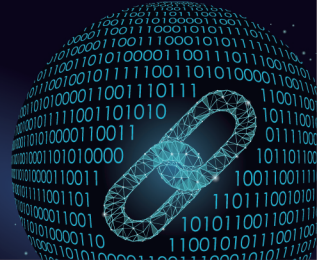




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



考虑群体信任的网络安全态势多维偏好评级方法

余高锋, 李登峰

引用本文:

余高锋, 李登峰. 考虑群体信任的网络安全态势多维偏好评级方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1718–1726.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于云模型和多层权重求解的多粒度语言大群体决策方法

Multi-granularity linguistic large group decision-making based on cloud model and multi-layer weight determination

控制与决策. 2021, 36(9): 2257–2266 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0102>

大群体应急决策中考虑属性关联的偏好信息融合方法

Preference information fusion method of large groups emergency decision-making based on attributes association

控制与决策. 2021, 36(10): 2537–2546 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0117>

基于犹豫度和相似度的专家权重确定方法及其应用

Expert weights determination method and application based on hesitancy degree and similarity measure

控制与决策. 2021, 36(6): 1482–1488 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1382>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

专家交互情境下不完备群组DEMATEL决策方法

Incomplete group DEMATEL decision-making method under expert interaction context

控制与决策. 2020, 35(12): 3066–3072 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0353>

考虑群体信任的网络安全态势多维偏好评级方法

余高锋¹, 李登峰^{2†}

(1. 三明学院 经济与管理学院, 福建 三明 365004; 2. 电子科技大学 经济与管理学院, 成都 611731)

摘要: 现有网络安全态势评级方法难以同时兼顾专家间信任信息、偏好信息以及客观异质信息等多源信息, 为此, 建立基于群体信任的网络安全态势多维偏好评级模型. 在描述网络安全态势多维偏好评级问题的基础上, 提出社会网络中信任信息不确定程度度量方法, 进一步建立一种考虑单链信任信息不确定性和内部差异性、多链间信任非补偿性和内部差异性的不完整信任网络构造模型, 据此确定专家权重; 定义基于级别特征值的客观排序、专家偏好的群体一致性程度和群体非一致性程度, 进一步建立包含专家信任信息、偏好信息和评级信息等在内的网络安全态势评级多维偏好分段变权综合优化模型, 获得基于二元语义的网络安全态势等级和等级区分度. 所提出方法为构建和检验网络安全态势评级提供理论依据, 有助于研发先进的网络安全态势评级系统, 提高网络安全防护能力.

关键词: 评级; 社会网络; 多维偏好分析; 网络安全

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1802

引用格式: 余高锋, 李登峰. 考虑群体信任的网络安全态势多维偏好评级方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1718-1726.

Network security situation grade assessment multi-dimensional rating method considering group trust

YU Gao-feng¹, LI Deng-feng^{2†}

(1. School of Economics and Management, Sanming University, Sanming 365004, China; 2. School of Management and Economics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The network security situation grade assessment (NSGA) pays little attention to experts' trust information, preference information and objective information such as multiple information, thus, the NSGA multi-dimensional method based on the group consensus is established. In the sparse network security situation social network generation problem, the uncertainty degree of trust information is defined, further an imperfect trust network construction model considering the trust information uncertainty degrees and internal differences of single path trust, and the non-compensation trust information of multi-path trusts is proposed, and the weight of experts are computed. The objective ranking based on grade eigenvalue is defined, the degrees of group consistency and group inconsistency of experts' preferences are defined, and NSGA multi-dimensional preference piecewise variable synthesis optimization models including expert trust information, preference information and actual information are further established. This method provides a theoretical basis for the construction and test of NSGA, helping to develop advanced NSGA systems and improving the ability of network security protection.

Keywords: grade assessment; social network; multidimensional analysis of preference; network security

0 引言

随着计算机和通信技术的迅速发展, 计算机网络的应用越来越广泛, 规模越来越大, 多层面的网络安全威胁和安全风险不断增加, 网络病毒和网络攻击构

成的威胁与日俱增, 仅依靠传统的网络安全防护技术和管理思路, 已不能满足有效防护网络安全的需要, 迫切需要新的方法实时监控网络安全, 降低网络安全风险, 提高网络安全防护能力. 因此, 研究网络安全态

收稿日期: 2022-10-18; 录用日期: 2023-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72001126); 教育部人文社科项目(20YJC630196); 福建省自然科学基金项目(2020J01925).

责任编委: 梁樑.

†通讯作者. E-mail: lidengfeng@fzu.edu.cn.

势评级的工作迫在眉睫。

目前,关于网络安全的理论和方法已得到了国内外学者的关注, August等^[1]和杨善林等^[2]分别研究了网络软件安全问题和互联网的资源观; Khouzani等^[3]建立了基于概率攻击图的网络安全多目标优化模型; Paul等^[4]研究了网络安全风险规划优化决策模型; Cheung等^[5]建立了基于攻防博弈的物流管理系统安全防御模型. 上述方法表明了网络空间安全问题仍然是当前学术界一个研究热点. 网络安全态势评级是网络空间安全中常见的问题,而网络安全态势评级由于受多方面因素影响,具有多源威胁、多受体和不确定性等问题,这是一个典型的多指标评级问题. 在现有网络安全态势评级过程中,常见的是专家组对待测评企业的网络设备、网络管理人员和企业的网络安全报告进行综合考评,此时涉及专家间信任信息、偏好信息和客观信息等多源信息,甚至专家间存在间接信任关系. Wu等^[6]提出了信任传递算子,张恒杰等^[7]对群体共识决策的研究进行了综述和展望; Liu等^[8]提出了考虑知识覆盖的信任传递算子; Gong等^[9]提出了基于线性不确定理论的社会网络信任传递方法; Wu等^[10]提出了考虑双重反馈机制的区间社会信任共识决策方法; Sun等^[11]提出了考虑态度共识阈值的最小调整成本的动态反馈机制群体决策方法; Gao等^[12]建立了基于个体语义的个性化社会网络群体决策达成共识模型; 陈晓红等^[13]建立了社会网络环境下考虑犹豫度和一致性的大群体决策模型. 上述方法提出的专家的间接信任信息集成算子尚未考虑单链信任信息不确定性、多链间信任非补偿性和内部差异性,可能会导致一些模型给出的网络安全态势评级结果出现与实际判断明显不吻合,给实际网络监控带来很大的困难甚至造成某些“混乱”.

另一方面,多偏好分析方法^[14]是用于解决多指标决策问题的一种简单有效的方法,在多偏好分析方法中,决策者认为方案间的偏序的精确真度为0或1,且其仅适用于方案准则值为实数的情形. 一般分为3步: 1) 结合方案间判断矩阵,定义一致性指标和非一致性指标; 2) 通过一致性指标和非一致性指标,构造和求解线性规划,获得正理性点和指标权重; 3) 计算与正理性点的最近距离,获得方案优劣排序. 而目前多维偏好分析研究分为3类: 1) 指标信息为不确定信息的多维偏好方法,主要关注其指标信息为不确定信息,如指标信息直觉模糊集^[15-16]、异质信息^[17-19]等多维偏好分析方法; 2) 方案间偏序具有不确定信息的多维度偏好分析方法,如直觉模糊集^[20-21]、区间直觉

模糊数^[22]和混合信息^[23]等; 3) 基于有限理性的多维偏好分析方法,如基于后悔理论的多维偏好分析方法^[24]、基于前景理论的多偏好分析方法^[25]和基于犹豫度的多偏好分析方法^[26]等. 上述多维偏好分析方法丰富了多指标决策方法及其应用的研究,有效解决了多指标方案的排序,但是,很少关注网络安全态势评级过程中方案等级和指标阈值,尤其缺少对专家间信任信息、偏好信息和客观异质信息等多源信息进行分析,即目前多维偏好分析方法无法解决多源信息下网络安全态势评级问题.

针对上述问题,本文利用社会网络描述专家间信任信息,提出基于分段变权的不完整社会网络生成方法,进一步建立基于群体共识的网络安全态势多维偏好评级方法,据此获得基于二元语义的网络安全态势等级和等级区分度.

1 网络安全态势评级问题描述

借鉴《国家网络安全事件应急预案》和《国家突发公共事件总体应急预案》等国家标准,依据网络安全态势感知的需求、特征和要求,构建网络安全态势等级评估指标体系和等级阈值,如表1所示. 不妨设有某个需要网络安全态势等级测评的企业构成集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 等级集 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_5\}$. 其中: e_k 为网络安全态势等级测评问题的第 k 个等级,且规定符号上表示为 $e_k \prec e_{k+1}$, 即第 e_{k+1} 个等级较第 e_k 个等级好. 指标集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, b_{ik} 表示指标值隶属于等级的基准值. $G = \{g_1, g_2, \dots, g_b\}$ 为专家的集合, g_l 为第 l 个专家.

表1 网络安全态势等级评价指标体系和等级划分标准

| 等级评价指标 | 评价等级 | | | | |
|--------|--------|---------|----------|----------|-----------|
| | e_1 | e_2 | e_3 | e_4 | e_5 |
| c_1 | 10 | 20 | 50 | 80 | 500 |
| c_2 | 100 | 150 | 200 | 250 | 500 |
| c_3 | 100 | 150 | 200 | 250 | 500 |
| c_4 | 10 | 20 | 50 | 80 | 500 |
| c_5 | (0, 5] | (5, 10] | (10, 20] | (20, 30] | (30, 100) |
| c_6 | 10 | 20 | 50 | 80 | 500 |
| c_7 | 100 | 150 | 200 | 250 | 500 |
| c_8 | 10 | 20 | 50 | 80 | 500 |
| c_9 | 无 | 部分 | 一般 | 很严重 | 非常严重 |

在现实生活中,专家的社会经历、文化水准以及社会地位等方面存在差异,专家间存在直接信任关系或间接信任关系,用矩阵形式可直观地表示其信任网络,具体如下式所示:

$$S = \begin{matrix} & g_1 & g_2 & \dots & g_b \\ \begin{matrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_b \end{matrix} & \begin{bmatrix} (1, 0) & (t_{12}, d_{12}) & \dots & (t_{1b}, d_{1b}) \\ (t_{21}, d_{21}) & (1, 0) & \dots & \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ (t_{b1}, d_{b1}) & & \dots & (1, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

其中: $s_{l_1 l_2} = (t_{l_1 l_2}, d_{l_1 l_2})$ 表示专家 g_{l_1} 对专家 g_{l_2} 的信任关系, $t_{l_1 l_2}, d_{l_1 l_2} \in [0, 1], t_{l_1 l_2}$ 为信任程度, $d_{l_1 l_2}$ 为非信任程度. 若 $s_{l_1 l_2}$ 不存在, 则表示专家 g_{l_1} 对专家 g_{l_2} 的信任信息残缺, 专家 g_{l_1} 对专家 g_{l_2} 可能存在间接信任关系或没有信任关系; 若 $s_{l_1 l_2}$ 存在, 则表示专家 g_{l_1} 对专家 g_{l_2} 存在直接信任关系. 若 $0 \leq t_{l_1 l_2} + d_{l_1 l_2} \leq 1$, 则表明专家 g_{l_1} 对专家 g_{l_2} 的信任存在犹豫性; 若 $t_{l_1 l_2} + d_{l_1 l_2} \geq 1$, 则表明专家 g_{l_1} 对专家 g_{l_2} 的信任存在不一致性.

根据调研, 获取企业 a_j 关于指标 c_i 的特征值为 y_{ji}, j 为企业关于指标集 C 的特征值, 记为 $\mathbf{Y}_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{j9})^T$.

等级的划分是一个模糊概念, 可能不同的等级评估问题会有不同的划分标准, 指标等级阈值是多指标等级划分的关键信息, 其涉及定量定性信息, 分为上界型定量等级阈值 C_1 、下界型定量等级阈值 C_2 、区间型定量等级阈值 C_3 和语言型等级阈值 C_4 等.

假设专家对待企业测评的网络进行现场考察, 结合其专业知识和经验, 分别对部分企业或全部企业两两比较偏好关系, 即专家给出部分企业间偏好信息记为 $\Omega_l = \{(j_1, j_2) | j_1 \succ j_2 (j_1 = 1, 2, \dots, n; j_2 = 1, 2, \dots, n)\}$, 其中符号“ \succ ”表示专家 g_l 认为企业 a_{j_1} 的网络安全态势优于企业 a_{j_2} .

2 多维偏好模糊评级方法研究

2.1 信任传递方法

为了解决专家间的不完整社会网络, 不妨假设有 δ 条信任链从专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} , 其链集合为 $\{\delta_{l_1 l_2 1}, \delta_{l_1 l_2 2}, \dots, \delta_{l_1 l_2 \delta}\}$, 专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 的第 ε 链长度记为 $p_{l_1 l_2 \varepsilon}$ 和 $s_{l_1 l_2 \varepsilon p} = (t_{l_1 l_2 \varepsilon p}, d_{l_1 l_2 \varepsilon p})$ 表示从专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 推荐链中第 ε 条链中专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon p}$ 到专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon, p+1}$ 的信任信息, $t_{l_1 l_2 \varepsilon p}$ 和 $d_{l_1 l_2 \varepsilon p}$ 分别为专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 推荐链中第 ε 链中专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon p}$ 到专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon, p+1}$ 的信任值和不信任值, $t_{l_1 l_2 \varepsilon p}, d_{l_1 l_2 \varepsilon p} \in [0, 1]$. 若 $0 \leq t_{l_1 l_2 \varepsilon p} + d_{l_1 l_2 \varepsilon p} \leq 1$, 则表示专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon p}$ 到专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon, p+1}$ 的信任存在犹豫性; 若 $t_{l_1 l_2 \varepsilon p} + d_{l_1 l_2 \varepsilon p} \geq 1$, 则表示专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon p}$ 到专家 $g_{l_1 l_2 \varepsilon, p+1}$ 的信任存在不一致性. 为了度量从专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 第 ε 条链的信任信息不确定性, 结合信息熵的定义, 专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 第 ε 条链的信任信息不确定程度 $E_{l_1 l_2 \varepsilon}$ 表示为

$$E_{l_1 l_2 \varepsilon} = \frac{1}{p_{l_1 l_2 \varepsilon}} \sum_{p=1}^{p_{l_1 l_2 \varepsilon}} \cos(0.5(|t_{l_1 l_2 \varepsilon p} - d_{l_1 l_2 \varepsilon p}|)(1 - \Lambda_{l_1 l_2 \varepsilon p})\pi). \quad (1)$$

由式(1)可知, $E_{l_1 l_2 \varepsilon}$ 不仅考虑信任值与不信任值的偏差, 还考虑专家间的信任犹豫度或不一致度. $E_{l_1 l_2 \varepsilon}$ 反映了专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 第 ε 条链的信任信息波动程度, $E_{l_1 l_2 \varepsilon}$ 越大, 信任信息波动越大; $E_{l_1 l_2 \varepsilon}$ 越小, 信任信息波动越小.

不妨设专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 第 ε 条链中信任信息向量为 $\mathbf{s}_{l_1 l_2 \varepsilon} = (s_{l_1 l_2 \varepsilon 1}, s_{l_1 l_2 \varepsilon 2}, \dots, s_{l_1 l_2 \varepsilon p_{l_1 l_2 \varepsilon}})$, 在社会网络中, 信任信息熵对信任传递存在影响, 为了解决这个问题, 结合 uni-norm 的信任传递算子, 本文提出基于信任信息熵的 uni-norm 的信任传递算子, 专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 第 ε 条链的信任值为

$$s_{l_1 l_2 \varepsilon} = \begin{cases} (0, 1), & s_{l_1 l_2 \varepsilon p} = (0, 1), \forall p \in \{1, 2, \dots, p_{l_1 l_2 \varepsilon}\}; \\ \left(E_{l_1 l_2 \varepsilon} \prod_{p=1}^{p_{l_1 l_2 \varepsilon}} t_{l_1 l_2 \varepsilon p} / \left[\prod_{p=1}^{p_{l_1 l_2 \varepsilon}} t_{l_1 l_2 \varepsilon p} + \prod_{p=1}^{p_{l_1 l_2 \varepsilon}} (1 - t_{l_1 l_2 \varepsilon p}) \right], E_{l_1 l_2 \varepsilon} \prod_{p=1}^{p_{l_1 l_2 \varepsilon} - 1} t_{l_1 l_2 \varepsilon p} d_{l_1 l_2 \varepsilon p} / \left[\left(\prod_{p=1}^{p_{l_1 l_2 \varepsilon} - 1} t_{l_1 l_2 \varepsilon p} \right) d_{l_1 l_2 \varepsilon p} + \prod_{p=1}^{p_{l_1 l_2 \varepsilon} - 1} (1 - t_{l_1 l_2 \varepsilon p})(1 - d_{l_1 l_2 \varepsilon p}) \right] \right), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)提出了基于信息熵的信任传递算子, 以有效解决信息熵对信任传递的影响, 发展和完善传递算子^[6].

2.2 多路径信任变权集成方法

假设 $\mathbf{p}_{l_1 l_2} = (p_{l_1 l_2 1}, p_{l_1 l_2 2}, \dots, p_{l_1 l_2 \delta})$ 为专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 链的 δ 条长度的集合, 在多路径信任集成中, 链的长度与信任信息成负相关, 为了解决这个问题, 提出基于惩罚型变权函数的链长度的权重函数确定方法, $\mathbf{w}_{p_{l_1 l_2}}(\mathbf{p}_{l_1 l_2}) = (w_{p_{l_1 l_2 1}}(\mathbf{p}_{l_1 l_2}), w_{p_{l_1 l_2 2}}(\mathbf{p}_{l_1 l_2}), \dots, w_{p_{l_1 l_2 \delta}}(\mathbf{p}_{l_1 l_2}))$ 为各链关于链长度的权重函数, 其中 $w_{p_{l_1 l_2 \varepsilon}}(\mathbf{p}_{l_1 l_2})$ 表示专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 的第 ε 链长度权重, 即

$$w_{p_{l_1 l_2 \varepsilon}}(\mathbf{p}_{l_1 l_2}) = u(p_{l_1 l_2 \varepsilon}) / \sum_{\varepsilon=1}^{\delta} u(p_{l_1 l_2 \varepsilon}). \quad (3)$$

其中: $u(x)$ 为保守型效用函数, $u(x)$ 满足: 1) $u(x) \geq 0$; 2) 对于任意 $x \in [0, 1], u'(x) < 0$. 若 $u(x) = 1/x^\lambda$, 则

$$w_{pl_1l_2\varepsilon}(\mathbf{p}_{l_1l_2}) = (1/p_{l_1l_2\varepsilon})^\lambda / \sum_{\varepsilon=1}^{\delta} (1/p_{l_1l_2\varepsilon})^\lambda, \quad (4)$$

即式(4)为Liu等^[8]的长度权重函数,是本文的特殊情形.

在目前多路径集成方法中,大部分仅考虑路径长短,尚未考虑链的信任值对集成结果的影响,更未考虑链的信任值内部差异性对集成结果的影响,为了解决这个问题,本文提出基于分段变权函数的链信任值权重确定方法.不妨设专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 的所有链信任得分向量为 $\lambda_{l_1l_2} = (\lambda_{l_1l_21}, \lambda_{l_1l_22}, \dots, \lambda_{l_1l_2\delta})$.其中: $\lambda_{l_1l_2\varepsilon} = (1 + t_{l_1l_2\varepsilon} - d_{l_1l_2\varepsilon})/2$,显然 $0 \leq \lambda_{l_1l_2\varepsilon} \leq 1$.

设 $w_{sl_1l_2}(\lambda_{lk}) = (w_{sl_1l_21}(\lambda_{l_1l_21}), w_{sl_1l_22}(\lambda_{l_1l_22}), \dots, w_{sl_1l_2\delta}(\lambda_{l_1l_2\delta}))^T$ 为各链信任权重关于链信任得分的权重函数, $w_{sl_1l_2\varepsilon}(\lambda_{l_1l_2})$ 表示专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 的第 ε 链信任值权重,即

$$w_{sl_1l_2\varepsilon}(\lambda_{l_1l_2}) = f(\lambda_{l_1l_2\varepsilon}) / \sum_{\varepsilon=1}^{\delta} f(\lambda_{l_1l_2\varepsilon}). \quad (5)$$

其中: $f(\lambda_{l_1l_2\varepsilon})$ 为一个在区间 $[0, 1]$ 连续的分段函数, $f(\lambda_{l_1l_2\varepsilon})$ 满足:1) $f(\lambda_{l_1l_2\varepsilon}) \geq 0$. 2)对于任意 $\lambda_{l_1l_2\varepsilon} \in [0, \alpha], f'(\lambda_{l_1l_2\varepsilon}) \leq 0$,即专家间信任值的权重 $w_{sl_1l_2\varepsilon}(\lambda_{l_1l_2})$ 随着信任得分 $\lambda_{l_1l_2\varepsilon}$ 的减少而增加,且存在变化率不一样的子区间,将此称为惩罚区间;对于任意 $\lambda_{l_1l_2\varepsilon} \in [\beta, 1], f'(\lambda_{l_1l_2\varepsilon}) > 0, \alpha \leq \beta$,即专家间信任值的权重 $w_{sl_1l_2\varepsilon}(\lambda_{l_1l_2})$ 随着信任得分 $\lambda_{l_1l_2\varepsilon}$ 的增加而增加,且存在变化率不一样的子区间,将此称为激励区间;对于任意 $\lambda_{l_1l_2\varepsilon} \in [\alpha, \beta], f(\lambda_{l_1l_2\varepsilon}) = c$,即专家间信任值的权重 $w_{sl_1l_2\varepsilon}(\lambda_{l_1l_2})$ 为常数, α, β 为信任变权的权重阈值,依据具体情况而定.

为了解决链间的信任信息差异性,构建符合信任信息变化规律的状态变权函数,依据推荐信任链的信任传递机理,确定信任的变权阈值,进一步构造如下状态变权函数:

$$f(\lambda_{l_1l_2\varepsilon}) = \begin{cases} 0.3 \ln(0.3/\lambda_{l_1l_2\varepsilon}) + 0.5, & \lambda_{l_1l_2\varepsilon} \in [0, 0.3); \\ 0.5, & \lambda_{l_1l_2\varepsilon} \in [0.3, 0.55]; \\ 2\lambda_{l_1l_2\varepsilon} - 0.6, & \lambda_{l_1l_2\varepsilon} \in (0.55, 0.9); \\ 0.15 \ln[0.1/(1 - \lambda_{l_1l_2\varepsilon})] + 1.3, & \lambda_{l_1l_2\varepsilon} \in [0.9, 1]. \end{cases} \quad (6)$$

由式(3)和(5)可知,各链关于链信任得分的权重向量 $\mathbf{w}_{sl_1l_2}(\lambda_{l_1l_2}) = (w_{sl_1l_21}(\lambda_{l_1l_21}), w_{sl_1l_22}(\lambda_{l_1l_22}), \dots, w_{sl_1l_2\delta}(\lambda_{l_1l_2\delta}))^T$ 和各链关于链长度的权重向量 $\mathbf{w}_{pl_1l_2}(\mathbf{p}_{l_1l_2}) = (w_{pl_1l_21}(\mathbf{p}_{l_1l_21}), w_{pl_1l_22}(\mathbf{p}_{l_1l_22}), \dots, w_{pl_1l_2\delta}(\mathbf{p}_{l_1l_2\delta}))$,因此,专家 g_{l_1} 到专家 g_{l_2} 的间接信任值 $s_{l_1l_2}$ 为

$$s_{l_1l_2} = \sum_{\varepsilon=1}^{\delta} s_{l_1l_2\varepsilon} (w_{pl_1l_2\varepsilon}(\lambda_{l_1l_2}) + w_{sl_1l_2\varepsilon}(\mathbf{p}_{l_1l_2})) / \sum_{k=1}^{\delta} (w_{pl_1l_2\varepsilon}(\lambda_{l_1l_2}) + w_{sl_1l_2\varepsilon}(\mathbf{p}_{l_1l_2})). \quad (7)$$

式(7)多链信息集成过程中同时兼顾单链的信息熵、链间信任值信任非补偿性和差异性、链的长度惩罚性,而Wu等^[6]、Liu等^[8]和Gong等^[9]等提出的不完整社会网络生成方法仅考虑链的长度影响,因此,式(7)进一步完善了Wu等^[6]、Liu等^[8]和Gong等^[9]提出的不完整社会网络生成方法,能够更好地反映现实情况.由式(7),得到专家间的完整社会网络矩阵为

$$CS = \begin{matrix} & g_1 & g_2 & \dots & g_b \\ \begin{matrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_b \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1b} \\ s_{21} & 1 & \dots & s_{2b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{b1} & s_{b2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (8)$$

其中 $s_{l_1l_2} = (t_{l_1l_2}, d_{l_1l_2})$.利用 $\lambda_{l_1l_2} = (1 + t_{l_1l_2} - d_{l_1l_2})/2$,计算得到社会信任得分矩阵 $C = (\lambda_{l_1l_2})_{b \times b}$,进一步计算得到专家的中心度为

$$C(g_{l_1}) = \sum_{l_2=1}^b \lambda_{l_1l_2} / (b - 1). \quad (9)$$

显然,中心度指标反映了各专家相应的重要性程度,专家的中心度 $C(g_l)$ 越大,表明专家越重要,因此,专家的信任度可表示为

$$o_l = C(g_l) / \sum_{\zeta=1}^b C(g_\zeta). \quad (10)$$

2.3 指标级别隶属函数的确定

由表1可知,DDOS次数 c_1 、僵尸网络次数 c_4 、恶意代码次数 c_6 和IP被封次数 c_8 等定量指标为成本型指标,且它们的等级阈值相同,因此,企业 a_j 关于指标 $c_i(i = 1, 4, 6, 8)$ 的等级 $e_k(k = 1, 2, \dots, 5)$ 的隶属函数为

$$\mu_{ji_1} = \begin{cases} 1, & 0 \leq y_{ji} \leq 10; \\ (20 - y_{ji})/10, & 10 < y_{ji} \leq 20; \\ 0, & y_{ji} > 20. \end{cases}$$

$$\mu_{ji_2} = \begin{cases} y_{ji}/10, & 0 \leq y_{ji} \leq 10; \\ 1, & 10 < y_{ji} \leq 20; \\ (50 - y_{ji})/30, & 20 < y_{ji} \leq 50; \\ 0, & y_{ji} > 50; \end{cases}$$

$$\mu_{ji_3} = \begin{cases} y_{ji}/20, & 0 \leq y_{ji} \leq 20; \\ 1, & 20 < y_{ji} \leq 50; \\ (80 - y_{ji})/30, & 50 < y_{ji} \leq 80; \\ 0, & y_{ji} > 80. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{i_4}} = \begin{cases} y_{ji}/50, & 0 \leq y_{ji} \leq 50; \\ 1, & 50 < y_{ji} \leq 80; \\ (500 - y_{ji})/420, & 80 < y_{ji} \leq 500; \\ 0, & y_{ji} > 500. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{i_5}} = \begin{cases} y_{ji}/80, & 0 \leq y_{ji} \leq 80; \\ 1, & 80 < y_{ji} < 500; \\ 500/y_{ji}, & y_{ji} \geq 500. \end{cases}$$

由表1可知,DDOS资产 c_2 、僵尸网络资产 c_3 和恶意代码资产 c_7 为成本型指标,且它们的等级阈值相同,因此,企业 a_j 关于指标 c_i ($i=2,3,7$)的等级 e_k ($k=1,2,\dots,5$)的隶属函数为

$$\mu_{j^{i_1}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq y_{ji} < 100; \\ (150 - y_{ji})/50, & 100 \leq y_{ji} < 150; \\ 0, & y_{ji} \geq 150. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{i_2}} = \begin{cases} y_{ji}/100, & 0 \leq y_{ji} < 100; \\ 1, & 100 \leq y_{ji} < 150; \\ (200 - y_{ji})/50, & 150 \leq y_{ji} < 200; \\ 0, & y_{ji} \geq 200. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{i_3}} = \begin{cases} y_{ji}/150, & 0 \leq y_{ji} < 150; \\ 1, & 150 \leq y_{ji} < 200; \\ (250 - y_{ji})/50, & 200 \leq y_{ji} < 250; \\ 0, & y_{ji} \geq 250. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{i_4}} = \begin{cases} y_{ji}/200, & 0 \leq y_{ji} < 200; \\ 1, & 200 \leq y_{ji} < 250; \\ (500 - y_{ji})/50, & 250 \leq y_{ji} < 500; \\ 0, & y_{ji} \geq 500. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{i_5}} = \begin{cases} y_{ji}/250, & 0 \leq y_{ji} \leq 250; \\ 1, & 250 < y_{ji} \leq 500; \\ 500/y_{ji}, & y_{ji} > 500. \end{cases}$$

由表1可知,僵尸网络流量 c_5 为成本型指标,因此,企业 a_j 关于指标 c_5 的等级 e_k ($k=1,2,\dots,5$)的隶属函数为

$$\mu_{j^{5_1}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq y_{j5} \leq 5; \\ (10 - y_{j5})/5, & 5 < y_{j5} \leq 10; \\ 0, & 10 < y_{j5} \leq 100. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{5_2}} = \begin{cases} y_{j5}/5, & 0 \leq y_{j5} < 5; \\ 1, & 5 \leq y_{j5} < 10; \\ (20 - y_{j5})/10, & 10 \leq y_{j5} < 20; \\ 0, & 20 \leq y_{j5} \leq 100. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{5_3}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq y_{j2} < 5; \\ (y_{j2} - 5)/5, & 5 \leq y_{j2} < 10; \\ 1, & 10 \leq y_{j2} < 20; \\ (30 - y_{j2})/10, & 20 \leq y_{j2} < 30; \\ 0, & 30 \leq y_{j2} \leq 100. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{5_4}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq y_{j2} < 10; \\ y_{j5}/20, & 10 \leq y_{j2} \leq 20; \\ 1, & 20 < y_{j2} \leq 30; \\ (100 - y_{j5})/70, & 30 < y_{j2} \leq 100. \end{cases}$$

$$\mu_{j^{5_5}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq y_{j2} < 20; \\ (y_{j2} - 20)/10, & 20 \leq y_{j2} \leq 30; \\ 1, & 30 < y_{j2} < 100. \end{cases}$$

由于域名信息泄露程度 c_9 为定性指标,企业 a_j 关于定性指标 c_9 的等级 e_k ($k=1,2,\dots,5$)隶属函数选取为

$$\mu_{j^{9_k}} = \begin{cases} 1, & y_{j9} = e_{9k}; \\ 0, & y_{j9} \neq e_{9k}; \end{cases} \quad k=1,2,\dots,5.$$

通过企业 a_j 关于指标 c_i 的等级 e_k 的隶属函数,结合表1和矩阵 \mathbf{Y} ,计算企业 a_j 关于指标集 C 的级别隶属度,用矩阵形式可直观地表示为

$$\mu_j = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & \dots & e_5 \\ \begin{matrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \mu_{j11} & \mu_{j12} & \dots & \mu_{j15} \\ \mu_{j21} & \mu_{j22} & \dots & \mu_{j25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{j91} & \mu_{j92} & \dots & \mu_{j95} \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

2.4 一致性和非一致性度量方法

设 $\mathbf{w}=(w_1, w_2, \dots, w_9)$ 为指标集权重向量,企业 a_j 的级别特征值为

$$v_j = \sum_{i=1}^9 w_i v_{ji} = \sum_{i=1}^9 w_i \sum_{k=1}^5 k \mu_{j^{i_k}}. \quad (11)$$

若 $v_{j_1} > v_{j_2}$,则企业 a_{j_1} 的级别特征值 v_{j_1} 大于企业 a_{j_2} 的级别特征值 v_{j_2} ,记为 $a_{j_1} \succ a_{j_2}$,称为客观排序.另一方面,专家 e_l 根据现场考察,结合自己的经验知识和判断,给出企业 a_{j_1} 和企业 a_{j_2} 的偏好排序为 $a_{j_1} \succ a_{j_2}$;上述客观排序与专家 e_l 对企业 a_{j_1} 和企业 a_{j_2} 的偏好 $(j_1, j_2) \in \Omega_l$ 的可能完全不一致,称其为不一致性,记为 $(v_{j_1} - v_{j_2})^-$,定企业 a_{j_1} 和企业 a_{j_2} 的不一致性程度定义为

$$(v_{j_1} - v_{j_2})^- = \begin{cases} v_{j_2} - v_{j_1}, & v_{j_1} < v_{j_2}; \\ 0, & v_{j_1} \geq v_{j_2}. \end{cases} \quad (12)$$

显然,若 $v_{j_1} < v_{j_2}$,客观排序与专家偏好 $(j_1, j_2) \in \Omega_l$ 不一致时,则不一致度 $(v_{j_1} - v_{j_2})^- = v_{j_2} - v_{j_1}$;反之,若 $v_{j_1} > v_{j_2}$,客观排序与专家偏好 $(j_1, j_2) \in \Omega_l$ 一致时,则不一致程度 $(v_{j_1} - v_{j_2})^- = 0$ 为0. 因此,不一致程度可简化为

$$(v_{j_1} - v_{j_2})^- = \max\{0, (v_{j_2} - v_{j_1})\},$$

即专家 g_l 的偏好与客观排序的总不一致性程度为

$$B_l = \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2})^- = \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} [\max\{0, (v_{j_2} - v_{j_1})\}]. \quad (13)$$

由式(13),结合式(9)求得专家权重 $\mathbf{O} = (o_1, o_1, \dots, o_b)$,因此,关于所有专家 $g_l (l = 1, 2, \dots, b)$ 的总不一致性程度为

$$B = \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2})^- = \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} [\max\{0, (v_{j_2} - v_{j_1})\}]. \quad (14)$$

类似地,专家 $g_l (l = 1, 2, \dots, p)$ 的偏好 $(j_1, j_2) \in \Omega_l$ 可能存在与客观排序完全一致,称其为一致性,其一致性程度记为 $(v_{j_1} - v_{j_2})^+$,因此,一致性程度定义为

$$(v_{j_1} - v_{j_2})^+ = \begin{cases} (v_{j_1} - v_{j_2}), & v_{j_1} \geq v_{j_2}; \\ 0, & v_{j_2} < v_{j_1}. \end{cases} \quad (15)$$

显然,式(15)可改写为 $(v_{j_1} - v_{j_2})^+ = \max\{0, (v_{j_1} - v_{j_2})\}$. 因此,总一致性程度为

$$G = \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2})^+ = \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} [\max\{0, (v_{j_1} - v_{j_2})\}]. \quad (16)$$

基于以上分析可知,总一致性程度 G 越大越好,不一致性程度 B 越小越好. 利用线性规划方法建立如下模型:

$$\begin{aligned} & \max\{G\}. \\ & \text{s.t.} \begin{cases} G - B \geq h; \\ \sum_{i=1}^m w_i = 1, w_j \geq 0.05. \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

将式(14)和(16)代入(17),有

$$G - B = \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2})^+ -$$

$$\begin{aligned} & \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2})^- = \\ & \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} [\max\{0, (v_{j_1} - v_{j_2})\}] - \\ & \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} [\max\{0, (v_{j_2} - v_{j_1})\}] = \\ & \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} [\max\{0, (v_{j_1} - v_{j_2})\}] - \\ & \max\{0, (v_{j_2} - v_{j_1})\}] = \\ & \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2}). \end{aligned} \quad (18)$$

因此,将式(18)代入(17),有

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} [\max\{0, (v_{j_1} - v_{j_2})\}] \right\}. \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2}) \geq h; \\ \sum_{i=1}^9 w_i = 1, w_i \geq 0.05, i = 1, 2, \dots, 9. \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

令 $\lambda_{j_1 j_2} = \max\{0, v_{j_1} - v_{j_2}\}$,即对于任意 $(j_1, j_2) \in \Omega_l$, $\lambda_{j_1 j_2} \geq 0$ 和 $\lambda_{j_1 j_2} \geq v_{j_1} - v_{j_2}$,于是,模型(19)可转化为

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} \lambda_{j_1 j_2} \right\}. \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{l=1}^b \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} (v_{j_1} - v_{j_2}) \geq h; \\ \lambda_{j_1 j_2} \geq v_{j_1} - v_{j_2}, (j_1, j_2) \in \Omega_l, l = 1, 2, \dots, b; \\ \lambda_{j_1 j_2} \geq 0, (j_1, j_2) \in \Omega_l, l = 1, 2, \dots, b; \\ \sum_{i=1}^9 w_i = 1, w_i \geq 0.05, i = 1, 2, \dots, 9. \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

利用式(11),可将(20)变换为下列线性规划:

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} \lambda_{j_1 j_2} \right\}. \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{l=1}^b o_l \sum_{(j_1, j_2) \in \Omega_l} \left(\sum_{i=1}^9 w_i \sum_{k=1}^5 k \mu_{j_1 i k} - \sum_{i=1}^9 w_i \sum_{k=1}^5 k \mu_{j_2 i k} \right) \geq h, \\ \lambda_{j_1 j_2} \geq v_{j_1} - v_{j_2}, (j_1, j_2) \in \Omega_l, l = 1, 2, \dots, b; \\ \lambda_{j_1 j_2} \geq 0, (j_1, j_2) \in \Omega_l, l = 1, 2, \dots, b; \\ \sum_{i=1}^9 w_i = 1, w_i \geq 0.05, i = 1, 2, \dots, 9. \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

利用 lingo 9.0 对式(21)求得 $\mathbf{w}^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_9^*)$,企

业 a_j 的级别特征值为

$$v_j = \sum_{i=1}^9 w_i^* v_{ji} = \sum_{i=1}^9 w_i^* \sum_{k=1}^5 k \mu_{j i k}$$

根据二元语义方法评定企业 a_j 的威胁等级,二元语义方法不仅可以确定企业所属评价等级,还可进一步区分样本间的差异程度. 对于任意 $v_j \in [1, 5]$, 有

$$\tau(v_j) = (e_{k_j}, \Delta_j) \in V \times [-0.5, 0.5]. \quad (22)$$

其中: $V = \{e_1, e_2, \dots, e_5\}$ 为综合评价等级集, $k_j = \text{Round}(v_j)$ 、 $\Delta_j = v_j - k_j$ 为综合级别特征值 v_j 与 k_j 的偏差值. 于是, 由式(22)即可确定企业 a_j 的网络安全态势等级, 也可根据企业的网络安全态势级别特征值大小, 给出其优劣.

式(21)和(22)同时考虑专家间信任信息、偏好信息和客观异质信息等多源信息, 其求解结果不仅能够合理确定企业网络安全态势等级, 而且能够确定企业网络安全态势的优劣顺序. 然而, Wan等^[21-22]的方法仅给出方案优劣顺序, 即Wan等^[21-22]的方法是本文的特殊情形, 因此, 所提出方法进一步完善和发展了多维偏好决策方法.

3 新零售生态企业网络安全态势测评和分析

新零售生态企业为了防御网络攻击, 识别网络风险和及时修补漏洞, 从某个第3方网络安全评价服务公司的行业报告, 筛选5家主流新零售生态企业进行分析, 不妨记为 $\{a_1, a_2, \dots, a_5\}$, 具体数据如表2所示.

表2 新零售生态网络安全威胁测评数据

| 指标 | 评价值 | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 |
| c_1 | 97 | 23 | 38 | 19 | 50 |
| c_2 | 28 | 68 | 8 | 17 | 16 |
| c_3 | 0 | 2 | 1 | 4 | 0 |
| c_4 | 0 | 2 | 2 | 14 | 0 |
| c_5 | 0 | 33 | 8 | 48 | 16 |
| c_6 | 7 | 4 | 1 | 0 | 8 |
| c_7 | 4 | 1 | 1 | 0 | 7 |
| c_8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| c_9 | 无 | 部分 | 部分 | 一般 | 部分 |

邀请4位专家对5家企业进行现场考察, 记为 $G = \{g_1, g_2, g_3, g_4\}$, 其中专家间存在的信任关系如图1所示, 且信任关系矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} (1, 0) & (0.55, 0.5) & & (0.9, 0.3) \\ & (1, 0) & (0.52, 0.51) & \\ (1.0, 0.2) & & (1, 0) & \\ & & (0.9, 0.4) & (1, 0) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

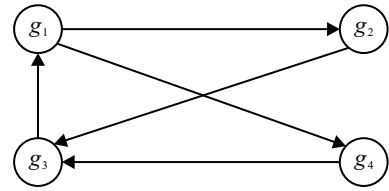


图1 专家组的信任网络

上述4位专家对5家企业进行现场考察, 结合经验和判断, 分别给出部分或全部企业间的网络安全态势两两比较偏好关系集合为 $\Omega_1 = \{(1, 4), (3, 5)\}$, $\Omega_2 = \{(1, 4), (2, 5)\}$, $\Omega_3 = \{(2, 5), (3, 4)\}$, $\Omega_4 = \{(3, 4), (3, 5)\}$.

由图1所示的专家间的信任关系, 并非所有的结点对间均有直接的路径可达, 如 g_1 到 g_3 间有两个路径可达: $g_1 \rightarrow g_2 \rightarrow g_3$ 和 $g_1 \rightarrow g_4 \rightarrow g_3$, 它们的链长度分别为 $P_{13} = (2, 2)$. 由式(2)得到这两条路径上传递所得到的信任得分为

$$P_{123}((0.55, 0.5), (0.52, 0.51)) = (0.57, 0.56),$$

$$P_{143}((0.9, 0.3), (0.9, 0.4)) = (0.98, 0.85).$$

由式(3), 提出基于惩罚型变权函数的链长度的权重函数确定方法, $w_{p13} = (w_{p131}, w_{p132})^T$ 为链长度的权重函数, 若 $u(x) = 1/x$, 则 $w_{p13\epsilon}(\mathbf{p}_{13}) = (1/p_{13\epsilon}) / \sum_{\epsilon=1}^2 (1/p_{13\epsilon})$, 即 $w_{p13}(\mathbf{p}_{13}) = (0.5, 0.5)^T$.

经计算, 专家 g_1 到专家 g_3 所有链信任得分向量为 $\lambda_{13} = (0.5, 0.6)$, 为了体现不同链的信任得分值差异性对信任集成的影响, 根据分段变权综合思想, 不妨设 $f(\lambda_{13\epsilon})$ 为一个在区间 $[0, 1]$ 连续的分段函数, 如下式所示:

$$CS = \begin{bmatrix} (1, 0) & (0.55, 0.5) \\ (0.8, 0.73) & (1, 0) \\ (0.8, 0.2) & (0.83, 0.8) \\ (0.96, 0.94) & (0.87, 0.79) \\ (0.8, 0.72) & (0.9, 0.3) \\ (0.52, 0.51) & (0.87, 0.62) \\ (1, 0) & (0.93, 0.9) \\ (0.9, 0.4) & (1, 0) \end{bmatrix}.$$

因此, 可知专家间的信任得分如下式所示:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0.525 & 0.54 & 0.8 \\ 0.535 & 1 & 0.505 & 0.625 \\ 0.8 & 0.515 & 1 & 0.515 \\ 0.51 & 0.54 & 0.75 & 1 \end{bmatrix}.$$

由式(9), 专家的中心度可表示为

$$C(g_1) = 0.95, C(g_2) = 0.86,$$

$$C(g_3) = 0.93, C(g_4) = 0.98.$$

由式(10),专家的权重可表示为

$$o_1 = 0.25, o_2 = 0.235, o_3 = 0.25, o_4 = 0.265.$$

结合表2,计算企业 a_1 关于指标集 C 的级别隶属度,用矩阵形式可直观地表示为

$$\mu_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.67 & 1 & 0.60 & 0.38 \\ 1 & 0.28 & 0.19 & 0.14 & 0.11 \\ 1 & 0.02 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 1 & 0.10 & 0.05 & 0.02 & 0.01 \\ 1 & 0.20 & 0.01 & 0.05 & 0.01 \\ 1 & 0.70 & 0.35 & 0.14 & 0.09 \\ 1 & 0.04 & 0.03 & 0.02 & 0.02 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

类似地,计算出企业 $a_j(j = 2, 3, 4, 5)$ 关于指标集 C 的级别隶属度.专家的权重 $o = (0.25, 0.235, 0.25, 0.265)$,将专家的权重和企业 $a_j(j = 1, 2, \dots, 5)$ 关于指标集 C 的规范化级别隶属度代入式(21),利用lingo软件对式(21)进行求解,计算得到新零售生态企业 $a_j(j = 1, 2, \dots, 5)$ 的网络安全态势级别特征为 $v = (4.15, 4.82, 4.24, 3.48, 4.24)$.

根据二元语义方法评定新零售生态企业 $a_j(j = 1, 2, \dots, 5)$ 的态势等级为良、优、良、中、良等,企业 a_2 的网络安全态势最好.

本文结果相对于余高峰等^[27]的评级方法,所提出新零售生态企业的网络安全态势级别特征为低于常权方法,但是,所提出方法评级结果的级别特征值最大与最小差值大于常权方法,即本文评级结果分辨率高于常权评级方法,有利于区分等级和排序,主要是本文综合考虑了专家间的信任关系和偏好共识度、评价信息等多源信息,使得本文的结果与实际情况更为相一致.

4 结论

本文针对网络安全态势评级方法难以同时兼顾专家间信任信息、偏好信息和客观异质信息等多源信息问题进行研究,提出了一种兼顾信任链的信任得分差异性和链长度的不完整社会网络生成方法,进一步建立了多维偏好评级模型,具有如下优势.

1)建立了符合网络安全态势特征的多维偏好评级模型,且同时兼顾专家信任信息、偏好信息和实际信息等多源信息,为多源异质信息下的网络安全评级问题提供了定量计算的理论和方法.

2)对于在不完整专家间社会网络生成问题,提出

了基于信任信息熵的信任传递算子,并进一步提出了一种基于分段变权的多路径信任集成方法,据此确定专家的中心度以及建立基于偏好共识度的各专家共识度,接着确定专家权重,解决了不完整社会网络生成过程中的单链信任信息不确定性、多链间信任非补偿性和内部差异性问题.

3)定义了基于级别特征值的态势客观排序与专家偏好的群体一致性程度和群体非一致性程度,进一步建立了包含专家信任信息、偏好信息和实际信息等多维偏好评级优化模型,据此获得基于二元语义的态势等级及等级区分度,解决了传统多维偏好分析方法仅给出方案优劣顺序的问题.

本文主要研究了企业间偏好和专家间信任信息为实数的多维偏好评级方法,而在复杂现实评级问题中,评级数据与信息、决策过程等涉及大量的不确定性因素,甚至还有犹豫性,因此,对于模糊环境下的多维偏好评级方法,甚至是双碳目标^[28]下的多维偏好评级方法值得进一步研究.

参考文献(References)

- [1] August T, Dao D, Kim K. Market segmentation and software security: Pricing patching rights[J]. *Management Science*, 2019, 65(10): 4575-4597.
- [2] 杨善林,周开乐,张强,等. 互联网的资源观[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(1): 1-11. (Yang S L, Zhou K L, Zhang Q, et al. A resource view of the Internet[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(1): 1-11.)
- [3] Khouzani M, Liu Z L, Malacaria P. Scalable min-max multi-objective cyber-security optimisation over probabilistic attack graphs[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 278(3): 894-903.
- [4] Paul J A, Zhang M J. Decision support model for cybersecurity risk planning: A two-stage stochastic programming framework featuring firms, government, and attacker[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 291(1): 349-364.
- [5] Cheung K F, Bell M G H. Attacker-defender model against quantal response adversaries for cyber security in logistics management: An introductory study[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 291(2): 471-481.
- [6] Wu J, Xiong R Y, Chiclana F. Uninorm trust propagation and aggregation methods for group decision making in social network with four tuple information[J]. *Knowledge-Based-Systems*, 2016, 96: 29-39.
- [7] 张恒杰,王芳,董庆兴,等. 群体共识决策的研究进展与展望[J]. *电子科技大学学报: 社会科学版*, 2021, 23(2): 26-37. (Zhang H J, Wang F, Dong Q X, et al. Consensus in group decision making: Research progress and

- prospect[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition, 2021, 23(2): 26-37.)
- [8] Liu Y J, Liang C Y, Chiclana F, et al. A knowledge coverage-based trust propagation for recommendation mechanism in social network group decision making[J]. Applied Soft Computing, 2021, 101: 1-10.
- [9] Gong Z W, Wang H, Guo W W, et al. Measuring trust in social networks based on linear uncertainty theory[J]. Information Sciences, 2020, 508: 154-172.
- [10] Wu J, Wang S, Chiclana F, et al. Two-fold personalized feedback mechanism for social network consensus by uninorm interval trust propagation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(10): 11081-11092.
- [11] Sun Q, Wu J, Chiclana F, et al. A dynamic feedback mechanism with attitudinal consensus threshold for minimum adjustment cost in group decision making[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(5): 1287-1301.
- [12] Gao Y, Zhang Z. Consensus reaching with non-cooperative behavior management for personalized individual semantics-based social network group decision making[J]. Journal of the Operational Research Society, DOI: 10.1080/01605682.2021.1997654.
- [13] 陈晓红, 张威威, 徐选华. 社会网络环境下基于犹豫度和一致性的大群体决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(5): 1178-1192.
(Chen X H, Zhang W W, Xu X H. Large group decision-making method based on hesitation and consistency under social network context[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2020, 40(5): 1178-1192.)
- [14] Srinivasan V, Shocker A D. Linear programming techniques for multidimensional analysis of preferences[J]. Psychometrika, 1973, 38(3): 337-369.
- [15] Li D F, Chen G H, Huang Z G. Linear programming method for multiattribute group decision making using IF sets[J]. Information Sciences, 2010, 180(9): 1591-1609.
- [16] Li D F. Extension of the LINMAP for multiattribute decision making under Atanassov's intuitionistic fuzzy environment[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2008, 7(1): 17-34.
- [17] Li D F, Wan S P. Fuzzy linear programming approach to multiattribute decision making with multiple types of attribute values and incomplete weight information[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(11): 4333-4348.
- [18] Li D F, Wan S P. Fuzzy heterogeneous multiattribute decision making method for outsourcing provider selection[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(6): 3047-3059.
- [19] Li D F, Wan S P. A fuzzy inhomogenous multiattribute group decision making approach to solve outsourcing provider selection problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 67: 71-89.
- [20] Wan S P, Li D F. Fuzzy LINMAP approach to heterogeneous MADM considering comparisons of alternatives with hesitation degrees[J]. Omega, 2013, 41(6): 925-940.
- [21] Wan S P, Li D F. Atanassov's intuitionistic fuzzy programming method for heterogeneous multiattribute group decision making with Atanassov's intuitionistic fuzzy truth degrees[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(2): 300-312.
- [22] Wan S P, Li D F. Fuzzy mathematical programming approach to heterogeneous multiattribute decision-making with interval-valued intuitionistic fuzzy truth degrees[J]. Information Sciences, 2015, 325: 484-503.
- [23] Wan S, Zou W C, Dong J Y. Prospect theory based method for heterogeneous group decision making with hybrid truth degrees of alternative comparisons[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 141: 106285.
- [24] Zhang S T, Zhu J J, Liu X D, et al. Regret theory-based group decision-making with multidimensional preference and incomplete weight information[J]. Information Fusion, 2016, 31: 1-13.
- [25] 余高锋, 费巍, 叶银芳. 基于前景理论的农村电子商务发展水平多维偏好决策方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2182-2188.
(Yu G F, Fei W, Ye Y F. Development level of rural E-commerce multi-dimensional preference decision making method based on prospect theory[J]. Control and Decision, 2020, 35(9): 2182-2188.)
- [26] Yu G F, Li D F. A novel intuitionistic fuzzy goal programming method for heterogeneous MADM with application to regional green manufacturing level evaluation under multi-source information[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 174: 108796.
- [27] 余高锋, 李登峰. 网络安全威胁态势评级的变权方法[J]. 系统科学与数学, 2021, 41(9): 2477-2491.
(Yu G F, Li D F. Variable weight method of rating for network security threat situation[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2021, 41(9): 2477-2491.)
- [28] 束兰根, 辛晴. 碳达峰视角下的中国地级以上城市碳排放与经济发展相关性研究[J]. 电子科技大学学报: 社会科学版, 2021, 23(5): 1-11.
(Shu L G, Xin Q. Research on the relationship between urban carbon emissions and economic development of China from the perspective of carbon peak[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition, 2021, 23(5): 1-11.)

作者简介

余高锋(1986—), 男, 教授, 博士, 从事经济管理决策与博弈等研究, E-mail: yugaofeng666@163.com;

李登峰(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事经济管理决策与博弈等研究, E-mail: lidengfeng@fzu.edu.cn.