

基于HFACS和灰色关联的煤矿事故人因因素分析

刘志飞¹, 谢雄刚^{1*}, 杨家向², 丁 锐³

¹贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳

²贵州省盘州市能源局, 贵州 盘州

³贵州省六盘水市水城区能源局, 贵州 六盘水

收稿日期: 2022年11月23日; 录用日期: 2022年12月16日; 发布日期: 2022年12月27日

摘要

近年来, 我国煤矿安全生产的形势得到了大幅改善, 但形势依然严峻。造成煤矿事故的直接原因中人因因素依然大量存在。因此, 为了促进煤矿安全生产, 需要进一步研究煤矿事故中的人因因素, 分析人因因素在煤矿事故中所起的作用。本文利用改进的HFACS理论和灰色关联分析方法, 对煤矿事故调查报告进行统计分析得出人因因素包括4个一级分析指标: 管理组织缺失、不安全的领导行为、不安全行为的前提条件及不安全行为, 以及12个二级分析指标。应用灰色关联分析方法, 分析煤矿事故人因因素之间的关联度大小, 阐明因素之间的密切程度。分析结果表明: 4个一级分析指标与煤矿事故人因因素的密切程度分别为: 不安全的行为、管理组织缺失、不安全的领导行为、不安全行为的前提条件, 为预防煤矿事故中的人因因素提供了侧重依据。

关键词

煤矿事故, 人因因素, 改进HFACS, 灰色关联分析

Analysis of Human Factors of Coal Mine Accidents Based on HFACS-Grey Relational Analysis

Zhifei Liu¹, Xionggang Xie^{1*}, Jiaxiang Yang², Rui Ding³

¹Mining College, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Energy Resources Bureau of Panzhou City, Panzhou Guizhou

³Energy Bureau of Shuicheng District, Liupanshui City, Liupanshui Guizhou

Received: Nov. 23rd, 2022; accepted: Dec. 16th, 2022; published: Dec. 27th, 2022

*通讯作者。

Abstract

In recent years, the situation of mine safety production has been greatly improved, but the situation is still severe. There are still a lot of human factors which are the direct causes of coal mine accidents. Therefore, in order to promote the safety of coal mine production, it is necessary to further study the human factors in coal mine accidents and analyze the role of human factors in coal mine accidents. This paper uses the improved HFACS theory and grey correlation analysis method to make a statistical analysis of the coal mine accident investigation report and finds that the human factors include 4 first-level analysis indicators: the absence of management organization, unsafe leadership behavior, the prerequisite of unsafe behavior and unsafe behavior, and 12 second-level analysis indicators. The grey correlation analysis method is used to analyze the degree of correlation between the human factors of coal mine accidents and to clarify the degree of closeness between the factors. The analysis results show that the close degree between the four first-level analysis indexes and the human factors of coal mine accidents is: unsafe behavior, lack of management organization, unsafe leadership behavior, and the prerequisite of unsafe behavior, which provides an emphasis basis for the prevention of human factors in coal mine accidents.

Keywords

Coal Mine Accident, Human Factor, Improved HFACS, Grey Relational Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近些年来，随着国家对安全生产越来越重视，特别重大安全生产鲜有发生，安全形势得到很大的好转。但是煤矿事故仍有发生。据调查，目前由于人为因素导致的事故高达 90% [1]，而在我国发生的煤矿安全事故产生的直接致因中人因所占比率实际上高达 97.67% 以上[2]。因此利用现有的煤矿事故调查报告研究人因因素在煤矿事故中的作用对于预防煤矿事故具有重要的意义。

目前为止，对于煤矿人因因素的研究主要有：解学才等[3]应用改进的 HFACS 和集对分析进行矿山安全分析。并采用了专家评分法、层次分析法确定各因素的权重，计算出系统的联系度表达式。米楚明[4]应用“S-O-R”循环模型及 HRA 方法，从个人、班组、组织等三方面分析了煤矿人因事故，并构建了相应的矫正模型；柳茹林等[5]应用 HFACS-MI 改进模型对煤矿重特大事故进行了人因分析。姚有利[6]应用灰色关联分析对矿工的不安全行为研究。朱艳娜等[7]对煤矿人因事故中的不安全行为进行了关联性分析，以辨清煤矿员工不安全行为影响因素与人因事故的内在发展规律。陈晓勇等[8]应用 HFACS 理论对煤矿顶板事故进行人因分析。

这些研究都在一定程度上为煤矿事故原因调查分析做出了一定的贡献，但是对于人因因素在煤矿事故中所起的作用没有进行一个定量描述，相较于其他研究方法，灰色理论能够直观的描述因素之间的密切关系，因此，本文通过 HFACS 理论得出煤矿事故中的人因因素，应用灰色理论对煤矿人因因素进行关联度分析，阐明人因因素之间的密切关系，对人因因素在煤矿事故中所起的作用进行定量的描述，从而为预防煤矿事故中的人因因素提供参考依据。

2. 灰色关联度分析方法

灰色关联度分析方法是灰色系统理论中的一种重要分析方法，通过对系统的动态发展过程进行量化分析，进而识别出影响系统发展状态的主次因素，是对序列之间关联程度的度量，从而得出系统中各因素之间的关联性[9]。

灰色关联度分析方法的具体应用步骤[10]：

1) 确定比较序列与参考序列。

在对统计数据进行灰色关联度分析时，首先应该确定比较序列与参考序列。比较序列由自变量数据所构成，一般记为：

$$X_i = \{X_i(1), X_i(2), X_i(3), \dots, X_i(n)\}, i = 1, 2, 3, 4, \dots, m \quad (m \text{ 为比较序列长度})$$

参考序列由因变量数据构成。一般记为：

$$X_0 = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3), \dots, X_0(n)\} \quad (n \text{ 为参考序列的长度})$$

2) 对原始数据进行无量纲化处理。

在对数据进行分析时，有些数据的量纲不同，会影响分析结果的准确性，就需要对数据进行无量纲化处理。处理方法为：

$$X_i(k) = \frac{X_i(k)}{X_i(1)} \quad (k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

3) 计算关联系数。

关联系数的计算公式具体如下：

$$\varepsilon(k) = \frac{\min \min |X_0(k) - X_i(k)| + \rho_{\max} \max |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho_{\max} \max |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

其中， ρ 为分辨系数，在(0, 1)区间内取值，一般取 0.5。

4) 计算关联度。

对各关联系数取平均值，即：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(k) \quad (3)$$

5) 关联度排序。

对关联度的大小进行排序，比较关联度大小，关联度数值越大，表明比较序列与参考序列的关系越紧密。

3. 煤矿事故人因分析与分类系统改进模型

HFACS 是一种开放性的用于分析人为因素的系统工具，它能够根据具体的行业特征进行适当调整，最早应用在航空领域[11]。

煤矿事故人因分析与分类系统改进模型将煤矿事故中的人因因素产生分为 4 个层次：管理组织缺失、全不安的领导行为、不安全行为的前提条件及不安全行为。本文通过对相关文献的阅读建立了如图 1 所示的煤矿 HFACS 改进模型。[12] [13] [14] [15]

煤矿安全事故人因的灰色关联分析

通过对贵州省 2015~2020 年的 31 起煤矿事故调查报告的分析，并应用上述的煤矿事故人因分析与分类系统改进模型进行影响因素统计，统计结果如表 1 所示。

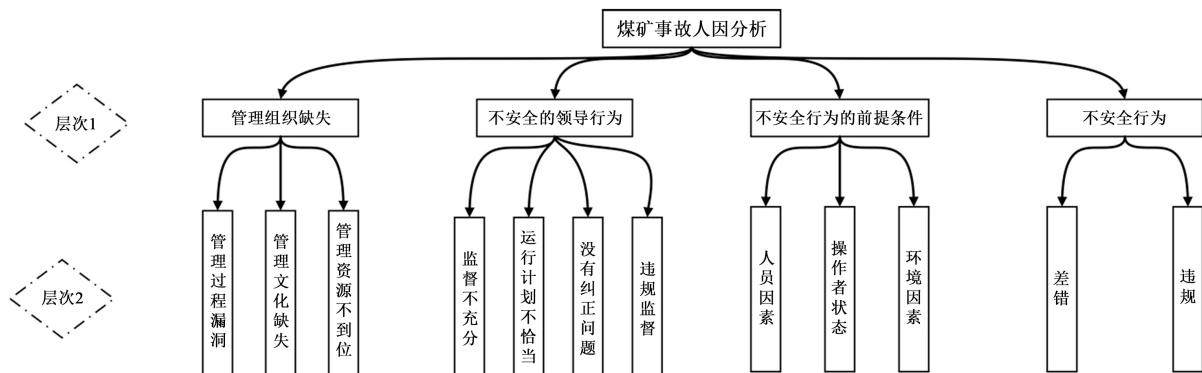


Figure 1. Improved HFACS model of coal mine
图 1. 煤矿 HFACS 改进模型

Table 1. 2015~2019 results of human factor analysis of coal mine accidents in Guizhou Province
表 1. 2015~2019 年贵州省煤矿事故人因因素分析结果

| 人因因素分析指标 | 重大事故 | 较大事故 | 一般事故 |
|----------------------------------------|------|------|------|
| 层次一：管理组织缺失 X_1 | 10 | 22 | 21 |
| 管理过程漏洞 X_{11} | 4 | 9 | 13 |
| 管理文化缺失 X_{12} | 3 | 4 | 6 |
| 管理资源不到位 X_{13} | 3 | 9 | 3 |
| 层次二：不安全的领导行为 X_2 | 14 | 25 | 34 |
| 监督不充分 X_{21} | 4 | 9 | 11 |
| 运行计划不恰当 X_{22} | 4 | 7 | 10 |
| 没有纠正问题 X_{23} | 3 | 6 | 7 |
| 违规监督 X_{24} | 3 | 3 | 6 |
| 层次三：不安全行为的前提条件 X_3 | 5 | 16 | 9 |
| 人员因素 X_{31} | 2 | 7 | 5 |
| 操作者状态 X_{32} | 1 | 0 | 1 |
| 环境因素 X_{33} | 2 | 9 | 3 |
| 层次四：不安全行为 X_4 | 4 | 9 | 10 |
| 差错 X_{41} | 1 | 3 | 1 |
| 违规 X_{42} | 3 | 6 | 9 |
| 合计 X_0 | 33 | 72 | 74 |

4. 人因因素与一级指标之间的灰色关联分析

利用上述公式(1)对数据进行无量纲化处理, 以提高灰色关联分析结果的准确性。无量纲化处理结果见表 2。

通过上述分析结果, 以管理组织缺失 X_1 、不安全的领导行为 X_2 、不安全行为的前提条件 X_3 、不安全行为 X_4 为参考序列, 煤矿事故人因总数 X_0 为参考序列, 进行关联分析。

根据关联系数的计算公式, 对数据列 X_0 、 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 , 进行绝对差值计算, 其计算结果见表 3。

由表3计算结果可知：

$$\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| = 0, \quad \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)| = 1.02$$

取 $\rho = 0.5$ ，根据关联系数计算公式(1)分别计算每个比较序列与参考序列对应的关联系数，计算结果如下：

$$\varepsilon_{01} = (1.00, 0.96, 0.61); \quad \varepsilon_{02} = (1.00, 0.57, 0.98); \quad \varepsilon_{03} = (1.00, 0.33, 0.45); \quad \varepsilon_{04} = (1.00, 0.88, 0.86)$$

应用公式(3)可计算出管理组织缺失 X_1 、不安全的领导行为 X_2 、不安全行为的前提条件 X_3 、不安全行为 X_4 与煤矿事故人因总数之间的灰色关联度为： $r_{01} = 0.86$ ； $r_{02} = 0.85$ ； $r_{03} = 0.59$ ； $r_{04} = 0.91$ ； 关联序列为 $r_{04} > r_{01} > r_{02} > r_{03}$ 。通过上述分析可知，不安全的行为是贵州省煤矿事故中最常出现的，其次是管理组织缺失，然后是不安全的领导行为，最后是不安全行为的前提条件。在煤矿事故调查报告中经常可以看见工人产生不安全行为和工人违章操作导致事故的发生，以及安全管理机构不完善，安全管理人员不足等原因。安全管理组织的缺失就会导致安全管理上的不完善，进而工人的不安全行为得不到监督，就可能导致事故的发生。

Table 2. Results of dimensionless processing
表2. 无量纲化处理结果

| 人因因素分析指标 | 重大事故 | 较大事故 | 一般事故 |
|----------------------------------------|------|------|------|
| 层次一：管理组织缺失 X_1 | 1.00 | 2.2 | 2.1 |
| 管理过程漏洞 X_{11} | 1.00 | 2.25 | 3.25 |
| 管理文化缺失 X_{12} | 1.00 | 1.33 | 2.00 |
| 管理资源不到位 X_{13} | 1.00 | 3.00 | 1.00 |
| 层次二：不安全的领导行为 X_2 | 1.00 | 1.79 | 2.43 |
| 监督不充分 X_{21} | 1.00 | 2.25 | 2.75 |
| 运行计划不恰当 X_{22} | 1.00 | 1.75 | 2.50 |
| 没有纠正问题 X_{23} | 1.00 | 2.00 | 2.33 |
| 违规监督 X_{24} | 1.00 | 1.00 | 2.00 |
| 层次三：不安全行为的前提条件 X_3 | 1.00 | 3.20 | 1.80 |
| 人员因素 X_{31} | 1.00 | 3.50 | 2.50 |
| 操作者状态 X_{32} | 1.00 | 0.00 | 1.00 |
| 环境因素 X_{33} | 1.00 | 4.50 | 1.50 |
| 层次四：不安全行为 X_4 | 1.00 | 2.25 | 2.50 |
| 差错 X_{41} | 1.00 | 3.00 | 1.00 |
| 违规 X_{42} | 1.00 | 2.00 | 3.00 |
| 合计 X_0 | 1.00 | 2.18 | 2.42 |

5. 人因因素一级指标与二级指标之间的灰色关联分析

为了探究人因因素一级指标与二级指标之间的关系，以人因因素一级指标为参考序列，二级指标为比较序列，进行灰色关联分析。以管理组织缺失(X_1)为参考系列，管理过程漏洞(X_{11})、管理文化缺失(X_{12})、

管理资源不到位(X_{13})为比较序列。根据关联系数的计算公式, 对数据列 X_1 、 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{13} , 进行绝对差值计算, 其计算结果见表 4。

Table 3. Calculation results of absolute difference of first-level indicator
表 3. 一级指标绝对差值计算结果

| 绝对差 | 重大事故 | 较大事故 | 较大事故 |
|---------------|------|------|------|
| Δ_{01} | 0.00 | 0.02 | 0.32 |
| Δ_{02} | 0.00 | 0.39 | 0.01 |
| Δ_{03} | 0.00 | 1.02 | 0.62 |
| Δ_{04} | 0.00 | 0.07 | 0.08 |

Table 4. Calculation results of absolute difference of secondary index X_1
表 4. 二级指标 X_1 绝对差计算结果

| 绝对差 | 重大事故 | 较大事故 | 较大事故 |
|---------------|------|------|------|
| Δ_{11} | 0.00 | 0.05 | 1.15 |
| Δ_{12} | 0.00 | 0.87 | 0.10 |
| Δ_{13} | 0.00 | 0.8 | 1.10 |

由表 4 计算结果可知:

$$\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| = 0, \\ \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)| = 1.15$$

取 $\rho = 0.5$, 根据关联系数计算公式(1)分别计算每个比较序列与参考序列对应的关联系数, 计算结果如下:

$$\varepsilon_{11} = (1.00, 0.92, 0.33); \quad \varepsilon_{12} = (1.00, 0.40, 0.85); \quad \varepsilon_{13} = (1.00, 0.42, 0.34)$$

应用公式(3), 可计算出以管理组织缺失(X_1)为参考系列, 管理过程漏洞(X_{11})、管理文化缺失(X_{12})、管理资源不到位(X_{13})为参考序列的灰色关联系度为: $r_{11} = 0.75$; $r_{12} = 0.75$; $r_{13} = 0.59$; 关联序列为: $r_{13} > r_{12} = r_{11}$ 。通过以上分析可知, 在以一级指标管理组织缺失(X_1)为参考系列、二级指标管理过程漏洞(X_{11})、管理文化缺失(X_{12})、管理资源不到位(X_{13})为比较序列的情况下, 二级指标管理资源不到位(X_{13})与一级指标管理组织缺失(X_1)之间的关联度更为紧密, 而管理过程漏洞(X_{11})、管理文化缺失(X_{12})与其关联度则对等。产生上述分析结果的原因是因为在煤矿事故调查报告中, 事故原因经常出现有: 安全管理人员配额不足、安全管理机构不健全、对员工培训不充分等情况, 都属于管理资源不到位。安全管理人员不足或者不专业等情况。

同理可分析得: 以不安全的领导行为(X_2)为参考系列, 监督不充分(X_{21})、运行计划不恰当(X_{22})、没有纠正问题(X_{23})、违规监督(X_{24})为比较序列的灰色关联系度为: $r_{21} = 0.67$; $r_{22} = 0.93$; $r_{23} = 0.87$; $r_{24} = 0.63$; 关联序列为: $r_{22} > r_{23} > r_{21} > r_{24}$ 。通过上述分析结果可知, 二级指标运行计划不恰当(X_{22})与一级指标不安全的领导行为(X_2)的联系更为紧密, 其次是没有纠正问题(X_{23}), 最后分别是监督不充分(X_{21})、违规监督(X_{24})。在煤矿生产过程中都会制定相应的施工计划, 但是在实际操作过程中往往出现不按照计划施工的情况, 甚至于施工计划只是为了应付检查而设置, 工人在施工过程中就会出现与施工计划不一致的操作, 进而

导致事故的发生。而作为安全管理人员,因为不能时时刻刻在施工现场,所以当工人出现不安全行为时就不能进行及时的纠正。

同理可以分析得:以不安全行为的前提条件 X_3 为参考序列,人员因素 X_{31} 、操作者状态 X_{32} 、环境因素 X_{33} 为比较序列的灰色关联度为: $r_{31} = 0.85$; $r_{32} = 0.67$; $r_{33} = 0.80$; 关联序列为: $r_{31} > r_{33} > r_{32}$ 。有以上分析可知:人员因素 X_{31} 与不安全行为的前提条件 X_3 的关联度最为紧密,其次是环境因素 X_{33} ,最后是操作者状态 X_{32} 。煤矿工人产生不安全行为的前提条件有很多,如安全意识不高、安全知识不足,这些都属于人员因素,因此煤矿事故调查报告中也常常出现这些原因。

以不安全行为 X_4 为参考序列,差错 X_{41} 、违规 X_{42} 为比较序列的灰色关联度为: $r_{41} = 0.50$; $r_{42} = 0.68$; 关联序列为: $r_{42} > r_{41}$ 。有以上分析结果可知:违规 X_{42} 与不安全行为 X_4 的关联度最为紧密,其次是差错 X_{41} 。煤矿生产过程中出现不安全行为最主要的原因就是违反操作规程、违反操作程序,进而产生不安全行为导致事故的发生。

综上,相较于其他分析方法,本文通过 HFACS 理论找出造成煤矿事故的主要人因不安全行为及关联关系,应用灰色关联理论对人因因素进行关联度排序,不仅可以得出各人因因素之间的密切关系,避免主观因素对分析结果的影响,而且能够有效避免 HFACS 模型只能定性分析不能定量分析的问题,两种方法的结合应用使各人因因素在事故中的作用定量化,为预防煤矿事故中的人因因素提供侧重依据,达到减少人因不安全行为所造成危害程度的目的。

6. 结论

- 1) 在煤矿事故人因因素的 4 个一级指标中,其关联度大小排序分别为:不安全的行为、管理组织缺失、不安全的领导行为、不安全行为的前提条件。
- 2) 通过改进的煤矿 HFACS 理论和灰色关联理论对煤矿事故调查报告中的人因因素进行统计分析,较好地了解了人因因素在煤矿事故中所起的作用程度,有助于为预防煤矿安全事故找到侧重点。
- 3) 改进的煤矿 HFACS 理论和灰色关联理论虽然能够较好的对煤矿事故中的人因因素进行统计分析,但是也存在有些二级指标因素不够明确等缺点,具有一定的模糊性。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(No. 51864009 和 No. 52104079)。

参考文献

- [1] 陈晓勇,施式亮,李润求,李岩,游波. 基于修正的 HFACS 与 SPA 的建筑施工安全人因分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(3): 63-69.
- [2] 陈兆波,雷煜斌,曾建潮,等. 煤矿安全事故人因的灰色关联分析[J]. 煤炭工程, 2015, 47(4): 145-148.
- [3] 解学才,杨振宏,许贵阁. 基于改进的 HFACS 和 SPA 的矿山安全人因分析[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 37-42.
- [4] 米楚明. 基于人因可靠性分析的煤矿人误行为矫正研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [5] 柳茹林,程卫民,于岩斌,等. 基于 HFACS-MI 改进模型的煤矿重特大事故人因分析[J]. 煤矿安全, 2017, 48(8): 250-253.
- [6] 姚有利. 基于灰色关联分析的矿工不安全行为研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(6): 35-38.
- [7] 朱艳娜,何刚,张贵生,乔国通. 煤矿人因事故不安全行为关联分析[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(4): 32-35.
- [8] 陈晓勇,施式亮,李润求,等. 基于 HFACS 的煤矿顶板事故人因分析[J]. 矿业工程研究, 2017, 32(4): 9-13.
- [9] 周文浩,曾波. 灰色关联度模型研究综述[J]. 统计与决策, 2020, 36(15): 29-34.

-
- [10] 牛国庆, 闫思洁. 改进的 HFACS 煤矿事故致因灰色关联分析[J]. 煤炭工程, 2016, 48(5): 142-145.
 - [11] 李彦斌, 金宁, 洪梦琳. 基于 HFACS 和灰色关联法电网企业人为事故隐性危险源的辨识与评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(2): 157-161.
 - [12] 阴东玲. 基于贝叶斯网络的煤矿安全事故发生人因推理[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2016.
 - [13] 董追. 基于 HFACS 的煤矿安全事故发生人因分析和分类研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2014.
 - [14] 张雪涛. 煤矿安全管理体系缺失和不安全行为的思考[J]. 内蒙古煤炭经济, 2018(14): 117-118.
 - [15] 赵捷. 煤矿安全事故发生人因分析的一致性研究[J]. 科技创新导报, 2017, 14(25): 212-213.