

煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建及应用

贺泓梵

湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201

DOI:10.61369/ME.2026010022

摘 要 : 本文提出构建一种基于能力成熟度模型的煤矿应急救援能力评价模型。从事前预防能力、应急准备能力、应急响应能力和事后恢复能力4个维度建立了煤矿应急救援能力评价指标体系并基于熵权法和突变级数法进行综合评价。最后,对山东省某煤矿的应急救援能力进行了评价,得出该煤矿的成熟度等级为“规范”级。

关 键 词 : 煤矿; 应急救援能力; 能力成熟度模型; 熵权法; 突变级数法

Construction and Application of Coal Mine Emergency Rescue Capability Maturity Evaluation Model

He Hongfan

School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201

Abstract : This paper proposes to construct an evaluation model for coal mine emergency rescue capability based on the Capability Maturity Model (CMM). An evaluation index system for coal mine emergency rescue capability is established from four dimensions, namely pre-prevention capability, emergency preparedness capability, emergency response capability and post-recovery capability, and a comprehensive evaluation is conducted by combining the entropy weight method with the catastrophe progression method. Finally, the emergency rescue capability of a coal mine in Shandong Province is evaluated, and the mine is concluded to reach the Standard Level of maturity.

Keywords : coal mine; emergency rescue capacity; capability maturity model; entropy weight method; mutation progression method

引言

煤矿是我国重要的能源产业,然而,由于煤炭企业自身所处的特殊环境以及煤矿该行业自身存在的安全隐患,导致了煤炭企业在煤炭企业中经常发生的安全事故。在这些安全事故中,有很多是由于煤矿应急救援能力不足而导致的,因此,煤矿应急救援能力评价成为了一个备受关注的问题。在国外,煤矿应急救援能力评价研究相对较早,研究成果较为丰富。关键绩效指标法^[1]是最常用的方法之一。该方法将煤矿应急救援能力的评估分为多个关键绩效指标,然后将这些指标进行加权组合,计算得出一个综合指数,用于衡量煤矿应急救援能力的成熟度水平。国内针对煤矿应急救援机构,有学者构建了由制度、人员、物资和技术四个方面构成的评价指标体系;在煤矿应急救援能力评价方法方面,突变级数法^[2]、层次分析法^[3]、熵权法^[4]、TOPSIS法^[5]、Vague集理论^[6]等多种方法被广泛运用。近年来,一些新的评估方法也正在被研究和探索^[7],例如基于模型的评估方法和基于数据挖掘的评估方法等。这些新的方法对于提高煤矿应急救援能力的评估准确性和可信度有着重要的意义。综上,在分析国内外的一些相关文献时,发现在针对煤矿应急救援能力评价等级划分以及判断标准确定的研究尚且不足,针对这个问题,引入了能力成熟度模型核心思想,在构建能力成熟度评价模型当中,为研究评价过程中的指标判断标准以及判断煤矿应急救援能力成熟度等级提供有效的参考。

一、煤矿应急救援能力评价指标体系

煤矿应急救援能力^[9]是指煤矿在突发事件或事故发生时,能够有效组织、协调和实施应急救援工作的能力。在查阅文献后^[8-11],构建出煤矿应急救援能力评价指标体系。

表1 煤矿应急救援能力评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of coal mine emergency rescue capability

目标层 A	中间层 B	指标层 C
煤矿应急救援能力 A	事前预防能力 B1	危险源辨识 C1
		危险源控制 C2
		应急预案编制 C3
		安全检查 C4

应急准备能力 B2		井下应急救援演练 C5
		井下作业人员应急培训 C6
		矿井应急物资储备 C7
		矿井应急通信设备 C8
煤矿应急救援能力 A	应急响应能力 B3	救援决策指挥 C9
		矿井救援队伍响应 C10
		煤矿应急人员疏散 C11
		煤矿应急人员搜救 C12
		煤矿救援经验总结 C13
		煤矿事故调查分析 C14
事后恢复能力 B4		伤亡矿工安置 C15
		矿井救援装备复原 C16

二、基于突变级数法的煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建

（一）评价指标重要性排序

利用熵权方法来确定各指标的权重，以减少利用突变级数法在评估过程当中的主观性。采用熵权法对指标进行赋权的具体步骤是^[10]：

1. 被评价对象 L，评价指标 Y，被评价对象 Li 对指标 Yj 的值记作 Xij，则原始指标数据矩阵为：

$$x = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中，Xij 为第 j 个指标下第 i 个被评价对象的值。

表2 几种常见的突变系统类型
Table 2 Common types of mutant systems

突变类型	势函数	分歧方程	归一方程
尖点突变	$f(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$a = -6x^2; b = 8x^3$	$xa = a^{\frac{1}{2}}; xb = b^{\frac{1}{3}}$
燕尾突变	$f(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$	$a = -6x^2; b = 8x^3; c = -3x^4$	$xa = a^{\frac{1}{2}}; xb = b^{\frac{1}{3}}; xc = c^{\frac{1}{4}}$
蝴蝶突变	$f(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$	$a = -10x^2; b = 20x^3; c = -15x^4; d = 4x^5$	$xc = c^{\frac{1}{4}}; xd = d^{\frac{1}{5}}; xa = a^{\frac{1}{2}}; xb = b^{\frac{1}{3}};$

在计算出每个底层指标的隶属函数值之后，还需要利用互补与非互补的原则进行计算得出中间层指标的函数隶属值，互补原则与非互补的原则定义如下^[13]：

1. 互补原则：假如一个上层指标其包含的各个不同指标之间有明显的相关关系时，则该上层指标包含的各个不同指标之间称为互补型，即一个该上层指标的隶属函数值应取其包含的各指标相应隶属函数值的平均值。

$$y = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (8)$$

2. 非互补原则：如果该上层指标所包含的各指标之间不存在相关性，则为非互补型，那么该上层指标的隶属函数值取各指标相应隶属函数值的最小值。

$$y = \min(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

2. 数据标准化

（1）正向指标标准化公式：

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (2)$$

（2）负向指标标准化公式：

$$x_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (3)$$

（3）计算第 j 个指标下第 i 个评价对象的特征向量 Pij：

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

（4）计算第 j 个指标的熵值 e_j ：

$$e_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

（5）计算第 j 个指标的效用值 d_j ：

$$d_j = 1 - e_j \quad (6)$$

（6）确定各指标的权重 W_j ：

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (7)$$

（二）确定突变类型

在对原始数据进行无量纲化之前，需要判断每个系统中突变的类型^[12]：如果一个指标包含两个下级指标，那么该系统便是尖点突变；如果包括三个下级指标，该系统便是燕尾突变；如果包括四个下级指标，该系统是蝴蝶突变，这三种是较为常见的突变系统类型，其对应公式见表2。

根据构建的煤矿应急救援能力评价指标体系（见表1），煤矿应急救援能力包括：事前预防能力、应急准备能力、应急响应能力以及事后恢复能力4个变量，可确定中间层符合蝴蝶突变模型和互补原则。

（三）确定评价等级

在得到该煤矿应急救援能力成熟度评价系统的总突变隶属度后，再由根据总隶属度评价煤矿应急能力水平相应的等级：其中0-0.3为混乱级、0.3-0.6为简单级、0.6-0.75为规范级、0.75-0.9为优化级、0.9-1为精益级。

三、评价模型应用

（一）指标值获取

以山东省某矿为例，邀请5名安全与应急领域相关专家基于该

矿应急救援能力实际,并结合指标体系进行评分,评分结果见表3,由于篇幅所限,只给出平均分。

表3 煤矿应急救援能力实际状况评分
Table 3 actual scores of coal mine emergency rescue capability

底层指标	平均分	底层指标	平均分
C1	0.832	C9	0.882
C2	0.782	C10	0.712
C3	0.792	C11	0.817
C4	0.848	C12	0.628
C5	0.749	C13	0.740
C6	0.733	C14	0.734
C7	0.766	C15	0.823
C8	0.758	C16	0.882

（二）煤矿应急救援能力评价指标重要性排序

在得到相关指标的评分之后,依据2.1中熵权法步骤进行计算,得到各指标权重如表4所示。

表4 各指标权重
Table 4 Weight of each indicator

一级指标	权重	二级指标	权重
B1	0.2386	C1	0.0544
		C2	0.0817
		C3	0.0520
		C4	0.0505
		C5	0.0622
B2	0.3005	C6	0.0467
		C7	0.1100
		C8	0.0817
		C9	0.0505
		C10	0.0467
B3	0.2379	C11	0.0909
		C12	0.0498
		C13	0.0549
B4	0.2230	C15	0.0492
		C14	0.0524
		C16	0.2580

（三）综合评价

在用熵权法得到各指标的权重后,利用表2公式对各底层指标进行计算,再判断指标间的互补或非互补的关系,依此类推,最终得到该矿应急救援能力成熟度的总突变隶属函数值。其中,一级指标隶属度, $B_1=0.4232$, $B_2=0.3316$, $B_3=0.4213$, $B_4=0.4160$,总突变隶属值为0.7428。

（四）评价结果及分析

该煤矿应急能力总突变隶属函数值为0.7428,根据计算结果,可以得到以下的结论:该煤矿的应急救援能力评定为“规范”级别,说明该煤矿的应急处理能力一般。可得一级指标的隶属度大小顺序为: $B_1>B_3>B_4>B_2$,故 B_2 应急准备能力的隶属度是最低的,表明了应急准备能力在该煤矿应急救援能力成熟度评价当中是最薄弱的,应当加强这方面能力。

四、结论

（1）引入CMM思想构建了煤矿应急救援能力成熟度评价模型,对煤矿应急能力成熟度等级以及各指标在每一等级中的判断标准进行了探讨,可为煤矿应急救援能力的评价提供判断标准。

（2）将熵权法、突变级数法二者有效结合评价,一定程度上降低了多目标分析决策的主观性,以计算数据呈现出的评价结构更清晰,评价结果更具客观性和准确性。

（3）利用构建的评价模型得出某矿应急救援能力成熟度模型为“规范”级,其中应急准备能力隶属度最低。

参考文献

- [1]Almana Ranya S.,Alharbi Abeer. Door to Disposition Key Performance Indicator in Three Saudi Arabian Hospitals' Emergency Departments during COVID-19 Pandemic[J]. Healthcare,2022,10(11).
- [2]李春辉,方菊明,何泽军,毛文普.基于突变理论的建筑企业安全管理评价研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(12):87-91.
- [3]杨峰峰,张巨峰,郑超,许泰,焦云飞.基于 Logistic 曲线与模糊层次分析法的煤矿应急能力研究[J].煤炭工程,2019,51(02):154-157.
- [4]李萌.基于层次分析法-熵权法的煤-水协调开发综合评价[D].中国地质大学(北京),2021.DOI:10.27493
- [5]王治文,白学文.基于 AHP-TOPSIS 模型的煤矿安全管理效果评估[J].能源技术与管理,2021,46(04):138-140.
- [6]单仁亮,王存权,陈孝国.基于 Vague 集理论的煤矿应急救援能力研究[J].煤炭技术,2016,35(02):320-321.DOI:10.13301/j.cnki.ct.2016.02.124.
- [7]郑霞忠,郭雅薇,陈述.建筑企业职业健康安全管理体系成熟度评价[J].中国安全科学学报,2015,25(12):146-150.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2015.12.025.
- [8]陈方曼,潘兵.煤矿突发事件应急救援能力评价与定位研究[J].皖西学院学报,2019,35(03):65-69+75.
- [9]戚宏亮,宁云才.煤矿应急救援能力评估研究[J].煤炭技术,2017,36(04):337-340.DOI:10.13301/j.cnki.ct.2017.04.124.
- [10]商振,张虹.煤矿应急救援能力评估指标体系构建研究[J].华北科技学院学报,2016,13(02):45-50.
- [11]王春光.基于可拓理论的煤矿应急能力评价[J].中国煤炭,2013,39(08):109-114.DOI:10.19880/j.cnki.ccm.2013.08.029.
- [12]李杨,刘月.基于突变级数法的建筑施工企业应急能力评价[J].华北科技学院学报,2022,19(05):79-83.DOI:10.19956/j.cnki.ncist.2022.05.011.
- [13]成连华,周瑞雪,严瑾,郭慧敏.煤矿应急救援能力成熟度评价模型构建及应用[J].中国安全科学学报,2021,31(07):180-186.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.07.025.