

文章编号:1671-1556(2017)05-0110-05

基于 ISM 和 TIFNs 的企业安全投入研究

黄萍,徐晶晶,朱伟方

(福州大学环境与资源学院,福建福州 350116)

摘要:为系统研究企业安全投入结构,基于解释结构模型(ISM)方法的特点,从人员投入、安全设备投入、安全管理投入 3 个维度找出影响企业安全投入的 16 个主要因素,初步建立企业安全投入的 4 级多层阶梯 ISM 模型;根据建立的 ISM 模型,采用直觉三角模糊数(TIFNs)评估企业安全投入各影响因素的影响程度大小,分别计算直觉模糊数权重和三角模糊数权重,最后计算各影响因素的组合权重,确定正、负理想点,并引入 TOPSIS 方法计算各影响因素的相对贴近度。结果表明:企业安全投入的 3 个维度的重要度从高到低依次为安全管理投入、人员投入、安全设备设施投入,这为合理地确定企业安全投入的结构提供了重要依据,并有效解决了信息的模糊性和不确定性问题。

关键词:企业安全投入;解释结构模型(ISM);直觉三角模糊数(TIFNs)

中图分类号:X915.4

文献标识码:A

DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2017.05.019

Research on Enterprise Safety Investment Based on ISM and TIFNs

HUANG Ping, XU Jingjing, ZHU Weifang

(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: To develop the systematic study of enterprise safety investment structure, this paper figures out 16 basic elements from 3 dimensions including personnel investment, safety equipment investment, safety management investment on the base of the characteristics of the interpretive structural modeling (ISM) method. The paper preliminarily establishes 4 level multi step interpretive structural model of enterprise safety investment. According to the established ISM model, the paper applies the triangular intuitionistic fuzzy numbers (TIFNs) to evaluating the influence of the factors of safety investment in each enterprise. The study calculates the intuitionistic fuzzy weights and triangular fuzzy weights, calculates the combined weights of all elements, determines the positive and negative ideal points and applies TOPSIS to calculating the relative closeness degrees of each factor. The results show that the importance from high to low of 3 dimensions of enterprise safety investment is safety management investment, personnel investment, safety equipment investment, which provides an important basis for reasonable safety investment structure, and can effectively solve the ambiguity and uncertainty of information.

Key words: enterprise safety investment; interpretive structural modeling (ISM); triangular intuitionistic fuzzy numbers(TIFNs)

安全投入是以获取最大安全效果和效益为目标,对企业中有限的资源进行合理分配,安全效益的实现可避免人员伤亡和财产损失,维持企业顺利进行生产,创造更多的效益和财富^[1]。不合理的安全投入不仅浪费资源,而且可能酿成事故,造成人员伤亡或经济损失,故合理的安全投入结构应引起足够

的重视。

近年来,许多研究者采用不同的方法对企业的安全投入进行了大量研究,如张飞燕等^[2]将灰色系统理论应用到煤矿安全投入结构研究中,得出了安全投入对安全效益的影响程度并排序^[2];任海芝等^[3]将层次分析法与灰色关联分析法相结合,研究

收稿日期:2016-10-23 修回日期:2017-09-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51604082)

作者简介:黄萍(1986—),女,博士,讲师,主要从事安全管理与安全科学技术方面的研究。E-mail:2020312526@qq.com

了煤炭企业安全投入与安全产出之间的关联度^[3];赵鹏飞等^[4]应用 M(1,2,3)模型对煤矿安全投入结构进行了研究;赵宝福等^[5]采用层次分析法与直觉三角模糊数相结合,研究确定了各煤矿企业安全投入各影响因素的总体权重;董大旻等^[6]应用结构方程模型和探索性因子对建筑企业安全投入进行了研究;国外研究者 Son 等^[7]运用成本效益分析法对建筑企业的安全投入进行了研究;Lopez-Alonso 等^[8]运用问卷调查法对建筑行业的安全投入进行了研究;Patrick 等^[9]对航空航天的安全投入结构进行了研究。

但上述研究缺乏对安全投入深层因素的研究且未能挖掘出隐含因素,且对数据的模糊性和不确定性处理不到位,缺少对数据稳定性的考虑。解释结构模型(ISM)作为重要的系统工程分析方法,可深入挖掘系统的隐含因素且已应用于特种设备安全监管体系构建^[10]和矿山生态环境安全影响因素分析^[11]等方面,并取得了较好的效果。该方法将复杂系统分为若干子系统,利用实践经验构造一个多级递阶的结构模型,通过该模型结构找出系统中最重要影响因素,进而用于分析关系复杂且结构不清晰的体系^[12-13]。此外,直觉三角模糊数(TIFNs)也受到许多学者的关注,如吴海涛等^[14]将直觉三角模糊数应用到高铁列车调度指挥的人因失误风险排序研究中。

鉴于此,本文拟采用系统工程中的 ISM 方法,深入分析企业安全投入中各个影响因素之间的相互联系,揭示影响企业安全投入的直接因素、间接因素以及深层因素,并进一步利用直觉三角模糊数(TIFNs)计算出各级指标的权重并进行排序,这对合理分配企业有限的人力、物力资源,提高企业效益具有深远意义。

1 企业安全投入 ISM 建模

1.1 企业安全投入的影响因素分析

ISM 建模流程主要包括以下步骤:组建 ISM 实施小组;设定拟解决的问题;选择系统构成要素;建立构思模型及反映各要素关系的可达矩阵;对可达矩阵进行分解,建立结构模型。

基于上述 ISM 建模步骤,首先找出影响企业安全投入的因子,然后根据各因子间关系建立邻接矩阵、可达矩阵,最后得出多级递阶 ISM 模型,并提出合理的解决措施。

评价指标体系的建立必须遵循系统性、科学性、

普遍性和特殊性原则,据此本文从人员投入、安全设备投入和安全管理投入 3 个维度选取了 16 个主要影响因素,详见表 1。

表 1 企业安全投入的主要影响因素
Table 1 Main influence factors of enterprise safety investment

维度	影响因素
人员投入	安全技术素质 S ₁
	日常安全管理 S ₂
	应急与消防演练 S ₃
	安全知识宣传 S ₄
	安全教育培训 S ₅
	安全奖励 S ₆
安全设备投入	劳保用品 S ₇
	特种设备 S ₈
	安全防护与警示装置 S ₉
	安全设备设施的购入 S ₁₀
	专用安全设备的检修与维护 S ₁₁
	职业卫生设备 S ₁₂
安全管理投入	应急救援体系 S ₁₃
	安全文化 S ₁₄
	安全规程 S ₁₅
	安全监察 S ₁₆

1.2 建立邻接矩阵 R

如果 S_i 对 S_j 有影响,则为 1;若 S_i 对 S_j 无影响,则为 0。由此可以确定两两因素之间的相互关系:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当 } S_i \text{ 对 } S_j \text{ 有影响时} \\ 0 & \text{当 } S_i \text{ 对 } S_j \text{ 无影响时} \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为矩阵元素。

则其邻接矩阵 R 为

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.3 建立可达矩阵 M

可达矩阵 M 指用矩阵形式表述有向连接图各

2 企业安全投入的直觉三角模糊数

直觉模糊集的概念是由保加利亚学者 Atanassov 于 1986 年提出的,后来的学者又在直觉模糊集的基础上提出了可以表示非隶属度和隶属度的三角模糊数^[16]。

2.1 原始判断矩阵的确定

直觉三角模糊数可以表示为

$$\tilde{u} = ([a, b, c]; u, v)$$

其中,隶属度 u 函数和非隶属度 v 函数分别表示为

$$u(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}u & (a \leq x \leq b) \\ \frac{c-x}{c-b}u & (b < x \leq c) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (4)$$

$$v(x) = \begin{cases} \frac{b-x+v(x-a)}{b-a}u & (a \leq x \leq b) \\ \frac{x-b+v(c-x)}{c-b}u & (b < x \leq c) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:隶属度 u 表示决策者认为自己的判断值属于三角模糊数 $[a, b, c]$ 的程度;非隶属度表示决策者认为自己的判断值不属于三角模糊数 $[a, b, c]$ 的程度;决策者的犹豫度可用 $\pi = 1 - u - v$ 表示,其值越小代表越肯定。

2.2 三角模糊数权重的确定

直觉三角模糊数可以划分为直觉模糊数和三角模糊数两个部分。三角模糊数的权重计算过程如下:

特征比重 f_{ij} 为

$$f_{ij} = d_{ij} / \sum_{i=1}^m d_{ij}$$

其中, d_{ij} 为三角模糊数的期望值,可表示为

$$d_{ij} = (a_{ij} + 2b_{ij} + c_{ij})/4 \quad (6)$$

熵值 e_j 为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln(f_{ij}) \quad (7)$$

熵权 α_j 为

$$\alpha_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (8)$$

2.3 直觉模糊数权重的确定

直觉模糊数的权重计算过程如下:

直觉模糊熵 E_j 为

$$E_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\min(u_{ij}, v_{ij}) + \pi_{ij}}{\max(u_{ij}, v_{ij}) + \pi_{ij}} \quad (9)$$

熵权 β_j 为

$$\beta_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j} \quad (10)$$

2.4 指标组合权重的确定

指标组合权重 ω_j 的计算公式为

$$\omega_j = \frac{\sqrt{\alpha_j \beta_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j}} \quad (11)$$

根据企业安全投入评估指标体系,由多位专家建立初始判断矩阵,经过分别对直觉模糊数权重和三角模糊数权重的计算,最后计算出指标的组合权重。由此,可计算出企业安全投入评估指标体系的综合风险值 $\tilde{r}' = (|a_j', b_j', c_j'|; u_j', v_j')$ 和各指标的组合权重,各指标的组合权重见表 2。

表 2 企业安全投入各影响因素的组合权重和相对贴近度 η

Table 2 Combined weights of each influence factor in enterprise safety investment evaluation system

维度	权重	相对贴近度 η	影响因素	组合权重	相对贴近度 η
人员投入	0.317	0.621	安全技术素质 S_1	0.203	0.487
			日常安全管理 S_2	0.235	0.452
			应急与消防演练 S_3	0.114	0.303
			安全知识宣传 S_4	0.107	0.385
			安全教育培训 S_5	0.232	0.473
			安全奖励 S_6	0.109	0.306
			劳保用品 S_7	0.217	0.301
			特种设备 S_8	0.128	0.295
安全设备投入	0.308	0.504	安全防护与警示装置 S_9	0.289	0.369
			安全设备设施的购入 S_{10}	0.125	0.321
			专用安全设备的检修与维护 S_{11}	0.143	0.398
			职业卫生设备 S_{12}	0.098	0.317
安全管埋投入	0.375	0.625	应急救援体系 S_{13}	0.189	0.307
			安全文化 S_{14}	0.235	0.457
			安全规程 S_{15}	0.285	0.469
			安全监察 S_{16}	0.291	0.498

2.5 运用 TOPSIS 方法计算指标的相对贴近度

根据直觉三角模糊数的加权几何平均算子,把第 i 个因素的属性值相乘即可得到其综合风险值和综合风险矩阵;然后确定正负理想点 \tilde{U}_i^+ 、 \tilde{U}_i^- 和 Hamming 距离 d_i^+ 、 d_i^- ,其计算公式如下:

$$d_i^+ = d(\tilde{r}', \tilde{U}_i^+) \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$d_i^- = d(\tilde{r}', \tilde{U}_i^-) \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

其中,正理想点 \tilde{U}_i^+ 为

$$\tilde{U}_i^+ = ([\max(a'_i), \max(b'_i), \max(c'_i)]; 1, 0)$$

($i = 1, 2, \dots, m$)

$$(13)$$

负理想点 \tilde{U}_i^- 为

$$\tilde{U}_i = ([\min(a'_i), \min(b'_i), \min(c'_i)]; 1, 0) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

指标的相对贴适度 η_i 为

$$\eta_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (15)$$

式中： η_i 为指标 i 的相对贴适度。

根据上述公式，可计算出企业安全投入各影响因素的相对贴适度，见表 2。

由表 2 可见，企业安全投入评估指标体系中，方案层中的安全管理投入要素起着主要作用，其权重达 0.375，相对贴适度为 0.625，其次是人员投入和安全设备投入；在指标层中，日常安全管理、安全教育培训、安全技术素质、安全文化、安全规程、安全监察与其他各影响因素相比显得尤为重要。

3 结 论

(1) 本文从人员投入、安全设备投入、安全管理投入 3 个维度分析了企业安全投入的影响因素，总结出 16 个基本要素，并采用 ISM 法将企业安全投入的影响因素划分为 4 个层级，结果发现安全监察、安全规程、安全文化以及专用安全设备的检修与维护是影响企业安全投入的深层因素。

(2) 引入直觉三角模糊数计算各影响因素的组合权重和相对贴适度，可更灵活、更细腻地减小人为因素评价带来的模糊性和不确定性，提高企业安全投入评估系统的可靠度，实例证明该方法是可行的，具有一定的实用性。

(3) 通过计算直觉模糊数权重和三角模糊权重，最后计算出各影响因素的组合权重和相对贴适度，结果表明安全管理投入是企业安全投入的关键因子，其中安全监察的权重达到 0.291，这与 ISM

法的分析结果接近。

参考文献：

- [1] 徐强, 王如坤, 王兴发, 等. 基于优化模型的煤矿安全投入分配决策研究[J]. 金属矿山, 2013(11): 139-141.
- [2] 张飞燕, 孟薇, 韩颖. 基于灰色系统理论的煤矿安全投入结构分析与优化[J]. 中国矿山, 2014, 23(1): 120-124.
- [3] 任海芝, 陈玉琴, 程恋军. 煤炭企业安全投入规模与投入结构优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(8): 3-8.
- [4] 赵鹏飞, 贺阿红. 煤炭安全结构合理性评价[J]. 煤矿安全, 2016, 47(1): 145-150.
- [5] 赵宝福, 张超, 贾宝山, 等. TIFNS-AHP 在煤炭企业安全投入中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 145-149.
- [6] 董大旻, 冯凯梁. 基于 EFQM 的建筑企业安全投入绩效评估 SEM[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(2): 10-16.
- [7] Son K S, Melchers R E, KALW M. An analysis of safety control effectiveness[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2000, 68: 187-194.
- [8] Lopez-Alonso M, Ibarrondo-Davila M P, Rubio-Gamez M C, et al. The impact of health safety investment on construction company costs[J]. *Safety Science*, 2013, 60: 151-159.
- [9] Patrick M, Wayne K T. Safety inputs, behaviors and injury severity[J]. *Applied Economic*, 2001, 33: 7701-710.
- [10] 郝素利, 石文杰, 李超峰. 基于 ISM 的特种设备安全监管体系构建[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(4): 34-39.
- [11] 刘烈武, 宋焕斌. 基于 ISM 的矿山生态环境安全影响因素分析[J]. 金属矿山, 2012(8): 133-137.
- [12] Tzannatos E, Kokotos D. Analysis of accidents in Greek shipping during the pre-and post period[J]. *Marine Policy*, 2009, 4: 679-684.
- [13] 汪应洛. 系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [14] 吴海涛, 罗霞. 基于直觉三角模糊 TOPSIS 的高铁列车调度指挥人因失误风险排序[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(4): 139-144.
- [15] 蔡久顺, 张执国, 师鹏, 等. 基于直觉模糊多属性群决策的风险排序方法[J]. 工程数学学报, 2015, 32(5): 650-657.
- [16] 周文中, 袁永博, 郎坤. 基于直觉三角模糊的建筑施工绿色风险排序模型[J]. 工程管理学报, 2012, 2(4): 22-26.