

文章编号: 0253-9993(2007)07-0700-05

矿区立井井筒非采动破裂的距离判别分析预测法

官凤强, 李夕兵

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 将距离判别分析方法应用于矿区立井井筒非采动破裂的预测问题中, 建立了井筒非采动破裂的距离判别分析模型. 选用表土层厚度、底含厚度、底含水位速降、井筒外径、井壁厚度和井筒投入使用时间 6 项指标作为距离判别分析模型的判别因子, 以历史上工程实测数据作为学习样本进行训练, 建立相应判别函数对工程实例进行预测. 研究表明, 距离判别分析模型分类性能良好, 预测精度高, 回判估计的误判率很低.

关键词: 立井井筒; 非采动破裂; 距离判别分析

中图分类号: TD262.5 **文献标识码:** A

A distance discriminant analysis method of forecast for shaft-lining non-mining fracture of mine

GONG Feng-qiang, LI Xi-bing

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on the principle of Mahalanobis distance discriminant analysis, a forecast model of shaft-lining non-mining fracture of mine was established. Six factor indexes including uniaxial compressive strength, p-wave velocity in rock, volumetric joint count, joint roughness coefficients, joint weathering coefficients and permeability coefficient, were regarded as discriminant factor of the model. Discriminant functions were obtained through training a large set of historical engineering geological samples. The results show that the classification model of distance discriminant analysis excellent performance, high prediction accuracy.

Key words: shaft-lining; non-mining fracture; distance discriminant analysis

矿井井筒的非采动破裂是指煤矿立井在不受地下采动影响的条件下(井筒及其附近的工业广场都留有足够的保护煤柱), 井壁发生严重变形和破裂, 致使提升运输困难, 造成矿山停产的一种新的矿井破裂灾害^[1-4]. 这一灾害自从 20 世纪 80 年代在徐淮矿区(徐州、淮北和淮南)发生以来, 相继又在兖滕矿区发生, 给矿井的安全生产造成巨大损失. 据统计, 在徐淮和兖滕矿区内发生的立井井筒破裂造成的经济损失已达数亿元^[5-7]. 因此, 准确地进行立井井筒破裂工程地质灾害发生的预报及判别对于矿山的安全生产及经济效益具有重大的现实意义.

目前对井筒破裂的预报方法主要有 2 种^[5]: ① 通过加强对井筒变形的监测, 以监测数据为依据, 对井筒的变形进行分析, 对其破裂进行判别预报; ② 近几年发展起来的预报方法, 即系统科学、智能技术方法, 主要包括人工神经网络法、模糊神经网络法^[8]等, 很多学者在这方面进行了深入的研究.

判别分析方法是根据观测到的样本的若干数量特征(简称判别因子)对新获得的样本进行识别、预测,判断其所属类型的一种统计分析方法.该方法已经在自然科学和社会科学的各个领域得到广泛应用.虽然如此,在立井井筒非采动破裂预测中,判别分析方法尚未取得很好的应用.本文借鉴了判别分析理论的思想,并且考虑实际工程中影响井筒非采动破裂的多项因素,建立距离判别分析模型对立井井筒破裂灾害发生进行预报及判别.该模型选用多项指标作为综合评判的判别因子,建立了相应的判别函数进行预测,并在实际工程中进行运用,取得了良好的效果.

1 立井井筒破裂影响因素的选取^[4,5]

通过对发生井筒破裂矿区的现场调查表明,井筒破裂存在如下共同特点:

破裂未受到直接采动的影响,且破裂井筒都为立井井筒.破裂时间发生在井筒建成若干年之后.破裂部位穿过第四系深厚表土,几乎全部在第四系土层底部与基岩交接面一带.第四系土层分为上、中、下3组,其中下组可分为上、下2个含水段,下段含水层即为底含.破裂呈环带状,混凝土剥落,纵横向钢筋向井筒内裸露,井壁颈缩明显,有的还伴有大量涌水冒砂,竖向提升罐道明显弯曲变形.破裂井壁多数为冻结法施工井壁,也有部分为钻井法井壁.

综合立井井筒发生非采动破裂的发生机理情况及破裂矿区的水文和工程地质特点,选取以下6个因素作为影响立井井筒非采动破裂的特征因素.

(1) 表土层厚度:立井井筒表土层厚度大约为200 m,在立井井壁厚度和含水层水头下降值等条件相同时,井壁周围表土层越深,则井壁可能遭受破坏的程度越大.

(2) 底含厚度:底含厚度变化较大,一般为20~40 m,由于该层为承压含水层,底含的组成结构特点决定了其失水后必然会产生较大的压缩变形,且土层变形量直接关系到井筒附加应力的的大小,所以底含厚度越大,井筒破裂的可能性越大.

(3) 底含水位速降:底含水位速降决定了立井井筒周围土层变形的速率,从而决定了立井井筒破裂的时间.有关研究表明,有时立井井筒附近地表下沉与底含水头降甚至呈同步关系.

(4) 井筒外径:在确定的工程地质条件下,立井井筒外表面积与立井井筒附加力的大小成正比,因此井筒外径作为影响井筒破裂的主要因素之一.

(5) 井壁厚度:井壁厚度越大,立井井筒的净截面积越大,内壁应力降低,有利于井筒的稳定.

(6) 井筒投入使用时间:井筒投入使用时间越长,底含水位降越大,立井井筒破裂的可能性越大.

2 距离判别分析模型

距离判别的基本思想:样本和哪个总体距离最近,就判它属于哪个总体.下面首先引入马氏距离的概念.

设总体 $G = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ 是 m 元总体(考察 m 个指标),其中样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$. 令 $\mu_i = E(X_i)$, $i=1, 2, \dots, m$, 则总体均值向量为 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)^T$. 总体 $G = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ 的协方差矩阵为

$$\Sigma = \text{cov}(G) = E[(G - \mu)(G - \mu)^T].$$

则样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 与总体 G 的马氏(Mahalanobis)距离定义^[9]为

$$d^2(X, G) = (X - \mu)^T \Sigma^{-1} (X - \mu).$$

考虑2个总体 $k=2$ 的距离判定情况^[9]. 设有2个总体 G_1 和 G_2 , 已知来自总体 G_i ($i=1, 2$) 的训练样本为 $X_{(i)}^{(t)} = (x_{i1}^{(t)}, x_{i2}^{(t)}, \dots, x_{im}^{(t)})^T$ ($i=1, 2; t=1, 2, \dots, n_i$), 其中 n_i 是取自 G_i 的样本个数, 则总体 G_i 的均值向量 μ_i 的估计量为

$$\bar{X}^{(i)} = \left(\frac{1}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} x_{i1}^{(t)}, \dots, \frac{1}{n_i} \sum_{t=1}^{n_i} x_{im}^{(t)} \right)^T = (\bar{x}_1^{(i)}, \dots, \bar{x}_m^{(i)})^T.$$

总体 G_i 的协方差矩阵 Σ_i 的估计为组内协方差矩阵 S_i , 即

$$S_i = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} (X_{(i)}^{(i)} - \bar{X}^{(i)})(X_{(i)}^{(i)} - \bar{X}^{(i)})^T.$$

当 $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \Sigma$ 时, 反映分散性的协方差矩阵 Σ 的无偏估计为

$$S = \frac{(n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2}{n_1 + n_2 - 2}.$$

对给定的待判样本 $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$, 分别计算样本 X 到 2 个总体的马氏距离 $d^2(X, G_1)$ 和 $d^2(X, G_2)$, 并按距离最近准则判别归类, 判别准则为

$$\begin{cases} X \in G_1 & (d^2(X, G_1) < d^2(X, G_2)), \\ X \in G_2 & (d^2(X, G_1) \geq d^2(X, G_2)). \end{cases}$$

简化马氏距离的计算公式, 整理得

$$d^2(X, G_i) = (X - \bar{X}^{(i)})^T S^{-1} (X - \bar{X}^{(i)}) = X^T S^{-1} X - 2Y_i(X) \quad (i = 1, 2).$$

其中 $Y_i(X)$ 是 X 的线性函数. 对于给定的待判样本 X , 计算其到各总体的马氏距离, 只须计算 $Y_i(X)$ 即可.

$$Y_i(X) = (S^{-1} \bar{X}^{(i)})^T X - \frac{1}{2} (\bar{X}^{(i)})^T S^{-1} \bar{X}^{(i)} \quad (i = 1, 2).$$

则 2 个总体的距离判别准则为

$$\begin{cases} X \in G_1 & (Y_1(X) > Y_2(X)), \\ X \in G_2 & (Y_1(X) \leq Y_2(X)). \end{cases}$$

为考察上述判别准则的优良性, 采用以训练样本为基础的交叉确认估计法来计算误判率^[10].

设来自总体 G_i ($i = 1, 2$) 的训练样本为 $X_t^{(i)} = (x_{t1}^{(i)}, x_{t2}^{(i)}, \dots, x_{tm}^{(i)})^T$ ($t = 1, 2, \dots, n_i$), 并且 2 个总体容量分别为 n_1 和 n_2 . 误判率的交叉确认估计具体步骤如下:

- (1) 从总体 G_1 的训练样本中剔除其中一个样品, 并用剩余的 $n_1 + n_2 - 1$ 的训练样本建立判别函数;
- (2) 用建立的判别函数对提出的样品进行判别;
- (3) 重复步骤 (1)、(2), 直到总体 G_1 中的训练样本被全部剔除, 记其误判的样品个数为 n_{12}^* ;
- (4) 对总体 G_2 的训练样本重复步骤 (1) ~ (3), 并记其误判样品个数为 n_{21}^* ;
- (5) 计算误判率 η

$$\eta = (n_{12}^* + n_{21}^*) / (n_1 + n_2).$$

3 立井井筒破裂的距离判别分析模型及其应用

3.1 距离判别分析模型判别参数的确定和建立

以文献 [6] 所提供的立井井筒破裂的实际资料为例 (原始数据见表 1), 选取其中 16 个样本数据进行训练, 其余 4 个样本数据作为待判样本进行检验. 参考有关研究结果, 经综合分析后, 确定以表土层厚度 (X_1)、底含厚度 (X_2)、底含水速降 (X_3)、井筒外径 (X_4)、井壁厚度 (X_5) 和井筒投入使用时间 (X_6) 作为距离判别分析模型的判别因子, 将立井井筒分为破裂和完整 2 个类别, 建立距离判别分析模型.

3.2 样本数据归一化处理

因为立井井筒非采动破裂的影响因素之间量纲不同, 导致样本数据之间差别较大. 为了使模型训练更加有效, 对样本数据采取归一化处理.

$$\bar{x} = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}).$$

其中， \bar{x} 为归一化处理后的样本数据； x 为原始测试数据； x_{\min} 为原始数据最小值； x_{\max} 为原始数据最大值。归一化处理后的样本数据见表 2 和表 3。

表 1 距离判别分析法学习样本数据

Table 1 Composition of results of distance discriminant analysis method

井筒名称	表土层厚度/m	底含厚度/m	底含水位速降/m	井筒外径/m	井壁厚度/m	井筒投入使用时间/月	实际状态
兴隆庄主井	189.31	34.10	60.225	8.92	1.21	192	破裂
兴隆庄副井	190.41	30.00	60.225	10.10	1.30	225	破裂
兴隆庄东风井	190.41	32.85	60.000	6.40	0.70	241	破裂
兴隆庄西风井	189.50	29.90	70.000	7.40	0.95	230	破裂
鲍店主井	148.69	56.29	84.000	8.50	1.00	194	破裂
鲍店副井	148.60	55.00	82.000	10.00	1.00	187	破裂
鲍店北风井	202.56	59.00	80.000	6.60	0.80	190	破裂
杨村主井	185.50	57.72	87.500	6.40	0.70	146	破裂
杨村副井	184.50	56.00	87.000	7.00	1.00	139	破裂
杨村北风井	173.40	65.30	86.200	5.90	0.70	136	破裂
兴隆庄主井	189.31	34.10	0	8.92	1.21	0	完整
兴隆庄副井	190.41	30.00	0	10.10	1.30	0	完整
兴隆庄东风井	190.41	32.85	0	6.40	0.70	0	完整
兴隆庄西风井	189.50	29.90	0	7.40	0.95	0	完整
鲍店主井	148.69	56.29	0	8.50	1.00	0	完整
鲍店副井	148.60	55.00	0	10.00	1.00	0	完整
鲍店北风井	202.56	59.00	0	6.60	0.80	0	完整
杨村主井	185.50	57.72	0	6.40	0.70	0	完整
杨村副井	184.50	56.00	0	7.00	1.00	0	完整
杨村北风井	173.40	65.30	0	5.90	0.70	0	完整

表 2 归一化处理后的样本数据

Table 2 Training results after treated

井筒名称	判别因子						实际状态	训练结果
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6		
兴隆庄副井	0.774 8	0.002 8	0.688 3	1.000 0	1.000 0	0.933 6	破裂	破裂
兴隆庄东风井	0.774 8	0.083 3	0.685 7	0.119 0	0	1.000 0	破裂	破裂
兴隆庄西风井	0.758 0	0	0.800 0	0.357 1	0.416 7	0.954 4	破裂	破裂
鲍店主井	0.001 7	0.745 5	0.960 0	0.619 0	0.500 0	0.805 0	破裂	破裂
鲍店副井	0	0.709 0	0.937 1	0.976 2	0.500 0	0.775 9	破裂	破裂
鲍店北风井	1.000 0	0.822 0	0.914 3	0.166 7	0.166 7	0.788 4	破裂	破裂
杨村副井	0.665 3	0.737 3	0.994 3	0.261 9	0.500 0	0.576 8	破裂	破裂
杨村北风井	0.459 6	1.000 0	0.985 1	0	0	0.564 3	破裂	破裂
兴隆庄副井	0.774 8	0.002 8	0	1.000 0	1.000 0	0	完整	完整
兴隆庄东风井	0.774 8	0.083 3	0	0.119 0	0	0	完整	完整
兴隆庄西风井	0.758 0	0	0	0.357 1	0.416 7	0	完整	完整
鲍店主井	0.001 7	0.745 5	0	0.619 0	0.500 0	0	完整	完整
鲍店副井	0	0.709 0	0	0.976 2	0.500 0	0	完整	完整
鲍店北风井	1.000 0	0.822 0	0	0.166 7	0.166 7	0	完整	完整
杨村副井	0.665 3	0.737 3	0	0.261 9	0.500 0	0	完整	完整
杨村北风井	0.459 6	1.000 0	0	0	0	0	完整	完整

表3 距离判别分析法预测结果

Table 3 Forecast results of distance discriminant analysis method

井筒名称	判别因子						实际 状态	本文 结果	NN 方法	FNN 方法
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6				
兴隆庄主井	0.754 4	0.118 6	0.688 3	0.719 0	0.850 0	0.796 7	破裂	破裂	破裂	破裂
兴隆庄主井	0.683 8	0.785 9	1.000 0	0.119 0	0	0.605 8	完整	完整	完整	完整
杨村主井	0.754 4	0.118 6	0	0.719 0	0.850 0	0	破裂	破裂	破裂	破裂
杨村主井	0.683 8	0.785 9	0	0.119 0	0	0	完整	完整	完整	完整

3.3 判别模型的检验及实例分析

经过学习后的模型,利用交叉确认估计法对学习样本判别,判别结果全部准确(表2),得到误判率为0.根据学习好的距离判别分析模型对4个待判样本进行判别,判别结果与实际情况完全相符(表3).表3同时列出了利用神经网络(NN)方法^[6]和模糊神经(FNN)网络方法^[8]的判别结果,和本文结果一致.由此可见,距离判别分析模型用于立井井筒非采动破裂的预测预报是完全可行并且高效的.

4 结 语

将距离判别分析理论用于煤矿立井井筒的非采动破裂预测中,分析了影响立井井筒非采动破裂的诸多因素,并选用6项指标:表土层厚度、底含厚度、底含水位速降、井筒外径、井壁厚度和井筒投入使用时间作为判别因子,将立井井筒分为破裂和完整2个类别,建立了预测立井井筒破裂的距离判别分析模型.将该模型在实际工程中进行运用,结果表明,该模型学习效率很高,利用回代估计法所得到的误判率为零,预测结果符合实际情况,工程应用性强,为煤矿立井井筒的非采动破裂预测提供了一条新途径.

参考文献:

- [1] 都平平. 井壁非采动破裂治理措施的探讨 [J]. 中州煤炭, 1995 (2): 18 ~ 20.
- [2] 孔凡顺, 李文平, 孙如华. 兖腾 - 徐淮矿区地应力与井筒破裂关系研究 [J]. 中国煤田地质, 2003, 15 (2): 35 ~ 37.
- [3] 唐德才, 李文平, 武旭仁, 等. 煤矿立井非采动破裂工程地质勘察方法 [J]. 水文地质工程地质, 2002 (4): 29 ~ 32.
- [4] 李文平, 于双忠. 深厚表土中煤矿立井非采动破裂的研究 [J]. 工程地质学报, 1995, 3 (1): 45 ~ 55.
- [5] 刘环宇, 王思敬, 曾钱帮, 等. 煤矿立井井筒非采动破裂的人工神经网络预测 [J]. 水文地质工程地质, 2005 (12): 65 ~ 67.
- [6] 刘环宇, 李 晓, 曾钱帮, 等. 兖州矿区立井井筒非采动破裂的非线性预测与判别方法 [J]. 工程地质学报, 2005, 13 (2): 231 ~ 235.
- [7] 刘环宇, 王思敬, 倪兴华, 等. 煤矿立井井筒非采动破裂治理新方法设计 [J]. 河海大学学报, 2005, 33 (2): 190 ~ 193.
- [8] 刘环宇, 王思敬, 曾钱帮, 等. 基于模糊神经网络兖州矿区立井井筒非采动破裂的判别 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (10): 1 237 ~ 1 240.
- [9] 高惠璇. 应用多元统计分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [10] 范金城, 梅长林. 数据分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.