

控制与决策

Control and Decision

知识图谱强化网络分析法的系统评价方法

刘剑慰, 邢健豪, 姜斌, 冒泽慧, 马亚杰

引用本文:

刘剑慰,邢健豪,姜斌,冒泽慧,马亚杰. 知识图谱强化网络分析法的系统评价方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 236–243.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0364>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于群决策考虑属性效用一致性的DEA他评交叉效率公共权重排序法](#)

A common-weight ranking method for DEA peer-efficiency based on group decision-making and considering the consistency of attribute utility

控制与决策. 2021, 36(9): 2279–2289 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1719>

[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>

[基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价](#)

Dynamic comprehensive evaluation of power grid emergency capability based on fuzzy-two-stage super efficiency SBM

控制与决策. 2021, 36(6): 1333–1341 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1128>

[基于不变网络模型和故障注入的分布式信息系统故障溯源方法](#)

Fault source location algorithm for distributed information system based on invariant network and fault injection

控制与决策. 2020, 35(11): 2723–2732 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0214>

[乡村旅游开发适宜性等级评价TOPSIS方法](#)

TOPSIS method of suitability grade assessment for rural tourism development

控制与决策. 2020, 35(11): 2619–2625 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1565>

知识图谱强化网络分析法的系统评价方法

刘剑慰, 邢健豪, 姜斌[†], 冒泽慧, 马亚杰

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 211100)

摘要: 针对传统系统评价方法在评价指标体系构建和权重分配过程中过于依赖专家主观意见的缺点, 利用网络分析法 (ANP) 结构与知识图谱结构的相似性, 提出一种基于知识图谱的网络分析强化方法, 充分使用先验知识, 增强评价的完备性和客观性. 首先, 收集评价任务相关的文本数据建立知识图谱, 作为网络分析法的网络层指标库; 然后, 依据评价任务确定网络分析法的控制层, 包括评价目标和评价准则. 根据控制层, 在网络层指标库中搜索适配的指标构建网络层; 接着, 以指标与准则间的相似度为客观度标准, 调整指标相对重要性, 并通过网络分析法计算各指标的权重, 依据各指标的得分完成系统评价; 最后, 应用案例的结果验证该方法具有有效性、先进性以及通用性.

关键词: 系统评价; 知识图谱; 网络分析法; 评价指标; 指标权重; 相似度

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0364

引用格式: 刘剑慰, 邢健豪, 姜斌, 等. 知识图谱强化网络分析法的系统评价方法 [J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 236-243.

System evaluation method of analytic network process strengthened by knowledge graph

LIU Jian-wei, XING Jian-hao, JIANG Bin[†], MAO Ze-hui, MA Ya-jie

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of traditional system evaluation methods that rely too much on the subjective opinions in the construction of an evaluation indicator system and weight distribution, this article utilizes the similarity between the structure of analytic network process (ANP) and the structure of knowledge graph to propose a strengthened analytic network process method based on knowledge graph. This method adopts prior knowledge to enhance the completeness and objectivity of the evaluation. Firstly, the text data related to the evaluation task is collected to establish the knowledge graph which is the indicator library of the network layer. Secondly, the control layer of the analytic network process that includes the evaluation objective and the evaluation criteria is determined according to the evaluation task. The network layer is constructed by searching for suitable indicators in the network layer indicator library according to the control layer. Thirdly, the similarity between the indicators and the criteria is adopted as the objective standard to adjust the relative importance of the indicators. Through the analytic network process, the weight of each indicator is calculated to complete the system evaluation based on the score of each indicator. Finally, the results of the application cases verify that the proposed method has effectiveness, advanced nature and universality.

Keywords: system evaluation; knowledge graph; analytic network process; evaluation indicator; indicator weight; similarity

0 引言

系统评价是综合运用系统工程的原理、模型和方法, 根据设定的目标体系, 从不同方面对复杂系统及其方案进行科学评价. 系统评价不仅对复杂设备的维护管理有积极作用^[1], 对工程项目的长远规划也有重要意义.

系统评价主要有定性和定量两类评价方法^[2]. 定性评价不采用数学的方法, 由评测专家根据自己掌握的知识 and 实际情况, 对评价对象给出描述性评价结果. 定性评价简便灵活, 但是由于缺少充分的数据支撑, 评价结论具有较强的主观性. 常用的定性评价方法有小组座谈会法^[3]、头脑风暴法^[4]、德尔菲法^[5]

收稿日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-08-09.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020AAA0109305).

[†]通讯作者. E-mail: binjiang@nuaa.edu.cn.

等.定量评价则采用数学的方法,由评测专家根据评价任务相关的数据资料,对评价对象给出数值化评价结果.定量评价较为精确、客观,但是难以处理无法量化的因素.常用的定量评价方法有层次分析法^[6]、网络分析法^[7]、模糊评价法^[8]、灰色评价法^[9]、熵权法^[10]、逼近理想解排序法^[11]、神经网络评价法^[12]等.其中网络分析法属于系统评价中的定量评价方法,是一种适应复杂结构的评价方法.

为适应复杂的评价对象和不断提升的评价需求,近几十年来,网络分析法理论不断发展.一方面,各种传统评价方法与网络分析法相结合形成了多种综合系统评价方法.赵凯丽^[13]引入灰色评价法,将网络分析法计算得到的指标权重与灰色评价矩阵相结合得出评价价值,减少了网络分析法中指标评分过程中的主观影响.Agrawal等^[14]将逼近理想解排序法与网络分析法相结合,充分利用原始数据信息,计算各评价方案间的差距,以确定最优评价方案,有效解决了单一网络分析法无法进行多目标评价的问题.田霖等^[15]采用模糊网络分析法,对所有评价因素的整体优先级进行排序,确定关键因素作为评价指标,然后对目标进行评价,增强了评价的合理性;另一方面,网络分析法通过结合其他领域的理论,使其原本理论框架不断拓展.朱兴林等^[16]提出了ANP-可拓云模型,利用云模型在定性定量转换过程中的有效性,通过对专家评价语言的不确定性推理,增强了网络分析法中评价因素权重的客观性.刘晓民等^[17]将图论引入网络分析法,构建了GT-ANP模型,采用图论中的中心性概念描述评价指标体系中各节点的重要性,量化地反映了网络分析法各指标间的相互作用和影响.

由此可见,针对网络分析法的研究工作主要集中于将网络分析法与其他评价方法优势结合以及对网络分析法的模型作出优化.但是目前这些研究仍然局限于传统的系统评价理论框架内,传统的系统评价方法中评价指标体系的建立和权重分配过程,往往需要依赖专家组的现场讨论,对专家知识的利用重复、低效,且具有不完备性和主观性.因此如何充分利用先验知识,提升评价完备性和客观性是当前系统评价研究面临的主要问题.

在当今大数据时代的背景下,数据爆炸式地产生,各领域的专业知识和数据规模不断扩大,质量不断提高.Picciotto^[18]强调了大数据在扩展评估实践的范围和提高质量方面有着巨大的前景.同时也指出评估人员对大数据不能做到快速利用,难以发挥大数据革命对评估学科的战略意义.知识图谱是大数据

的重要产物,其概念于2012年由Google公司首先提出,最初应用于改善其搜索引擎的质量.知识图谱本质上是一种语义网络,由海量的节点和边构成,其中节点表示实体而边表示实体间的各种关系.知识图谱以图数据的形式储存着人类大量的先验知识^[19],可为系统评价过程中专家的意见提供有效补充,提升评价完备性.

考虑到知识图谱在解决系统评价研究问题上的优势以及网络分析法网络层结构与知识图谱结构的相似性,本文提出一种知识图谱强化网络分析法的系统评价方法.该方法基于知识图谱优化网络层构建过程,充分利用知识图谱中的先验知识提升评价完备性;此外,还根据指标与准则的相似度为客观标准,对指标间的相对重要性作出修正,提升评价客观性.

1 问题描述

基于网络分析法的系统评价的问题主要体现在评价指标体系构建和定量评价2个方面.

1.1 评价指标体系构建问题描述

评价指标是描述系统状态的具体标志,如在评估某方案时,通常会设立成本评价指标来衡量执行该方案的益处^[20].一个复杂系统包含许多评价指标,由这些指标构成的评价指标体系是进行系统评价的核心和基础.网络分析法的评价指标体系由控制层和网络层共同组成.控制层包括评价目标和评价准则;所有受控制层支配的元素组成网络层,元素组间相互影响.网络分析法中的准则是对系统状态概括性地描述,而元素则是在准则的范围内对系统状态更具体地描述,两者均是重要的评价指标.

在传统的网络分析法中,评价指标体系的构建依赖于专家讨论,存在主观性较强且完备性不高的问题.在网络分析法中,网络层是依据控制层而建立,且其包含的评价指标繁多,指标间关系复杂,因此评价指标体系构建的关键主要体现在其网络层上.

本文采用知识图谱优化了网络分析法网络层的构建,改进后的网络分析法结构如图1所示.

依据相关数据建立包含大量有关评价任务先验知识图谱,作为网络分析法中建立网络层的指标库,提升了评价指标体系的完备性;然后,根据评价目标或准则,在知识图谱中检索适配指标构建网络层,减少了专家设置评价指标的主观性.

1.2 定量评价问题描述

定量评价需要结合评价指标体系,通过具体的评价计算求得综合反映评价对象的评价结果.评价结果是对评价对象的直观描述,基于网络分析法的系统

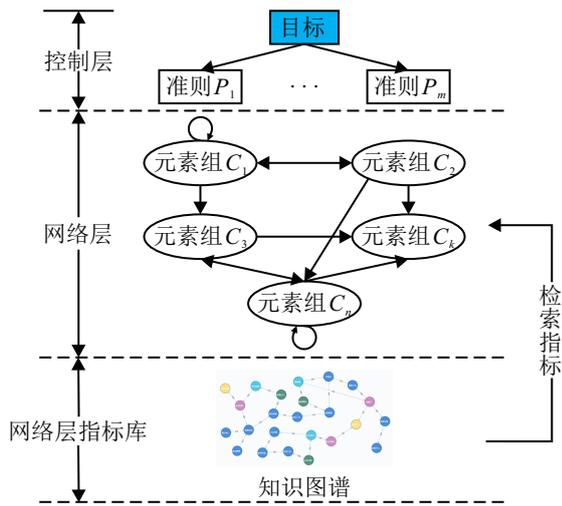


图1 知识图谱强化网络分析法结构

评价的结果表示为各评价指标得分的加权和 R , 有

$$R = VS^T, \tag{1}$$

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_n), \tag{2}$$

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_n). \tag{3}$$

其中: S 为评价指标的评价得分向量; $s_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为评价指标 i 的得分, 评价得分通常由对评价指标数据打分得到, 有具体数据作为客观依据; V 为评价指标的权重向量; $v_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为评价指标 i 对评价目标的权重。

在传统网络分析法评价中, 指标权重的确定取决于专家给出的指标间相对重要性, 具有较强的主观性。此外, 评价指标权重值的分配高低还反映了各指标对评价对象的重要程度。因此, 基于网络分析法的系统评价, 其定量评价问题主要体现在指标权重的确定上。本文以指标与准则间的相似度为客观度标准, 修正指标间的相对重要性, 以减少主观性。

2 基于知识图谱建立网络层

构建评价指标体系是进行系统评价的核心和基础。传统网络分析法中评价指标体系的构建, 需要经过专家组的研究和讨论。这一过程耗费人力, 不能对专家知识重复利用。针对这些问题, 本文利用知识图谱改进网络层的构建, 即基于知识图谱自动建立网络层, 降低人工参与, 同时充分利用先验知识提升评价指标体系的完备性。

2.1 数据处理

1) 构建知识图谱。确定评价任务, 然后搜集相关文本数据, 作为建立知识图谱的主要知识来源。结合实际情况分析, 综合各种自然语言处理技术, 实现从文本中抽取实体、关系, 从而建立知识图谱。

2) 对数据进行词嵌入。对之前收集到的数据进

行词嵌入得到词向量, 计算词向量间的余弦相似度作为从网络层指标库检索指标与修正指标间初始相对重要性的依据。

词嵌入是一种词的类型表示, 是将词汇映射至实数向量的方法总称。词嵌入将词的特征映射至较低的维度, 减少了模型参数, 加快了训练速度, 且使得具有相似意义的词具有相同的表示, 更符合客观实际。

在对文本数据进行词嵌入时, 若网络分析法控制层准则在文本数据中不存在, 则需给出该准则的补充描述, 放入文本数据中一起作词嵌入以获得控制层准则的词向量。

3) 确定知识图谱各节点关键词。若知识图谱中存在节点实体是较长的文本信息而非单一词汇, 则需对节点提取关键词概括文本信息, 从而提升搜索效率。同时, 节点间、准则与节点间的相似度可简单转化为其关键词词向量的余弦相似度。参考词频-逆文件频率 (TF-IDF)^[21], 定义了知识图谱中提取节点关键词的算法。

算法1 在知识图谱中提取节点关键词的算法。

step 1: 计算出节点中每个词的词频 TF 和逆节点频率 INF, 即

$$TF = \frac{c}{m}, \tag{4}$$

$$INF = \lg \left(\frac{N}{n+1} \right). \tag{5}$$

其中: c 为某词在该节点出现的次数, m 为该节点的总词数, N 为知识图谱的总节点数, n 为包含该词的节点数。

step 2: 计算节点中每个词的 TF-INF 值, 即

$$TF-INF = TF \times INF. \tag{6}$$

step 3: 将节点中的词按 TF-INF 值降序排列, 取排序最高的词或较高的几个词作为该节点的关键词。

TF-INF 为某一词对知识图谱中某个节点的重要程度, TF-INF 值大的词汇表示在特定节点中较高频率出现, 而在所有节点中较低频率出现, 因而可作为关键词代表该节点的关键信息。

2.2 建立网络层

确定网络分析法的控制层, 包括评价目标和评价准则。需要强调, 评价准则可不设置, 但是必须要有评价目标; 然后, 根据控制层的目标或准则, 搜索知识图谱中相关节点作为指标建立网络层。

若控制层目标或准则在知识图谱中有相同的节点, 即该控制层元素与网络层有直接关系, 则可视为网络分析法中的“连接”准则, 查询时只需返回与该节点相关的、具有特定标签的节点作为该控制层元

素候选相关指标.

若控制层目标或准则在知识图谱中无相同节点,即该控制层元素与网络层无直接关系,则视为网络分析法中的“诱导”准则,查询需找到与该元素相似度最高的、具有特定标签的节点.定义控制层元素与节点排序第*i*位的关键词的余弦相似度为

$$S_{P_S_Node_i} = \frac{K_{P_S} K_{Node_i}^T}{\|K_{P_S}\|_2 \|K_{Node_i}\|_2}. \quad (7)$$

其中: K_{P_S} 为控制层目标或准则的关键词词向量, K_{Node_i} 为某知识图谱节点TF-NF值排序第*i*位关键词的词向量.

定义控制层元素与节点间的相似度 $S_{P_S_Node}$ 为控制层元素与节点所有关键词余弦相似度的最大值,有

$$S_{P_S_Node} = \max\{S_{P_S_Node_1}, S_{P_S_Node_2}, \dots, S_{P_S_Node_k}\}. \quad (8)$$

计算每个节点和控制层元素的 $S_{P_S_Node}$,返回值最高的节点.然后,通过查询语言在知识图谱中检索这些节点和与其相关的、具有特定标签的节点作为候选指标.需要注意的是,在检索指标构建网络层时,应保留它们在知识图谱中原本存在的相互影响的关系.最后,对形成的网络层进行审核、修改和补充.至此,网络分析法的评价指标体系已全部构建完成.

3 确定指标权重并完成评价

在评价指标体系构建完成后,若要获得直观的评价结果,则需要根据指标体系进行定量评价.评价指标权重的设置反映了各指标对评价对象的重要程度,是定量评价过程中的关键环节.传统网络分析法中权重的确定完全取决于专家给出的指标间相对重要性,主观性过强.针对这一问题,本文根据指标与准则间的相似度对相对重要性作出修正,以增强权重的客观性.

3.1 确定相对重要性

step 1: 确定初始相对重要性.一般情况下,网络分析法中有直接优势度法和间接优势度法两种比较元素重要性的方式.直接优势度法是比较某两元素

表1 1-9标度具体含义

a_{ij}	含义
1	元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 同样重要
3	元素 <i>i</i> 比元素 <i>j</i> 稍重要
5	元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 明显重要
7	元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 强烈重要
9	元素 <i>i</i> 与元素 <i>j</i> 极端重要
2,4,6,8	中间值

对给定准则的相对重要性,适用于元素间相互独立的情况;间接优势度法则是在准则下,比较某两元素对第3个元素的相对重要性,适用于元素间相互影响的情况.以上两种方法中的相对重要性一般均由专家组确定,相对重要性通常采用1-9标度法^[22],如表1所示.

step 2: 修正相对重要性.对于初始给出的各指标间的初始相对重要性,根据元素(指标)间的相似度,对元素间的相对重要性进行修正.

假设控制层准则 P_S 控制元素组 C_i 和 C_j ,以元素组 C_j 中元素 c_{jk} 为次准则.

定义元素 c_{il} 和 c_{im} 与次准则 c_{jk} 相似度为

$$S_{c_{jk_c_{il}}} = \frac{K_{c_{jk}} K_{c_{il}}^T}{\|K_{c_{jk}}\|_2 \|K_{c_{il}}\|_2}, \quad (9)$$

$$S_{c_{jk_c_{im}}} = \frac{K_{c_{jk}} K_{c_{im}}^T}{\|K_{c_{jk}}\|_2 \|K_{c_{im}}\|_2}, \quad (10)$$

其中 $K_{c_{jk}}$ 、 $K_{c_{il}}$ 、 $K_{c_{im}}$ 为元素 c_{jk} 、 c_{il} 、 c_{im} 的TF-INF值排序最高的关键词词向量.同理也可比较直接以 P_S 为准则,没有次准则的情况下,元素组 C_i 对元素组 C_j 的相对重要性.

假设专家组给出在 c_{jk} 次准则下, c_{il} 对 c_{im} 的初始相对重要性程度为 a_{il_im} ,其修正量为

$$\delta = \begin{cases} 1, & S_{c_{jk_c_{il}}} > S_{c_{jk_c_{im}}}, a_{il_im} < 9; \\ 0, & S_{c_{jk_c_{il}}} = S_{c_{jk_c_{im}}}, a_{il_im} = 1, 9; \\ -1, & S_{c_{jk_c_{il}}} < S_{c_{jk_c_{im}}}, a_{il_im} > 1. \end{cases} \quad (11)$$

最终的相对重要性程度为

$$\bar{a}_{il_im} = a_{il_im} + \delta. \quad (12)$$

其具体含义为:若元素 c_{il} 比元素 c_{im} 在客观意义上的含义更接近次准则 c_{jk} ,即 c_{il} 与 c_{jk} 关键词词向量的余弦相似度大于 c_{im} 与 c_{jk} 的关键词词向量的余弦相似度,则在初始相对重要性上再加上一个标度,反之,则减去一个标度,以此对初始相对重要性作出客观修正,且保证修正不会使得相对重要性标度超过上下限.

3.2 构建加权超矩阵

假设网络分析法的控制层中有准则 P_1, P_2, \dots, P_m ,网络层中有元素组 C_1, C_2, \dots, C_N ,其中元素组 C_i 中有元素 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}$ ($i = 1, 2, \dots, N$),以控制层元素 P_S ($S = 1, 2, \dots, m$)为准则,以元素组 C_j 中的元素 e_{jl} ($l = 1, 2, \dots, n_j$)为次准则,根据step 1和step 2比较 C_i 中的元素相对 e_{jl} 的重要程度,从而得到元素间判断矩阵 $J_{C_i_e_{jl}}$.

$$J_{C_i-e_{jl}} = \begin{bmatrix} e_{i1_i1} & e_{i1_i2} & \cdots & e_{i1_in_i} \\ e_{i2_i1} & e_{i2_i2} & \cdots & e_{i2_in_i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{in_i_i1} & e_{in_i_i2} & \cdots & e_{in_i_in_i} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

如判断矩阵中的 e_{i1_i2} 为元素 e_{i1} 相对元素 e_{i2} 对次准则 e_{jl} 的重要性,取值为1-9标度法规定的数值.对于构建的判断矩阵,由特征根法得到排序向量 $(w_{i1}^{(j1)}, w_{i2}^{(j1)}, \dots, w_{in_i}^{(j1)})^T$.同理,得到元素组 C_i 元素以元素组 C_j 中其他元素为次准则下的判断矩阵,并通过计算求得排序向量,将所有得到的排序向量构成矩阵 W_{ij} ,即

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} w_{i1}^{(j1)} & w_{i1}^{(j2)} & \cdots & w_{i1}^{(jn_j)} \\ w_{i2}^{(j1)} & w_{i2}^{(j2)} & \cdots & w_{i2}^{(jn_j)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{in_i}^{(j1)} & w_{in_i}^{(j2)} & \cdots & w_{in_i}^{(jn_j)} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中 W_{ij} 的列向量 $(w_{i1}^{(jl)}, w_{i2}^{(jl)}, \dots, w_{in_i}^{(jl)})^T$ 为元素组 C_i 中元素 $e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in_i}$ 对元素组 C_j 中元素 $e_{jl} (l=1, 2, \dots, n_j)$ 重要程度的排序向量.最终可得到 P_S 准则下的超矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \cdots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \cdots & W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N1} & W_{N2} & \cdots & W_{NN} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

超矩阵的个数与控制层准则数目一致.由计算排序向量的过程可知,超矩阵 W 的列不是归一化的.若要确保最终的极限相对排序向量是归一化的,需要构建加权矩阵.

以 P_S 为准则,比较各元素组对次准则 C_j 的重要性,得到元素组间判断矩阵 J_{C_j} ,即

$$J_{C_j} = \begin{bmatrix} C_{1_1} & C_{1_2} & \cdots & C_{1_N} \\ C_{2_1} & C_{2_2} & \cdots & C_{2_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N_1} & C_{N_2} & \cdots & C_{N_N} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

如判断矩阵中的 C_{1_2} 是元素组 C_1 相对元素组 C_2 对次准则 C_j 的重要性.同理,根据上述判断矩阵得到排序向量 $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{Nj})^T$.依次选取剩余次准则,得到加权矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

然后,根据加权矩阵对超矩阵 W 的元素进行加权,得到加权超矩阵

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} a_{11}W_{11} & a_{12}W_{12} & \cdots & a_{1N}W_{1N} \\ a_{21}W_{21} & a_{22}W_{22} & \cdots & a_{2N}W_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}W_{N1} & a_{N2}W_{N2} & \cdots & a_{NN}W_{NN} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

记 $\bar{W} = (\bar{W}_{ij}), (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{Nj})^T$ 为归一化特征向量,且 W_{ij} 是列归一化的,因此 \bar{W} 也是列归一化的.

3.3 计算指标权重

在网络层结构中,加权超矩阵 \bar{W} 中的元素 w_{ij} 为元素 i 对元素 j 的一步优势度,是 i 与 j 两个元素间的直接影响,但是元素 i 可通过对第3个元素的影响来间接影响元素 j ,通过中间第3元素对所有元素的间接影响均是通过加权超矩阵求平方得到的^[23].依此类推,若要考虑尽可能多的元素间的影响,反映系统的整体情况,则需要提升加权超矩阵的幂次.

记 \bar{W} 的 k 次幂为

$$\bar{W}^k = (\bar{W}_{ij}^k). \quad (19)$$

一般地,元素 i 对元素 j 的 k 步优势度为

$$\bar{W}_{ij}^k = \sum_{m=1}^N \bar{W}_{im}^1 \bar{W}_{mj}^{k-1}. \quad (20)$$

当 $k \rightarrow \infty$ 时,若 \bar{W}^k 存在,则 \bar{W}^k 趋于稳定, \bar{W}^k 各列的非0值均相同, \bar{W}^∞ 可表示为

$$\bar{W}^\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} \bar{W}^k, \quad (21)$$

\bar{W}^∞ 的列向量为准则 P_S 下各元素的极限相对排序向量,即式(3)中的评价指标权重向量 V .

3.4 计算评价结果

根据专家组打分,可得到式(2)中的评价得分向量 S ,评价目标最后的得分表示为各评价指标得分的加权和,有

$$R = VS^T. \quad (22)$$

4 应用案例

本节将采用2个应用案例对该系统评价方法进行说明,表明该方法的有效性、先进性以及通用性.

第1个应用案例是对某制造公司生产线上的机械手故障对生产的影响进行评价.对于某部位故障的影响进行评价,需要结合生产过程分析该故障对应的如具体故障和故障原因等相关指标,将评价目标细分,从而提高评价的准确性和针对性.该公司在某一时期生产过程中产生了大量的设备问题解决报告,这些工单详细地描述了该公司生产过程中生产线上常见的故障问题,导致该故障的原因以及相应的维修过程等,包含与评价目标相关的具体评价指标.考虑到上述情况,采用所提出知识图谱强化网络分析法的系

统评价方法实现评价过程。

4.1 知识图谱的构建

对设备问题解决报告中的文本描述进行分析,总结确定了以下5类3元组关系:(具体故障、追因、故障原因),(故障原因、导致、故障原因),(处理人、使用、维修方法),(故障原因、涉及、零部件),(设备型号、属于、设备分类)。按照3元组规定的实体和关系类别,采用人工进行标注,将处理后结构化的文本导入Neo4j平台,形成了共计9109个节点,12320条关系的专业知识图谱,如图2所示。

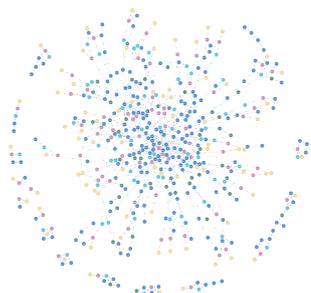


图2 基于某制造公司设备问题解决报告建立的知识图谱

需要强调的是,该知识图谱反映的是设备问题解决报告描述中的所有有效信息,因此也可实现其他评价任务,如对其他故障的影响以及问题处理人的维修水平进行评价等。

4.2 词嵌入和节点关键词确定

本应用案例采用的Word2Vec(word to vectors)算法^[24]是当下最常用的词嵌入算法,其核心思想是基于上下文,先用one-hot形式的独热编码代表各个词,然后通过一个预测目标函数学习这些向量的参数。Word2Vec模型本质上是单隐含层前馈神经网络,其输入是独热编码,隐含层是线性单元,不设激活函数,输出层维度与输入层维度一致,采取softmax回归。训练完成后所得到的输入层到隐含层间的权重矩阵为词向量。

Word2Vec算法设置如下:1)采用CBOW算法,即通过上下文单词来预测目标单词;2)词向量的维度为100;3)当前词与预测词在同一句子中的最大距离为5;4)词频少于5的单词会被丢弃。

对文档数据进行jieba分词,然后采用上述参数设置的Word2Vec算法进行词嵌入得到了词向量库,总词向量数为8191。

将知识图谱所有的节点数据作为语料进行jieba分词处理,然后按照所提出知识图谱节点提取关键词算法,选取每个节点中TF-INF值排序前2名的词作为该节点的关键词。

4.3 网络分析法结构的构建

本应用案例确定的评价目标为对该制造公司某一生产时期机械手故障的影响进行评价。为尽量减少人为参与,不设置评价准则,网络分析法控制层仅有评价目标一个元素,其关键词为“机械手”。

对机械手故障重要性的评价应落实到具体故障,通过所提出的控制层元素与节点相似度算法检索知识图谱中标签为具体故障的节点,搜索到5个与评价目标相似度最高的节点,分别为:机械手夹紧故障,机械手回0故障,机械手抓料故障,机械手跳电以及机械手不动作。将其作为具体故障元素集,然后利用Cypher查询语言与这5个节点相关的节点,分析后选取标签为故障原因的节点为最后打分的评价指标,即将对具体故障的评价细分为对故障原因的评价。这些节点共计30个,将其作为故障原因元素集。

对比传统网络分析法和基于知识图谱的方法针对该评价目标建立的评价指标体系,两者的评价指标个数与指标间的关系数如表2所示。

表2 评价指标体系

方法	传统网络分析法	基于知识图谱
指标个数	19	35
指标间关系数	14	31

表2中数据表明该方法充分利用了知识图谱中机械手故障的描述,选取到了更多的指标,且挖掘了指标间的相互联系,有效提升了评价的完备性。

4.4 计算指标权重和评价结果

按照所提出方法的步骤,确定初始相对重要性和进行修正后构建加权超矩阵,计算求得所有故障原因相对评价目标的指标权重如图3所示。

PLC信号错误	0.10908	工件信息出错	0.04090
UL轴异响	0.01169	工件数据丢失	0.01636
下料滚道处传感器脏	0.04090	工件状态不正常	0.01169
传感器位置不好	0.01169	托架位置不好	0.02805
回0程序存在条件未满足	0.10908	抓料位置不好	0.02026
固定导向松动	0.00390	机械手位置不好	0.02805
夹紧信号错误	0.02805	机械手未插进销控	0.01169
夹紧压力不好	0.01169	毛胚存在差异	0.01636
安全交叉检验无法通过	0.05454	气动行程开关固定处松动	0.01169
安全回路故障	0.10908	消音器堵塞	0.01169
定位块位置不好	0.01169	程序问题	0.04090
对射开关坏	0.04090	编码器坏	0.05454
导向条松动偏移	0.00390	编码器接线损坏	0.02727
工件上料定位不佳	0.05454	编码器线夹过紧	0.02727
工件位置不好	0.01169	锁定销卡死	0.04090

图3 机械手故障原因评价指标权重

按照评分划分的等级如表3所示。

表3 评分等级划分

评分	0~3	3~7	7~10
对生产线的影响等级	低	中	高

对这些评价指标进行打分,并结合指标权重,可得到机械手故障的重要性得分。针对基于知识图谱

建立的评价指标体系,传统网络分析法和加入修正相对重要性得到的评价得分如表4所示.表4中数据表明两种方法所得到的评价结果基本一致,可见设备问题报告所描述的生产时期内,机械手故障对生产线的影响等级为“高”.但是加入修正相对重要性的权重计算方法相比传统网络分析法权重计算方法,在确保评价结果合理的情况下,参考了指标与准则间的客观相似度,增强了评价过程客观性.

表4 机械手对生产线的影响得分

方法	传统网络分析法	加入修正相对重要性
评价得分	8.544	8.387

4.5 通用性验证

为进一步验证所提出方法的通用性,在此对一个公开案例进行评价.该案例选取的评价指标体系参考文献[25],评价目标为机床故障对机床可靠性的影响;对应选取的知识图谱为机床故障诊断知识图谱[26].将原评价指标体系最底层指标作为具体故障部位集,按照上一案例的流程检索适配指标后,最终得到的网络分析法结构如图4所示,新增20个具体故障原因指标.

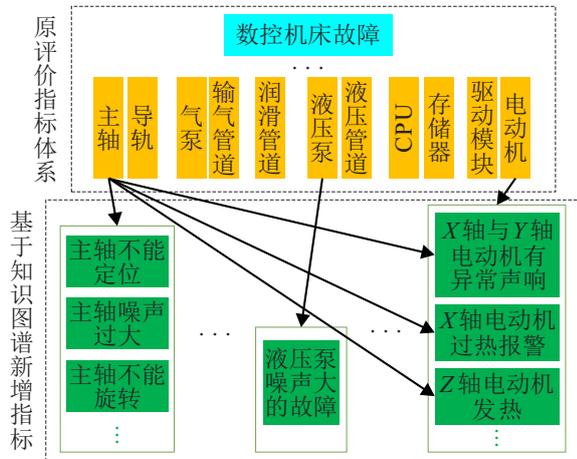


图4 基于公开知识图谱建立的网络分析法结构

Y轴导轨润滑不足	0.125 000	PRIMO-S 系统CPU 故障	0.083 333
液泵噪声大	0.125 000	SM 系统CPU 模块I/C、S 报警灯亮的故障	0.041 667
X轴与Y轴电动机有异常声响	0.014 762	主轴不能定位	0.011 791
X轴电动机过热报警	0.025 944	主轴不能旋转	0.078 709
Z轴电动机发热	0.013 199	主轴噪声过大	0.002 225
主轴电机互锁故障	0.031 010	主轴驱动器报警	0.011 442
开机电动机高速旋转	0.019 252	ALM 930 为系统存储器ROM 报警	0.038 852
主轴伺服驱动单元损坏的故障	0.143 939	NC 系统存储器板的故障	0.061 673
伺服驱动未准备好	0.011 364	系统出现ALM 901 磁泡存储器报警	0.024 475
开机时系统电源与伺服驱动电源均无法正常接通	0.011 364	导轨润滑不足的故障	0.125 000

图5 机床故障原因评价指标权重

然后采用该方法计算出指标权重,如图5所示.结合对评价指标10分制的打分,最后得到机床故障对机床可靠性的影响得分6.117.

案例2验证了所提出方法对于公开评价指标体系、公开知识图谱,同样能够实现整个评价流程,具有通用性.

5 结论

针对传统系统评价方法在指标体系构建和指标权重分配过程中过于依赖专家主观意见的不足,本文基于网络分析法与知识图谱结构的相似性将两者结合,提出了一种知识图谱强化网络分析法的系统评价方法.该方法基于知识图谱优化了网络分析法网络层的构建过程,充分利用知识图谱中的先验知识来提升评价的完备性;同时基于指标与准则间的相似度,对其相对重要性标度进行了修正,提升了评价过程的客观性;最后通过实现该系统评价方法在故障影响评价中的应用,验证了所提出方法的有效性.所提出的知识图谱强化网络分析法的系统评价方法相比传统的网络分析法评价,有效减少了对专家主观意见的依赖程度,且提升了指标体系构建过程的完备性和指标权重分配过程的客观性.

参考文献(References)

- [1] 王村松, 陆宁云, 程月华, 等. 基于无标签、不均衡、初值不确定数据的设备健康评估方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(11): 2687-2695. (Wang C S, Lu N Y, Cheng Y H, et al. Equipment health risk assessment based on unlabeled, unbalanced data under uncertain initial condition[J]. Control and Decision, 2020, 35(11): 2687-2695.)
- [2] 刘思峰, 郭本海, 方志耕. 系统评价: 方法、模型、应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-31. (Liu S F, Guo B H, Fang Z G. System evaluation: Methods, models, applications[M]. Beijing: Science Press, 2015: 1-31.)
- [3] Islam R. Group decision making through nominal group technique: An empirical study[J]. Journal for International Business and Entrepreneurship Development, 2010, 5(2): 134-153.
- [4] Mohanty B K, Das S. Brain storming session on surface and ground water resources of odisha: Status, policy and strategy[J]. Journal of the Geological Society of India, 2018, 92(1): 125-127.
- [5] Brady S R. Utilizing and adapting the Delphi method for use in qualitative research[J]. International Journal of Qualitative Methods, 2015, 14(5): 160940691562138.
- [6] 彭道刚, 卫涛, 赵慧荣, 等. 基于D-AHP和TOPSIS的火电厂控制系统信息安全风险评估[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2445-2451. (Peng D G, Wei T, Zhao H R, et al. Cyber security

- risk assessment of power plant control system based on D-AHP and TOPSIS[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(11): 2445-2451.)
- [7] Yi J N, Liu L W, Li J Z. Analysis on the innovation ability of regional enterprises based on the analytic network process[J]. *R & D management*, 2008, 20(2): 23-27.
- [8] Wu T, Ma J, Zhang H. Network security evaluation mould based on multifactor fuzzy evaluation[J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 2013, 5(5): 256-263.
- [9] Shi H W, Deng Y. A grey model for evaluation of information systems security[J]. *Journal of Computers*, 2012, 7(1): 284-291.
- [10] Nurwulan N, Jiang B. Possibility of using entropy method to evaluate the distracting effect of mobile phones on pedestrians[J]. *Entropy*, 2016, 18(11): 390.
- [11] 费巍, 余高峰, 李登峰. 乡村旅游开发适宜性等等级评价 TOPSIS 方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(11): 2619-2625.
(Fei W, Yu G F, Li D F. TOPSIS method of suitability grade assessment for rural tourism development[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(11): 2619-2625.)
- [12] Sun W W, Tang J, Bai C S. Evaluation of university project based on partial least squares and dynamic back propagation neural network group[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 69494-69503.
- [13] 赵凯丽. 基于灰色网络分析法的信息系统安全风险分析及评价研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017: 35-43.
(Zhao K L. Research on information system security risk analysis and assessment based on G-ANP method[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017: 35-43.)
- [14] Agrawal A, Seh A H, Baz A, et al. Software security estimation using the hybrid fuzzy ANP-TOPSIS approach: Design tactics perspective[J]. *Symmetry*, 2020, 12(4): 1-21.
- [15] 田霖, 张露露. 基于模糊 ANP 和 TOPSIS 法的科技型中小企业成长性评价体系构建[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(2): 184-190.
(Tian L, Zhang L L. Establishment of growth evaluation system for technology-based SMEs based on fuzzy ANP and TOPSIS[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(2): 184-190.)
- [16] 朱兴林, 姚亮, 叶拉森. 基于 ANP-可拓云模型的公路枢纽城市载体竞争力评价[J]. *公路*, 2021, 66(10): 235-242.
(Zhu X L, Yao L, Ye L S. Evaluation of competitiveness of highway hub cities carrier based on ANP and extension cloud model[J]. *Highway*, 2021, 66(10): 235-242.)
- [17] 刘晓民, 王文娟, 王震宇, 等. 基于 GT-ANP 理论的生态脆弱区煤-水协调绿色开采度评价[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(8): 203-210.
(Liu X M, Wang W J, Wang Z Y, et al. Evaluation of coal water coordinated green mining degree in ecologically fragile area based on GT-ANP theory[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 203-210.)
- [18] Picciotto R. Evaluation and the big data challenge[J]. *American Journal of Evaluation*, 2020, 41(2): 166-181.
- [19] 李涓子, 侯磊. 知识图谱研究综述[J]. *山西大学学报: 自然科学版*, 2017, 40(3): 454-459.
(Li J Z, Hou L. Reviews on knowledge graph research[J]. *Journal of Shanxi University: Natural Science Edition*, 2017, 40(3): 454-459.)
- [20] Chen C, Lu N Y, Jiang B, et al. A risk-averse remaining useful life estimation for predictive maintenance[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(2): 412-422.
- [21] Wang X Y, Ning H Y. TF-IDF keyword extraction method combining context and semantic classification[C]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Data Science and Information Technology*. Xiamen, 2020: 123-128.
- [22] 郭亚军, 张发明, 易平涛. 标度选择对综合评价结果的影响及合理性分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(7): 1277-1280.
(Guo Y J, Zhang F M, Yi P T. Rationality analysis on different scales and comprehensive evaluation result sensitivity[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(7): 1277-1280.)
- [23] Saaty T L, Vargas L G. *Decision making with the analytic network process*[M]. New York: Springer Science, 2013: 15-17.
- [24] Mikolov T, Chen K, Corrado G, et al. Efficient estimation of word representations in vector space[J/OL]. 2013, arXiv: 1301.3781.
- [25] 沈明瑞, 刘阔, 董浩琪, 等. 基于贝叶斯与故障树的数控机床可靠性评价[J]. *制造技术与机床*, 2020(1): 61-65.
(Shen M R, Liu K, Dong H Q, et al. Reliability evaluation of CNC machine tools based on Bayes and fault tree[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2020(1): 61-65.)
- [26] Wang R Y. Shukongdashi[EB/OL]. [2022-6-15]. <https://github.com/wangrenyisme/Shukongdashi>.

作者简介

刘剑慰(1977—), 男, 副教授, 博士, 从事网络控制系统故障检测与容错控制等研究, E-mail: ljw301@nuaa.edu.cn;

邢健豪(1998—), 男, 硕士生, 从事知识图谱、系统评价理论等研究, E-mail: xjh19980727@163.com;

姜斌(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事故障诊断与容错控制及其在飞机、卫星和高速列车中的应用等研究, E-mail: binjiang@nuaa.edu.cn;

冒泽慧(1981—), 女, 教授, 博士生导师, 从事具有干扰与微小渐变故障的系统故障诊断与容错控制、高速列车与航天器飞行控制应用等研究, E-mail: zehuimao@nuaa.edu.cn;

马亚杰(1987—), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应故障、容错控制等研究, E-mail: yajiemao@nuaa.edu.cn.