扫码阅读下载

蒋合国,崔数文,谭鹏程,等.矿井通风系统综合评价指标体系与方法[J].矿业安全与环保,2024,51(2):25-32.
JIANG Heguo,CUI Shuwen,TAN Pengcheng,et al. Comprehensive evaluation index system and method of mine ventilation system[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2024,51(2):25-32.
DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20221105

矿井通风系统综合评价指标体系与方法

蒋合国[1],崔数文[1],谭鹏程[2],魏筱乐[1],魏连江[2],宋小林[2]

(1.彝良驰宏矿业有限公司,云南 昭通 657000; 2.中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:对矿井通风系统进行科学合理的综合评价是矿井通风系统优化与调整的重要依据,目前仍未形成公认的综合评价指标体系与方法。针对矿井通风系统综合评价中存在指标体系的确定不够合理、权重维护困难等问题,采用理论分析、文献分析等方法,从矿井通风系统组成要素、性质、能力等3个角度,“通风动力、通风网络、通风设施”“安全可靠性、经济合理性”“保障能力、防灾能力、抗灾能力”等8个维度选取10项评价指标构建矿井通风系统综合评价指标体系。该评价指标体系可以从多角度、多维度全面反映被评价对象的综合情况,抓住主要因素,确保综合评价的全面性和可信度。同时,提出了以等距分级、等比赋权进行排序打分的权重确定方法,即专家排序指数赋权法,以快速确定与维护评价权重,使评价结果具有客观性,又易于操作。

关键词:矿井通风;多角度多维度;综合评价;评价指标体系;权重确定方法

中图分类号:TD724;X913.4　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1008-4495(2024)02-0025-08

Comprehensive evaluation index system and method of mine ventilation system

JIANG Heguo[1], CUI Shuwen[1], TAN Pengcheng[2], WEI Xiaole[1], WEI Lianjiang[2], SONG Xiaolin[2]

(1. Yiliang Chihong Mining Co., Ltd., Zhaotong 657000, China;
2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The scientific comprehensive evaluation of the mine ventilation system is an important basis for the optimization and adjustment of the mine ventilation system. So far, a recognized comprehensive evaluation index system and method have not been formed. Aiming at the problems in the current comprehensive evaluation of mine ventilation system, such as unreasonable determination of the index system and difficulty in weight maintenance, from the three perspectives of the components, properties, and capabilities of the mine ventilation system, as well as eight dimensions including “ventilation power, ventilation network, ventilation facility”, “safety reliability, economic rationality”, “support capability, disaster prevention capability, and disaster resistance capability” selected 10 evaluation indicators, this study adopts theoretical analysis, literature synthesis and other methods to construct a comprehensive evaluation index system of mine ventilation system. The evaluation index system can comprehensively reflect the comprehensive situation of the evaluated object from multi-perspectives and multi-dimensions, grasp the main factors, and ensure the comprehensiveness and credibility of the comprehensive evaluation. At the same time, an expert ranking index weighting method is proposed, which is based on equidistant grading and proportional weighting. The expert ranking index weighting method can quickly determine and maintain the evaluation weight, so that the evaluation result are objective and easy to operate.

Keywords: mine ventilation; multi-perspectives and multi-dimensional; comprehensive evaluation; evaluation index system; weight determination method

收稿日期:2022-11-01;2024-03-06 修订

基金项目:国家自然科学基金项目(52074282)

作者简介:蒋合国(1983—),男,云南昭通人,学士,高级工程师,主要从事矿井通风与安全、有色金属开采等方面的研究工作。E-mail:327188116@qq.com。

通信作者:魏连江(1976—),男,江苏连云港人,博士,副教授,主要从事矿井通风理论与技术方面的研究工作。E-mail:cumtvb@126.com。

矿井通风系统是矿井生产系统的重要组成部分,对保障矿井安全生产发挥着重要作用。矿井通风系统是否合理,对矿井节能降耗及提高抗灾能力具有重要影响。对矿井通风系统的科学综合评价是

矿井通风系统优化与调整的重要依据,目前仍未形成公认的综合评价指标体系与方法。因此,科学、合理选择矿井通风系统评价指标,建立易于理解、易于操作的评价体系与方法,对于准确掌握矿井通风系统的运行状态,提高矿井通风系统的管理水平具有重要的指导意义[1-4]。

国外学者对矿井通风系统评价进行了大量探索和研究,不断优化评价指标与评价方法。1873年法国通风学者缪尔格提出"矿井等积孔"概念,对矿井通风难易程度进行评价,"等积孔"指标目前仍被广泛使用,但刘友英[5]指出其已难以准确评价矿井通风难易程度;20世纪80年代末,苏联学者C.克列巴诺夫提出利用矿井主要通风机效率、单位能量消耗、风量有效利用系数等8项指标表示矿井通风系统的状态和质量。国外矿井通风系统安全评价目前主要以概率风险评价为基础,以事故隐患发生后造成的严重度与事故隐患发生概率的乘积作为系统状态的风险率(危险度)。其他的矿井评价方法中,Fllipek提出的评价方法是将瓦斯、顶板、火灾和水害等4种灾害作为矿井评价指标,分别建立4种评价函数,根据其隶属函数评价得分,按照矿井危险性分级表确定危险等级。

国内学者从20世纪80年代开始大力研究矿井通风系统评价指标体系与方法,从开始的单指标评价发展到如今的多指标综合评价。黄元平等[6]从安全可靠性和经济合理性两个方面选取7项指标进行矿井通风系统综合评价;周福宝等[7]采取模糊综合评判法,以矿井总风量、矿井风量供需比、矿井总风压等12项指标进行矿井通风系统综合评价;曹凯等[8]采用层次分析法确定15项评价指标并分为最高层、中间层和最底层进行综合评价;蔡卫等[9-10]对矿井通风安全性进行定义,确定9项指标及权重来构建评价指标体系,通过分析矿井通风系统特点确定19项评价指标,建立了多层次矿井评价模型;陈开岩等[11-12]建立了包含矿井通风系统原始参数、监测系统、日常通风系统、管理系统和防灾抗灾系统等5个单元、46项指标的矿井通风系统评价体系,基于各指标建立分级界定值和隶属函数,使各指标对象评测值可转化为统一的无量纲量;程磊等[13-14]基于人工神经网络从矿井通风动力、通风网络、通风设施等8个方面,确定16项评价指标,建立了综合评价指标体系;刘彦青[15]提出了以BP神经网络法建立评价指标体系与评价模型;苏盈盈等[16]根据矿井通风系统组成确定16项评价指标,采取SVM方法初步建立了评价指标体系;徐杨等[17]从人机环管4种影响因素出发,确定了17项指标,建立了多因素、多指标评价体系;魏连江等[18]提出新的矿井通风难易程度评价指标"风压难度系数",可以较准确地评价矿井通风难易程度。

在权重确定方法方面,贾敏娜等[19]通过对16种主观及客观权重确定方法进行比较,得出专家赋权法在权重确定方面的重要性;李因果等[20]提出将主观赋权和客观赋权结合在一起进行评价,会提高评价结果的可信性;陈文涛等[21]采用网络层次分析(ANP)决策方法确定指标权重和层次结构模型;徐杨等[17]结合模糊综合评判法和层次分析法2种方法确定指标权重,证明2种方法用于安全评价具有可行性;郭昱[22]通过文献综述得出权重确定方法有主观赋权法、客观赋权法和组合赋权法3种,通常选择2种评价方法结合使用确定评价权重。

评价指标的选择和权重的确定是进行矿井通风系统综合评价的关键和核心,综合评价指标体系的构建必须遵循可操作、可量化、可比性、可实现等原则[23],各评价指标间应尽可能避免明显的含义关联或含义重叠。

目前较多学者对矿井通风系统评价指标、评价指标体系、权重确定、综合评价模型等进行了多方面研究,但存在某些评价指标体系不够全面、有些评价指标体系评价指标过多、评价指标实际可操作性较差、指标含义表达重复、权重维护比较困难等问题。基于此,笔者采用文献分析及理论分析等方法,建立一种科学合理的矿井通风系统综合评价指标体系与权重确定方法,使评价结果更具有客观性,又便于操作。

1 综合评价模型与权重确定方法

1.1 多角度多维度综合评价模型

为构建科学合理的综合评价指标体系,首先需要建立易于使用的综合评价模型。依据构建评价指标体系可操作、可量化、可比性、可实现等原则,提出一个多角度、多维度综合评价模型,以4项评价指标模型为例简单说明,依此类比可推广至N项评价指标模型。

根据目标层和指标层建立OI模型,如图1所示,其中,O为评价目标,I为评价指标。在指标比较少的情况下,OI评价模型使用简单、快捷方便。

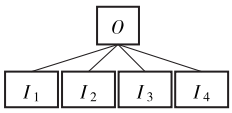

图1 OI模型
Fig. 1 OI model

当指标比较多时,需根据指标特点属性进行分类,由此建立 OIC 模型,如图 2 所示。假设 4 项指标存在 2 种分类方法,则可从 2 个角度建立 OIC 评价指标体系。O_n 为第 n 个角度的评价目标,C_k 为评价指标分类的维度,维度 C_k 的评价值为该维度隶属指标的评价值之和,维度 C_k 无须确定其指标权重。

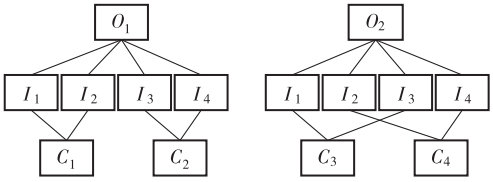

图 2　OIC 模型
Fig. 2　OIC model

为便于使用,可将 OIC 模型等价变换为 OCI 模型,如图 3 所示。相较于 OIC 模型,OCI 模型更加通俗易懂。O_n 为第 n 角度的评价目标,C_k 为第 k 个评价维度的评价值,图 3 可实现从 2 个角度 4 个维度 4 个指标进行综合评价,且不同角度与维度评价结果相同,即 $O_1=O_2$。

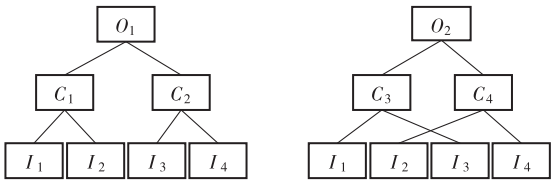

图 3　OCI 模型
Fig. 3　OCI model

最后,可将图 3 中 2 个评价指标相同、维度分类不同的 OCI 模型合并为 OOCI 综合评价模型,如图 4 所示。

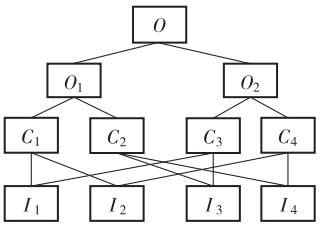

图 4　OOCI 模型
Fig. 4　OOCI model

OOCI 模型可以推广至 N 个角度、K 个维度、J 个指标的复杂综合评价中,则有:

$$O=O_n=\sum_{j=1}^{J}I_jW_j(j=1,2,\cdots,J;n=1,2,\cdots,N) \tag{1}$$

$$O_n=\sum_{k=1}^{K}C_kD_{nk}(k=1,2,\cdots,K;n=1,2,\cdots,N) \tag{2}$$

$$C_k=\sum_{j=1}^{J}W_jI_jB_{kj} \tag{3}$$

式中:O 为评价总目标;O_i 为第 i 个角度的评价总目标;I_j 为第 j 个评价指标值;W_j 为指标 I_j 对应的权重;C_k 为第 k 维度的评价值,如果第 k 维度属于第 n 角度,那么 $D_{nk}=1$,否则 $D_{nk}=0$;如果第 j 指标属于第 k 维度,那么 $B_{kj}=1$,否则 $B_{kj}=0$。

OOCI 模型实现了多角度、多维度、多指标对某个系统进行统一综合评价的目标。

1.2　专家排序指数赋权法

在综合评价中,权重能否被快速确定、是否易于维护、是否充分反映评价者的真实意图至关重要。笔者基于序关系分析法、专家打分法和指数赋权法,提出一种专家排序指数赋权法来确定评价指标权重。通常层次分析法、专家打分法等方法均采取等差标度。前人研究表明[24-25],使用等差标度确定权重值因人的心理判断差异较大。等比标度是一种具有良好数学结构与实际顺序相匹配的标度方式,可克服等差标度的部分缺陷。笔者通过比较分析确定采用等比标度。利用专家排序指数赋权法确定评价指标权重,可按照重要程度将评价指标从大到小排列,重要程度最高的评价指标排在左边,其权重占比也最高,重要程度低的评价指标排在右边,其权重占比最低;同时,将重要程度分为六级,分别为同等重要、稍微重要、重要、明显重要、强烈重要和极端重要,取值为 a^0、a^1、a^3、a^5、a^7、a^9,若有部分数值居于两者中间,可取 a^2、a^4、a^6、a^8,等比标度与等差标度之间的关系如表 1 所示。但由于等比标度存在较多的 a 取值,基于指数赋权法进行研究对比,发现矿井通风系统综合评价采用等比标度($a=9^{1/9}$)较为合适,此取值可达到等距分级、等比赋权的目的。

表 1　等比标度与等差标度之间关系
Table 1　Relationship between equal ratio scale and equal difference scale

重要性程度	等差标度值D_i	等比标度值S_j
同等重要	0	a^0
稍微重要	1	a^1
重要	3	a^3
明显重要	5	a^5
强烈重要	7	a^7
极端重要	9	a^9

专家排序指数赋权法确定权重,首先需要专家对指标重要程度进行排序、确定评价指标的重要等级,之后可计算各个指标的权重。

设某评价对象一级评价指标体系为$\{I_j|j=1,2,$

$\cdots, J\}$，其对应的权重体系为$\{W_j \mid j=1,2,\cdots,J\}$，则有：

$$W_j = S_j / \sum_{j=1}^{J} S_j \tag{4}$$

式中：$0<W_j\leqslant 1$；$\sum_{j=1}^{J} W_j = 1$；$j=1,2,\cdots,J$。

2 矿井通风系统综合评价指标体系的构建

矿井通风系统是动态随机、复杂变化的系统，其评价指标体系构建目的是反映整个系统的基本状况和主要特征，进而发现系统可能存在的问题。

2.1 评价指标的确定

若选择的评价指标过多，则可能会极大增加评价指标体系的复杂度和评价难度，而且可能会掩盖主要影响因素；若评价指标选择过少，虽然简化了评价过程，缩短了评价时间，但难以反映评价对象的真实状态。因此，首先需科学合理地选择评价指标，进而建立一个全面系统、易于理解的评价指标体系。结合矿井通风系统的组成、性质和功能，基于矿井通风系统综合评价体系构建原则，采取文献分析与理论分析相结合的方法，从众多评价指标中选择确定10项矿井通风系统综合评价指标：

1）风压难度系数I_1[18]：风压难度系数能够准确反映矿井通风难易程度，可以替代等积孔指标，同时该指标与矿井通风总阻力、主要通风机负压具有很大的相关性，可以反映矿井通风总阻力、主要通风机负压对通风系统综合评价的影响[5,7,9]。

2）主要通风机富余系数I_2：表征主要通风机最大转速、最大叶片安装角度等特征，体现主要通风机运转稳定性，可代表之前主要通风机运转稳定性、主要通风机备用系数等指标[11,14]。

3）主要通风机效率I_3：反映主要通风机运转经济合理性，该指标计算简单、可操作性强，与主要通风机综合效率、风机总功率等指标基本一致[13,16]。

4）反风率I_4：反映反风效果的指标，主要包括反风时间、反风率，由于目前矿井反风时间均能达到要求，故选择反风率作为评价反风效果的指标，可代表矿井反风系统灵活性和灵活程度等指标[9,14]。

5）回风段阻力比I_5：反映矿井的抗灾能力，可体现矿井通风网络阻力分布合理性，是一项不可或缺的重要指标，可代表矿井通风阻力分布等指标[10,12]。

6）风量供需比I_6：能直观说明矿井供风合理性，风量供需比必须在大于1的合理区间，风量供需比过小供风量不足，难以满足需求；风量供需比过大，供风量过大不经济。可替代风量利用系数、风量供需综合指数等指标[8,11]。

7）井巷风速合格率I_7：为各巷道风速合格数量占井巷总数量之比，反映井巷风速的合理性。井巷风速合格与否对安全至关重要，风速偏低，可导致瓦斯积聚；风速偏高，可导致粉尘飞扬、能耗大。井巷风速合格率配合风量供需比可反映矿井通风合理性、用风地点合格率等指标[13,17]。

8）防灾设施合格率I_8：表征矿井通风系统的防灾抗灾能力，是矿井通风系统安全保障体系的物质基础，体现矿井通风设施安全性和矿井通风系统合理性[8-9]。

9）通风构筑物合格率I_9：为质量合格的通风设施与全矿井设置通风设施总数量之比。矿井通风设施的质量好坏，直接影响整个矿井通风系统的稳定性、可靠性和抗灾能力，可代表通风设施合格率等指标[8,13]。

10）矿井有效风量率I_{10}：指矿井采掘工作面、变电所、独立硐室等各用风地点实际风量总和与矿井总进风量的比值，是反映内部漏风和通风经济合理性的指标[14,16]。

建立的OI评价指标体系如图5所示。

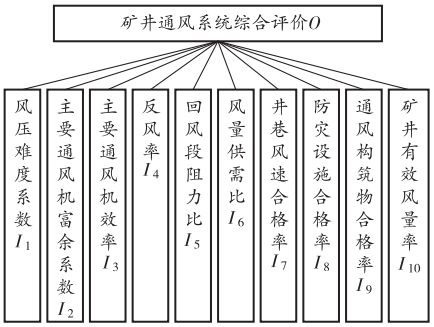

图5 矿井通风系统综合评价指标OI模型

Fig. 5 OI model for comprehensive evaluation index for mine ventilation system

2.2 隶属函数

结合主要特征点值，对选取的10项评价指标依次建立相应的隶属函数。

1）风压难度系数I_1，隶属函数如式（5）所示：以$x=1.0$为合格标准，得分为0.6；$x>1.2$表示不合格，得分为0；$x<0.6$表示优秀，取值为1.0。

$$f(x)=\begin{cases}1.0, x<0.6\\ 1.6-x, 0.6\leqslant x\leqslant 1.2\\ 0, x>1.2\end{cases} \tag{5}$$

2）主要通风机富余系数I_2，隶属函数如式（6）所示：以$x=1.1$为合格标准，得分为0.6；$x\geqslant 1.3$表示优秀，取值为1.0；$x<1.0$表示不合格，取值为0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x<1.0\\ \dfrac{x-0.8}{1.3-0.8}, 1.0\leqslant x<1.3\\ 1.0, x\geqslant 1.3\end{cases} \tag{6}$$

3)主要通风机效率 I_3,隶属函数如式(7)所示:以 $x=0.6$ 为合格标准,得分为 0.6;$x\geqslant 0.85$ 表示优秀,取值为 1.0;$x<0.55$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x<0.55\\ \dfrac{x-0.225}{0.85-0.225}, 0.55\leqslant x<0.85\\ 1.0, x\geqslant 0.85\end{cases} \tag{7}$$

4)反风率 I_4,隶属函数如式(8)所示:以 $x=0.6$ 为合格标准,得分为 0.6;$x\geqslant 0.8$ 表示优秀,取值为 1.0;$x<0.55$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x<0.55\\ \dfrac{x-0.3}{0.8-0.3}, 0.55\leqslant x<0.8\\ 1.0, x\geqslant 0.8\end{cases} \tag{8}$$

5)回风段阻力比 I_5,隶属函数如式(9)所示:以 $x=0.46$ 为合格标准,得分为 0.6;$x\leqslant 0.3$ 表示优秀,取值为 1.0;$x\geqslant 0.7$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}1.0, x\leqslant 0.3\\ \dfrac{0.7-x}{0.7-0.3}, 0.3<x<0.7\\ 0, x\geqslant 0.7\end{cases} \tag{9}$$

6)风量供需比 I_6,隶属函数如式(10)所示:以 $x=1.0$ 与 $x=1.5$ 为合格标准,得分为 0.6;$x=1.2$ 表示优秀,取值为 1.0;$x<0.95$ 或 $x>1.55$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x<0.95\\ \dfrac{x-0.7}{1.2-0.7}, 0.95\leqslant x\leqslant 1.2\\ \dfrac{1.95-x}{1.95-1.2}, 1.2<x\leqslant 1.55\\ 0, x>1.55\end{cases} \tag{10}$$

7)井巷风速合格率 I_7,隶属函数如式(11)所示:以 $x=0.95$ 为合格标准,得分为 0.6;$x=1.0$ 表示优秀,取值为 1.0;$x<0.9$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x<0.9\\ \dfrac{x-0.875}{1-0.875}, 0.9\leqslant x\leqslant 1.0\end{cases} \tag{11}$$

8)防灾设施合格率 I_8,隶属函数如式(12)所示:以 $x=0.95$ 为合格标准,得分为 0.6;$x=1.0$ 表示优秀,取值为 1.0;$x<0.9$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x<0.9\\ \dfrac{x-0.875}{1-0.875}, 0.9\leqslant x\leqslant 1.0\end{cases} \tag{12}$$

9)通风构筑物合格率 I_9,隶属函数如式(13)所示:以 $x=0.95$ 为合格标准,得分为 0.6;$x=1.0$ 表示优秀,取值为 1.0;$x<0.9$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x<0.9\\ \dfrac{x-0.875}{1-0.875}, 0.9\leqslant x\leqslant 1.0\end{cases} \tag{13}$$

10)矿井有效风量率 I_{10},隶属函数如式(14)所示:以 $x=0.85$ 为合格标准,得分为 0.6;$x\geqslant 0.95$ 表示优秀,取值为 1.0;$x\leqslant 0.75$ 表示不合格,取值为 0。

$$f(x)=\begin{cases}0, x\leqslant 0.75\\ \dfrac{x-0.7}{0.95-0.7}, 0.75<x<0.95\\ 1.0, x\geqslant 0.95\end{cases} \tag{14}$$

2.3　综合评价指标体系的确定

基于 OOCI 模型理念,可从多角度多维度建立综合评价指标体系,故拟从矿井通风系统组成要素、性质、能力等 3 个角度,“通风动力、通风网络、通风设施”“安全可靠性、经济合理性”“保障能力、防灾能力、抗灾能力”等 8 个维度建立矿井通风系统综合评价指标体系。

2.3.1　基于组成要素的综合评价指标体系

矿井通风系统是由通风动力、通风网络、通风设施三部分组成,故可从矿井通风系统组成要素的角度分为“通风动力、通风网络、通风设施”等 3 个维度,建立矿井通风综合评价指标体系 O_1(组成要素),如图 6 所示。

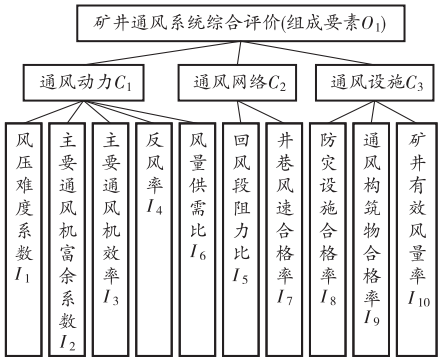

图 6　矿井通风系统综合评价指标体系 O_1(组成要素)

Fig. 6　Comprehensive evaluation index system O_1 for mine ventilation system (components)

2.3.2　基于性质的综合评价指标体系

对矿井通风系统一般可从系统具体的性质方面进行评价,包括安全可靠性、经济合理性和技术先进性[26],但安全可靠性、经济合理性均包含技术先进

性,经过整合将技术先进性指标融入安全可靠性和经济合理性指标之中,只需按照安全可靠性、经济合理性2个维度对10个评价指标进行分类,建立的综合评价指标体系 O_2(性质)如图7所示。

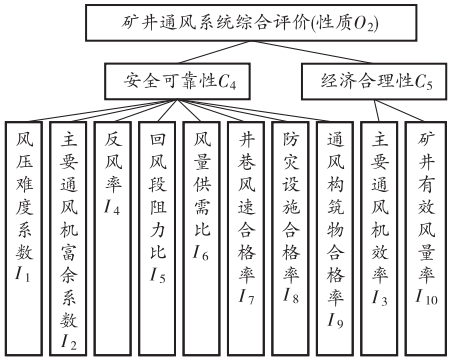

图7 矿井通风系统综合评价指标体系 O_2(性质)

Fig. 7 Comprehensive evaluation index system O_2 for mine ventilation system (nature)

2.3.3 基于能力的综合评价指标体系

矿井通风系统应具备保障、抗灾、防灾等多种能力,故从"保障能力、防灾能力、抗灾能力"等3个维度,建立矿井通风系统综合的评价指标体系 O_3(能力)如图8所示。

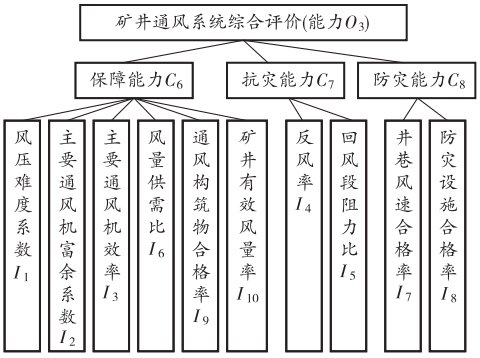

图8 矿井通风系统综合评价指标体系 O_3(能力)

Fig. 8 Comprehensive evaluation index system O_3 for mine ventilation system (capacity)

2.3.4 基于人机环管的综合评价指标体系

无论任何系统,均可采用人—机—环境系统分析方法进行评价[17,27]。经研究分析,若通过人—机—环境系统分析方法来构建矿井通风系统评价指标体系,需增加"人、环、管"部分评价指标,分别为巷道空气质量合格率 I_{11}、安全监测系统故障率 I_{12}、初中以上学历比例 I_{13}、员工培训 I_{14},具体评价指标体系 O_4 如图9所示。但显而易见,该4个评价指标代表含义与其他评价体系指标有所重叠,这4项指标没有必要全部增加,故可舍去"人机环管"评价指标体系 O_4。

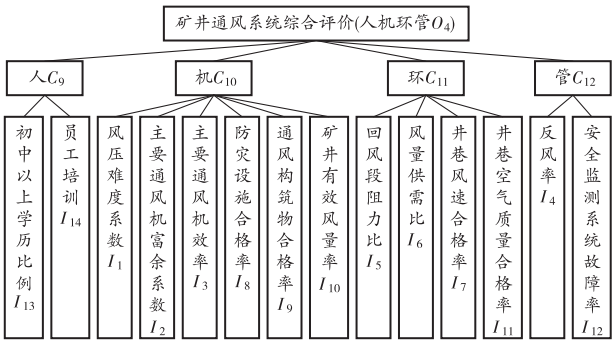

图9 矿井通风系统综合评价指标体系 O_4(人—机—环—管)

Fig. 9 Comprehensive evaluation index system O_4 for mine ventilation system (people—machine—environment—manage)

2.3.5 OOCI综合评价指标体系

经反复研究对比,最终确定矿井通风系统OOCI综合评价指标体系从3个角度(组成要素 O_1、性质 O_2、能力 O_3)、8个维度(通风动力 C_1、通风网络 C_2、通风设施 C_3、安全可靠性 C_4、经济合理性 C_5、保障能力 C_6、防灾能力 C_7、抗灾能力 C_8)、10项评价指标进行矿井通风系统综合评价,如图10所示。

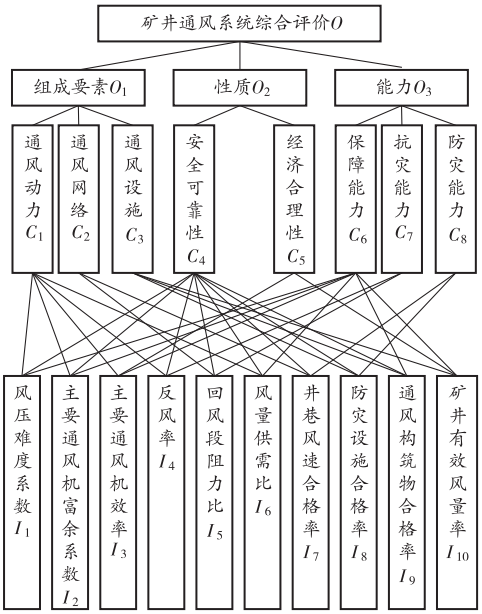

图10 矿井通风系统OOCI综合评价指标体系(综合)

Fig. 10 Comprehensive evaluation index system OOCI for mine ventilation system (comprehensive)

2.4 评价指标权重的确定

在确定矿井通风系统评价指标及综合评价指标体系后,若要准确评价矿井通风系统,还需确定各评价指标权重。采取定性分析与定量分析相结合的方法,以问卷调查的方式邀请数名专家对指标进行标度,汇总结果并取众数。在确定各评价指标的标度参数(重要等级)、标度值后,根据式(4)计算得到各评价指标权重,依据该方法确定各评价指标权重,如

表 2 所示。

表 2　矿井通风系统综合评价指标权重
Table 2　Comprehensive evaluation index weight for mine ventilation system

指标编号	评价指标名称	标度值参数	等比标度值（$a=9^{1/9}$）	权重 W_i
I_1	风压难度系数	9	a^9	0.128 6
I_2	主要通风机富余系数	8	a^8	0.114 3
I_3	主要通风机效率	5	a^5	0.071 4
I_4	反风率	6	a^6	0.085 7
I_5	回风段阻力比	5	a^5	0.071 4
I_6	风量供需比	9	a^9	0.128 6
I_7	井巷风速合格率	8	a^8	0.114 3
I_8	防灾设施合格率	7	a^7	0.100 0
I_9	通风构筑物合格率	7	a^7	0.100 0
I_{10}	矿井有效风量率	6	a^6	0.085 7

2.5　指标及综合评价结果分级方法

通过 OOCI 综合评价指标体系对矿井通风系统进行评价时，可将评价结果分为“优秀”“良好”“中等”“合格”“不合格”5 个等级，如表 3 所示。

表 3　矿井通风系统评价结果分级
Table 3　Classification of evaluation results for mine ventilation system

评级等级	矿井通风系统评价结果 O 的范围	对矿井通风系统合理性简介	需采取的安全防护措施
优秀 A	$O\geqslant95\%$	矿井通风系统十分合理	继续保持
良好 B	$80\%\leqslant O<95\%$	矿井通风系统合理	加强预防
中等 C	$70\%\leqslant O<80\%$	矿井通风系统相对合理，但存在一定问题	查明原因采取措施
合格 D	$60\%\leqslant O<70\%$	矿井通风系统基本达标，存在一定危险	检查问题及时整改
不合格 E	$O<60\%$	矿井通风系统不合理，危险系数高	停产整顿

3　OOCI 综合评价指标体系验证

矿井通风系统 OOCI 综合评价模型可从 3 个角度、8 个维度进行综合评价，现对该综合评价指标体系进行验证。

以山西某矿井为例，该矿井共布置 3 个井筒，其中主斜井、副斜井共同担负矿井进风任务，回风立井担负矿井回风任务，形成了“两进一回”中央并列式通风系统。矿井配备 2 台同等能力、型号为 FBCDZ-10-No. 32 的轴流式高效对旋式主要通风机，电动机功率为 2×560 kW，主要通风机最大排风量为 15 329 m^3/min，矿井总进风量为 11 945 m^3/min（主斜井进风 4 067 m^3/min、副斜井进风 7 878 m^3/min），总回风量 12 098 m^3/min，排风量 12 336 m^3/min。根据实际需要将采集到的矿井数据，应用式（4）~（14）计算得到各评价指标得分，见表 4。

表 4　矿井通风系统评价指标得分及隶属函数取值
Table 4　Evaluation index score and membership function value for ventilation system in a certain mine

指标编号	评价指标	权重 W_i	实际数据	指标得分 I_j	最终得分
I_1	风压难度系数	0.128 6	0.71	0.890 0	0.114 5
I_2	主要通风机富余系数	0.114 3	1.15	0.700 0	0.080 0
I_3	主要通风机效率	0.071 4	0.768 5	0.869 6	0.062 1
I_4	反风率	0.085 7	0.639 5	0.679 0	0.058 2
I_5	回风段阻力比	0.071 4	0.458 4	0.788 8	0.056 3
I_6	风量供需比	0.128 6	1.12	0.840 0	0.108 0
I_7	井巷风速合格率	0.114 3	0.975 6	0.804 8	0.092 0
I_8	防灾设施合格率	0.100 0	0.981 2	0.849 6	0.085 0
I_9	通风构筑物合格率	0.100 0	0.976 1	0.808 8	0.080 9
I_{10}	矿井有效风量率	0.085 7	0.928 5	0.914 0	0.078 3

依据表 4 和式（1）~（3）可计算各维度评价得分及总评价得分，见表 5。

表 5　矿井通风系统各维度得分及评价结果
Table 5　Score and evaluation results of various dimensions of ventilation system in a certain mine

维　度	得　分	角　度	评价结果 O
通风动力 C_1	0.314 8	组成要素 O_1	0.815 3
通风网络 C_2	0.256 3		
通风设施 C_1	0.244 2		
安全可靠性 C_4	0.674 9	性质 O_2	0.815 3
经济合理性 C_5	0.140 4		
保障能力 C_6	0.523 8	能力 O_3	0.815 3
抗灾能力 C_7	0.177 0		
防灾能力 C_8	0.114 5		

由表 5 可见，从 3 个角度评价该矿井通风系统得到的结果均相等，其评价结果 O（$80\%\leqslant81.53\%<95\%$）处于良好区间，可以初步认定该煤矿为安全矿井，这也与该矿实际情况相符，可进行安全生产。

4　结论

1）提出 OOCI 通用综合评价模型，有利于从多

角度多维度对矿井通风系统进行评价,并且可以保证评价结果与实际情况的一致性。结合实际需要,OI模型和OCI模型也可以单独使用进行综合评价。

2)提出专家排序指数赋权法,有利于反映决策者真实意图,方便矿井通风系统评价指标权重的快速确定和维护,也可以根据具体需要采用其他合理的权重确定方法。

3)从矿井通风系统组成要素、性质、能力3个角度、"通风动力、通风网络、通风设施""安全可靠性、经济合理性""保障能力、防灾能力、抗灾能力"等8个维度,构建了矿井通风系统OOCI多维度综合评价指标体系。

参考文献(References):

[1] 周福宝,魏连江,夏同强,等.矿井智能通风原理、关键技术及其初步实现[J].煤炭学报,2020,45(6):2225-2235.
ZHOU Fubao, WEI Lianjiang, XIA Tongqiang, et al. Principle, key technology and preliminary realization of mine intelligent ventilation[J]. Journal of China Coal Society,2020 45(6):2225-2235.

[2] 聂兴信,冯珊珊,张书读,等.高海拔矿井作业人员动态热舒适性评价[J].中国安全科学学报,2020,30(1):180-186.
NIE Xingxin, FENG Shanshan, ZHANG Shudu, et al. Dynamic comfort evaluation for operators in high-altitude mines[J]. China Safety Science Journal,2020,30(1):180-186.

[3] 刘兴滨,张雷.基于Ventsim模型的矿井通风系统精确调整[J].煤矿开采,2018,23(3):42-43.
LIU Xingbin, ZHANG Lei. Accurate adjustment of mine ventilation system based on ventsim model[J]. Coal Mining Technology,2018,23(3):42-43.

[4] VIZCAYCHIPI M P, MARTINS L, WHITE J R, et al. Intensive Care Weaning (iCareWean) protocol on weaning from mechanical ventilation: A single-blinded multicentre randomised control trial comparing an open-loop decision support system and routine care, in the general intensive care unit[J]. BMJ Open, 2020, 10(9): e042145.

[5] 刘友英.衡量矿井通风难易程度的指标[J].煤矿安全,1989,20(5):31-35.
LIU Youying. Indicators for measuring the difficulty of mine ventilation[J]. Safety in Coal Mines,1989,20(5):31-35.

[6] 黄元平,赵以惠.矿井通风系统的评价方法[J].煤矿安全,1983,14(9):24-31.
HUANG Yuanping, ZHAO Yihui. Evaluation method of mine ventilation system[J]. Safety in Coal Mines,1983,14(9):24-31.

[7] 周福宝,王德明,李正军.矿井通风系统优化评判的模糊优选分析法[J].中国矿业大学学报,2002,31(3):262-266.
ZHOU Fubao, WANG Deming, LI Zhengjun. Fuzzy optimum selection and analysis for optimization and evaluation of mine ventilation systems[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002,31(3):262-266.

[8] 曹凯,王德明.基于层次分析法的矿井通风系统安全评价指标[J].煤矿安全,2010,41(5):43-46.
CAO Kai, WANG Deming. Safety evaluation index of mine ventilation system based on analytic hierarchy process[J]. Safety in Coal Mines, 2010,41(5):43-46.

[9] 蔡卫.矿井通风系统安全性评价及其应用[J].煤炭学报,2004,29(2):195-198.
CAI Wei. Safety evaluation and its application on coal mine ventilation system[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(2):195-198.

[10] 蔡卫,吴兵.层次分析法在矿井通风评价中的应用[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(2):149-152.
CAI Wei, WU Bing. Application of analytic hierarchical process in mine ventilationevaluation [J]. Journal of Liaoning Technical University,2005,24(2):149-152.

[11] 陈开岩,王超.矿井通风系统可靠性变权综合评价的研究[J].采矿与安全工程学报,2007,24(1):37-41.
CHEN Kaiyan, WANG Chao. Variable weight comprehensive evaluation for mine ventilation system seliability[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2007,24(1):37-41.

[12] 陈开岩,傅清国,刘祥来,等.矿井通风系统安全可靠性评价软件设计及应用[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):393-398.
CHEN Kaiyan, FU Qingguo, LIU Xianglai, et al. Design and application of estimation software for safety reliability of mine ventilation system[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2003,32(4):393-398.

[13] 程磊,杨运良,熊亚选.基于人工神经网络的矿井通风系统评价研究[J].中国安全科学学报,2005,15(5):88-91.
CHENG Lei, YANG Yunliang, XIONG Yaxuan. Study of mine ventilation system assessment based on artificial neural network[J]. China Safety Science Journal,2005,15(5):88-91.

[14] 程磊,杨运良,熊亚选.矿井通风系统评价指标体系的研究[J].中国安全科学学报,2005,15(3):91-94.
CHENG Lei, YANG Yunliang, XIONG Yaxuan. Study on assessment index structure of mine ventilation system[J]. China Safety Science Journal,2005,15(3):91-94.

[15] 刘彦青.基于巷道摩擦阻力系数BP神经网络预测模型的矿井风网风量预测研究[J].矿业安全与环保,2021,48(2):101-106.
LIU Yanqing. Study on the air quantity of mine ventilation network based on BP neural network prediction model of friction resistance coefficient in roadway [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2021,48(2):101-106.

[16] 苏盈盈,刘兴华,李景哲,等.矿井通风系统指标体系的约简及其安全评价[J].中国安全科学学报,2013,23(9):83-89.
SU Yingying, LIU Xinghua, LI Jingzhe, et al. Mine ventilation system index system reduction and its safety evaluation[J]. China Safety Science Journal,2013,23(9):83-89.

[17] 徐杨,周延,孙鑫,等.基于模糊层次分析法的矿井安全综合评价[J].中国安全科学学报,2009,19(5):147-152.
XU Yang, ZHOU Yan, SUN Xin, et al. Synthesized assessment method for coal mine safety based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal (CSSJ),2009,19(5):147-152.

[18] 魏连江,康家康,宋小林,等.矿井通风难易程度评价指标及分级方法[J].中国矿业大学学报,2021,50(4):649-657.
WEI Lianjiang, KANG Jiakang, SONG Xiaolin, et al. Evaluation index and classification method of mine ventilation difficulty[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2021,50(4):649-657.

[19] 贾敏娜,宋光兴.群决策中专家权重确定方法研究综述[J].时代金融,2008(1):24-25.
JIA Minna, SONG Guangxing. Review on the methods of determining expert weight in group decision-making[J]. Times Finance, 2008(1):24-25.

(下转第39页)

underground coal mines[J]. Strategic Study of CAE,2023,25(5):146-156.

[5] 刘勇.煤矿粉尘智能防控技术及装备[J].智能矿山,2023,4(8):52-56.
LIU Yong. Intelligent prevention and control technology and equipment of coal mine dust[J]. Journal of Intelligent Mine,2023,4(8):52-56.

[6] 王伟.大断面煤巷快速掘进支护技术的研究[J].自动化应用,2023,64(15):209-211.
WANG Wei. Research on rapid excavation and support technology for large cross-section coal roadway[J]. Automation Application,2023,64(15):209-211.

[7] 王国法,孟令宇.煤矿智能化及其技术装备发展[J].中国煤炭,2023,49(7):1-13.
WANG Guofa,MENG Lingyu. Development of coal mine intelligence and its technical equipment[J]. China Coal,2023,49(7):1-13.

[8] 王星龙.低渗透煤层动静压联合注水防尘技术研究[D].西安:西安科技大学,2022.

[9] 王惠凤,陈殿赋.掘进工作面粉尘综合治理技术与实践[J].矿业安全与环保,2020,47(5):90-94.
WANG Huifeng, CHEN Dianfu. Technology and practice of comprehensive control of dust in heading face[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2020,47(5):90-94.

[10] 刘荣华,朱必勇,莫世途,等.一种新型组合式喷雾降尘装置流场及雾化特性试验研究[J/OL].安全与环境学报[2024-02-11].DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1590.

[11] 王鹏飞,邬高高,袁新虎,等.微纳米气泡强化喷雾降尘试验研究[J].煤炭学报,2022,47(12):4495-4503.
WANG Pengfei, WU Gaogao, YUAN Xinhu, et al. An enhanced spray dust suppression method by micro-nano bubbles[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(12):4495-4503.

[12] 刘涛,兰树员,汪春梅,等.综掘工作面高压喷雾与泡沫除尘技术应用的对比研究[J].矿业安全与环保,2016,43(1):50-53.
LIU Tao,LAN Shuyuan,WANG Chunmei,et al. Comparative study on application of high-pressure spray and foam dust removal technology in fully mechanized heading face[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2016,43(1):50-53.

[13] 孟庆国,周茵,兰文龙,等.环境友好型泡沫除尘剂协同试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(4):105-110.
MENG Qingguo, ZHOU Yin, LAN Wenlong, et al. Experimental study on environment-friendly foam dedusting agent[J]. Mining Research and Development,2019,39(4):105-110.

[14] 王冬辉,白若男,聂文,等.基于风幕封闭的综掘面综合控除尘技术研究与应用[J].煤炭工程,2015,47(12):59-61.
WANG Donghui, BAI Ruonan, NIE Wen, et al. Research and application on comprehensive dust control and remove technology with enclosed air curtain in comprehensive mechanized heading face[J]. Coal Engineering,2015,47(12):59-61.

[15] 马威.综掘工作面分步立体式控降尘系统优化[J].煤矿安全,2015,46(2):82-84.
MA Wei. Optimization forsubstep three-dimensional dust control system at fully mechanized excavation face[J]. Safety in Coal Mines,2015,46(2):82-84.

[16] 杨征,庄学安,陈真,等.快掘工作面粉尘污染规律模拟及防尘技术探讨[J].煤矿机械,2022,43(2):79-82.
YANG Zheng,ZHUANG Xue'an,CHEN Zhen,et al. Simulation of dust pollution law and discussion on dust prevention technology in fast-tunneling working face[J]. Coal Mine Machinery,2022,43(2):79-82.

(责任编辑:樊淑兰)

(上接第 32 页)

[20] 李因果,李新春.综合评价模型权重确定方法研究[J].辽东学院学报(社会科学版),2007,9(2):92-97.
LI Yinguo, LI Xinchun. Weight determination of comprehensive evaluation model[J]. Journal of Eastern Liaoning University (Social Sciences),2007,9(2):92-97.

[21] 陈文涛,佟瑞鹏,孙跃龙.基于 ANP 方法的社区事故应急能力评估指标权重的确定[J].中国安全科学学报,2010 20(6):166-171.
CHEN Wentao, TONG Ruipeng, SUN Yuelong. Determination of index weight in evaluation of community emergency response capability based on ANP[J]. China Safety Science Journal (CSSJ),2010,20(6) 166-171.

[22] 郭昱.权重确定方法综述[J].农村经济与科技,2018,29(8):252-253.
GUO Yu. Summary of weight determination methods[J]. Rural Economy and Science-Technology,2018,29(8):252-253.

[23] 彭张林,张爱萍,王素凤,等.综合评价指标体系的设计原则与构建流程[J].科研管理,2017,38(增刊 1):209-215.
PENG Zhanglin, ZHANG Aiping, WANG Sufeng, et al. Design principle and construction process of comprehensive evaluation index system[J]. Science Research Management,2017,38(S1):209-215.

[24] 侯岳衡,沈德家.指数标度及其与几种标度的比较[J].系统工程理论与实践,1995,15(10):43-46.
HOU Yueheng,SHEN Dejia. Exponential scale and its comparison with several scales[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,1995,15(10):43-46.

[25] 吕跃进,张维,曾雪兰.指数标度与 1-9 标度互不相容及其比较研究[J].工程数学学报,2003,20(8):77-81.
LU Yuejin, ZHANG Wei, ZENG Xuelan. Exponential scale not being consistent with 1-9 scale[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics,2003,20(8):77-81.

[26] 范红伟.矿井通风系统可靠性评价指标体系的构建与实施[J].山西煤炭,2020,40(3):46-49.
FAN Hongwei. Construction and implementation of reliability evaluation index system for mine ventilation system[J]. Shanxi Coal,2020,40(3):46-49.

[27] 白仁喜."人机环管"在煤矿供电安全管理中的应用[J].陕西煤炭,2020,39(2):176-178.
BAI Renxi. Application of "human-machine-environment-management" in the safety management of coal mine power supply[J]. Shaanxi Coal,2020,39(2):176-178.

(责任编辑:樊淑兰)