

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2018.04.002

基于贝叶斯反馈云理论的地下矿山通风系统可靠性研究

陈圆超¹,戴剑勇^{1,2*},刘珏玉³

(1.南华大学 环境保护与安全工程学院,湖南 衡阳 421001;2.南华大学 研究生院,
湖南 衡阳 421001;3.南华大学 经济与法学学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:为减少传统地下矿山评价方法中人的主观因素影响,提出采用基于贝叶斯反馈云理论的地下矿井通风系统可靠性评价方法,完成评价指标定性概念向定量数值的转化,再以贝叶斯方法进行参数修正.实例分析表明:该方法能有效修评价人员的评价差异,提高可靠性评价的客观性和科学性.

关键词:地下矿山通风系统;可靠性;贝叶斯反馈;云理论

中图分类号:X936 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2018)04-0008-07

Reliability Research of Ventilation System in Underground Mine Based on Cloud Method and Bayesian Feedback

CHEN Yuanchao¹, DAI Jianyong^{1,2*}, LIU Jueyu³

(1.School of Environmental Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2.The Graduate School, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3.School of Economics and Law, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: For reducing the influence of subjective factors in traditional assessment methods of underground mine, the reliability assessment method for ventilation system in underground mine based on cloud method and bayesian feedback is set forward to transform the qualitative indexes into quantitative indexes and optimize the parameters. The case of application suggests that the theory can correct the assessment divergence of personnel effectively and improve the objectivity and scientificity of the reliability assessment.

key words: ventilation system in underground mine; reliability; bayesian feedback; cloud method

收稿日期:2018-03-14

基金项目:国家自然科学基金研究项目(51174116)

作者简介:陈圆超(1991-),男,硕士研究生,主要从事矿山安全方面的研究.E-mail:360991967@qq.com.*通信作者:
戴剑勇(1969-),男,教授,博士,主要从事于核安全系统工程方面的研究.E-mail:79417049@qq.com

0 引言

矿井通风系统是由诸多变量组成的一个复杂系统,其运行状态对保证井下安全生产具有重要意义^[1].因矿山可靠性评判中存在着很大的模糊性,早在 1988 年,就有学者将模糊理论运用在矿山通风可靠性评价中^[2],之后又出现了大量关于矿井通风系统的可靠性模糊评价的研究^[3-8].但传统的模糊集理论具有不彻底性,一旦人为假定隶属函数之后,则将分析结果重新归入到精确数学领域^[9],忽略了评价过程中的随机性和模糊性.云理论则可以提供一种定性知识描述、定性概念及其定量数值之间的转换模型,充分考虑了实际评价工作中的随机性.因此,提出将云理论运用在地下矿山通风系统可靠性评价中,并利用贝叶斯反馈算法对模型参数进行检验与修正,使评价结果更为客观准确.

1 云理论

1.1 云理论概述

云理论是由李德毅院士在 20 世纪 90 年代提出^[10],该理论设计了一种用语言值表示定性概念与定量数值相互转换的模型,称为云模型.云模型可通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 三个数字特征,将定性指标的模糊性、随机性和离散性有机结合,再以定量数值的形式表现较为客观地出来.云模型的示例云图见图 1 ($E_x = 80, E_n = 1.6667, H_e = 0.3333$).

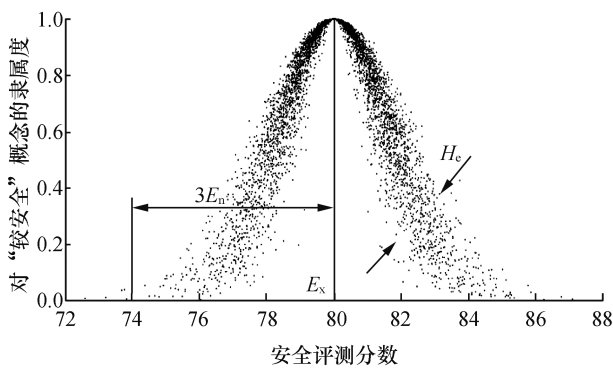


图 1 云模型
Fig.1 Cloud model

以某系统为例,横坐标为测评分数,纵坐标为分数对应“较安全”概念的隶属度,期望 E_x 表示最符合“较安全”定性概念的值,其隶属度为 1;熵

E_n 表示定性概念的不确定性和可度量范围, E_n 越大表示定性概念可度量的范围越大,云图的跨度就越大;超熵 H_e 表示熵 E_n 的熵,表示 E_n 的不确定性和样本出现的随机性,即云图中“云滴”的离散度, H_e 越大,云就越厚.

1.2 云发生器

生成云的算法称云发生器,按功能的不同可分为正向云发生器和逆向云发生器.逆向云发生器的算法如下^[11]:1) 收集 N 个样本的定量值 $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 计算其平均值 $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ 和样本方差 $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2$; 2) 确定三个云参数: $E_x = \bar{X}, E_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E_x)^2}, H_e = \sqrt{1 - S^2 - E_n^2}$. 另外,在已知定性概念的定量值边界时,可以用近似指标法确定云参数: $E_x = (C_{\min} + C_{\max})/2, E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6, H_e = k$, 式中, C_{\max} 和 C_{\min} 分别是定性概念的定量值上界和下界, k 可根据评价系统本身的模糊性和随机性赋值; 3) 生成以 E_n 为数学期望, H_e 为标准差的随机数 E_n , 以 E_x 为数学期望, E_n 为标准差的随机数 x , 将 x 作为定性概念云模型的一个云滴; 4) 令 y 为 x 的隶属度, 有: $y = \exp[-(x - E_x)^2 / 2E_n^2]$; 5) 重复第 3, 4 步, 生成 n 个云滴. 正向云发生器的云参数 E_x, E_n, H_e 是预设的, 可略去第 1, 2 步.

2 地下矿山通风系统可靠性评价指标与可靠性等级

2.1 可靠性评价指标

对现有研究^[3-6]进行研究分析,将地下矿山通风系统可靠性评价指标分成三个一级指标:通风系统环境 U_1 ,通风设施设备 U_2 ,作业人员与安全管理 U_3 . U_1 包含 11 个二级指标:通风网络结构稳定性 C_1 ,风量供需比 C_2 ,矿井有效供风率 C_3 ,通风系统等积孔 C_4 ,回风段阻力百分比 C_5 ,反风系统合格率 C_6 ,作业系统微气候 C_7 ,采掘面浮尘浓度最大超标率 C_8 ,矿井漏风率 C_9 ,风质合格率 C_{10} ,工作面配风合格率 C_{11} ; U_2 包括 6 个二级指标:主通风机运行效率 C_{12} ,主通风机备用系数 C_{13} ,局扇装备达标率 C_{14} ,千米巷道通风设施数 C_{15} ,通风设施质量合格率 C_{16} ,巷道维修状况 C_{17} ; U_3 包括 4 个二级指标:作业人员安全素质 C_{18} ,安全投入合理性 C_{19} ,安全监测情况 C_{20} ,安全管理制

度与执行情况 C_{21} . 可靠性评价算法如式: $S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot R_i)$. S_i 、 W_i 和 R_i 分别为第 i 个指标的综合测评云, 权重云和评价云. 计算出综合可靠性结果 S 后, 将其与可靠性等级标尺对比即可得到评价结果.

2.2 可靠性等级

根据现有研究^[3,12-13], 结合专家经验划分地下矿山通风系统可靠性评价指标等级划分, 见表 1.

根据指标近似法, 结合专家经验, 得到各个一级评价指标云参数, 见表 2.

表 1 地下矿山通风系统可靠性评价指标等级

Table 1 Level of reliability index of ventilation system of underground mine

指标	好	较好	一般	差
U_1	$100 \leq S_i \leq 90$	$90 < S_i \leq 75$	$75 < S_i \leq 62$	$62 < S_i \leq 0$
U_2	$100 \leq S_i \leq 88$	$88 < S_i \leq 73$	$73 < S_i \leq 61$	$61 < S_i \leq 0$
U_3	$100 \leq S_i \leq 86$	$86 < S_i \leq 72$	$72 < S_i \leq 60$	$60 < S_i \leq 0$

综合测评云 U 由三个一级指标取均值所得. 将 U 的参数输入正向云发生器, 得到修正前的地下矿山通风系统可靠性评价标尺隶属云图(图 2).

表 2 可靠性等级标尺隶属云参数(修正前)

Table 2 Cloud parameters of reliability level scale (before correction)

评价指标	好			较好			一般			差		
	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e	E_x	E_n	H_e
通风系统环境 U_1	95	1.667	0.667	82.5	2.5	1	68.5	2.167	0.867	56	2	0.8
通风设施设备 U_2	94	2	0.8	80.5	2.5	1	67	2	0.8	55.5	1.833	0.733
作业人员与安全管理 U_3	93	2.333	0.933	79	2.333	0.933	66	2	0.8	55	1.667	0.667
综合测评云 U	94	2	0.8	80.667	2.444	0.978	67.167	2.056	0.822	55.5	1.833	0.733

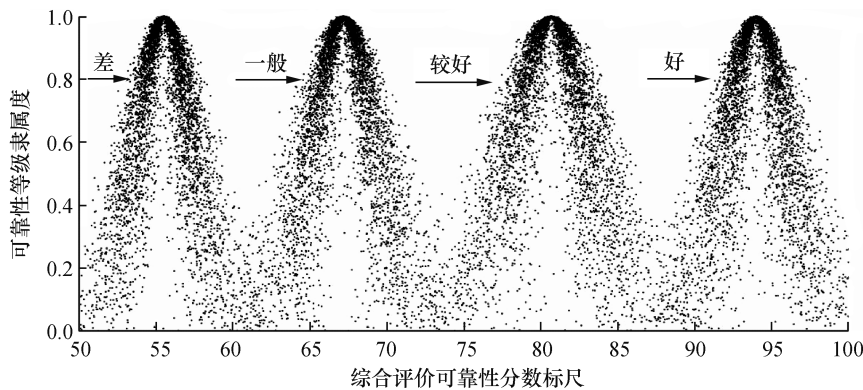


图 2 修正前地下矿山通风系统可靠性标尺隶属云

Fig.2 Scale cloud of ventilation system reliability of underground mine before correction

由于专家意见存在差异性和主观性, 图中的云滴在云与云之间的边界处分界不明显, 而且云滴离散程度较大, 不宜用于实际评价工作. 同时, 人们对模糊定性概念的认识和理解是会随着时间的变化而变化的, 这就需要后来的实践经验来修正原先的判断^[14]. 因此, 提出采用贝叶斯反馈算法来修正云模型参数, 解决上述问题.

3 贝叶斯反馈云模型

贝叶斯反馈云模型运行流程见图 3^[11].

因云滴是根据云参数依概率产生的, 所以若云参数的设定偏差较大, 云滴也会与客观事实有较大偏差, 需要针对这种情况对云滴进行修正, 过程如下^[14]:

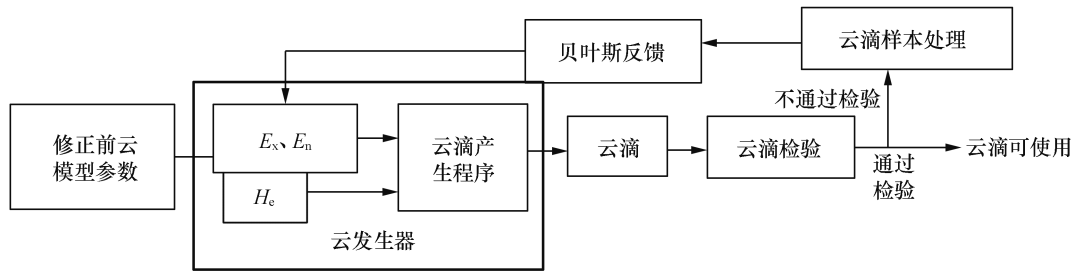


图 3 贝叶斯反馈云模型运行流程

Fig.3 Process of bayesian feedback cloud model

1) 为模糊定性概念设定协同认知置信度 $(1 - \alpha)$, 因概念云服从 $N(E_x, E_n^2)$ 分布, 由中心极限定理可知, 当 $x \in [E_x - z_{\alpha/2} \cdot E_n, E_x + z_{\alpha/2} \cdot E_n]$ 时, 该定性概念的隶属度可以达到 $(1 - \alpha)$, 区间中 $z_{\alpha/2}$ 指标准正态分布的双侧百分点位, 其值可通过查标准正态分布表获得. 当 α 接近 0, x 在区间外就是一个极小概率的事件. 把 $[E_x - z_{\alpha/2} \cdot E_n, E_x + z_{\alpha/2} \cdot E_n]$ 称为接受域, 接受域之外的区域称为拒绝域, 设 X_L 和 X_H 分别为 $x < E_x - z_{\alpha/2} \cdot E_n$ 和 $x > E_x + z_{\alpha/2} \cdot E_n$ 时云滴点的均值, 称为 x 拒绝域的两个基点. 组织专家组, 通过网络投票判定这两个基点值是否确实不属于对应的定性概念, 认为不属于, 投赞成票, 认为属于则投否决票, 若否决率大于 $\alpha/2$, 则认为小概率事件发生, 原云参数需要修正.

2) 用贝叶斯反馈算法对新云滴参数进行修正. 根据后验概率分布可得到修正后的特征参数 (推理过程见文献 [12]):

$$E_x^c = \left(\frac{X}{(E_n^2 + H_e^2)/n} + \frac{C_0}{\sigma^2} \right)$$

$$E_n^c = \left(\frac{1}{(E_n^2 + H_e^2)/n} + \frac{1}{\sigma^2} \right)$$

$$E_n^c = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x^c|$$

$$H_e^c = \sqrt{S^2 - E_n^{c2}}$$

X 为去除不属于定性概念云滴后剩余的云滴期望, C_0 和 σ 分别等于原 E_x 和 E_n .

现修正可靠性等级标尺云参数. 将置信度 $(1 - \alpha)$ 设为 0.95, 查表得 $z_{\alpha/2} = 1.96$, 并收集四个标尺云落在拒绝域的八组云滴, 各取均值得四组 X_H 和 X_L . 通过专家组网络投票决定云滴组是否通过检验, 见表 3.

表 3 显示所有云滴组否决率均大于 $\alpha/2$, 都

未通过检验, 应进行云滴样本处理和贝叶斯反馈修正. 对表 2 的云参数进行修正, 见表 4.

表 3 可靠性等级拒绝域基点和网络投票结果

Table 3 Rejection region basis points of reliability level and the result of network voting

等级	基点	总票	否决数	否决率
好	X_H	99.579	62	0.032
	X_L	88.656	62	0.048
较好	X_H	87.240	63	0.032
	X_L	73.967	63	0.048
一般	X_H	72.600	60	0.033
	X_L	61.480	60	0.033
差	X_H	60.401	62	0.048
	X_L	50.506	62	0.032

表 4 可靠性等级标尺隶属云参数 (修正后)

Table 4 Cloud parameters of reliability level scale

等级	好	较好	一般	差
E_x	93.984	80.673	67.181	55.488
E_n	0.842	1.535	1.120	0.423
H_e	0.540	0.854	0.574	0.268

生成修正后的标尺隶属云见图 4. 重新进行网络投票, 投票结果显示四组云参数均通过检验, 修正后的云滴可用于可靠性评价 (若有拒绝域基点 X_H 和 X_L 仍未通过检验, 则要再次进行上述投票、修正步骤). 相对于图 2, 图 4 修正后的云图云滴更为聚集, 云与云之间的分界更为清晰, 这表明修正后的可靠性等级分级评估已达到一定的共识, 结果更加统一, 虽然仍有一定的随机性和模糊性, 但已经在可接受范围之内, 因此修正后的云图运用在实际评价中更具现实意义. 图 4 表示, “好” 等级的区间为 $[91.456, 96.511]$, “较好” 等级的区间为 $[76.070, 85.277]$, “一般” 的区间为 $[63.821,$

70.541],“差”的区间为[54.219,56.756].若最终测评结果 S 落在某一等级区间,系统的可靠性即

对应该可靠性等级;若未落在规定等级区间,则对应较低一级的可靠性等级.

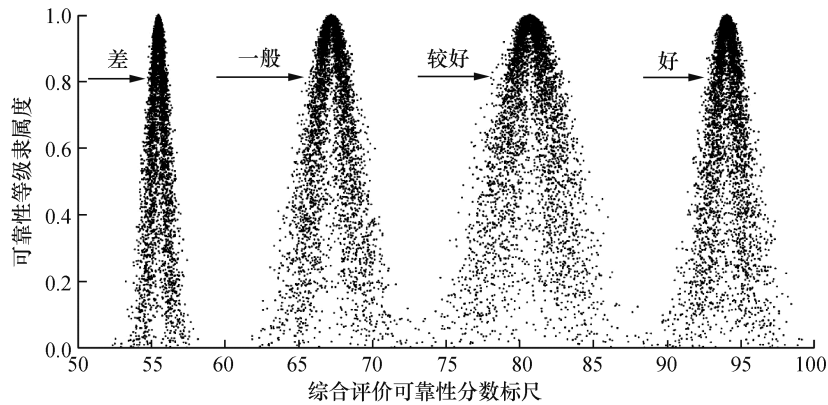


图4 修正后地下矿山通风系统可靠性标尺隶属云

Fig.4 Scale cloud of ventilation system reliability of underground mine after correction

4 地下矿山通风系统可靠性评价指标权重云模型

现有研究中,确定指标的权重一般采用层次分析法,但人思想的主观因素会对指标的重要性有很大影响.为加强客观性,采用文献[15]的标度

准则构建云模型指标比较判断矩阵.参考现有研究^[3-5,12-13],结合专家经验,对一级指标作比较判断矩阵,分别对 E_x 、 E_n 和 H_e 进行一致性检验,通过后,用方根法求得其权重云,见表5.同理得到二级指标权重云参数,见表6.

表5 一级指标比较判断矩阵与权重云参数

Table 5 The relatively judgment matrix of the first class index and the weight cloud parameters

指标	通风系统环境 U_1	通风设施设备 U_2	作业人员与安全管理 U_3	权重云参数
U_1	(1,0,0)	(3,0.33,0.05)	(5,0.33,0.05)	(0.637,0.480,0.480)
U_2	(1/3,0.33/9,0.05/9)	(1,0,0)	(3,0.33,0.05)	(0.258,0.325,0.195)
U_3	(1/5,0.33/25,0.05/25)	(1/3,0.33/9,0.05/9)	(1,0,0)	(0.105,0.32545,0.195)

表6 二级指标权重云参数

Table 6 The weight cloud parameters of the second class index

通风系统环境 $U_1(E_x, E_n, H_e)$	通风设施设备 $U_2(E_x, E_n, H_e)$	作业人员与安全管理 $U_3(E_x, E_n, H_e)$
C_1 关键指标	C_{12} (0.562,0.505,0.497)	C_{18} (0.112,0.116,0.118)
C_2 关键指标	C_{13} (0.034,0.045,0.061)	C_{19} (0.103,0.098,0.100)
C_3 (0.183,0.135,0.135)	C_{14} (0.105,0.105,0.103)	C_{20} (0.250,0.259,0.247)
C_4 (0.083,0.095,0.095)	C_{15} (0.072,0.096,0.095)	C_{21} (0.535,0.527,0.536)
C_5 (0.044,0.093,0.093)	C_{16} (0.072,0.096,0.095)	
C_6 (0.083,0.095,0.095)	C_{17} (0.156,0.152,0.150)	
C_7 (0.023,0.090,0.090)		
C_8 (0.023,0.090,0.090)		
C_9 (0.065,0.093,0.093)		
C_{10} (0.170,0.130,0.130)		
C_{11} (0.326,0.181,0.181)		

其中,通风网络结构稳定性 C_1 ,风量供需比 C_2 两个指标对通风系统可靠性起决定性的重

作用,必须符合规定,可靠性评价时若这两个任意一个不符规定,则系统可靠性直接评为不合格,故

将其作为独立指标,不赋权重值.得到修正后的标尺隶属云和权重云参数,便可进行地下矿山通风系统可靠性评价.

5 实例分析

某地下矿山位于湖南省,主井直径 5 m,井深 320 m,通风系统为侧翼对角式,阶梯式网络,采用抽出式通风,通风机额定风量为 39.7~100 m³/s.本次可靠性评价活动有 9 位评价员参与,通过对 21 个指标进行实地调研,给出可靠性评分.其中,第一个一级指标通风系统环境 U₁ 的所属二级指标与综合测评结果,见表 7.

表 7 U₁ 指标测评结果

Table.7 The assessment result of the U₁ index

指标	测评结果	E _x	E _n	H _c
C ₁	合格		—	
C ₂	合格		—	
C ₃	85,78,81,79,80,80,78,82,79	80.222	0.699	2.111
C ₄	94,91,92,92,94,86,92,92,89	91.333	0.786	2.373
C ₅	90,81,86,87,85,84,85,84,87	85.444	0.787	2.379
C ₆	70,75,76,77,73,74,74,75,70	73.778	0.766	2.315
C ₇	70,75,73,74,74,75,76,70,78	73.889	0.823	2.487
C ₈	78,76,76,80,78,80,72,78,70	76.444	1.079	3.258
C ₉	65,62,65,73,67,65,68,70,66	66.778	1.016	3.068
C ₁₀	72,73,79,74,75,77,70,75,76	74.556	0.848	2.561
C ₁₁	74,77,76,70,72,75,75,77,76	74.667	0.737	2.226

联系表 7,以 $S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot R_i)$ 计算出

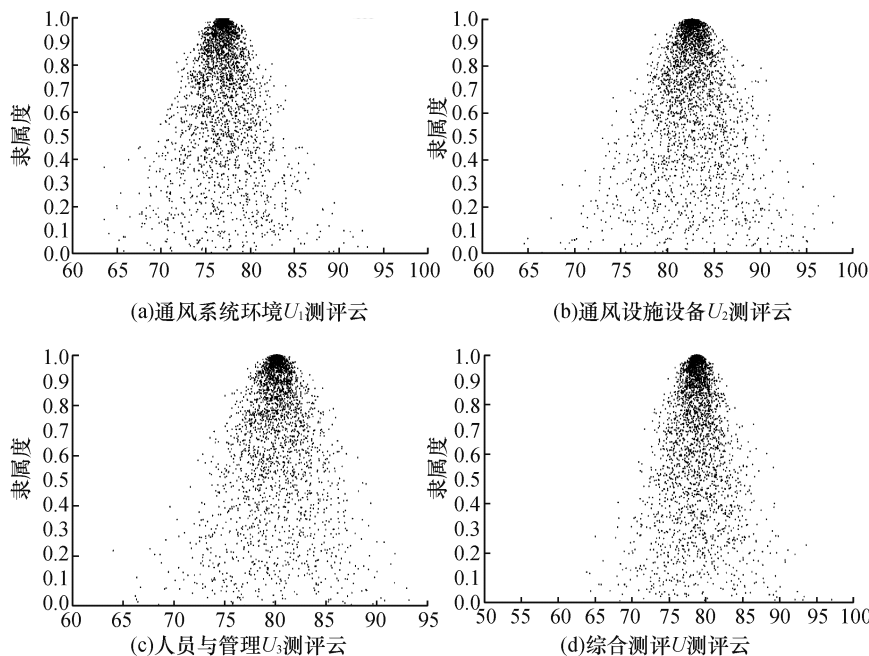


图 5 修正前一级指标测评云与综合测评云

Fig.5 The first class index and the comprehensive assessment cloud before correction

通风系统环境 U₁ 的修正前云参数 S₁ = (76.952, 0.822, 2.484),同理,计算出通风设施设备 U₂ 的云参数 S₂ = (82.628, 0.900, 2.728),作业人员与安全管理 U₃ 的云参数 S₃ = (80.140, 0.822, 2.491),并根据表 6 的一级指标权重云参数计算出整个通风系统的云参数 S = (78.752, 0.848, 2.565),将以上四组云参数输入正向云发生器,得到修正前三个一级指标和综合测评云图,见图 5.

由于测评人员评价时存在主观因素,相互之间有着评价分歧,导致图 5 各云图的云滴较分散,聚集程度低,评价结果客观性不足.对 9 位评价员对 19 个指标的测评分数得出的测评云进行云滴检验、云滴样本处理和贝叶斯反馈,得到修正后的测评云参数 S₁' = (77.054, 2.462, 0.903), S₂' = (82.615, 2.721, 0.855), S₃' = (80.136, 2.369, 1.099), S' = (78.813, 2.528, 0.926),用云发生器生成云图,见图 6.

对比图 5 和图 6,可知修正后的测评云图中,尤其是数学期望处的云滴,较修正前的更为聚集,表示专家组在经过网络投票和贝叶斯反馈之后达成一定共识,评价结果的随机性和模糊性已在可以接受范围之内,因此修正后的云图显示的可靠性评价结果更为合理.将修正后的云期望置于图 4 对应的可靠性等级区间,得到最后评价结果:该地下矿山通风系统的三个一级指标以及综合指标的可靠性评价等级均属于“较好”级别.

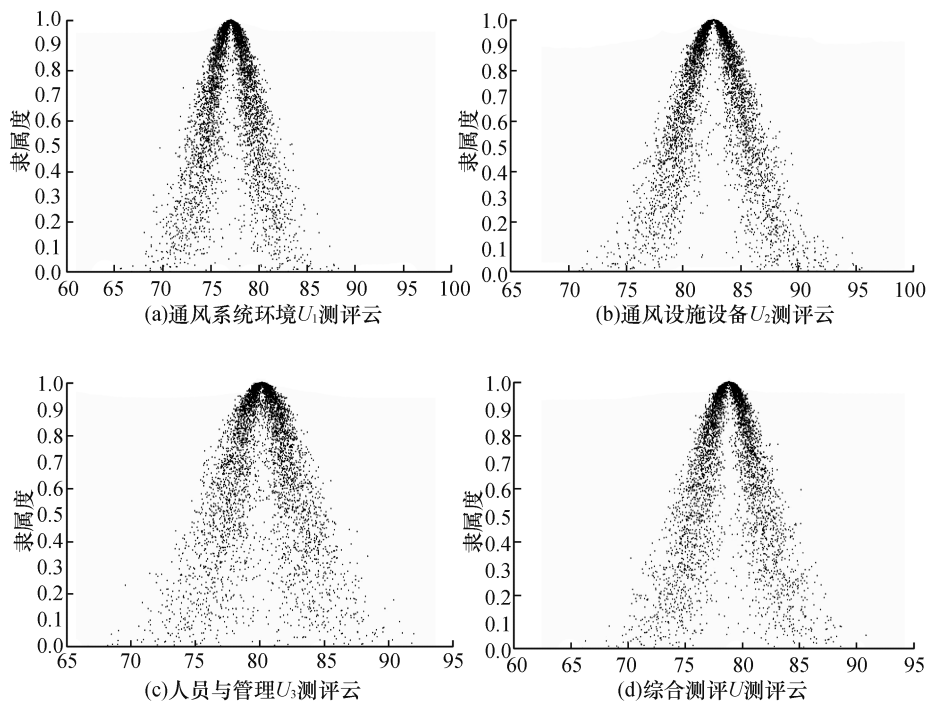


图6 修正后一级指标测评云与综合测评云

Fig.6 The first class index and the comprehensive assessment cloud after correction

6 结论

将贝叶斯反馈云模型运用在地下矿山通风系统的可靠性评价中,首先,超熵这一参数清晰地表示了定性概念的模糊性,体现出云模型相对传统模糊集的优越性.其次,专家组对置信区域外的云滴均值以投票的方式决定其是否属于定性概念,将不属于的云滴剔除后再以贝叶斯反馈理论进行云参数的修正,实际上是评价人员们取得评价共识,进而提高评价客观性的过程.因此运用贝叶斯反馈云模型对地下矿山通风系统的可靠性进行评价,结果较传统模糊集方法更为清晰可靠,客观性和科学性更强.

参考文献:

- [1] 李艳军.矿井通风系统可靠性分析方法研究[D].西安:西安科技大学,2008.
- [2] TOMINAGA Y. Application of fuzzy set theory to mine ventilation control[J]. Journal of the mining institute of japan, 1988, 104: 271-276.
- [3] 陆刚,韩可琦,肖桂彬.矿井通风系统可靠性的模糊综合评价[J].采矿与安全工程学报, 2008, 25(2): 244-247.
- [4] 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.

- [5] 丁厚成,黄新杰.基于 AHP-FCE 的煤矿通风系统可靠性评价研究[J].自然灾害学报, 2013, 22(3): 153-159.
- [6] HUANG J X, GENG M L, Li M, et al. Evaluation of mine ventilation safety based on GLM-grey clustering-fuzzy method[J]. Journal of residuals science & technology, 2016, 13(6): 1891-1895.
- [7] 王广录,杜源,张东青.基于模糊控制的煤矿通风自动控制系统应用[J].黑龙江科学, 2015(8): 6-7.
- [8] 成龙.矿井通风系统可靠性的模糊综合评价[J].能源与节能, 2015(3): 11-12.
- [9] 刘晶晶,孙永海,陈莉,等.基于云模型的玉米饮料感官鉴别[J].农业机械学报, 2013, 44(1): 113-118.
- [10] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.
- [11] 李德毅,刘常昱,杜鹃,等.不确定性人工智能[J].软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594.
- [12] 章俊龙.基于 AHP-FCE 的金属矿山通风系统可靠性评价研究[D].马鞍山:安徽工业大学, 2013.
- [13] 陈磊.煤矿通风系统安全可靠性评价研究[D].包头:内蒙古科技大学, 2014.
- [14] 刘继,邓贵仕,那日萨.贝叶斯反馈云模型的分析与设计[J].系统工程理论与实践, 2008, 28(7): 138-143.
- [15] 张秋文,章永志,钟鸣.基于云模型的水库诱发地震风险多级模糊综合评价[J].水利学报, 2014, 45(1): 87-95.

(责任编辑:龙威)