

基于变异系数权重的灰色关联投影法在安全绩效评价中的应用*

高玉翠 陈建宏** 于凤玲 熊立春

(中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘要:在提出施工企业安全绩效评价指标体系的基础上,运用灰色关联投影法对企业安全绩效进行评价。为避免指标的相对重要程度因人为赋权的主观性影响和指标权重分配的均衡化以及指标之间因量纲不同而对权重的影响,采取了变异系数法来对各指标确定权重。之后针对实地考察的施工企业进行实证分析,运用比较安全学的思想对安全绩效进行纵向对比,依据评价体系灰色关联度大小来判断施工企业安全绩效的水平高低。进而诊断出各企业安全绩效的优劣,为同类型的企业实际开展安全绩效评价提供指导性的方向和建议。

关键词:安全绩效;指标体系;灰色关联投影法;变异系数法

中图分类号:X947

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2014.03.006

Application of Grey Relation Projection on Safety Performance Assessment Based on Variation Coefficient*

GAO Yucui CHEN Jianhong** YU Fengling XIONG lichun

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: Evaluation index system of construction enterprise safety performance is proposed, applying the grey correlation projection to the enterprise safety performance evaluation. In order to avoid human subjectivity of the relative importance on indicators and the equalization of index weight distribution, the variation coefficient is used to determine the weight of each index, which can also prevent the effects of different dimension on index. According to comparative security idea and on-the-spot investigation and analysis of construction enterprise, a longitudinal comparison of safety performance is conducted. The safety performance of construction enterprise is judged by gray correlation. Then safety performance of each enterprise is further recognized, which can provide guidance and suggestions for the same type of enterprises to carry out safety performance evaluation.

Key words: safety performance evaluation; indicator system; gray relation projection; variation coefficient

1 引言

安全绩效不像其他产品投入一样能够随成品表现出来,因此将安全绩效尽可能的进行量化分析非常重要。传统定性的检查和评价很难科学的量化企业的安全管理绩效,而且安全管理涉及到多个因素,并且各因素的权重也很难衡量^[1]。

科学有效的安全绩效评价方法会使整个安全管理体系更有效,并最终改善企业的安全业绩。与国外相比,我国关于安全绩效的研究开始比较晚,国内很多文献在关于安全绩效的研究上,主要是单方面

研究安全文化、安全动机、安全行为、安全投入、安全氛围、组织意识、组织氛围、组织支持感、业主安全态度、变革型领导行为、安全监管能力、企业培训形式、工作压力与社会支持等对安全绩效的影响^[2]。

安全绩效评价既可以通过计算得出安全绩效数值,通过百分制为基准比较出绩效水平高低,也可以运用比较安全学的思想,其包括不同国家、时期建筑安全工程的发展思想、技术水平、标准与管理体制的比较,不同类型建筑施工事故的特点、规律、机理与控制比较,不同规模与类型的建筑(工业与民用建筑,地面与地下建筑等)的安全绩效的比较等,通过几个企业或单位的纵向对比,判断出一定时期内企业相对安全绩效变化^[3]。目前,安全绩效的考核还不完善,多数企业考核形式简单,指标不统一,取分标准也不统一,考核结果没有可比性,现实意义上说则不利于企业、监管部门对其安全状况做出正确的

2013-09-12 收稿,2014-01-17 接受

* 国家自然科学基金重点(51374242),中南大学自由探索计划(2012QNZT028)资助

** 通讯作者, E-mail: yucui_gao@csu.edu.cn; Tel: 15074877143

判断。本文运用安全比较学的思想对作者所在城市的五家施工单位进行了安全绩效的纵向评价。

2 安全绩效评价方法

安全绩效有很多种方法,大致可以分为两种:系统评估和机体测量^[4]。系统评估较为传统,关注的是整个系统的效果,所设计目标的完成情况,如煤炭企业的百万吨死亡率等,一般用事件发生概率与严重率来表示。有机测量是各要素的运行状况,涉及到安全系统运行的每个方面,一般有检查表、调查、描述和统计等方法。

在具体运用上,安全绩效评价需要采取定性分析与定量考核相结合的方法,建立评估模型,合理确定指标的权重,做出客观、公正的评价,达到持续改进管理。在我们国家,与安全绩效管理相关的工作在许多行业都有开展,如安全评价、企业考核评定、安全质量标准化活动、职业卫生评价等等。

现有的研究中主要采用的方法是制定绩效考核表进行打分,采用平均分作为绩效值或是通过层次分析法及权值因子法等确定指标的权重,最后通过加权的方法得出安全绩效总分值。目前主要有下面几种方法。

安全检查表(SCL),企业综合安全管理状况的检查表,此方法形式简单,又便于操作,可满足不同行业的需要,但主观性太大,说服力较弱。平衡记分卡(简称BSC),把实现企业战略和绩效有机地结合在一起,把企业的战略目标转变为具体目标和考核指标,但是随企业战略的改变,平衡计分卡也应当随之重新调整,实时更新会很麻烦。陈艳^[5]、董正亮^[6]等运用此法丰富与发展了安全绩效的综合评价方法,前者对机械制造业的安全绩效进行了考核研究,后者以平衡计分卡为中心构建安全绩效管理体系。

层次分析法(AHP),以构造对比矩阵的形式计算权向量并做一致性检验,它能够考虑和衡量指标的相对重要性,但当数据统计量大时,一致性检验会有一定问题。近几年,有许多文献以层次分析方法为基础,建立了一系列安全管理绩效、安全文化等评价模型。

关键绩效指标法(KPI),朱会英^[7]通过鱼骨图分析,提炼出KPI模块,针对关键要素进行考核,在施工项目中建立了一套以KPI为基础的安全绩效管

理体系。但KPI量化的指标易忽略人为因素和弹性因素,会产生一些考核上的争端和异议。

还有一些较为新颖的模型,如管理疏忽和危险树(MORT)方法、结构方程模型(SEM)、D-S理论等。高明^[2]结合MORT思想,构建基于MORT的安全绩效评价系统。刘浪^[8]基于结构方程模型进行了安全生产行政执法绩效分析。刘霁^[9]基于结构方程模型对建筑施工企业进行了KPI安全绩效评价。郭进平等^[10]提出一种基于D-S证据理论的企业安全绩效综合评定方法。这些都是安全绩效评价系统的创新和应用。

采用以上两种或两种以上评价方法进行结合。如张旭凤^[11]针对供电企业的安全生产特点,采用层次分析及模糊综合评判来评价安全绩效。刘霁^[9]对建筑施工企业运用结构方程模型时,结合KPI进行了安全绩效评价。郑军^[12]将KPI与AHP进行结合,构建了高校财务安全管理绩效评价体系。

从以上可以看出,安全绩效的评价研究趋向于多元化,新型评价方法、各种方法的结合是一种研究趋势。传统的确定权重法有德尔菲法、专家调查法、权值因子判断法、加权平均法、层次分析法、熵值法及各种组合权重模型,本文利用各指标的变异系数来确定其权重,通过变异系数的归一化处理,可以防止指标之间因量纲不同而对权重的影响。

3 基于变异系数权重的安全绩效灰色关联评价模型

3.1 评价指标体系的构建

安全绩效评价不同于经济效益评价,后者多为客观指标,更有说服力。进行企业安全绩效综合评价的基础是要确定评价指标体系。安全绩效方面很多都为非客观指标,本文在进行实地调研时,尽力寻求客观指标。

安全绩效指标不仅包括超前性指标,还应包括滞后性指标^[4]。在综合施工企业的具体情况和施工阶段特点的基础上,本文借鉴文献[9]中人的因素、管理制度、施工设备和环境条件四个方面,又将文献[13]中财产损失和生产损失费用等用事故损失来概括,共五个方面构建指标体系(见表1),将超前性和滞后性这两种指标进行了综合考虑。在变异系数法的基础上建立加权灰色关联评价模型,为企业的绩效评价提供科学依据。

表 1 施工企业安全绩效评价指标体系

Table 1 The evaluation index system of construction enterprise safety performance

安全绩效	人的因素	安全文化思想认识
		安全行为的执行能力
		人的生理状态
		人的心理状态
	管理制度	安全投入比例
		安全监控机构的设置
		安全检查和力度
		安全宣传和教育
	施工设备	安全应急
		设备的合理安装和控制
	环境条件	设备的检测、维护和保养
		自然气候条件
	事故损失	现场环境
		人均损失工作日
		经济损失比例

“安全投入”作为企业的安全指标,具有简单、明了的特点,但是因为企业单位资产总额、从业人员数量、每年收入的不同,并没有可比性,本文采用安全投入比例这个指标。同理,经济损失在每年收入的基础上得到经济损失比例,其中经济损失包括直接经济损失和间接经济损失。根据国标 GB/T15499-1995 将伤亡人员、事故伤害换算成工作损失日,得到人均损失工作日。通过此方法,对指标进行了无差异处理,也可以有效地回避样本数据的敏感性。

3.2 安全绩效评价灰色关联评价模型的构建

安全绩效评价是一个复杂的问题,具有灰色系统理论的典型非线性特征,涉及因素非常多,具有不确定、随机性和模糊性,无法用某一特定的函数关系来表述。安全绩效评价系统本身就是一个灰色系统,是一个灰色多目标决策问题。下面介绍灰色关联投影法,它是从矢量投影的角度出发,解决多目标决策与评价问题^[14-20]。

1) 确定方案矩阵及初值化处理

多指标决策域集合: $A = \{\text{方案1, 方案2, } \dots, \text{方案} n\} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 因素指标的集合: $V = \{\text{指标1, 指标2, } \dots, \text{指标} m\} = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$, 方案 A_i 对指标 V_j 的属性值(指标值)为 $y_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 。一般有两种指标类型,“效益”型指标:属性值越大越好的指标。如资金值率,劳动生产率等;“成本”型指标:属性值越小越好的指标。如流动资金占用率,流动资金的周转天数等。当因素

指标 V_j 为效益型时,取 $y_{0j} = \max\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\}$; 当因素指标 V_j 为成本型时,取 $y_{0j} = \min\{y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj}\}$ 。从而构成含有相对最佳方案的增广型矩阵为方案集 A 对指标集 V 的决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{(n+1) \times m}, (i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, 即

$$Y = \begin{pmatrix} y_{01} & y_{02} & \cdots & y_{0m} \\ y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{pmatrix}$$

(1)

2) 指标值的初值化处理

为了消除量纲和量纲单位不同所带来的的不可公度性,决策之前首先应将评价指标进行无量纲化处理。对一个数列的所有数据均除以它的第一个数据,从而得到新数据列。

决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{(n+1) \times m}, (i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 进行初值化生成 $Y', Y' = (y'_{ij})$ 。当指标为效益型时,

$$y'_{ij} = \frac{y_{ij}}{y_{0j}}, (i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

(2)

当指标为成本型时,

$$y'_{ij} = \frac{y_{0j}}{y_{ij}}, (i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

(3)

显然,理想方案 $y'_{0j} = 1(j = 1, 2, \dots, m)$ 。

3) 加权灰色关联决策矩阵

每一个方案是由 m 个因素指标所确定的,它构成 m 维因素指标空间 V 中的一个离散的方案点,进行多目标决策,就是比较空间 V 中各方案点与理想方案点的关联度。以 y'_{0j} 为母因素,以 $y'_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 为子因素,就可以得到其他方案与理想方案的关联度。记 f_{ij} 为子因素 $y'_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 关于母因素 $y'_{0j} = 1(j = 1, 2, \dots, m)$ 的关联度,则

$$f_{ij} = \frac{\min_n \min_m |y'_{0j} - y'_{ij}| + \lambda \max_n \max_m |y'_{0j} - y'_{ij}|}{|y'_{0j} - y'_{ij}| + \lambda \max_n \max_m |y'_{0j} - y'_{ij}|}$$

(4)

通常 $\lambda = 0.5$ 。由 $(n + 1) \times m$ 个数 f 组成的矩阵为多目标灰色关联度判断矩阵

$$F = \begin{pmatrix} f_{01} & f_{02} & f_{03} & \cdots & f_{0m} \\ f_{11} & f_{12} & f_{13} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & \cdots & f_{nm} \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ f_{11} & f_{12} & f_{13} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & \cdots & f_{nm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

指标间的加权向量为 $W = (w_1, w_2, \cdots, w_m)^T$, 可以得到加权灰色关联决策矩阵

$$F' = F \cdot W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ f_{11} & f_{12} & f_{13} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & \cdots & f_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_m \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & \cdots & w_m \\ w_1 f_{11} & w_2 f_{12} & w_3 f_{13} & \cdots & w_m f_{1m} \\ w_1 f_{21} & w_2 f_{22} & w_3 f_{23} & \cdots & w_m f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 f_{n1} & w_2 f_{n2} & w_3 f_{n3} & \cdots & w_m f_{nm} \end{pmatrix} \quad (6)$$

4) 灰色关联投影值

将每个决策方案看成一个行向量(矢量), 则称每个决策方案 A_i 与理想方案 A^* 之间的夹角 θ_i 为灰色关联投影角。夹角余弦越大, 表明决策方案 A_i 与理想方案 A^* 之间的变化方向愈一致。夹角余弦为

$$\cos\theta_i = \frac{A_i \cdot A^*}{\|A_i\| \cdot \|A^*\|}$$
$$= \frac{\sum_{j=1}^m w_j f_{ij} \cdot w_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^m w_j^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j f_{ij})^2}}$$
$$= \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij} \cdot w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m w_j^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j f_{ij})^2}}, i = 1, 2, \cdots, n \quad (7)$$

将模的大小与夹角余弦的大小综合考虑, 就可以全面准确的反应各个决策方案 A_i 与理想方案 A^* 之间的接近程度。称决策方案 A_i 在理想方案 A^* 上

的投影值为灰色关联投影值, 则有

$$D_i = \|A_i\| \cdot \cos\theta_i = \|A_i\| \cdot \frac{A_i \cdot A^*}{\|A_i\| \cdot \|A^*\|}$$
$$= \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij} \cdot w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m w_j^2}} = \sum_{j=1}^m f_{ij} \cdot \left(\frac{w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m w_j^2}} \right) \quad (8)$$

灰色关联投影值 D_i 综合反映了决策方案 A_i 与理想方案 A^* 之间的接近程度。称

$$\tilde{w}_j = \frac{w_j^2}{\sqrt{\sum_{j=1}^m w_j^2}} (j = 1, 2, \cdots, m) \quad (9)$$

为灰色关联投影权值, 则灰色关联投影值为

$$D_i = \sum_{j=1}^m f_{ij} \cdot \tilde{w}_j, i = 1, 2, \cdots, n \quad (10)$$

根据这些投影值的大小, 就可以对多目标做出科学的排序。

3.3 变异系数权重的计算

由于评价指标体系中的各项指标的量纲不同, 不宜直接比较其差别程度。为了消除各项评价指标的量纲不同的影响, 需要用各项指标的变异系数来衡量各项指标取值的差异程度^[15,21]。各项指标的变异系数公式如下:

$$V_j = \frac{\sigma_j}{x_j} (j = 1, 2, \cdots, n) \quad (11)$$

式中, V_j 是第 j 项指标的变异系数、也称为标准差系数; σ_j 是第 j 项指标的标准差; $\bar{x}_j$ 是第 j 项指标的平均数。各项指标的权重为:

$$w_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (12)$$

4 施工企业安全绩效灰色关联评价模型的实证分析

4.1 原始资料

本文选取作者所在城市的五家施工单位企业作为研究对象, 通过实地调研、走访并咨询相关专家, 查阅相关资料, 整理得出各项评价指标的原始数据如表 2 所示。

4.2 数据归一化处理及灰色关联判断矩阵

根据表 2 数据, 最佳方案 A_0 的因素指标 $A_0 = (90, 88, 85, 86, 2.23, 85, 82, 89, 90, 89, 86, 95, 83,$

8.5,0.15) 利用式(1~3) 进行数据归一化处理后, 根据式(4),得到灰色关联判断矩阵 F 。

$$F = \begin{bmatrix} 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.724 & 0.911 & 0.908 & 1.000 & 0.441 & 0.680 & 0.566 & 0.621 & 0.818 & 0.862 & 0.938 & 0.869 & 0.725 & 1.000 & 0.404 \\ 0.759 & 1.000 & 0.610 & 0.751 & 0.886 & 0.748 & 0.705 & 0.817 & 1.000 & 0.838 & 0.834 & 0.769 & 1.000 & 0.545 & 0.333 \\ 1.000 & 0.552 & 0.730 & 0.883 & 0.538 & 0.908 & 0.804 & 1.000 & 0.612 & 0.776 & 0.732 & 0.769 & 0.784 & 0.700 & 0.359 \\ 0.797 & 0.606 & 0.908 & 0.968 & 0.697 & 1.000 & 0.742 & 0.518 & 0.677 & 0.886 & 1.000 & 0.689 & 0.558 & 0.370 & 0.397 \\ 0.612 & 0.572 & 1.000 & 0.834 & 1.000 & 0.856 & 1.000 & 0.565 & 0.863 & 1.000 & 0.968 & 1.000 & 0.617 & 0.427 & 1.000 \end{bmatrix}$$

表2 施工企业安全绩效评价指标原始数据
Table 2 The original data of construction enterprise safety performance evaluation index

评价指标(C)	施工企业				
	M1	M2	M3	M4	M5
安全文化思想认识(C1)	78	80	90	82	70
安全行为的执行能力(C2)	85	88	63	68	65
人的生理状态(C3)	82	66	74	82	85
人的心理状态(C4)	86	76	82	85	80
安全投入比例(%)(C5)	1.24	2.13	1.56	1.89	2.23
安全监控机构的设置(C6)	71	75	82	85	80
安全投入的力度(C7)	60	70	75	72	82
安全宣传和教育(C8)	70	82	89	60	65
安全应急(C9)	83	90	70	75	85
设备的合理安装和控制(C10)	84	83	80	85	89
设备的检测、维护和保养(C11)	84	80	75	86	85
气候地理条件(C12)	90	85	85	80	95
现场工作环境(C13)	72	83	75	60	65
人均损失工作日(日/年)(C14)	8.5	12	10	21	16
经济损失比例(%)(C15)	0.31	0.5	0.4	0.32	0.15

4.3 求出各指标的权重

由变异系数式(11、12) 计算出各评价指标的权重如表3 所示。

表3 基于变异系数法的各指标权重
Table 3 The weight of each index based on variation coefficient

评价指标(C)	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数	归一化处理
安全文化思想认识(C1)	90	70	80.0	6.450	0.081	0.043
安全行为的执行能力(C2)	88	63	73.8	10.534	0.143	0.075
人的生理状态(C3)	85	66	77.8	6.940	0.089	0.047
人的心理状态(C4)	86	76	81.8	3.600	0.044	0.023
安全投入比例(%)(C5)	2.23	1.24	1.8	0.367	0.203	0.107
安全监控机构的设置(C6)	85	71	78.6	5.004	0.064	0.034
安全投入的力度(C7)	82	60	71.8	7.167	0.100	0.053
安全宣传和教育(C8)	89	60	73.2	10.759	0.147	0.078
安全应急(C9)	90	70	80.6	7.172	0.089	0.047
设备的合理安装和控制(C10)	89	80	84.2	2.926	0.035	0.018
设备的检测、维护和保养(C11)	86	75	82.0	4.050	0.049	0.026
气候地理条件(C12)	95	80	87.0	5.099	0.059	0.031
现场工作环境(C13)	83	60	71.0	7.975	0.112	0.059
人均损失工作日(日/年)(C14)	21	8.5	13.5	4.517	0.335	0.177
经济损失比例(%)(C15)	0.5	0.2	0.336	0.115	0.343	0.181

4.4 确定灰色关联度及排序

根据式(9),得到灰色关联投影权值,再根据式(8)、(10)可得出施工企业的投影值 $D_j = (0.192\ 5, 0.183\ 7, 0.239\ 4, 0.155\ 9, 0.230\ 4)$ 。 $M3 > M5 > M1$

$> M2 > M4$,与实际相符,在所评价的五个施工单位, $M3$ 的绩效管理最好,是由于该单位平时非常注重安全意识的培养和安全生产;相比之下, $M4$ 的绩效管理最差,此单位施工环境较为恶劣,事故伤亡较为严重。
通过对比可知,企业根据结果能够了解自身的安全绩效水平的高低,可以进一步来明确企业自身不足之处以及还需要进一步改进的地方。

5 结论

- 1)安全绩效在灰色关联评价模型中,以关联度的大小定量表示评价结果,更直接地对安全绩效进行了评价。安全绩效灰色关联评价模型的评价结果与实际情况基本相符合,适用性强,具有一定的实用价值和现实意义。特别是为政府安监部门和企业自身提供了可供参考的依据。
- 2)在评价指标体系的构建时,因涉及的施工单位资产总额、从业人员数量、每年收入的不同,除了需要主观赋值的指标外,客观指标均进行了无差异处理,也有效地回避了样本数据的敏感性。
- 3)变异系数法计算简单,适应性强,可以防止指标之间因量纲不同而对权重的影响,能很好解决以往权重的主观性问题。
- 4)研究成果仅是安全绩效评价领域中的一些初步探讨。通过此方法也可以计算某施工单位安全绩效的年度变化率。多种评价方法的综合应用、消除行业差距和计算机系统评估将是下一步的研究方向,建立起全国或区域性的统一网络,会极大方便安全管理。

参考文献

[1]王廷春,孙德青,于菲菲,等. 安全管理绩效模糊综合评价研究[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(3):185-188.

[2]高明. 基于 MORT 的安全绩效评价研究[D]. 北京:中国地质大学,2011.

[3]吴超,易灿南,胡鸿. 比较安全学的创立及其框架的构建研究

[J]. 中国安全科学学报,2009,19(6):17-28.

[4]刘素霞,梅强,沈斌,等.安全绩效研究综述[J].中国安全科学学报,2010,20(5):131-139.

[5]陈艳.机械制造企业安全绩效考核指标研究[D].北京:首都经济贸易大学,2007.

[6]董正亮,王方宁,郭启明,等.以平衡记分卡为中心构建安全绩效管理系统[J].工业安全与环保,2007,33(11):57-59.

[7]朱会英.建筑施工项目 KPI 安全绩效管理体系[D].重庆:重庆大学,2005.

[8]刘浪,陈建宏,陈海涛,等.基于结构方程模型的安全生产行政执法绩效分析[J].中国安全科学学报,2011,21(4):38-44.

[9]刘霁,李云,刘浪.基于 SEM 的建筑施工企业 KPI 安全绩效评价[J].中国安全科学学报,2011,21(6):123-128.

[10]郭进平,尚旭光,卢才武.基于 DS 理论的企业安全绩效综合评定研究[J].中国安全科学学报,2011,21(4):150-155.

[11]张旭凤.企业生产安全绩效指标体系及其在供电企业测量应用研究[D].北京:中国地质大学,2010.

[12]郑军.基于 KPI-AHP 模型的高校财务安全管理绩效评价体系的构建[J].会计之友,2012,(32):27-30.

[13]陶刘群.企业安全绩效考核指标体系研究[D].北京:首都经济贸易大学,2009.

[14]邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.

[15]冀巨海,王琪.煤炭企业绩效灰色关联评价——基于变异系数法的分析[J].经济问题,2011,(5):89-91.

[16]皮祖训,刘何清.校园安全灰色关联评价模型及应用[J].中国安全科学学报,2008,18(6):134-140.

[17]穆瑞,张家泰.基于灰色关联分析的层次综合评价[J].系统工程理论与实践,2008,10(10):125-130.

[18]于凤玲,陈建宏.基于灰色关联与优势分析的能源消费与工业环境污染的实证研究[J].环境污染与防治,2012,34(11):93-97.

[19]CAO Wei ,SHENG Yu ,QIN Yinghong,et al. Grey relation projection model for evaluating permafrost environment in the Muli coal mining area,China[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment,2010,24(4):363-374.

[20]LIU Weilong, LIU Peide. Hybrid multiple attribute decision making method based on relative approach degree of grey relation projection[J]. African Journal of Business Management,2010,4(17):3 716-3 724.

[21]郭亚军.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社,2007.

作者简介

高玉翠(1989-),女,硕士在读,主要研究方向:安全评价,矿山安全;
陈建宏(1963-),男,教授,博导,副院长,湖南省芙蓉学者计划特聘教授,主要研究方向:安全评价,矿业系统工程,安全预警;
于凤玲(1977-),女,博士在读,讲师,主要研究方向:安全评价,资源安全与环境经济学;
熊立春(1985-),男,博士在读,主要研究方向:安全疏散,安全预警。