

基于突变级数法的煤矿瓦斯爆炸危险性评价

张旺,冯涛,武剑,马超甫

(湖南科技大学 能源与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为防治瓦斯爆炸,将突变理论与模糊数学相结合的突变级数法应用在煤矿瓦斯爆炸灾难危害评价中.从人的因素,机器因素和环境因素3个角度出发,分析煤矿瓦斯爆炸的影响因素,构建瓦斯爆炸危险性评价指标体系,最后运用突变级数法对煤矿瓦斯爆炸危险性进行综合评价.以贵州木孔煤矿为评价实例,得出突变级数法的评价结果为“一般安全”,与实际情况一致.研究为防治瓦斯爆炸以及保障矿井的安全生产提供了一条新的思路.

关键词:煤矿;瓦斯爆炸;危险性评价;突变级数法

中图分类号:TD712.7

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2016)01-0041-05

Gas explosion risk assessment in coal mines based on catastrophe progression method

ZHANG Wang, FENG Tao, WU Jian, MA Chaofu

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: For prevention and control of gas explosion, this paper applies the catastrophe progression method to the coal mine gas explosion disaster risk assessment by combining catastrophe theory with fuzzy mathematics. This method analyzes the influencing factors of the gas explosion from three aspects including human, machine and environment, and builds the gas explosion hazard assessment index system. Finally, it evaluates the gas explosion hazard in the coal mines with catastrophe progression method. Taking the Mukong Coal Mine's gas explosion risk assessment as an example, the evaluation result of catastrophe progression method is "generally safe", and it is consistent with the reality. It has provided a new idea for the prevention of gas explosion as well as for the coal mine safety production.

Key words: coal mine; gas explosion; risk assessment; catastrophe progression method

瓦斯爆炸是目前煤矿最为严重的灾害之一,为了有效地防控矿井瓦斯爆炸,必须采取一种合理的评价方法来对矿井瓦斯爆炸的可能性的进行危险性评估.目前评价瓦斯爆炸危险性的方法主要有多层次分析法、灰色关联法、模糊综合评价法、神经网络评价法^[1-4],但由于矿井生产系统的非线性特点以及动态特性,瓦斯爆炸灾害发生的原因多种多样,使得上述评价方法难以确定参数的权重,无法对防控瓦斯爆炸达到应有效果^[5].

突变级数法是近年来被广泛使用的一种描述非线性动态现象的综合评价方法.用突变级数法进行瓦斯爆炸危险性评价,不用对各因素采取权重,只要考虑各指标对瓦斯爆炸影响的相对重要性,因此可保证评价的客观性^[6].

收稿日期:2015-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51104063)

通信作者:冯涛(1957-),男,河北泊头人,教授,博士生导师,研究方向:复杂煤层开采、岩石力学与岩层控制. E-mail: tfeng@hnust.edu.cn

1 突变级数法的基本原理

突变级数法的一般流程:确定评价总指标,然后根据它们的重要性对其逐层矛盾分组,最后形成一个多目标的嵌套结构.其中,同一层的每几个指标形成一种突变形式,常见的突变类型有 4 种,即:折叠突变系统(Fold catastrophe system)、尖点突变系统(Cusp Catastrophe system)、燕尾突变系统(Swallowtail catastrophe system)和蝴蝶突变系统(Butterfly catastrophe system).如表 1 所示.

表 1 常见的 4 种突变模型^[7,8]

突变模型	状态变量	控制变量	势函数	分歧方程
折叠突变	1	1	$f(x) = x^3 + ax$	$a = 0$
尖点突变	1	2	$f(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$a = -6x^2, b = 8x^3$
燕尾突变	1	3	$f(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$	$a = -6x^2, b = 8x^3, c = -3x^4$
蝴蝶突变	1	4	$f(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + d$	$a = -10x^2, b = 20x^3, c = -15x^4, d = 4x^5$

注: x 是 $f(x)$ 的状态变量, a 、 b 、 c 和 d 是函数的控制变量.

根据上表公式,设突变模型的数学模型势函数为 $f(x)$, 对 $f(x)$ 求导,即令 $f(x)' = 0$, 可得若干解,这些解的集合就构成了势函数的平衡曲面,再对 $f(x)'$ 求导,即令 $f(x)'' = 0$, 得到属于该曲面的奇异集.联合上述两个导数方程,可得突变模型的奇异集方程.当代入指定控制变量使得奇异集方程成立时,相对应的模型将出现突变.如图 1 所示.

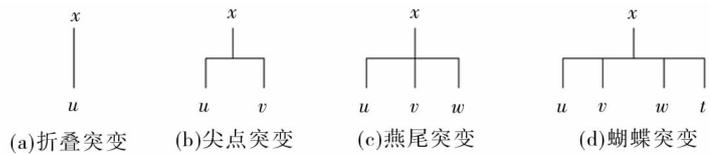


图 1 常见的 4 种突变模型示意图

根据突变理论,表 1 的各标准化模型的分歧方程,可得归一化公式(又称突变级数)如下所示:

- 折叠突变: $X_a = a^{1/2}$;
- 尖点突变: $X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}$;
- 燕尾突变: $X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}, X_c = c^{1/4}$;
- 蝴蝶突变: $X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}, X_c = c^{1/4}, X_d = d^{1/5}$.

2 煤矿瓦斯爆炸危险性综合评价的突变级数法

2.1 建立评价指标体系

大量研究表明,由于煤矿作业环境的立体性与不固定性,导致煤矿瓦斯爆炸风险和许多原因有关.从微观上来讲,煤矿瓦斯爆炸的原因为甲烷和氧气达到爆炸极限并存在引爆火源,宏观上则是矿井的各类开采及作业活动导致这 3 个要素交集的结果.基于现有的研究成果^[9],本文从人员素质因素、生产设备因素、生产环境因素 3 个角度出发,根据实地调查研究分析,形成如图 2 所示瓦斯爆炸事故危险性评价指标体系^[10].整个指标体系共有 14 个指标 4 个突变系统,其中 3 个二级指标构成燕尾型突变系统,11 个三级指标依次构成 2 个蝴蝶突变系

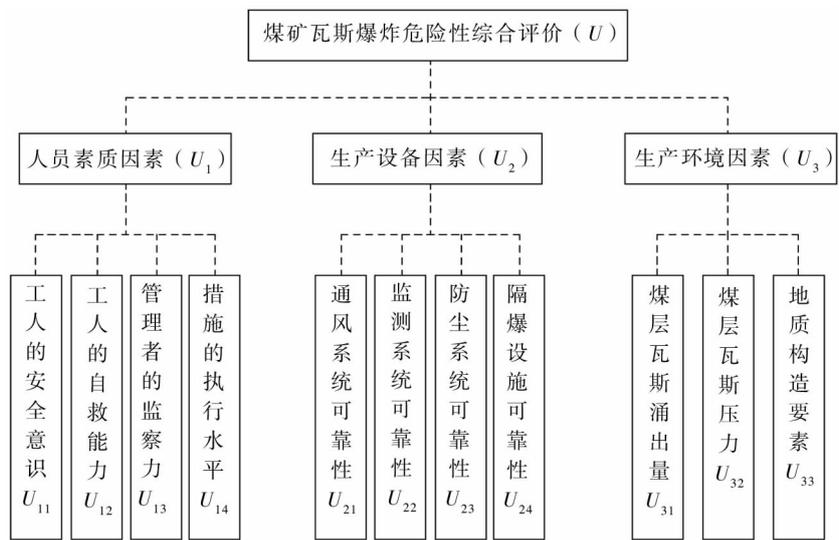


图 2 煤矿瓦斯爆炸危险性综合评价指标体系

统和1个燕尾型突变系统.

2.2 建立评价集

评价集 $V = \{\text{安全 } V_1, \text{较安全 } V_2, \text{一般安全 } V_3, \text{不安全 } V_4\}$, 相应的分值: $\{90, 80, 70, 60\}$. 显然, 分值越大代表越安全.

2.3 确定隶属度及隶属函数

为了客观、真实地反映隶属度, 保证评价结果的准确性. 确定因素集各因素隶属于 V 的程度, 根据模糊数学常用的隶属函数确定方法, 根据概率分布规律, 预先构造各因素隶属度模糊子集, 经检验后进一步修改, 得到比较接近真实情况的隶属度. 本文借鉴文献[11]的研究成果, 确定隶属函数如下:

$$f_1(u) = \begin{cases} 1 & (90 \leq u \leq 100) \\ \frac{u-80}{90-80} & (80 \leq u < 90) \\ 0 & (u < 80) \end{cases}; \quad f_2(u) = \begin{cases} \frac{100-u}{100-90} & (90 \leq u < 100) \\ 1 & (80 \leq u < 90) \\ \frac{u-70}{80-70} & (70 \leq u < 80) \\ 0 & (u < 70) \end{cases};$$

$$f_3(u) = \begin{cases} 0 & (90 \leq u \leq 100) \\ \frac{90-u}{90-80} & (80 \leq u < 90) \\ 1 & (70 \leq u < 80) \\ \frac{u-60}{70-60} & (u < 70) \end{cases}; \quad f_4(u) = \begin{cases} 0 & (80 \leq u \leq 100) \\ \frac{80-u}{80-70} & (70 \leq u < 80) \\ 1 & (u < 70) \end{cases}.$$

2.4 高级综合评价

利用专家评分法对三级指标原始值进行评测, 再将评测值代入隶属函数, 即得评价体系指标层初始模糊隶属函数值矩阵 $R_{U_1}, R_{U_2}, R_{U_3}$. 例如将人员素质因素 U_1 下的三级指标 U_{11}, U_{12}, U_{13} 的评测值代入隶属函数 $f_1(u), f_2(u), f_3(u), f_4(u)$ 可得到 R_{U_1} . 同理, 把 U_2, U_3 代入隶属函数可得 R_{U_2}, R_{U_3} . 以 U_1 为例:

$$\text{初始模糊隶属函数值矩阵 } R_{U_1} = \begin{bmatrix} f_1(U_{11}) & f_2(U_{11}) & f_3(U_{11}) & f_4(U_{11}) \\ f_1(U_{12}) & f_2(U_{12}) & f_3(U_{12}) & f_4(U_{12}) \\ f_1(U_{13}) & f_2(U_{13}) & f_3(U_{13}) & f_4(U_{13}) \\ f_1(U_{14}) & f_2(U_{14}) & f_3(U_{14}) & f_4(U_{14}) \end{bmatrix}.$$

因为11个三级指标从左到右构成突变系统类型依次为蝴蝶型、蝴蝶型和燕尾型, 再根据各突变模型的归一公式对 $R_{U_1}, R_{U_2}, R_{U_3}$ 进行计算, 得到指标层的突变级数矩阵 $R'_{U_1}, R'_{U_2}, R'_{U_3}$.

$$\text{指标层突变级数值矩阵 } R'_{U_1} = \begin{bmatrix} \sqrt{f_1(U_{11})} & \sqrt{f_2(U_{11})} & \sqrt{f_3(U_{11})} & \sqrt{f_4(U_{11})} \\ \sqrt[3]{f_1(U_{12})} & \sqrt[3]{f_2(U_{12})} & \sqrt[3]{f_3(U_{12})} & \sqrt[3]{f_4(U_{12})} \\ \sqrt[4]{f_1(U_{13})} & \sqrt[4]{f_2(U_{13})} & \sqrt[4]{f_3(U_{13})} & \sqrt[4]{f_4(U_{13})} \\ \sqrt[5]{f_1(U_{14})} & \sqrt[5]{f_2(U_{14})} & \sqrt[5]{f_3(U_{14})} & \sqrt[5]{f_4(U_{14})} \end{bmatrix}.$$

因为三级评价指标内部存在着互相影响作用, 所以在进行递归计算时, 一般取对突变级数求平均值作为状态变量 x 的值, 根据上述计算原则可得到二级指标 U_1, U_2, U_3 对应评语中“安全”的隶属函数值分别为 $r_{U_1}^{(f_1)}, r_{U_2}^{(f_1)}, r_{U_3}^{(f_1)}$, 如下所示:

$$r_{U_1}^{(f_1)} = \frac{\sqrt{f_1(U_{11})} + \sqrt[3]{f_1(U_{12})} + \sqrt[4]{f_1(U_{13})} + \sqrt[5]{f_1(U_{14})}}{4};$$

$$r_{U_2}^{(f_1)} = \frac{\sqrt{f_1(U_{21})} + \sqrt[3]{f_1(U_{22})} + \sqrt[4]{f_1(U_{23})} + \sqrt[5]{f_1(U_{24})}}{4};$$

$$r_{U_3}^{(f_1)} = \frac{\sqrt{f_1(U_{31})} + \sqrt[3]{f_1(U_{32})} + \sqrt[4]{f_1(U_{33})}}{3}.$$

同理可得到二级指标 U_1, U_2, U_3 隶属于其他评语的函数值, 将这些函数值按列排列即得准则层模糊隶属函数值矩阵如下:

$$R_U = \begin{bmatrix} r_{U_1}^{(f_1)} & r_{U_1}^{(f_2)} & r_{U_1}^{(f_3)} & r_{U_1}^{(f_4)} \\ r_{U_2}^{(f_1)} & r_{U_2}^{(f_2)} & r_{U_2}^{(f_3)} & r_{U_2}^{(f_4)} \\ r_{U_3}^{(f_1)} & r_{U_3}^{(f_2)} & r_{U_3}^{(f_3)} & r_{U_3}^{(f_4)} \end{bmatrix}$$

由于 3 个二级指标 U_1, U_2, U_3 形成了燕尾型突变模型, 根据燕尾型突变模型归一公式可得准则层突变级数值矩阵 R'_U .

$$R'_U = \begin{bmatrix} \sqrt{r_{U_1}^{(f_1)}} & \sqrt{r_{U_1}^{(f_2)}} & \sqrt{r_{U_1}^{(f_3)}} & \sqrt{r_{U_1}^{(f_4)}} \\ \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_1)}} & \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_2)}} & \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_3)}} & \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_4)}} \\ \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_1)}} & \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_2)}} & \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_3)}} & \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_4)}} \end{bmatrix}$$

由于二级指标 U_1, U_2, U_3 内部存在着互相影响作用, 所以可取 R'_U 中第一列的平均值作为隶属于评价集中“安全”的总突变隶属函数值, 即: $r_1 = (\sqrt{r_{U_1}^{(f_1)}} + \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_1)}} + \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_1)}})/3$, 同理不难算出隶属于评价集中剩下评语的总突变隶属函数值 r_2, r_3, r_4 , 所以总突变隶属函数值矩阵 $R = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4]$. 总突变隶属函数值最大值, 根据其对应的评语, 得出评价结果.

3 应用实例

贵州省遵义木孔煤矿位于金沙县城东部, 而该矿受矿区特殊瓦斯赋存因素影响是一个高瓦斯矿井, 近年来随着开采深度的增加, 斯涌出量逐渐增大, 瓦斯异常现象开始显现, 矿井面临的瓦斯治理压力越来越大, 较容易发生瓦斯突出, 瓦斯爆炸事故. 基于此本文选择贵州木孔煤矿作为评价对象, 根据该煤矿实际情况, 运用专家打分法对该煤矿的评价指标进行评分, 评测数据结果如表 2 所示.

表 2 木孔煤矿评测参数

目标层	准则层	指标层	评测数据
煤 矿 瓦 斯 爆 炸 危 险 性 综 合 评 价 (U)	因素(U_1)	工人的安全意识 U_{11}	82
		工人的自救能力 U_{12}	71
		管理者的监察力 U_{13}	90
		措施的执行水平 U_{14}	65
	因素(U_2)	通风系统可靠性 U_{21}	81
		监测系统可靠性 U_{22}	78
		防尘系统可靠性 U_{23}	69
		隔爆设施可靠性 U_{24}	83
		煤层瓦斯涌出量 U_{31}	76
	因素(U_3)	生产环境	
		煤层瓦斯压力 U_{32}	79
		地质构造要素 U_{33}	91

将表 2 指标层所列的三级指标评测值代入隶属函数, 利用相应模型的归一公式对原始数据进行处理, 得到以下几个矩阵.

1) 指标层隶属函数值矩阵

$$R_{U_1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 1 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.1 & 1 & 0.9 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}; \quad R_{U_2} = \begin{bmatrix} 0.1 & 1 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0.8 & 1 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.9 & 1 \\ 0.3 & 1 & 0.7 & 0 \end{bmatrix}; \quad R_{U_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.6 & 1 & 0.4 \\ 0 & 0.9 & 1 & 0.1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2) 指标层突变级数值矩阵

$$R'_{U_1} = \begin{bmatrix} 0.447 & 1 & 0.894 & 0 \\ 0 & 0.464 & 1 & 0.965 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.871 & 1 \end{bmatrix}; R'_{U_2} = \begin{bmatrix} 0.316 & 1 & 0.949 & 0 \\ 0 & 0.928 & 1 & 0.585 \\ 0 & 0 & 0.974 & 1 \\ 0.786 & 1 & 0.931 & 0 \end{bmatrix};$$

$$R'_{U_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.775 & 1 & 0.632 \\ 0 & 0.965 & 1 & 0.464 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

3) 准则层隶属函数值矩阵

$$R_U = \begin{bmatrix} 0.362 & 0.616 & 0.691 & 0.491 \\ 0.276 & 0.732 & 0.964 & 0.396 \\ 0.333 & 0.913 & 0.666 & 0.365 \end{bmatrix}.$$

4) 准则层突变级数值矩阵

$$R'_U = \begin{bmatrix} 0.602 & 0.785 & 0.831 & 0.701 \\ 0.651 & 0.901 & 0.987 & 0.734 \\ 0.760 & 0.978 & 0.903 & 0.777 \end{bmatrix}.$$

从而得到木孔煤矿瓦斯爆炸危险性评价总突变隶属矩阵 $R = [0.671 \ 0.888 \ 0.907 \ 0.737]$, 依据“总突变隶属函数值越大越优”的原则, 总突变隶属函数值隶属于评语集中第三级的值最大, 可知木孔煤矿瓦斯爆炸危险等级为第三级, 即“一般安全”。但是隶属于第二级的总突变隶属函数值也达到了0.888与第三级相差最小, 这说明只要对该煤矿采取一定的瓦斯爆炸预防措施, 加强安全管理力度, 即可以达到第二级即“较安全”水平。评价结果与该煤矿的实际情况一致。

4 结论

1) 应该从“人-机-环”3个方面出发, 建立煤矿瓦斯爆炸风险评价指标体系、评价集和模糊隶属函数, 并通过专家评分法对各级指标进行评测。

2) 突变理论方法能较好地反映瓦斯爆炸事故孕育过程中的突变特性, 克服了权重法主观性强的缺点, 为煤矿瓦斯爆炸危险性综合评价提供了一种新的理论方法。

参考文献:

- [1] 邓小松. 基于 AHP 的瓦斯爆炸事故危险源风险评价[J]. 煤炭工程, 2015(3): 141 - 143.
- [2] 孙斌. 应用灰色关联分析法评价瓦斯爆炸事故危险源[J]. 煤炭科学技术, 2005(12): 61 - 64.
- [3] 宋士学, 曹庆贵, 林乐顺. 基于 AHP 和模糊数学的煤矿瓦斯爆炸危险性评价及应用[J]. 工业安全与环保, 2006(6): 57 - 59.
- [4] 田水承, 王莉, 李红霞. 基于 SPA 模型的煤矿瓦斯危险源风险评价[J]. 安全与环境学报, 2006(6): 103 - 106.
- [5] 施式亮. 矿井安全非线性动力学评价模型及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2000.
- [6] 邹义怀, 江成玉, 李春辉. 基于突变理论的煤与瓦斯突出危险性预测的研究[J]. 中国煤炭, 2011(10): 105 - 108.
- [7] 黄奕龙. 突变级数法在水资源持续利用评价中的应用[J]. 干旱环境监测, 2001(3): 167 - 170.
- [8] 徐阿猛, 齐黎明. 基于突变理论的马家沟矿煤与瓦斯突出过程研究[J]. 煤炭工程, 2011(12): 71 - 73.
- [9] 念其锋, 施式亮, 李润求. 煤矿瓦斯爆炸危险性的 ANP-SPA 评价模型及应用[J]. 科技导报, 2013(23): 40 - 44.
- [10] 宫凤强, 李夕兵, 高科. 地下工程围岩稳定性分类的突变级数法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008(5): 1081 - 1086.
- [11] 闵凡飞, 许俊杰, 杨晓鸿. 多层次模糊综合评判在选煤工艺流程选择中的应用[J]. 煤炭学报, 2002(2): 201 - 205.