attack: exploiting I-cache[C]//Proceedings of the 2007 ACM Workshop on Computer Security Architecture. ACM, 2007: 11-18.
- [8] ACIİÇMEZ O, BRUMLEY B B, GRABHER P. New results on instruction cache attacks [C] // International Conference on Cryptographic Hardware & Embedded Systems. 2010: 110-124.
- [9] ACIİÇMEZ O, ÇETINKAYA K, SEIFERT J P. On the Power of Simple Branch Prediction Analysis[C]// 2007 ACM Symposium on Information, Computer and Communications Security (ASIACCS'07). 2006: 312-320.
- [10] ACIİÇMEZ O, SEIFERT J P. Cheap Hardware Parallelism Implies Cheap Security[C]// Workshop on Fault Diagnosis and Tolerance in Cryptography, 2007 (FDTC 2007). IEEE, 2007: 80-91.
- [11] GULLASCH D, BANGERTER E, KRENN S. Cache games- bringing access-based cache attacks on AES to practice[C]// In 32nd IEEE Symposium on Security and Privacy. 2011: 490-505.
- [12] TROMER E, OSVIK D A, SHAMIR A. Efficient Cache Attacks on AES, and Countermeasures[J]. Journal of Cryptology, 2010, 23(1): 37-71.
- [13] YOUNIS Y A, KIFAYAT K, SHI Q, et al. A New Prime and Probe Cache Side-Channel Attack for Cloud Computing[C]// IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing. 2015: 1718-1724.
- [14] LIU F, YAROM Y, GE Q, et al. Last-Level Cache Side-Channel Attacks are Practical[C]// IEEE Symposium on Security & Privacy. 2015: 605-622.
- [15] YU S, GUI X L, ZHANG X J, et al. Co-residency Detection Scheme based on Shared Cache in the Cloud[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(12): 2651-2660. (in Chinese)
- 余思, 桂小林, 张学军, 等. 云环境中基于 cache 共享的虚拟机同驻检测方法[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(12): 2651-2660.
- [16] SI Y, GUI X, LIN J, et al. Detecting VMs Co-residency in Cloud: Using Cache-based Side Channel Attacks [J]. Electronics & Electrical Engineering, 2013, 19(5): 73-78.
- [17] BIAN G Q, ZHAI H, SHAO B L. A Measurement Method of Side-Channel-Attacks Threat for Co-Residency Virtual Machines Based on Cloud Model[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 21-27. (in Chinese)
- 边根庆, 翟红, 邵必林. 一种采用云模型的同驻虚拟机侧通道攻击威胁度量方法[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 21-27.
- [18] SHEN Q N, LI Q. Review on Co-residency Security Issues of Virtual Machines in Cloud Computing[J]. Journal of Integration Technology, 2015(5): 5-17. (in Chinese)
- 沈晴霓, 李卿. 云计算环境中的虚拟机同驻安全问题综述[J]. 集成技术, 2015(5): 5-17.