

文章编号:0253-9993(2010)S0-0015-04

孤岛煤柱冲击地压电磁辐射前兆时间序列分析

刘晓斐^{1,2},王恩元^{1,2},何学秋³

(1. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏 徐州 221008;2. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116;3. 中国安全生产科学研究院,北京 100012)

摘要:为分析冲击地压电磁辐射前兆时序特征,以南山矿孤岛煤柱冲击地压为例,将其电磁辐射前兆序列划分为有危险和无危险两个样本,并运用 SAS 统计分析软件对样本的随机性和平稳性进行了检验。结果表明,无危险状态样本只是一个平稳白噪声时间序列,而有危险状态样本则是一个平稳非白噪声时间序列,其合适的 ARMA 拟合模型为 AR(3) 模型。

关键词:孤岛煤柱;冲击地压;电磁辐射前兆;时间序列分析;平稳性;随机性

中图分类号:TD324 **文献标志码:**A

Time series analysis of electromagnetic radiation precursor of rockburst in gob-surrounded coal pillar

LIU Xiao-fei^{1,2}, WANG En-yuan^{1,2}, HE Xue-qiu³

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China; 3. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: To analyze the characteristics of electromagnetic radiation (EMR) precursor time series, EMR precursor series of rockburst of gob-surrounded coal pillar in Nanshan Coal Mine, was divided into two samples of the risk state and the non-risk state, and the SAS statistics and analysis software was used to test the randomness and the stationary of two samples. The results show that the EMR series of the non-risk state is a white noise and stationary sequence, the EMR series of the non-risk state is a non-white noise and stationary sequence which can be fitted as AR(3) model.

Key words: gob-surrounded coal pillar; rock burst; EMR precursor; time series analysis; randomness; stationary

自 20 世纪 90 年代中国矿业大学开展冲击地压电磁辐射预测技术的研究以来,经过近 20 a 的发展,冲击地压灾害电磁辐射预测技术已趋于成熟,并成功地应用于我国有冲击地压灾害矿区的冲击地压灾害监测。现行的冲击地压电磁辐射预测方法^[1-2]在冲击地压电磁辐射前兆数据的挖掘和分析上深度不够,对数据的利用也比较有限,仅仅停留在一般的数据处理上。

为了更好地利用电磁辐射前兆数据预测冲击地压和煤与瓦斯突出等煤岩动力灾害,一些学者在电磁辐射前兆分析、电磁辐射预测动力灾害的指标和方法等方面进行了新的研究尝试,进一步研究了煤岩动力

灾害的电磁辐射前兆特征。窦林名^[2]依据电磁辐射幅值和脉冲数两个指标变化的偏差值确定冲击地压的危险程度,并进行预测预报。王云海^[3]的研究表明,冲击地压电磁辐射前兆在时间上呈起伏增强的变化,与观测点的变形破坏过程及应力变化相对应。撒占友^[4]建立了采掘工作面煤岩流变破坏电磁辐射异常判识模型,通过对电磁辐射信号趋势分量、周期分量和随机分量的提取,和对电磁辐射指标时间序列输出误差的均值函数进行分析,来判定电磁信号是否异常,并据此对工作面的冲击危险性进行预测。魏建平^[5]建立了矿井煤岩动力灾害(包括冲击地压)的电磁辐射灰色-尖点突变模型,分析了煤岩变形电磁辐

收稿日期:2010-02-01 责任编辑:柴海涛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50904067,40874070);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2005CB221505);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0477);中国矿业大学青年科研基金资助项目(2008A005)

作者简介:刘晓斐(1981—),男,山西晋中人,博士,讲师。Tel:0516-83884695, E-mail:liuxiaofei_1981@163.com

射尖点突变特征,并应用于冲击地压和煤与瓦斯突出的预警。邹喜正^[6]对现场采集的煤岩电磁辐射数据进行分形特征分析,认为在正常情况下电磁辐射分形维数变化小,在冲击地压发生前分形维数变化大。王静^[7]应用相空间重构法计算了 5 次矿震前后系统混沌吸引子的关联维数,发现矿震发生前,混沌吸引子的关联维数 D 先升后降,矿震过程中有降维现象。李洪^[8]提出了冲击地压电磁辐射数据序列的混沌预测模型、分形预测模型及模式识别方法。

冲击地压电磁辐射监测数据是不是典型的时间序列,什么样的冲击地压电磁监测数据才具有可提取的前兆特征等,这些都是冲击地压电磁辐射监测及预报研究所必须关注和解决的问题。采用合适的方法对冲击地压电磁前兆数据进行深化处理,挖掘前兆信息及特征,能够进一步提高电磁辐射预测冲击地压的准确性。

自 Box 和 Jenkins 提出时间序列方法^[9-10]以来,经过长期的研究和发展,时序分析已形成了完整的体系,具有理论基础扎实、操作步骤规范、分析结果易于解释的优点,目前已被广泛应用于自然科学和社会科学的各个领域。电磁辐射监测数据是否为典型的时间序列,能否用时间序列方法来分析等,都需要进行探索性的研究。

1 时间序列特征分析

按照时间的顺序把随机事件变化发展的过程记录下来就构成了一个时间序列。对时间序列进行观察、研究,找寻其变化发展的规律,预测它将来的走势就是时间序列分析。平稳性和随机性是时间序列的两个基本特征。

1.1 时间序列的平稳性检验

拿到一个观察值时间序列之后,首先要对其平稳性和纯随机性进行检验(即序列的预处理),根据检验的结果和序列的特征可以将序列分为不同的类型,并采用不同的分析方法和适用模型。对序列的平稳性有两种检验方法:一种是根据时序和自相关图显示的特征判断的图检验方法;一种是构造检验统计量进行假设检验的方法^[11]。

1.2 时间序列的纯随机性检验

如果一个时间序列 $\{X_t\}$ 满足如下性质:① 取 $t \in T$, 有 $EX_t = \mu$; ② 取 $t, s \in T$, 有 $r(t, s) = \begin{cases} \sigma^2 (t = s) \\ 0 (t \neq s) \end{cases}$ 。

那么,称序列 $\{X_t\}$ 为纯随机序列,也称为白噪声(white noise)序列,简记为 $X_t \sim WN(\mu, \sigma^2)$ 。

纯随机性检验也称为白噪声检验,即专门检验序

列是否为纯随机序列。如果一个序列是纯随机序列,那其序列值之间应该没有任何相关关系,即序列的样本自相关系数满足 $\gamma(k) = 0, \forall k \neq 0$ 。实际由于观察值序列的有限性,导致纯随机序列的样本自相关系数不会绝对为零。

Barlett 定理:如果一个时间序列是纯随机的,得到一个观察期数为 n 的观察序列 $\{x_t, t = 1, 2, \dots, n\}$, 那么该序列的延迟非零期的样本自相关系数将近似服从均值为零、方差为序列观察期数倒数的正态分布,即 $\hat{\rho}_k \sim \dot{N}\left(0, \frac{1}{n}\right), \forall k \neq 0$ 。根据 Barlett 定理构造检验统计量 Q 检验序列的纯随机性, Q 统计量近似服从自由度为 m 的卡方分布 $Q = n \sum_{k=1}^m \hat{\rho}_k^2 \sim \chi^2(m)$, 其中 m 为指定延迟期数。

当 Q 统计量大于 $\chi_{1-\alpha}^2(m)$ 分位点,或该统计量的 P 值小于 α 时,则可以 $1-\alpha$ 的置信水平拒绝原假设,认为该序列为非白噪声序列;否则,接受原假设,认为该序列为纯随机序列。

在实际应用中发现 Q 统计量在大样本场合(n 很大)检验效果很好,但在小样本场合不太精确。为了弥补这一缺陷,Box 和 Ljung 又推导出 LB (Ljung-Box) 统计量,即 $LB = n(n+2) \sum_{k=1}^m \left(\frac{\hat{\rho}_k^2}{n-k}\right)$ 。Box 和 Ljung 证明 LB 统计量同样近似服从自由度为 m 的卡方分布。

LB 统计量就是 Box 和 Pierce 的 Q 统计量的修正,习惯将 Q 统计量和 LB 统计量统称为 Q 统计量,分别记作 Q_{BP} 统计量(Box 和 Pierce 的 Q 统计量)和 Q_{LB} 统计量(Box 和 Ljung 的 Q 统计量),实际上在各种检验场合普遍采用的 Q 统计量通常指的都是 LB 统计量。

2 孤岛煤柱冲击地压电磁辐射前兆时序特征

2.1 孤岛煤柱冲击地压概况

237 工作面位于鹤岗矿区南山煤矿井田北部,地表标高在 300 ~ 350 m。工作面标高为 -210 m,开采深度为 560 m,属于深部开采。工作面采用炮采放顶煤工艺,走向长 365 m,倾斜长 71 m,采高 1.8 m,煤层厚 12 ~ 15 m,倾角 10 ~ 11°。直接顶为 12 m 厚的 15 层煤,其上为基本顶,厚 50 ~ 60 m,灰白色中砂岩,底板为 2.5 ~ 3.0 m 灰色中、细砂岩。地质构造复杂,区内有 F1 断层斜穿该区域,断层落差为 2.0 ~ 3.5 m。该工作面左部未采,右部为 F2 和南 17 断层,上下段均已回采完毕,区段煤柱 10 m,较小,造成上

下巷应力集中,为典型的孤岛工作面。

2006-01-12T11:45,工作面发生冲击地压,震级为2.4级(以下统称该次冲击为“1·12冲击”)。工作面刮板输送机头往上,第7架棚到45架棚之间的顶子下移0.1m左右,下巷超前维护木梁压折4根。在回风道有风机且处在正常供风的情况下,工作面瞬间瓦斯浓度达到1%,软、硬帮瓦斯浓度达到0.8%,上隅角瓦斯浓度达到0.5%。

237工作面冲击地压电磁辐射监测采用电磁辐射强度值 E (单位mV)作为指标^[12]。“1·12冲击”发生前电磁辐射强度值有明显的异常前兆^[13-15]。将从2006-01-01夜班开始到1月12日下午班这段时间内的电磁辐射监测数据定义为“1·12冲击”的电磁辐射前兆数据。为了便于分析孤岛煤柱冲击地压电磁前兆的时间序列特征,将“1·12冲击”电磁前兆数据划分为无危险状态数据(1月1日夜班~1月8日早班)和有危险状态数据(1月8日上午班~1月12日下午班),如图1所示。

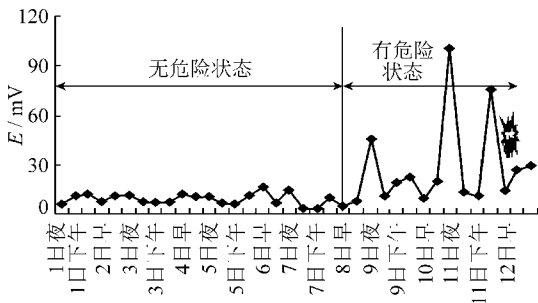


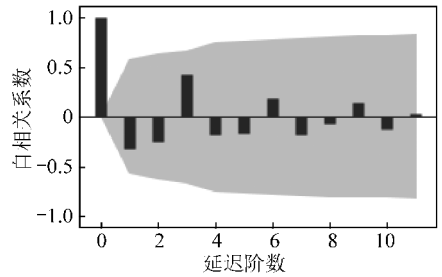
图1 “1·12冲击”电磁辐射前兆序列及其状态划分
Fig.1 State division of EMR precursor time series before Jan 12th

2.2 孤岛煤柱冲击地压电磁前兆时序分析

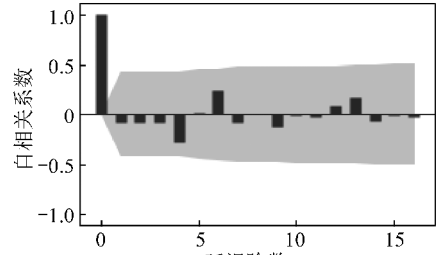
(1)平稳性分析。利用SAS软件分别对“1·12冲击”的电磁辐射前兆的有危险状态和无危险状态的数据绘制时序图,考察该序列的自相关性(图2),检验该序列的平稳性。

有危险状态电磁辐射样本的时序自相关图(图2(a))显示:延迟3阶之后,该序列自相关系数都落入2倍标准差范围以内,且自相关系数向零衰减的速度非常快,延迟6阶之后自相关系数即在零值附近波动。这是一个非常典型的短期的样本自相关图,可以认为该序列平稳。

无危险状态电磁辐射样本的时序自相关图(图2(b))显示:该序列的自相关系数一直都比较小,始终控制在2倍的标准差范围以内,可以认为该序列自始至终都在零轴附近波动,这是随机性非常强的平稳时间序列通常所具有的自相关图性质。



(a) 有危险状态



(b) 无危险状态

图2 “1·12冲击”电磁辐射前兆序列的自相关结果
Fig.2 Autocorrelations of EMR time series before Jan 12th in risk state

综上所述,无论是无危险状态还是有危险状态,其电磁辐射序列均为平稳时间序列。

(2)随机性分析。依据 LB 统计量公式,通过检验 Q_{LB} 统计量来进行“1·12冲击”的电磁辐射前兆的有危险状态和无危险状态两个序列各自的随机性检验(显著性水平 $\alpha=0.05$)见表1,结果表明:①各阶延迟下无危险状态序列 LB 检验统计量的 P 值明显大于显著性水平 $\alpha=0.05$,不能拒绝序列纯随机的原假设,判定无危险状态的电磁辐射变动属于纯随机波动。②各阶延迟下有危险状态序列 LB 检验统计量的 P 值都很小(<0.05),可以 $>95\%$ 的置信水平断定该序列属于非白噪声序列。

表1 “1·12冲击”的电磁辐射前兆有危险和无危险状态的随机性检验

Table 1 Check for white noise of EMR time series before Jan 12th in risk and non-risk states

危险状态	延迟阶数	Q_{LB} 统计量的值	Q_{LB} 统计量服从 χ^2 分布的自由度	Q_{LB} 统计量的 P 值
有危险状态	6	19.08	6	0.004 0
	12	21.10	12	0.048 9
无危险状态	6	4.81	6	0.567 9
	12	6.24	12	0.903 4

可以认为“1·12冲击”的电磁辐射前兆有危险序列不仅是平稳的,而且还蕴含着值得提取的相关信息。因此,需要建立一个合适的时序分析模型来拟合该序列的发展,并提取该序列中的有用信息。

(3) 平稳非白噪声序列建模。根据图3的平稳非白噪声序列建模步骤,对“1·12冲击”的电磁辐射前兆序列进行进一步的分析。结果^[15]表明,AR(3)模型是适合“1·12冲击”电磁前兆序列的最佳模型,模型的具体形式为

$$x_t = 16.11951 + \frac{\varepsilon_t}{1 - 0.56576B^3}$$

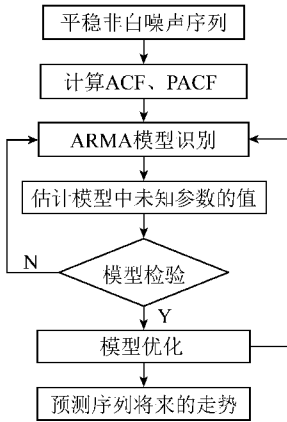


图3 平稳非白噪声序列的建模步骤

Fig.3 Modeling procedure of stationary and non-white noise time series

3 结 论

(1) 鹤岗南山矿237工作面“1·12冲击”电磁前兆序列有危险状态样本为平稳非白噪声时间序列,而无危险状态样本为平稳白噪声时间序列。

(2) “1·12冲击”电磁前兆序列有危险状态样本蕴含着值得提取的相关信息,适合进一步分析,该序列的ARMA拟合模型为AR(3)模型。

(3) 对冲击地压电磁辐射前兆的时序特征进行分析和研究,是为了将电磁辐射监测值的变化趋势尤其是冲击灾害的前兆特征用定量化的语言描述出来,从而为实现冲击地压电磁辐射前兆信息的定量识别和准确预测提供依据,为冲击地压电磁辐射预测研究提供了新的尝试。

参考文献:

- [1] 何学秋,王恩元,聂百胜,等.煤岩流变电磁动力学[M].北京:科学出版社,2003.
- [2] 窦林名,何学秋,王恩元.冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用[J].煤炭学报,2004,29(4):396-399.
Dou Linming, He Xueqiu, Wang Enyuan. Electromagnetic emission technique of monitoring rock burst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 396-399.
- [3] 王云海,何学秋,窦林名.煤样变形破坏声电效应的演化规律及机理研究[J].地球物理学报,2007,50(5):1569-1575.
Wang Yunhai, He Xueqiu, Dou Linming. Study on regularity and

mechanism of acoustic emission and electromagnetic emission during fracture process of coal samples[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1569-1575.

- [4] 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.
- [5] 魏建平,何学秋,王恩元,等.煤与瓦斯突出电磁辐射多重分形特征[J].辽宁工程技术大学学报,2005,24(1):1-4.
Wei Jianping, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. Electromagnetic emission multi-fractal characteristic of coal and gas outburst[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(1): 1-4.
- [6] 邹喜正,窦林名,徐方军.分维在电磁辐射技术预测冲击矿压中的应用[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(4):452-455.
Zou Xizheng, Dou Linming, Xu Fangjun. Study and practice of fractal dimension in prediction of rock burst by technology of electromagnetic emission[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(4): 452-455.
- [7] 王静,王恩元,魏建平.煤岩电磁辐射信号时间序列混沌特性分析[J].防灾减灾工程学报,2006,26(3):300-304.
Wang Jing, Wang Enyuan, Wei Jianping. Analysis of chaotic characteristics of time series of coal rock electromagnetic emission[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(3): 300-304.
- [8] 李洪.冲击矿压前兆信息的混沌预测及模式识别研究[D].青岛:山东科技大学,2006.
Li Hong. Research of chaotic prediction and pattern recognition based on omen information of rock burst[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006.
- [9] Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C. Time series analysis, forecasting and control[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1994.
- [10] 王燕.应用时间序列分析[M].北京:中国人民大学出版社,2005.
- [11] 高惠璇. SAS 系统 SAS STAT 软件使用手册[M].北京:中国统计出版社,1997.
- [12] 王恩元,何学秋,李忠辉,等.煤岩电磁辐射技术及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
- [13] 刘晓斐,王恩元,何学秋,等.回采工作面应力分布的电磁辐射规律[J].煤炭学报,2007,32(10):1019-1023.
Liu Xiaofei, Wang Enyuan, He Xueqiu, et al. Electromagnetic radiation laws of the stress distribution in working face[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 1019-1023.
- [14] Wang Enyuan, Liu Xiaofei, Zhao Enlai, et al. Study of electromagnetic characteristics of stress distribution and sudden changes in the mining of gob-surrounded coal face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(1): 1-5.
- [15] 刘晓斐.冲击地压电磁辐射前兆信息的时间序列数据挖掘及群体识别体系研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
Liu Xiaofei. Study on time series data mining and group recognition system of electromagnetic precursor information of rock burst[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.