

微震预警冲击地压的时间序列方法

吕进国^{1,2}, 潘立³

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于工作面微震事件释能规律的统计分析, 研究了微震能量随时间推移而变化的趋势, 认为高能量微震事件是冲击地压发生的必要条件。以大同忻州窑煤矿为例, 采用时间序列模型中的ARIMA季节性模型和门限自回归模型分别对未来微震事件释放能量进行预测, 比较了两种方法的优缺点及适用条件; 构建了微震能量方差变化的特征函数, 基于此特征函数提出了冲击危险模式的识别方法。研究表明: 周期性较为明显的高能量微震事件, ARIMA季节性模型能有效地预测未来微震释能趋势, 而门限自回归模型适用于预测高能微震周期性非显著的释能趋势; 微震能量方差变化特征函数判别准则能够对冲击地压进行有效预警。

关键词: 微震; 冲击地压; 时间序列; 门限自回归模型; 特征函数

中图分类号: TD324.1

文献标志码: A

Microseismic predicting coal bump by time series method

LÜ Jin-guo^{1,2}, PAN Li³

(1. State Key Lab. of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the statistical analysis of law of microseismic events releasing energy, researched the tendency of transformations of microseismic energy with the elapse of time, and deem that the high energy events are the necessary condition of coal burst. Taking Xinzhouyao Coal Mine of Datong City as an example, respectively applying the seasonal ARIMA model and threshold autoregressive model of time series models to forecast the microseismic events releasing energy in the future, and compared with the advantages and disadvantages of two methods and applicable conditions. The characteristic function of the variance change of the microseismic energy was constructed, and based on it, put forward a new recognition method for the risk model of coal burst. Research shows that ARIMA seasonal model can effectively predict the futural microseismic releasing energy in cyclical obvious high-energy microseismic events. However, the threshold autoregressive model is suitable to predict high microseismic energy releasing process of non-significant cyclical trend. The criterion of the characteristic function of microseismic energy variance can effectively predict coal burst.

Key words: microseismic; coal bump; time series; threshold autoregressive model; characteristic function

目前对冲击地压灾害的监测预警有多种手段, 微震监测^[1-2]即是其中较为有效的一种。微震监测能够较为准确地获得已发生微震事件的震源位置、发生时间和释放能量, 进而统计微震活动强弱和频率并判

断潜在的矿山动力灾害活动规律。冲击地压的孕育发生在时序上经历着能量积聚—能量释放—冲击失稳的过程。然而, 冲击失稳过程中, 往往伴随较大能量的微震事件。因此, 预测有冲击危险的微震活动变

收稿日期: 2010-08-18 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226801); 国家自然科学基金资助项目(50704034); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题资助项目

作者简介: 吕进国(1984—), 男, 辽宁阜新人, 博士研究生。Tel: 010-51734825, E-mail: glvjinguo2005@163.com

化趋势是预警冲击地压的关键所在,尤其是较高能量微震事件的准确预报。本文针对大同忻州窑煤矿微震监测数据,采用时间序列模型中的 ARIMA 季节模型和门限自回归模型分别对未来微震事件释放能量进行预测,对一系列微震事件的时、空以及能量分布及其变化进行系统地整理分析,构建了相应的时间序列,获得了微震随时间推移而变化的活动趋势。

1 ARIMA 模型及门限自回归模型

1.1 ARIMA 季节性理论模型

对周期为 T 的序列,可进行差分运算,得到 $\{x_t - x_{t-T}\}$ 序列,若一次季节差分不能得到平稳时序,还可以进行多次 (D 次) 季节差分。根据这一思路,记差分算子为 $\nabla_T^D = (1 - B^T)^D$ 。对非平稳时间序列 $\{x_t\}$ ($t = 1, 2, \dots, N$) 进行差分运算,即 $\nabla_T^D x_t = (1 - B^T)^D x_t$ 。

经季节差分运算后,对序列 $\{\nabla_T^D x_t\}$ 建立 ARMA (p, q) 模型,即

$$\Phi(B^T) \nabla_T^D x_t = \Theta(B^T) \varepsilon_t \quad (1)$$

如式 (1) 中 ε_t 为白噪声,则称式 (1) 为季节性模型;如果 ε_t 不是白噪声,具有趋势性,则模型变为

$$\varphi(B) \Phi(B^T) w_t = \theta(B) \Theta(B^T) a_t \quad (2)$$

1.2 门限自回归理论模型

当采用线性模型来逼近某种现象而得不到满意的结果时,就应该使用非线性时序模型。门限自回归模型就属于非线性时序模型中的一种,即在观测时序 $\{x_t\}$ 的取值范围内引入 $l-1$ 个门限值 r_j ($t=1, 2, \dots, l-1$),将时间轴分为 l 个区间,并用延迟步数 d 将 $\{x_t\}$ 按 $\{x_{t-d}\}$ 值的大小分配到不同的门限区间内,然后对不同区间内的 $\{x_t\}$ 采用不同 AR 模型来描述整个系统。门限自回归模型的一般形式为

$$\begin{cases} x_t = \varphi_0^{(j)} + \sum_{i=1}^{n_j} \varphi_i^{(j)} x_{t-i} + a_t^{(j)} \\ r_{j-1} < x_{t-d} \leq r_j \end{cases}$$

其中, r_j 为门限值; l 为门限区间的个数; d 为延迟步数; $\{a_t^{(j)}\}$ 为白噪声序列,它们之间互相独立; n_j 为第 j 个门限区间模型的阶数; $\varphi_i^{(j)}$ 为第 j 个门限区间内模型的自回归系数。

2 冲击地压前兆特征函数的构造

2.1 灾害发生前微震能量变化规律

一般情况下,灾害发生之前,工作面的微震事件每天所释放的能量会有明显的变化^[3-4],通过分析这种变化,可以总结出工作面发生冲击地压前微震的活

动规律: ① 每日微震释能活动较为平稳,一直保持在较低能量水平,处在稳定释放状态; ② 每日微震活动能量级别急剧增加,在 1~4 d 内,容易发生冲击地压和较大震动等动力灾害; ③ 每日微震释能活动较平稳,突然出现无微震活动状态,处在平衡期,持续 1~4 d 左右^[5,7],容易出现大的震动和冲击。

图 1 为大同忻州窑煤矿 8929 工作面 2008-07-02—07-19 每天微震活动释放能量的累计值^[8],其中 7 月 12 日与 7 月 17 日发生了冲击地压。

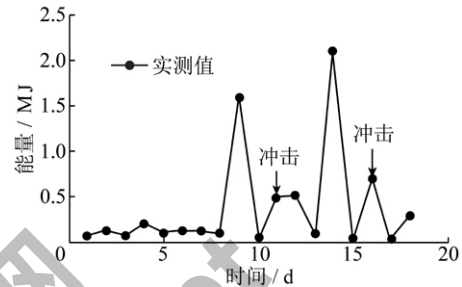


图 1 微震能量变化曲线

Fig. 1 Transformation curve of microseismic energy

2.2 特征函数的构造

为了对冲击地压进行有效预警,必须对未来微震活动所释放的能量进行预测,但未来微震释能的预测值并不能独立去评价发生冲击灾害的危险性,应该从整体上研究能量波动情况。

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \quad (3)$$

其中, σ_x^2 是微震能量的方差; μ_x 是时间序列的 $\{x_t\}$ 的均值。通过式 (3) 计算图 1 微震能量的波动情况,得到如图 2 所示的方差变化曲线。

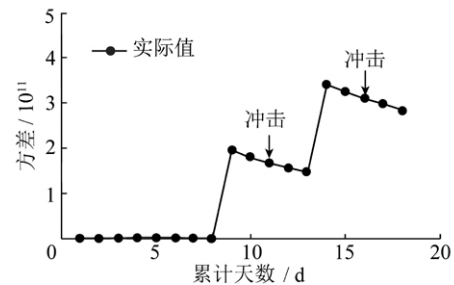


图 2 微震能量方差变化曲线

Fig. 2 The variance transformation curve of microseismic energy

从图 2 可以看出,7 月 9 日以前微震能量波动平稳,10 日 σ_x^2 突然变大,表明释放的能量迅猛升高,11 日 σ_x^2 明显减小,表明能量迅速下降,之后稳定波动,整体呈下降趋势,在 12 日发生了冲击地压。15 日 σ_x^2 突然变大,能量急剧上升,之后能量大幅度变化,总体呈下降趋势,在 17 日发生了冲击地压。这表明在相应的时间段里,微震能量方差 σ_x^2 的变化能较好地描

述微震释能过程在某段时间内的波动状况。可见 σ_x^2 的波动情况是时域中幅值变化的一个理想特征量。冲击地压发生的判别准则为

$$\Delta_t = (\sigma_t^2 - \sigma_{t-1}^2)(\sigma_{t+1}^2 - \sigma_t^2) < 0$$

$$\hat{t} = \{t+1, t+2, t+3, t+4\}$$

其中, t 为日期 ($t=2, 3, \dots, n$); σ_t^2 为在 t 时间段内微震释放能量的方差; $\hat{t}$ 为可能发生冲击地压的日期。如果 $\Delta_t < 0$ 且 $|\Delta_t|$ 越大, 越容易发生冲击危险及矿震等动力灾害。容易验证, 如图 2 所示, $\Delta_9 < 0$ 、 $\Delta_{14} < 0$, 在 12 日与 17 日分别发生了冲击地压。

3 应用时间序列模型预测微震能量

3.1 ARIMA 模型的应用

一般来说, 高能微震事件周期性比较显著, 不同矿井微震周期是不同的。通常工作面每推进 40 m 左右就会形成一个微震周期^[9]。以大同忻州窑煤矿微震释能数据为例^[8], 对未来微震事件能量进行预测。图 3 为 8929 工作面从 2008-06-15—07-14 微震监测事件能量累计值。

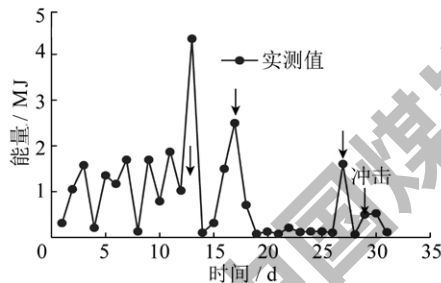


图3 微震能量变化曲线

Fig. 3 Transformation curve of microseismic energy

如图 3 所示, 6 月 27 日、6 月 31 日、7 月 10 日工作面发生了 3 次高能微震事件, 之后 7 月 12 日发生了冲击地压。可看出, 高能微震事件发生之前, 每日微震能量呈现稳定波动或缓慢增长状态, 预示着能量不断积聚, 直至高能级微震事件的发生, 之后工作面每日释放能量变小, 随后进入下一个能量的积聚期。

高能量微震事件周期性比较明显, 平均周期 T 为 10 d 左右, 分别对周期 $T=8, 9, 10, 11$ 进行综合对比, 选取最优周期 $T=8$, 可采用 ARIMA 季节性模型, 模型建立过程如图 4 所示。执行流程图的步骤, 选用 ARIMA(4, 0, 3)(1, 1, 1)⁸ 模型, 通过计算得到微震能量预测值和实际值的对比以及能量方差变化, 如图 5 所示。

实际上 7 月 15 日发生了高能量微震事件, 7 月 17 日发生了冲击地压。图 5 基本反映了微震释放能量的变化趋势, 第 32 d (即 7 月 15 日) $\Delta_{32} < 0$, 随后第

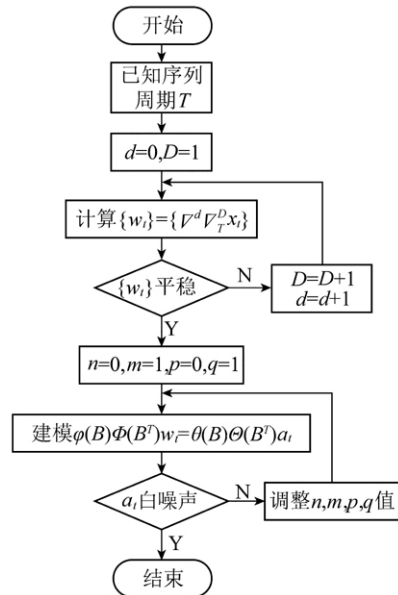
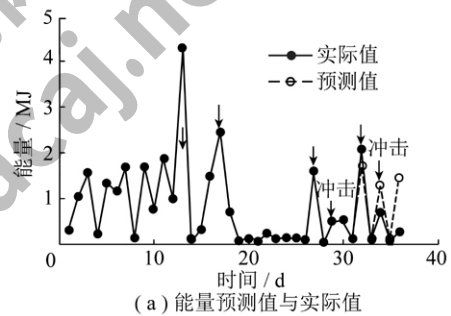
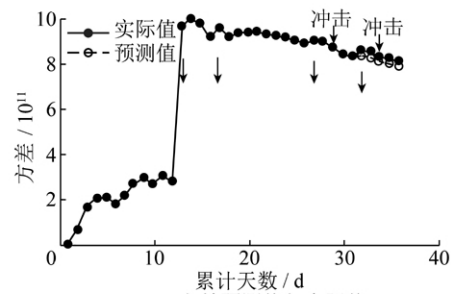


图4 ARIMA 模型流程

Fig. 4 Chart of ARIMA model flow



(a) 能量预测值与实际值



(b) 方差预测值与实际值

图5 测值与实际值的对比

Fig. 5 Comparison of prediction value and actual value

34 d (7 月 17 日) 发生了冲击地压, 释放的巨大能量对巷道造成了明显破坏。能量的预测值与实际值有一定的偏差, 尤其是第 32 d 的预测值明显偏离实际值, 这是因为微震的发生可能有人工放炮及周期不稳定等干扰因素, 影响了时间序列系统自身的稳定性, 由于构造的方差特征函数只考虑与周围能量方差的波动情况, 因此, 只要总体上的趋势正确就可以避免因预测值偏差过大而降低预警的可信度。

3.2 门限自回归模型的应用

某段时间高能量微震事件周期较稳定时, 应用

ARIMA 季节性模型能取得较好的效果,但周期受回采工作面推进影响较大,因此,有时周期不够稳定,变化较大,这时应采用门限自回归模型。其基本思想是把微震数据根据门限值分成低能量区间和高能量区间,再对这两个区间分别进行 ARIMA 模型回归拟合,门限自回归模型主要是确定门限值 r_j , 门限区间的个数 l , 延迟步数 d , 这里采用 D. D. C 方法^[9-10] 中的点值图法进行确定。同样,根据图 3 中的数据,算得 $d=2$, 区间个数 $l=2$, $r=243\ 000$, 确定后,根据式(2)计算微震能量的预测值以及能量方差的变化情况,如图 6 所示。

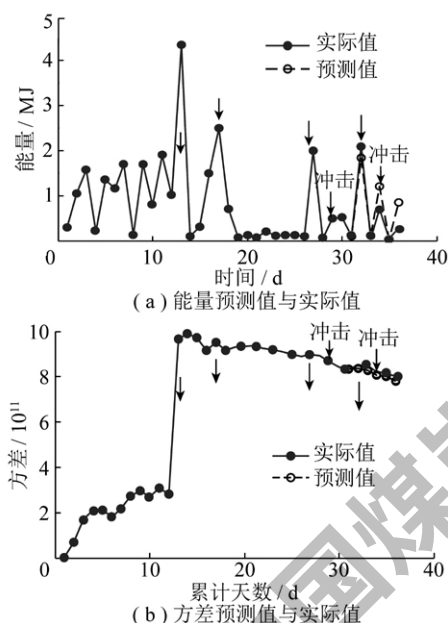


图 6 能量预测值和方差预测值与实际值的对比

Fig. 6 Comparison of prediction value and actual value for energy and variance

从图 6(a) 可以看出,最后一个预测值为不可信值,但其他预测值较 ARIMA 模型更加准确,更符合实际情况,这说明门限自回归模型对数据要求更加严格,并且短期的预测效果更加理想。从图 6(b) 可以看出,第 31 天 $\Delta_{31} < 0$, 在第 32 d 发生了高能微震事件,造成了较大震动,紧接着在第 34 d(7 月 17 日)发生了冲击地压,比 ARIMA 模型($\Delta_{32} < 0$) 预警时间缩短 1 d。未来 5 d 内预测能量的方差变化趋势与实际基本一致,更加真实的表现了未来微震能量的活动趋势,可以有效地预警冲击地压等动力灾害。

4 结 论

(1) 通过研究微震能量随时间变化的发展规律,认为高能微震事件是发生冲击地压的必要条件。构造出了微震能量方差变化的特征函数,基于此特征

函数提出了冲击地压发生前危险模式的识别方法。实验证明,此判别方法能有效地预警冲击地压、矿震等动力灾害,简单且容易实现。随着时间的推移,此方法有待继续发展和完善。

(2) ARIMA 季节性模型虽然能预测出每天微震释放能量的基本趋势,由于周期不够稳定,预测值容易产生较大误差。如果在某段时间内,高能微震释能过程呈现出明显且稳定的周期性,此方法可以得到良好的预测结果。

(3) 由于工作面推进以及其他因素的影响,有时高能微震释能过程的周期不够稳定,此时可以采用门限自回归模型进行预测。通过实例分析,门限自回归对数据的要求较高,数据越多,预测未来微震所释放的能量就越加准确,此方法进行短期预测的准确率较高,但不适合进行长期预测。

参考文献:

- [1] 姜耀东,赵毅鑫,刘文刚,等. 煤岩冲击失稳的机理和实验研究 [M]. 北京: 科学出版社,2009.
- [2] 邹德蕴,姜福兴. 煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究 [J]. 煤炭学报,2004,29(2): 159-163.
Zou Deyun, Jiang Fuxing. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 159-163.
- [3] 齐庆新,窦林名. 冲击地压理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社,2010.
- [4] 车用太,王 琦,黄积刚,等. 矿震及其前兆初探 [J]. 中国地震, 1993, 9(4): 334-340.
Che Yongtai, Wang Qi, Huang Jigang, et al. Mining earthquake and its precursor [J]. Earthquake Research in China, 1993, 9(4): 334-340.
- [5] 何满潮. 深部的概念体系及工程评价指标 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 854-2 858.
He Manchao. Conception system and evaluation indexes for deep engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 854-2 858.
- [6] Young R P, Talebi S, Hutchins D A. et al Analysis of mining-induced microseismic events at Strathcona Mine, Subdury, Canada [J]. Pure and Applied Geophysics PAGEOPH, 1989, 129: 3-4.
- [7] 赵毅鑫. 煤矿冲击地压机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2006.
- [8] 陆菜平, 窦林名, 王耀峰, 等. 坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 450-456.
Lu Caiping, Dou Linming, Wang Yaofeng, et al. Microseismic effect of coal materials rockburst failure induced by hand roof [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 450-456.
- [9] 杨叔子, 吴 雅, 轩建平, 等. 时间序列分析的工程应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
- [10] Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis, forecasting and control [M]. Holden Day Inc., 1976.