

煤与瓦斯突出危险性电磁辐射异常判识方法

撒占友¹, 何学秋², 王恩元²

(1. 青岛理工大学 安全工程系, 山东 青岛 266520; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 基于工作面煤与瓦斯突出前兆电磁辐射变化规律, 运用系统辨识、动态测试数据处理和数理统计等非线性理论, 建立了工作面煤与瓦斯突出危险性电磁辐射异常判识模型, 提出电磁辐射异常判别准则, 并应用于工作面煤与瓦斯突出危险性预测。结果表明: 电磁辐射异常判识模型具有较高的预测精度, 其实现了工作面煤与瓦斯突出危险性的连续动态趋势预测。

关键词: 煤与瓦斯突出; 电磁辐射; 异常判识; 趋势预测

中图分类号: TD713.2

文献标识码: A

EMR anomaly identification method of coal and gas outburst fatallness

SA Zhan-you¹, HE Xue-qiu², WANG En-yuan²

(1. Department of Safety Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Based on the EMR changing laws of coal and gas outburst premonition and the theories of nonlinear science, such as system identification, dynamic testing data processing and mathematical statistics, an EMR anomaly identification model of working face coal and gas outburst fatallness was established and an EMR anomaly identification criterion was put forward. The model was applied to forecasting working face coal and gas outburst fatallness. The results show that the model has higher forecast accuracy, realize a continuous dynamic trend forecast of working face coal and gas outburst fatallness.

Key words: coal and gas outburst; EMR; anomaly identification; trend forecast

电磁辐射法预测煤与瓦斯突出普遍采用电磁辐射指标(电磁辐射强度 E 和脉冲数 N)临界值预测法,但其临界值的合理确定是一大难题;另外,工作面电磁辐射信号的监测易受外界干扰,以一次电磁辐射指标值的大小判定工作面煤与瓦斯突出危险性势必造成较大的误差。电磁辐射信号是工作面前方煤岩体变形破坏程度、破裂速率和瓦斯压力作用程度的综合反映^[1-4]。随工作面的推进和电磁辐射指标的连续监测,构成了电磁辐射指标时间序列,它是一个既有趋势性又有周期性、既有相关性又有互相关性、既有确定性又有偶然性的非平稳随机序列。因此,根据连续几天或几个班测定的工作面电磁辐射指标值构成的时间序列,建立工作面煤与瓦斯突出危险性的电磁辐射异常判识模型,动态趋势预测工作面煤与瓦斯突出危险性具有重要的现实意义^[3]。

1 电磁辐射异常判识模型的建立

设采掘工作面电磁辐射信号观测时间序列为 $f(t)$,则 $f(t)$ 为煤岩体应力状态、构造运动、环境因子综

合效应、随机涨落和工作面不明因素变化影响的综合反映. 对于非平稳随机序列 $f(t)$, 一般包括确定分量和随机分量 2 部分; 为便于数据处理, 常将确定分量划分为非周期分量和周期分量 2 类^[5]. 因此, 根据随机时间序列 $f(t)$ 的变化特点和成分构成, 用时序分析和系统辨识相结合的方法, 建立采掘工作面煤与瓦斯突出危险性的电磁辐射异常判识模型 $\bar{f}(t) = \bar{P}(t) + \bar{Q}(t) + \bar{S}(t)$, 其中, $\bar{f}(t)$ 为电磁辐射观测序列 $f(t)$ 的最佳估值序列; $\bar{P}(t)$ 为电磁辐射趋势分量 $P(t)$ 的拟合估值序列; $\bar{Q}(t)$ 为电磁辐射周期分量 $Q(t)$ 的估值序列; $\bar{S}(t)$ 为电磁辐射随机分量 $S(t)$ 的自回归函数序列.

1.1 趋势分量 $\bar{P}(t)$

由五点三次平滑公式可求出电磁辐射趋势分量 $\bar{P}(t)$ 的时间序列 $P(t)$, 简记为 P_i ; 利用平滑公式对测试时间间隔等距点上的电磁辐射数据进行平滑, 其一般表达式 $\bar{P}(t) = \bar{P}_i = a + bt + ct^2 + dt^3 + \dots$.

由最小二乘法得五点三次平滑公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_{i-2} = (69P_{i-2} + 4P_{i-1} - 6P_i + 4P_{i+1} - P_{i+2})/70, \\ \bar{P}_{i-1} = (2P_{i-2} + 27P_{i-1} + 12P_i - 8P_{i+1} + 2P_{i+2})/35, \\ \bar{P}_i = (-3P_{i-2} + 12P_{i-1} + 17P_i + 12P_{i+1} - 3P_{i+2})/35, \\ \bar{P}_{i+1} = (2P_{i-2} - 8P_{i-1} + 12P_i + 27P_{i+1} + 2P_{i+2})/35, \\ \bar{P}_{i+2} = (-P_{i-2} + 4P_{i-1} - 6P_i + 4P_{i+1} + 69P_{i+2})/70, \end{array} \right. \quad (1) \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (5)$$

其中, $\bar{P}_i$ 为 P_i 的平滑值. 当测试点数 (电磁辐射测试次数) 很多时, 对于开始测试的两点和最后测试的两点分别用式 (1), (2), (4), (5) 进行平滑, 其余均用式 (3) 进行平滑. 这相当于每个子区间上用不同的三次最小二乘多项式进行平滑.

1.2 周期分量 $\bar{Q}(t)$

电磁辐射周期分量的时间序列 $Q(t)$ 可表示为 $Q(t) = f(t) - \bar{P}(t)$. 其拟合推估值可用三角傅里叶级数表示: $\bar{Q}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos mt + b_m \sin mt)$, 其中, a_0, a_m, b_m, m 为常数.

1.3 随机分量 $\bar{S}(t)$

电磁辐射观测序列 $f(t)$ 是非平稳随机序列, 将其去除趋势分量和周期分量, 可得到随机分量 $S(t)$, 简记为 $S_i, S_i = f(t) - \bar{P}(t) - \bar{Q}(t)$. 经过处理的随机量序列 $S(t)$ 可近似认为是平稳随机序列, 故可建立自回归数学模型 (AR 模型), 其数学表达式 $S(t) = S_i = a_1 S_{i-1} + a_2 S_{i-2} + \dots + a_l S_{i-l} + e_i$. 其中, l 为模型的阶数; e_i 为预测误差; $a_1, a_2, \dots, a_l$ 为常数.

2 电磁辐射异常的判别准则

在进行动态非平稳随机序列的测试误差分析时应考虑其时变性、随机性及相关性, 并应以随机过程理论为依据^[5]; 根据随机过程理论, 动态测试误差宜按均值函数、方差函数和自相关函数或自协方差函数等特征量来分析与评判. 工作面电磁辐射指标时间序列属于动态非平稳随机序列, 判定工作面煤岩电磁辐射信号是否异常时, 可采取对电磁辐射指标时间序列输出误差的均值函数进行分析与评判的方法.

根据电磁辐射信号异常判识模型特点, 其输出误差 $\omega(t) = f(t) - [\bar{P}(t) + \bar{Q}(t) + \bar{S}(t)]$. 模型系统输出误差的均值 $\mu = E[\omega(t)] = E\{f(t) - [\bar{P}(t) + \bar{Q}(t) + \bar{S}(t)]\}$, μ 反映电磁辐射指标时间序列输出误

差 $\omega(t)$ 中确定性的平均变化规律. 模型系统输出误差的方差 $\sigma^2 = E[(\omega(t) - \mu)^2]$, σ^2 反映电磁辐射指标时间序列输出误差 $\omega(t)$ 相对于其均值 μ 的离散程度, 因此, 其标准方差 σ 可作为电磁辐射信号异常的判别指标: $\sigma = \sqrt{E[(\omega(t) - \mu)^2]}$.

在给定制信度 p 的情况下, 输出误差 $\omega(t)$ 的概率置信区间为 $[-k_p\sigma, k_p\sigma]$. 若给定制信度 p 为 95%, 99% 或 99.5%, 则 k_p 一般取 2.0, 2.5 或 3.0.

用电磁辐射时间序列 $\bar{f}(t)$ 可拟合并推估采掘工作面电磁辐射信号变化规律, 在正常情况下, 系统输出误差 $\omega(t)$ 的变化均应在置信区间范围内. 若监测的电磁辐射信号强度或脉冲数序列的系统输出误差超出理论序列 $\bar{f}(t)$ 的误差概率置信区间, 则认为采掘工作面有煤与瓦斯突出危险性.

3 电磁辐射异常判识模型的试验性应用

试验地点为沈阳某煤矿运输巷掘进工作面, 试验期间同时使用电磁辐射法、钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 法预测工作面煤与瓦斯突出危险性, 2 种方法均是每 2 个班预测 1 次. 根据试验工作面运输巷的实际掘进状况, 以 2002-04-04—04-13 测试的 15 次电磁辐射预测结果为基础, 建立包含 15 个元素 (电磁辐射强度 E) 的动态数据库. 表 1 前 15 个数据为电磁辐射强度 E 和常规指标 Δh_2 的时间序列动态数据库, 其随工作面的推进和预测指标值的测试而动态变化, 即每增加 1 个新数据 (第 16 个), 相应地舍弃 1 个最早的旧数据 (第 1 个), 依此类推. 试验期间, 对试验工作面运输巷的突出危险性进行了连续 53 d 的对比预测, 共测试了 78 组电磁辐射和常规预测数据, 由于测试数据较多, 不便全部列于表中, 故 4 月 15 日以后测试的结果文中未予列出.

表 1 电磁辐射强度 E 和常规预测指标 Δh_2 时间序列动态数据库

Table 1 Dynamic database of EME intensity E and routine index Δh_2 time sequence

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
日期	4.4 早	4.4 夜	4.5 中	4.6 早	4.6 夜	4.7 中	4.8 早	4.8 夜	4.9 中	4.10 早	4.10 夜	4.11 中	4.12 早	4.12 夜	4.13 中	4.14 早
E/mV	123	68	142	186	121	93	150	248	193	156	127	97	165	234	148	124
$\Delta h_2/\text{Pa}$	140	120	160	210	150	160	180	230	210	200	160	140	190	220	180	160
有无征兆	无	无	无	有	无	无	无	有	无	无	无	无	无	有	无	无

由表 1 预测结果可以看出, 电磁辐射强度 E 与常规指标 Δh_2 的对应性很好. 在置信度为 95% 的水平下, 根据异常判别准则可计算出测试系统输出误差的概率置信区间为 $[-1.558, 1.558]$, 而 4 月 6 日早班、4 月 8 日夜班、4 月 9 日中班和 4 月 12 日夜班的电磁辐射强度 E 输出误差分别为 2.584, 4.125, 2.728 和 3.569, 其均在置信区间以外, 表明工作面煤岩电磁辐射信号出现异常, 除 4 月 10 日早班常规法预测异常而模型预测正常外, 其它异常点与常规预测结果基本一致.

在置信度为 95% 的水平下, 在 78 组电磁辐射强度 E 指标预测值中, 共有 15 次的工作面电磁辐射预测结果被模型判识为异常 (表 2). 当然, 电磁辐射信号异常并不能完全确定工作面前方煤层具有突出危险性, 但在工作面煤层有突出危险时, 一段时间内电磁辐射信号一定出现异常现象. 因此, 在模型判识工作面电磁辐射异常时, 可根据现场实际状况, 最终确定是否采取适当的防突措施. 由表 2 可以看出, 有 12 次钻屑瓦斯解吸指标 Δh_2 和电磁辐射异常判识模型同时出现异常; 有 2 次钻屑瓦斯解吸指标值 Δh_2 超限, 而电磁辐射异常判识模型并非出现异常; 有 3 次钻屑瓦斯解吸指标值 Δh_2 在界限值以内, 而电磁辐射异常判识模型出现异常, 有 2 次常规预测和异常模型判识均正常, 但出现大面积片帮和煤炮等突出征兆, 表明工作面前方煤层具有突出危险性. 故认为工作面有煤与瓦斯突出危险的次数分别为: 常规法预测 14 次, 异常模型判识 15 次, 2 次预测方法均失效, 其中有 5 次判断二者出现分歧. 假设各预测指标相互独立, 即任何一种指标值超过其临界值或异常均认为工作面有突出危险, 共有 17 次预测指标超过临界值或

电磁辐射指标异常, 有 12 次同时认为工作面有突出危险, 故电磁辐射异常模型判识结果与常规指标 Δh_2 预测结果一致率达 70.6%.

表 2 电磁辐射异常模型判识与常规预测对比

Table 2 Contrastion of EME model judging and routine forecast

序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
日 期	4.6 早	4.8 夜	4.9 中	4.10 早	4.12 夜	4.17 中	4.21 中	4.23 中	4.28 夜	4.30 早
模型判识	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+
常规预测	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+
突出征兆	煤炮	喷孔	无	无	喷孔	夹钻	喷孔	无	煤炮	无
序 号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
日 期	5.3 中	5.5 早	5.9 夜	5.11 中	5.15 夜	5.17 中	5.22 中	5.23 早	5.25 中	5.26 夜
模型判识	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+
常规预测	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+
突出征兆	喷孔	无	夹钻	无	喷孔	无	片帮	无	片帮	无

注: + 代表异常; - 代表正常

4 结 语

工作面煤与瓦斯突出危险性的电磁辐射异常判识模型预测是一种动态趋势预测法, 其避免了电磁辐射临界值法预测煤与瓦斯突出危险性的弊端。试验结果表明: 煤与瓦斯突出危险性的电磁辐射异常判识模型具有较高的预测精度, 实现了工作面煤与瓦斯突出危险性的连续动态趋势预测。

参考文献:

- [1] 何学秋, 王恩元, 聂百胜. 煤岩流变电磁动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
He Xueqiu, Wang Enyuan, Nie Baisheng. Electromagnetic dynamics of coal or rock rheology [M] Beijing: Science Press, 2003.
- [2] 撒占友, 何学秋, 王恩元. 煤岩破坏电磁辐射记忆效应特性及产生机制 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24 (2): 153 - 156.
Sa Zhanyou, He Xueqiu, Wang Enyuan. Producing mechanism and characteristics of memory effect of electromagnetic radiation during fracture of coal or rock [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24 (2): 153 - 156.
- [3] 撒占友, 何学秋, 王恩元. 工作面煤与瓦斯突出电磁辐射的神经网络预测方法研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (5): 563 - 567.
Sa Zhanyou, He Xueqiu, Wang Enyuan. Study on the electromagnetic emission neural network forecasting method of coal and gas outburst of working face [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29 (5): 563 - 567.
- [4] 窦林名, 何学秋. 采矿地球物理学 [M]. 北京: 中国科学文化出版社, 2002.
Dou Linming, He Xueqiu. Mining geophysics [M]. Beijing: China Science and Culture Publishing House, 2002.
- [5] 秦四清, 张俤元, 王士天, 等. 非线性工程地质学导引 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
Qin Siqing, Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, et al. Nonlinearity engineering geology guide [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.