

微震信号初至拾取的 AIC 算法及其分析

赵震华^{1,2}, 张杏莉^{1,2}, 卢新明^{1,2}

(1. 山东科技大学 计算机科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省智慧矿山信息技术重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:为了提高微震信号 P 波初至到时的拾取精度,对微震信号初至拾取的赤池信息量准则(AIC)算法包括 AR-AIC 算法、VAR-AIC 算法进行分析和对比,给出 AR 模型阶数 M 、特征函数、时窗长度对拾取结果影响及其选取规律。结果表明:AR 模型阶数 M 对 AR-AIC 算法的计算精度和计算速度有较大影响,AR 模型阶数 M 越大,算法计算速度越慢,AR 模型阶数 M 应选择 $AIC(M)$ 最小值时的阶数 M 或者选择 $AIC(M)$ 最小值稍前的阶数 M ;特征函数、时窗长度对 VAR-AIC 算法的计算精度有影响,特征函数建议选择 CF_4 ,时窗长度建议选择 600~1 000 个采样点,时窗结束时刻为信号最大振幅值时刻,开始时刻为信号最大振幅时刻向前移动 600~1 000 个采样点。

关键词:P 波初至拾取;微震信号;模型阶数;特征函数;时窗长度

中图分类号:TP391

文献标志码:A

AIC algorithm and its analysis for initial picking of micro-seismic signals

ZHAO Zhenhua^{1,2}, ZHANG Xingli^{1,2}, LU Xinming^{1,2}

(1. College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Shandong Province Key Laboratory of Wisdom Mine Information Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of picking up the first arrival time of P-wave of micro-seismic signals, this study made an analysis and comparison of the AIC algorithms including AR-AIC algorithm and VAR-AIC algorithm. The influence and selection rules of AR model order M , characteristic function and time window length on the performance of the algorithm were obtained. The results show that the order of AR model has a great influence on the accuracy and speed of AR-AIC algorithm. The larger the order M of AR model is, the slower the calculation speed is. The order M of AR model should be selected when $AIC(M)$ is the minimum value or before the minimum value of $AIC(M)$. The characteristic function and the length of time window have influence on the calculation accuracy of VAR-AIC algorithm. CF_4 is recommended to be selected as the characteristic function, and 600~1 000 sampling points are recommended to be selected for the length of time window. The end time of time window is the time of maximum amplitude value of signals, and the starting time is the time of maximum amplitude of signals, moving forward 600~1000 sampling points.

Key words: P-wave first arrival picking; micro-seismic signal; model order; characteristic function; time window length

收稿日期:2020-08-11

基金项目:国家重点研发计划专项资助(2017YFC0804406);国家自然科学基金项目(51904173);山东省高校科技计划项目(J18KA307)

作者简介:赵震华(1996—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为信号分析与处理。

张杏莉(1981—),女,山西芮城人,副教授,博士,主要研究方向为微地震信号分析和处理,本文通信作者。

E-mail:xlzhang_only@163.com

在冲击地压微震监测技术中,微震信号 P 波初至到时对于震源准确定位、冲击地压预测预警具有重要的意义^[1]。微震信号初至拾取的高准确性是实现震源定位可靠性的前提。

目前,国内外针对微震信号初至拾取的方法主要有赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)算法^[2-3]、长短时窗平均能量比法(short-term average/long-term average, STA/LTA)^[4-5]、高阶统计量法^[6]、人工神经网络法^[7-8]等。STA/LTA 方法是目前常用的微震事件识别方法,利用时域信号短时窗能量平均值和长时窗能量平均值之比动态反映信号振幅变化,通过识别微震事件的初至时刻达到自动检测微震事件的目的。该方法实现简单,运算速度快,但误判率较高。高阶统计量法通过从非高斯信号的高阶统计量中获取有效信息,根据高阶统计量中的峰度或偏斜度曲线的变化自动拾取震相到时,是研究非高斯、非线性和非平稳信号的有力工具,但在信噪比低时识别精度较差^[9]。人工神经网络法在拾取震相初至时,一般将表征地震波的特征量如偏振特征、信噪比、频谱特征、振幅等作为输入参数,将震相类别作为输出,并使用样本集训练该网络使之获得模式分类识别功能,最后将地震波某一特征量输入训练好的网络,若输出值大于设定好的阈值,就认为获得了震相的类型。人工神经网络法具有良好的非线性映射功能,可并行处理大量信息,但存在工作量大、难以选择隐含层节点数和传递函数的缺点。

AIC 算法是目前应用最广泛、拾取精度较高的震相初至拾取算法之一,具有运算速度快、拾取准确率高、噪声鲁棒性强等特点。王李管等^[10]利用长短时窗法初步定位 P 波 S 波的到时区间,在到时区间内应用自回归赤池信息准则(auto regression-Akaike information criterion, AR-AIC)算法,计算出对应 P 波 S 波的初至到时,并结合时差阈值判别和时频图谱对拾取结果进行检测;贾瑞生等^[11]利用 Hilbert 变换计算出包络信号,设置包络阈值,搜索出震相初至的大致位置,并设置合适的时窗,利用 VAR-AIC 算法计算 P 波震相初至;尚雪义等^[12]利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)自适应地将地震数据和噪声分离为不同的本征模式函数(intrinsic model function, IMF),可靠地保留了 P 波震相到达幅值和相位谱,利用 VAR-AIC 算法识别 P 波初至。本研究对 AR-AIC、VAR-AIC 算法及其影响因素进行全面分析对比,并结合实测煤矿井下微震信号的处理,分析 AR 模型阶数、特征函数、时窗长度对算法效果的影响。

1 AIC 算法简介

AIC^[13]算法是由日本统计学家赤池弘次创立和发展的。AR-AIC^[2]算法是一种基于 AIC 信息准则的到时拾取方法,该方法基于微震信号的非平稳特征,将信号划分成若干个固定长度的波形段,然后进行自回归(auto regression, AR)处理,求解 AR 模型阶数和系数,AR-AIC 算法表示为^[14]

$$\text{AR-AIC}(k) = (k - M) \ln \sigma_1^2 + (N - M - k) \ln \sigma_2^2 \quad (1)$$

式中: M 为 AR 模型阶数; N 为微震信号长度; σ_1^2 和 σ_2^2 为噪声段和信号段拟合误差的均方根值,即 AR 模型系数; k 为噪声段和信号段的分界点。AR 模型系数最小值对应处为噪声段和信号段的分界点,也就是说, AIC 函数的最小值即为实际的信号初至到时。

Maeda^[3]对 AR-AIC 算法进行改进,提出 VAR-AIC 算法,该算法直接由微震波形数据计算 AIC 函数,求解 AIC 函数的最小值,该最小值对应的位置即为震相初至。VAR-AIC 算法表示为

$$\text{VAR-AIC}(k) = k \ln \{\text{VAR}(CF(X_i[1, k]))\} + (N - k - 1) \ln \{\text{VAR}(CF(X_i[k + 1, N]))\} \quad (2)$$

式中: $X_i[1, k]$ 为微震波形数据 X_i 中采样点 $1 \sim k$ 的振幅值, k 的范围为时间窗口内所有的微震信号采样点, N 为微震信号长度,VAR() 为方差函数,CF() 为特征函数。VAR-AIC 算法计算简单,拾取精度高,因此得到广泛应用。

2 AIC 算法的影响因素分析及参数确定

由式(1)和式(2)可知,影响两种 AIC 算法拾取精度的因素有 AR 模型阶数、特征函数和时窗长度。本部分对两种 AIC 算法的影响因素进行分析讨论并确定各参数的取值。

2.1 阶数 M 的选取

AR-AIC 算法中,当模型阶数 M 确定后,利用最小二乘法可求得 AR 模型系数 σ_1^2 和 σ_2^2 ,即该算法的主

要影响因素为 AR 模型阶数 M 。

AR 模型阶数 M 最常用的确定方法是 AIC 准则^[15], AIC 准则的表达式为

$$AIC(M) = N \ln \sigma^2 + 2M. \quad (3)$$

式中: M 为 AR 模型阶数; N 为微震信号长度; σ^2 为 AR 模型系数。取式(3)最小值时的 M , 即为 AR 模型阶数。利用式(3)得到某微震信号的 AIC 准则曲线如图 1 所示。

由图 1 可见, AIC(M) 值在 $M=100$ 时已经基本趋于稳定, 在 $M=265$ 时到达最小值。 M 取 25、50、100、200、265 和 300 时, AR-AIC 算法对某微震信号的拾取结果如图 2 所示。

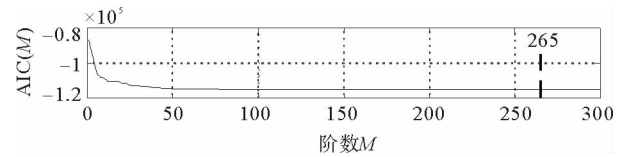
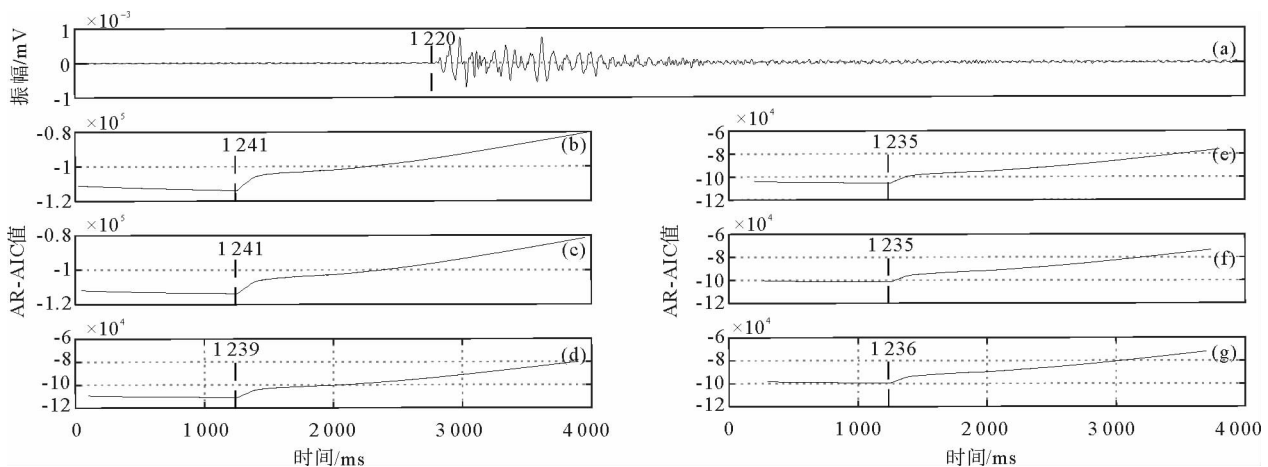


图 1 AIC 准则曲线图

Fig. 1 AIC criterion curve



(a) 为手工拾取结果; (b)~(g) 分别为 AR-AIC 算法在 M 为 25、50、100、200、265 和 300 时的拾取结果。

图 2 不同 AR 模型阶数 M 影响计算结果

Fig. 2 Calculation results of difference AR model order M

由图 1 和图 2 可知, 当 $M=50$ 和 100 时, M 值偏小, AIC(M) 值还未稳定, AR-AIC 算法拾取结果与手工拾取结果差距较大; 当 $M=200$ 和 265 时, AIC(M) 值已基本稳定, 拾取结果与手工拾取结果差异较小; 当 $M=300$ 时, AIC(M) 值已经稳定, 拾取结果与手工拾取结果差异相对较小。结果表明 AIC 准则确定的 AR 模型阶数能够使 AR-AIC 算法取得相对良好的效果。

AR-AIC 算法的计算时间会随着 AR 模型阶数 M 的增大而增加。以长度 $N=4\ 000$ 的微震信号为例, 使用 AR-AIC 算法在不同阶数 M 下的计算时间见表 1。由表 1 可知, 当 M 值增大时, 算法耗时会显著增加。因此, 在选择 AR 模型阶数时, 建议选择 AIC(M) 最小值时的阶数 M 或者选择 AIC(M) 最小值稍前的阶数 M , 但还需不断计算, 以保证该 M 值时拾取的初至到时与 AIC(M) 最小值时的 M 值拾取的初至到时相差不大, 既保证拾取结果, 又能适当降低算法运行时间。

2.2 特征函数的选取

特征函数对微震信号的初至到时拾取至关重要, 选取对微震信号振幅和频率变化反应灵敏的特征函数, 会提高算法对微震信号初至到时的拾取精度。

表 1 不同 AR 模型阶数 M 的计算时间

Tab. 1 Calculation time of different AR model order M

AR 模型阶数 M	时间/s
50	8.93
100	27.09
200	105.02
265	193.35
300	265.02

如式(2)所示,VAR-AIC 算法的主要影响因素是能够影响微震波形的特征函数(characteristic function, CF),特征函数的选取会直接影响初至到时拾取的结果^[16]。目前常用的特征函数有:

$$CF_1(i) = |X_t(i)|, \quad (4)$$

$$CF_2(i) = X_t(i)^2, \quad (5)$$

$$CF_3(i) = X_t(i) - X_t(i-1), \quad (6)$$

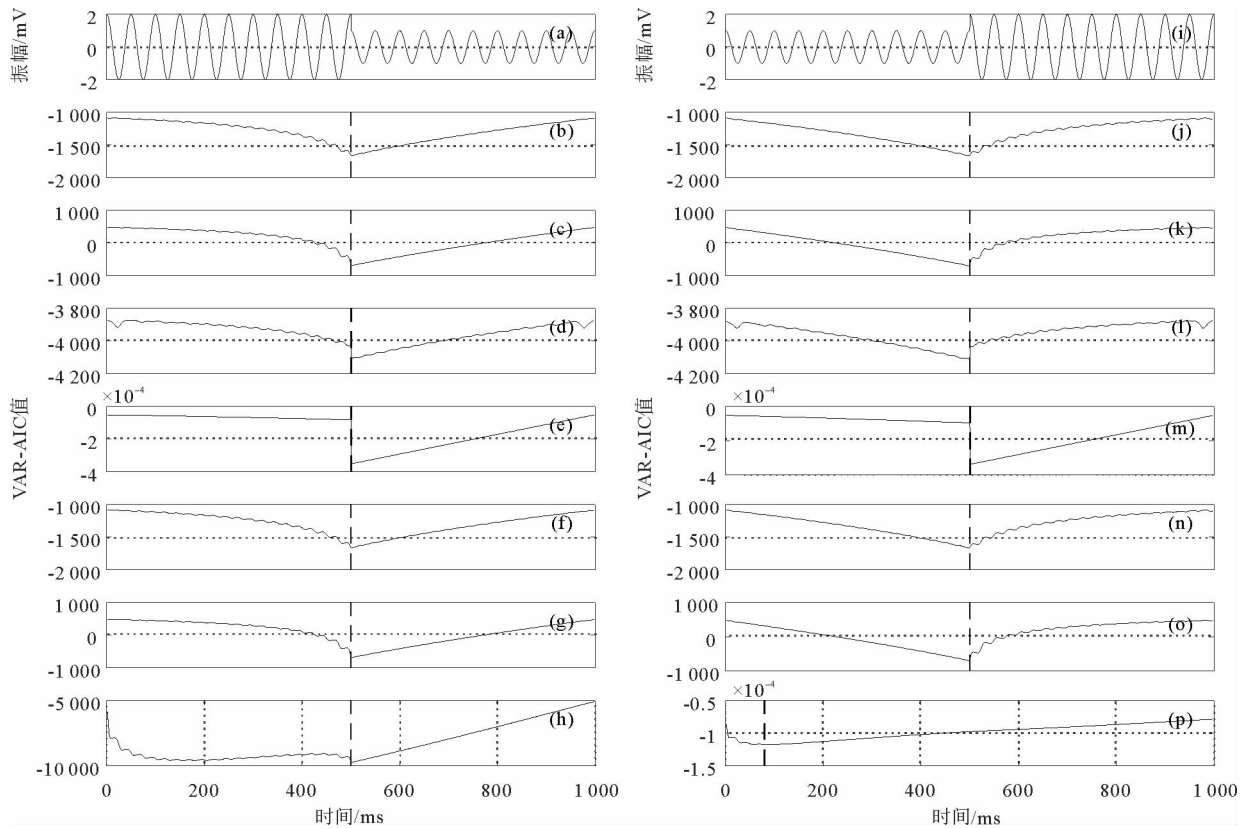
$$CF_4(i) = X_t(i)^2 - X_t(i-1)X_t(i+1), \quad (7)$$

$$CF_5(i) = \text{SUM}(|X_t(i)|), \quad (8)$$

$$CF_6 = \text{SUM}(|X_t(i)|^2), \quad (9)$$

$$CF_7(i) = \frac{X_t(i)^2}{i}. \quad (10)$$

利用 7 种特征函数分别对余弦函数进行分析,对振幅变化的响应特征如图 3 所示。



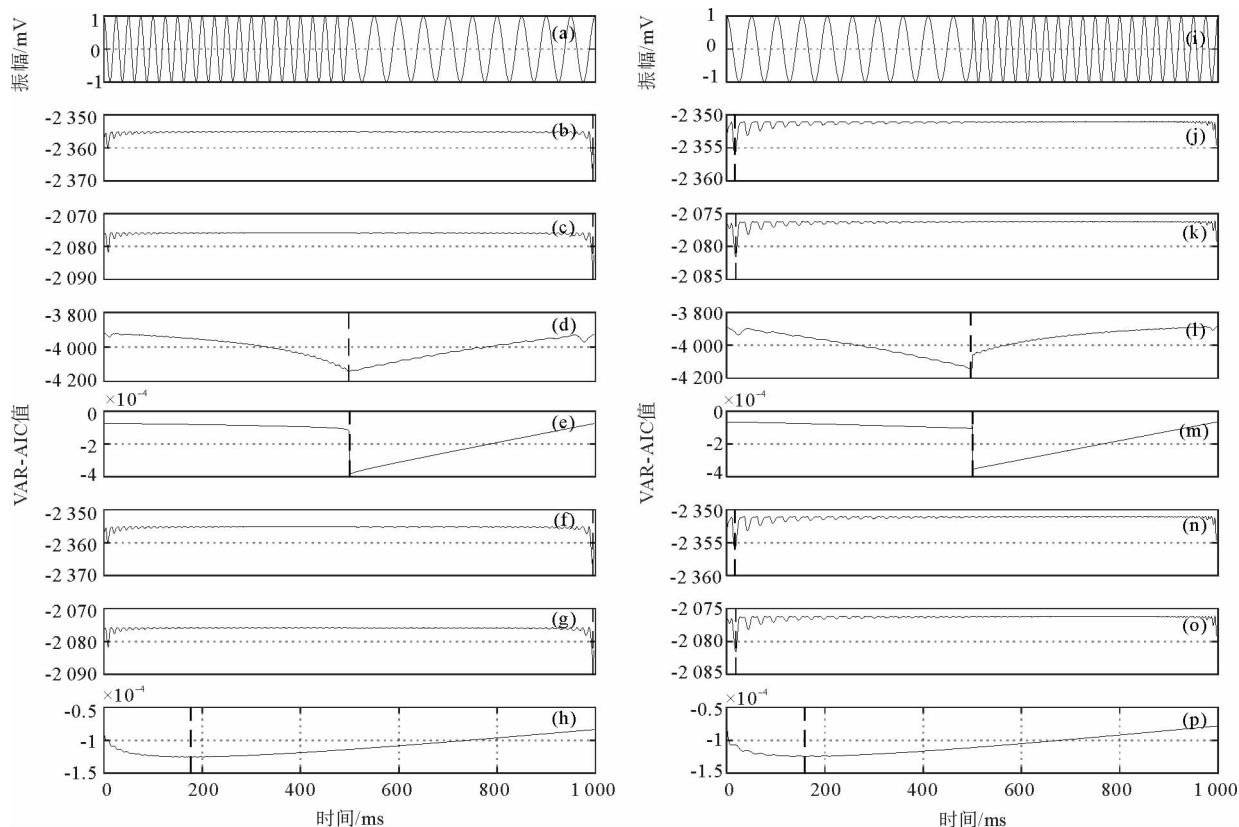
(a)和(i)为振幅变化的余弦信号;(b)和(j)、(c)和(k)、(d)和(l)、(e)和(m)、(f)和(n)、(g)和(o)、(h)和(p)分别为特征函数 $CF_1 \sim CF_7$ 的拾取结果。

图 3 7 种特征函数对振幅变化的响应

Fig. 3 Response of 7 characteristic functions to amplitude variation

由图 3 可见,特征函数 $CF_1 \sim CF_7$ 对图 3(a)的余弦信号振幅变化皆有响应,其中 CF_4 在分段点处的 VAR-AIC 值变化最大,响应最灵敏; CF_7 相比其他特征函数的响应程度稍弱一点。特征函数 $CF_1 \sim CF_6$ 对图 3(i)的余弦信号振幅变化皆有响应,其中 CF_4 的响应最灵敏; CF_7 的响应最弱,并且拾取到错误的分段点。

对频率变化的响应特征如图 4 所示。特征函数 CF_1 、 CF_2 、 CF_5 和 CF_6 对图 4(a)和图 4(i)余弦信号频率变化没有响应, CF_3 和 CF_4 对频率变化有响应。相比 CF_3 , CF_4 在分段点处的 VAR-AIC 值变化更大,响应更为灵敏, CF_7 虽对频率变化有响应,但响应程度较弱。



(a)和(i)为频率变化的余弦信号;(b)和(j)、(c)和(k)、(d)和(l)、(e)和(m)、(f)和(n)、(g)和(o)、(h)和(p)分别为特征函数 $CF_1 \sim CF_7$ 的拾取结果。

图4 7种特征函数对频率的响应

Fig. 4 Response of seven characteristic functions to frequency

由此得出的7种特征函数对振幅和频率变化的响应特性见表2。

表2 7种特征函数对振幅和频率的变化响应特性

Tab. 2 The response characteristics of seven characteristic functions to the variations of amplitude and frequency

特征函数	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7
振幅变化	有响应	有响应	有响应	响应灵敏	有响应	有响应	有响应
频率变化	无响应	无响应	有响应	响应灵敏	无响应	无响应	有响应

图5为VAR-AIC算法在7种特征函数作用下的某实测微震信号初至拾取结果。可见,VAR-AIC算法对7种特征函数作用下的微震信号都能进行初至拾取,但拾取结果受到一定影响。图5(d)和图5(e)中, CF_3 和 CF_4 作用下的微震信号拾取结果比 CF_1 、 CF_2 、 CF_5 、 CF_6 和 CF_7 更接近手工拾取结果,拾取结果更优,故建议选用特征函数 CF_3 或 CF_4 来进行微震信号初至拾取。

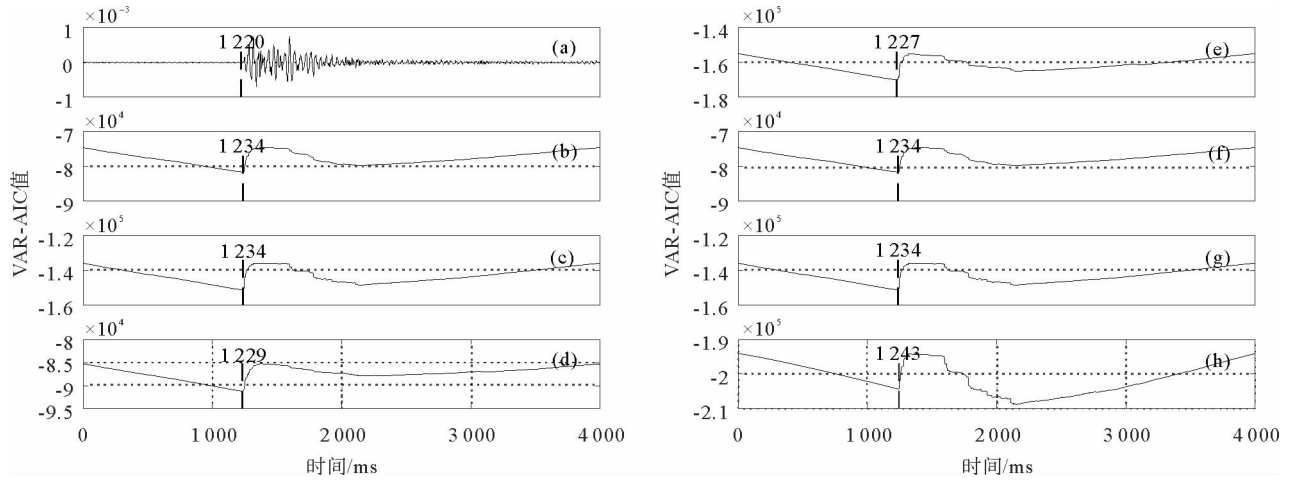
2.3 时窗长度

在VAR-AIC算法实际计算过程中,会出现AIC函数最小值不在信号初至位置的情况,如图6所示。

为避免此类情况的发生,将微震信号的振幅最大值时刻 p 作为时窗的结束时刻(如图7),从 p 向前取长度为 l 个采样点为初至拾取时窗,并在时窗内计算AIC函数最小值。为了分析时窗长度对拾取结果的影响,分别取 l 为200、400、600、1 000和1 200个采样点,且特征函数选择 CF_4 ,此时式(2)变为

$$\text{VAR-AIC}(k) = k \ln \{ \text{VAR}(CF_4(X_t[p-l, k])) \} + (N-k-1) \ln \{ \text{VAR}(CF_4(X_t[k+1, p])) \} \quad (11)$$

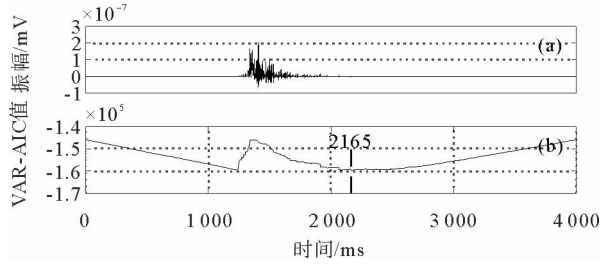
式中, p 为振幅最大值时刻, l 为时窗长度。



(a)为手工拾取结果;(b)~(h)分别为特征函数 $CF_1 \sim CF_7$ 作用下 VAR-AIC 算法拾取结果(虚线)

图 5 不同特征函数 VAR-AIC 算法拾取结果

Fig. 5 VAR-AIC algorithm picks the first arrival results using different characteristic functions



(a)为某微震信号;(b)为 VAR-AIC 算法拾取错误初至

图 6 VAR-AIC 算法拾取错误初至

Fig. 6 VAR-AIC algorithm picks up error first arrival

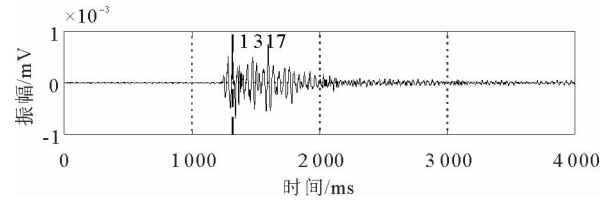


图 7 振幅最大值时刻 p

Fig. 7 Maximum amplitude moment p

VAR-AIC 算法对图 7 所示的微震信号拾取结果如图 8 所示。图 8(a)~8(f)分别为时窗长度为 200、400、600、800、1 000 和 1 200 个采样点的拾取结果,矩形框表示时窗长度。

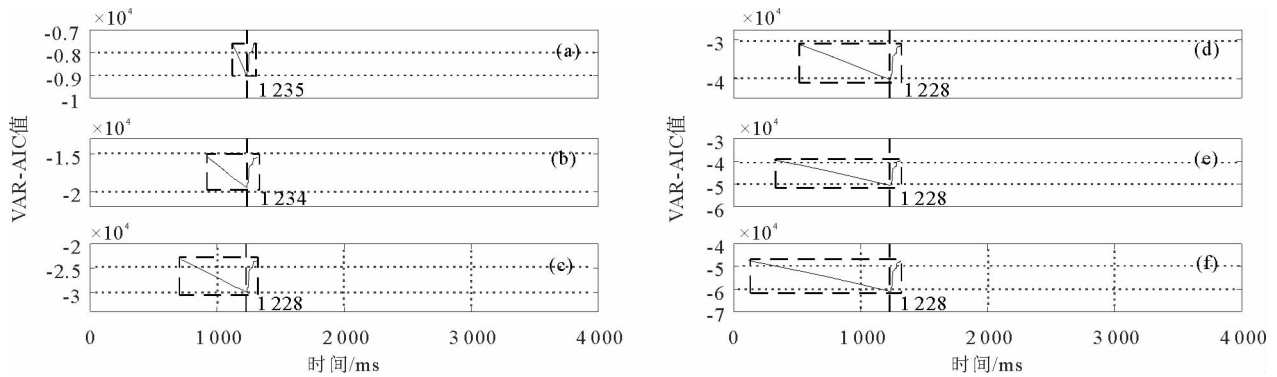


图 8 不同时窗长度的 VAR-AIC 算法拾取结果

Fig. 8 VAR-AIC algorithm picks up signals with different time window lengths

由图 8 可见,时窗长度对 VAR-AIC 算法的拾取结果有较大影响。图 8(a)和图 8(b)的拾取结果与手工拾取结果相差较大,而图 8(c)~8(f)的拾取结果与手工拾取结果误差仅为 8 个采样点。可见,当时窗长度过小时,时窗内手工拾取点后的微震数据占总时窗长度的 25% 以上,计算初至点前的方差偏大,从而导致拾取的初至点稍靠后。为保证拾取结果的准确性,建议在选择时窗长度时,开始时刻为信号最大振幅时刻向前移

动 600~1 000 个采样点,结束时刻选择信号最大振幅时刻,且时窗内需要包含信号初至时刻。

3 影响因素实例验证

3.1 AR 模型阶数 M 的选取

选取 10 条实测微震信号记录编号 1~10,如图 9 所示。

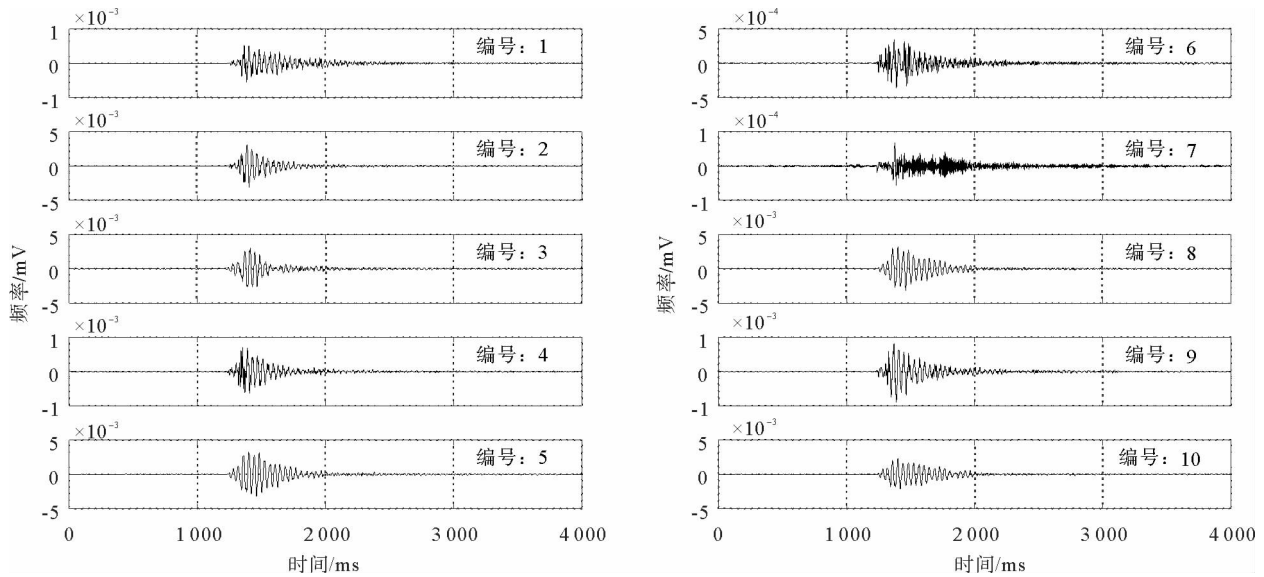


图 9 10 条实测微震信号记录

Fig. 9 10 micro-seismic signal records

利用 AIC 准则得到 10 条微震信号记录的 $AIC(M)$ 的最小值,并利用 AR-AIC 算法得到各阶数 M 下的初至时刻结果如表 3 所示,AR-AIC 算法的计算用时如表 4 所示。

表 3 各阶数 M 下的初至时刻

Tab. 3 The first arrival time of each order

ms

信号编号	阶数				AIC(M)最小值时的 结果(阶数 M)	手工拾取
	50	100	200	300		
1	1 248	1 245	1 243	1 243	1 243 (201)	1 228
2	1 243	1 243	1 237	1 239	1 236 (240)	1 222
3	1 235	1 236	1 230	1 230	1 229 (270)	1 210
4	1 240	1 240	1 235	1 234	1 233 (221)	1 214
5	1 249	1 247	1 241	1 243	1 240 (234)	1 224
6	1 236	1 236	1 229	1 232	1 231 (253)	1 212
7	1 247	1 248	1 242	1 242	1 242 (181)	1 223
8	1 240	1 240	1 234	1 234	1 234 (216)	1 220
9	1 242	1 242	1 238	1 237	1 238 (206)	1 213
10	1 255	1 254	1 250	1 250	1 248 (243)	1 232

由表 3 可知,在 $AIC(M)$ 最小值时的阶数 M 的拾取结果相比于其他阶数的结果更接近手工拾取,效果更好。由表 4 可知,运行时间会随着阶数的增大而增加,因此阶数 M 应选择 $AIC(M)$ 最小值时的阶数 M 或者选择 $AIC(M)$ 最小值稍前的阶数 M ,既保证拾取效果,也尽可能减少算法的计算时间。

3.2 特征函数的选取

选取图 9 中的 10 条实测微震信号,利用 VAR-AIC 算法分别计算 10 条微震信号记录在不同特征函数下的拾取结果,如表 5 所示。

表 4 AR-AIC 算法在各阶数 M 下的计算用时

Fig. 4 Running time of AR-AIC algorithm in different orders M

s

信号编号	阶数				AIC(M)最小值时的 用时(阶数 M)
	50	100	200	300	
1	8.71	30.97	121.43	305.72	135.42 (201)
2	8.65	25.47	99.83	267.45	150.29 (240)
3	9.88	24.87	81.04	201.13	159.95 (270)
4	8.65	23.91	88.02	209.97	104.08(221)
5	8.19	23.32	91.70	185.66	115.55(234)
6	8.72	23.38	81.32	214.96	128.85(253)
7	8.16	23.29	78.20	222.91	69.34(181)
8	8.20	23.39	87.61	184.35	94.46(216)
9	8.27	23.22	78.04	180.04	83.24(206)
10	9.39	27.94	80.86	252.90	175.82(243)

表 5 不同特征函数下的初至时刻

Tab. 5 First arrival time under different characteristic functionsms

ms

信号编号	特征函数							手工拾取
	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	
1	1 238	1 238	1 237	1 235	1 238	1 238	1 250	1 228
2	1 237	2 162	1 232	1 230	1 237	2 162	1 255	1 222
3	1 222	2 068	1 234	1 222	1 222	2 068	1 251	1 210
4	2 122	2 122	1 227	1 227	2 122	2 122	2 122	1 214
5	1 243	1 243	1 229	1 234	1 243	1 243	2 013	1 224
6	1 230	1 230	1 225	1 223	1 230	1 230	2 254	1 212
7	1 235	1 235	1 235	1 234	1 235	1 235	2 424	1 223
8	1 236	1 236	1 232	1 227	1 236	1 236	2 022	1 220
9	1 229	1 230	1 228	1 229	1 229	1 230	2 249	1 213
10	1 243	1 243	1 243	1 242	1 243	1 243	2 111	1 232

由表 5 可知,与手工拾取相比,特征函数 CF_4 作用下的微震信号更接近于手工拾取结果,鲁棒性更强,因此特征函数选择 CF_4 。此外,其他特征函数作用的微震信号在拾取初至时会出现拾取错误的情况,与图 6 所示结果一样,原因为初至时刻的 AIC 值不是 AIC 函数的全局最小值,导致拾取错误。

3.3 时窗长度的选取

同样选取图 9 所示的 10 条微震信号,利用式(11)计算 10 条微震信号记录在不同时窗长度下的拾取结果,特征函数选择 CF_4 。时窗的开始位置为结束位置向前移动的时窗大小,结束位置为最大振幅值时刻,拾取结果如表 6 所示。

由表 6 可知,与特征函数 CF_4 的拾取结果相比,时窗长度在 200~400 个采样点之间的拾取效果与 CF_4 的拾取效果相差较大,600~1 200 个采样点之间的拾取效果更接近于特征函数 CF_4 的拾取结果,鲁棒性更强,故时窗长度应选择在最大振幅值之前的 600~1 200 个采样点。

通过对以上 10 条实测微震信号记录的研究及分析,得出的结论与第 2 部分中给出的建议基本一致,验证了所得结论的正确性。

4 AIC 算法应用分析

利用两种 AIC 算法及其改进算法拾取微震信号初至应用较多。由于 AR-AIC 算法本身存在计算量巨大、拾取精度不高、计算时间长等缺点,决定了该算法在微震信号初至拾取中应用相对较少。Leonard^[17]和王海军等^[18]分别对 AR-AIC 算法进行改进,提出混合初至估计的方法,改善了低信噪比震相的拾取效果。

而在改进 VAR-AIC 算法时,一种思路是待拾取的信号波形进行改变,例如本研究利用特征函数作用于信号波形,使其对信号初至拾取产生影响。刘希强等^[19]提出利用三阶累积量进行精细震相拾取的 TOC-AIC (third-order cumulant AIC)算法,即用两个时间段数据的三阶累积量代替 VAR-AIC 算法中的方差。TOC-AIC 算法无论是在信噪比较低还是较高的情况下,得到的震相初至结果与实际结果都非常接近。

表 6 不同时窗长度下的初至时刻

Tab. 6 First arrival time under different window lengths

信号编号	时窗长度						CF_4	最大振幅值 时刻/ms
	200	400	600	800	1 000	1 200		
1	1 237	1 236	1 236	1 230	1 236	1 236	1 235	1 367
2	1 320	1 231	1 231	1 231	1 231	1 231	1 230	1 390
3	1 341	1 340	1 223	1 223	1 223	1 223	1 222	1 414
4	1 222	1 222	1 228	1 228	1 228	1 228	1 227	1 354
5	1 246	1 235	1 235	1 235	1 235	1 235	1 234	1 401
6	1 235	1 224	1 224	1 224	1 224	1 224	1 223	1 371
7	1 235	1 235	1 235	1 235	1 235	1 235	1 234	1 379
8	1 245	1 235	1 229	1 229	1 228	1 228	1 227	1 401
9	1 230	1 227	1 230	1 230	1 230	1 230	1 229	1 371
10	1 245	1 245	1 245	1 243	1 243	1 243	1 242	1 401

由于 VAR-AIC 算法存在拾取错误的问题,衍生出另外一种思路,即对微震信号长度进行限制,避免拾取错误。崔云洁等^[20]应用小波阈值降噪方法对微震信号进行降噪,利用 STA/LTA 方法进行预拾取,获取初至大致时刻,并以该时刻为基准,向前向后各截取 500 个采样点构成时间窗口,在时窗内利用 VAR-AIC 算法拾取初至;朱权洁等^[16]对原有的小波包去噪法模型进行改造,建立基于多去噪规则的多阈值去噪法,在 VAR-AIC 算法的基础上,提出了具有时窗限制的 I-AIC(improved AIC)算法,精确拾取水力压裂微震信号 P 波初至,与其他 4 种方法相比,I-AIC 算法对去噪结果更为敏感,拾取精度、计算速度更优。

通过对上述几种 AIC 改进算法的应用分析,说明对两种 AIC 算法的影响因素进行研究很有必要,可以为 AIC 算法在特征函数或时窗长度上进一步改进,以获得精度更高的初至拾取结果提供参考。

5 结论

通过对 AIC 算法的实验和应用分析,得出以下结论:

- 1) AR-AIC 算法中,AR 模型阶数 M 对拾取初至结果有较大影响。 M 值越大,算法复杂度越高,建议选择 $AIC(M)$ 最小值时的阶数 M 或者选择 $AIC(M)$ 最小值稍前的阶数 M ,该 M 值下算法拾取的初至点与 $AIC(M)$ 最小值时的阶数 M 值拾取的初至点相差较小。这样既能保证拾取效果,又能适当降低算法计算用时。
- 2) 特征函数的选取对信号初至拾取有较大影响,建议选用对振幅和频率均响应敏感的特征函数 $CF_4(i) = X_i(i)^2 - X_i(i-1)X_i(i+1)$,拾取效果更好。
- 3) 为避免拾取错误,应确定合适的时窗长度,建议时窗长度为 600~1 000 个采样点,时窗内需包含信号初至,时窗结束时刻通常选择信号最大振幅值时刻,时窗开始时刻为信号最大振幅时刻向前移动 600~1 000 个采样点。这样既能保证拾取效果、减少拾取误差,又缩短了计算时长。

参考文献:

- [1]刘畅,新平,李欣.3 种远震 P 波到时拾取方法的比较及其参数优化[J].地震学报,2018,40(4):419-429.
- LIU Chang, JIN Ping, LI Xin. A comparative study on three methods of onset-time determination for teleseismic P arrivals and parameters optimization[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(4): 419-429.
- [2]MORITA Y, HAMAGUCHI H. Automatic detection of onset time of seismic waves and its confidence interval using the autoregressive model fitting[J]. Zisin, 1984, 37(3): 281-293.
- [3]MAEDA N. A method for reading and checking phase times in autoproccessing system of seismic data[J]. Zisin, 1985, 38: 365-380.
- [4]ALLEN R V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. Bulletin of the Seismological Society of

- America, 1978, 68(5):1521-1532.
- [5] ALLEN R V. Automatic phase pickers; Their present use and future prospects[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(6):225-242.
- [6] 盛冠群, 李振春, 王维波, 等. 基于小波分解与高阶统计量的微地震初至拾取方法研究[J]. 石油物探, 2015, 54(4):388-395.
SHENG Guanqun, LI Zhenchun, WANG Weibo, et al. A new automatic detection method of microseismic events based on wavelet decomposition and high-order statistics[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(4):388-395.
- [7] BAER M, KRADOLFER U. An automatic phase picker for local and teleseismic events[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(4):1437-1445.
- [8] 庄东海, 肖春燕, 颜永宁. 利用人工神经网络自动拾取地震记录初至[J]. 石油地球物理勘探, 1994, 29(5):659-664.
ZHUANG Donghai, XIAO Chunyan, YAN Yongning. Seismic first arrival pickup using artificial neural network[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1994(5):659-664.
- [9] 李希亮, 刘希强, 董晓娜, 等. 高阶统计量方法在地球物理学中的应用与展望[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2):201-205.
LI Xiliang, LIU Xiqiang, DONG Xiaona, et al. Application and expectation of higher-order statistics in Geophysics[J]. North-western Seismological Journal, 2010, 32(2):201-205.
- [10] 王李管, 汪辉, 赵君杰. 单分量微地震信号的 P 波 S 波到时自动拾取方法[J]. 科技导报, 2016, 34(2):184-189.
WANG Liguan, WANG Hui, ZHAO Junjie. An automatic P-and S-wave onset-picking designed for single-component microseismic signals[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(2):184-189.
- [11] 贾瑞生, 谭云亮, 孙红梅, 等. 低信噪比微震 P 波震相初至自动拾取方法[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8):1845-1852.
JIA Ruisheng, TAN Yunliang, SUN Hongmei, et al. Method of automatic detection on micro-seismic P-arrival time under low signal to noiseratio[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8):1845-1852.
- [12] SHANG X Y, LI X B, Morales-Esteban A. Enhancing micro-seismic P-phase arrival picking: EMD—Cosine function based denoising with application to the AIC picker[J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, DOI:10.1016/j.jppgeo.2017.(9):12.
- [13] Akaike H T. A new look at the statistical model identification[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on 1974, 19(6):716-723.
- [14] SLEEMAN R, VAN ECK T. Robust automatic P-phase picking: An on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings[J]. Physics of the Earth Planet Inter, 1999, 113(1/2/3/4):265-275.
- [15] 陈国强, 赵俊伟, 黄俊杰, 等. 基于 Matlab 的 AR 模型参数估计[J]. 工具技术, 2005(4):39-40.
CHEN Guoqiang, ZHAO Junwei, et al. Liu Wanli. Matlab-based parameter Estimation of AR model[J]. Tool Engineering, 2005(4):39-40.
- [16] 朱权洁, 姜福兴, 魏全德, 等. 煤层水力压裂微震信号 P 波初至的自动拾取方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10):2319-2333.
ZHU Quanjie, JIANG Fuxing, WEI Quande, et al. An automatic method determining arrival times of microseismic P-phase in hydraulic fracturing of coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10):2319-2333.
- [17] LEONARD M. Comparison of manual and automatic onset time picking[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6):1384-1390.
- [18] 王海军, 刘贵忠, 范万春. 广义分维在地震信号初至检测中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2004(6):634-637.
WANG Haijun, LIU Guizhong, FAN Wanchun. The application generalized fractal in arrival time detection of sesimograms [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2004(6):634-637.
- [19] 刘希强, 周彦文, 曲均浩, 等. 应用单台垂向记录进行区域地震事件实时检测和直达 P 波初动自动识别[J]. 地震学报, 2009, 31(3):260-271.
LIU Xiqiang, ZHOU Yanwen, QU Junhao, et al. Real-time detection of regional events and automatic P-phase identification from the vertical component of a single station record[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(3):260-271.
- [20] 崔云洁, 贾瑞生, 宋培培, 等. 一种微震震相到时自动拾取方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(2):16-25.
CUI Yunjie, JIA Ruisheng, SONG Peipei, et al. An automatic picking method for onset time of microseismic phase[J]. Journal of Shandong University and Technology(Natural Science), 2018, 37(2):16-25.

(责任编辑: 齐敏华)