文章编号：1004—5589（2016）04—1127—06

基于遗传算法与 Levenberg-Marquardt 算法构建微震速度模型

孙嘉骏，曾晓献

吉林大学 仪器科学与电气工程学院，长春 130026

摘要： 为在射孔时间未知条件下达到微震速度模型矫正的目的，采用遗传算法交叉互换搜索最优初值和 Levenberg-Marquardt 算法局部锁定最优解的方式来构建微震速度模型。通过 6 层层状模型及井下不同数量检波器进行试算，随着检波器数量增加，构建的速度模型准确度越高，当检波器数量增加到 20 个时，误差约 13.4×10^{-3}，目的层检波器数量越多，构建目的层速度误差越小，第 5 层检波器由 1 增加到 3 个时，精度提高 9.1×10^{-3}，并且反演震源与实际震源距离相差 10 m，说明此方法在射孔时间未知条件下可以良好构建速度模型。

关键词： 微地震；速度模型；遗传算法；Levenberg-Marquardt 算法

中图分类号： P631.4 **文献标识码：** A **doi：** 10.3969/j.issn.1004-5589.2016.04.024

Structuring velocity model of microseism based on genetic algorithm and Levenberg-Marquardt algorithm

SUN Jia-jun，ZENG Xiao-xian

College of Instrument Science and Electrical Engineering，Jilin University，Changchun 130026，China

Abstract: To achieve the goal of correcting velocity models when the perforation time is unknown，we proposed a method that uses genetic algorithm to get eligible starter and uses Levenberg-Marquardt algorithm to lock optimal solution for constructing velocity model. Through numerical examples on a six layered model with different quantity detectors under mine，we found that the more the number of receivers，the higher the accuracy of constructed velocity model. When the number of receivers reaches 20，the error is about 13.4×10^{-3}. And the error of constructed velocity models reduces when we increase the receiver number. When we increase the number of receivers in fifth layer from 1 to 3，the precision improved 9.1×10^{-3}，and the distance of inversed source location and real source location is 10 m，which demonstrates that our method can construct good velocity model when the perforation time is unknown.

Key words: microseism; velocity model; GA; Levenberg-Marquardt algorithm

0 引言

水力压裂微地震监测技术是通过观测注水压裂过程产生的微弱地震事件描述地下裂缝的形态特征及分布规律的一项技术[1]，速度模型的准确与否对定位微地震事件位置十分重要[2]，传统速度模型的构建通过射孔与声波测井的先验信息进行校正[3]，而其难点主要在于：①由于水饱和度，孔

收稿日期：2016-04-18；改回日期：2016-06-25
基金项目：国家科技重大专项（2011ZX0560-003）资助.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

隙度，以及前期开采造成地下层位速度发生变化，导致声波测井无法直接用于震源的定位；②p 波与 s 波旅行时间初至方法要求射孔时间准确，而在野外实际工作中很难实现；③测井过程通常在裸眼井中进行，会受到泥浆侵袭，应力聚集等限制[4]。

一些学者通过利用改进算法与射孔资料联合反演微地震速度模型。如 Pei 等分别使用 Ocamm[5] 与快速退火的方法进行速度模型的反演，Bardainne[6] 等借鉴模拟退火算法思路，提出一种约束层析成像法建立速度模型，然而这些方法都局限于射孔时间已知，在未知情况下很难进行速度模型的反演。

遗传算法是 20 世纪 60 年代由 J. Holland 提出，在地震勘探中得到广泛应用。如田连玉借鉴退火算法与遗传算法联合的思想处理地震勘探剩余静校正问题[7]，黄进腊通过遗传算法进行波阻抗的反演研究[8]，王泉栋等利用遗传算法全局搜索的能力进行了微地震震源位置的反演[9]。遗传算法在搜索过程中具有不需要计算目标函数的导数，特别适用于离散问题以及非线性问题的优势，也具有计算量巨大，耗时多的缺点，单纯的利用遗传算法进行搜索，对于范围较大的区域很难找到全局最优解[10]。

为了在射孔时间未知条件下，寻找比较高效的构建速度模型的方法，笔者以检波器理论到时与实际到时双差分来作为目标函数，通过遗传算法[11]交叉互换的方式培育出多个速度子代，利用射线追踪[12]，在满足目标函数设定阈值前提下，通过 Levenberg-Marquardt 算法[13]得到满足最终阈值的速度模型，不仅解决了射孔时间未知的问题，而且具有比较高的效率。

1 基本原理

1.1 遗传算法交叉互换培育优良子代速度模型

以声波测井速度为初值，得到理论到时与实际到时之差 t_{total}，求取相应速度变量 v'，并将其以 a 为间隔进行等分，速度初值以 a 进行交叉互换得到子代，直到最终速度子代 t_{total} 符号改变为止。

$$t_{total} = \sum_{1}^{i} (ti_{teo} - ti_{act}) \tag{1}$$

则可以得到时间差值所占的比例 p

$$p = \frac{|t_{total}|}{|t_{act} - t_{total}|} \tag{2}$$

以时间差值加和的均值所占的比例求得相应速度变量 v'，v_{mean} 为声波测井的平均值。

$$v' = p^* \ v_{mean} \tag{3}$$

利用射线追踪，计算在每一个子代时间双差分值 E，对 E 最小子代进行保留，做为最终速度模型初值。

$$E = \sqrt{\sum_{1}^{i} (ti_{teo} - ti_{act})^2} \tag{4}$$

1.2 Levenberg-Marquardt 算法搜索最优速度模型

Levenberg-Marquardt 算法[13]是最优化算法的一种，是求解非线性问题的一个经典的方法。m_k 为模型参数矩阵，是遗传算法交叉变异中筛选后的速度 $m_k = [v_1 \quad v_3 \quad \cdots\cdots \quad v_n]$，$J_{m_k}$ 为雅克比矩阵，

$$J_{ij} = \begin{bmatrix} -\dfrac{h_1}{v_1^2\sqrt{1-p_1^2v_1^2}} & \cdots & -\dfrac{h_j}{v_j^2\sqrt{1-p_1^2v_j^2}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\dfrac{h_1}{v_1^2\sqrt{1-p_i^2v_1^2}} & \cdots & -\dfrac{h_j}{v_j^2\sqrt{1-p_i^2v_j^2}} \end{bmatrix} \tag{5}$$

E_{m_k} 为残差项:

$$E_{m_k} = Q_{m_k} - b \tag{6}$$

Q_{m_k} 是理论走时 $Q_{m_k} = [t1_{teo} \quad t2_{teo} \quad t3_{teo} \quad t4_{teo} \quad \cdots\cdots \quad tn_{teo}]$，$b$ 为观测走时 $b = [t1_{act} \quad t2_{act} \quad t3_{act} \quad t4_{act} \quad \cdots\cdots \quad tn_{act}]$，Levenberg-Marquardt 算法能快速收敛于使残差项最小的值，当 E 满足所设定的阈值 λ_2 时，输出速度模型；如果结果未达到设定阈值，则将 a 减小，重新计算。

1.3 速度模型反演步骤

虽然声波测井曲线所建立的速度模型不能直接应用于震源定位反演，但因其能准确反映地层的层位与厚度，所以以此建立一个一维模型，通过文中方法而得到的各层速度，二者结合反演出最终的速度模型。反演步骤（以 p 波为例，s 波类似）如下:

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1) 测井资料中拾取初始速度模型 $v = [v_1 \quad v_2 \quad \cdots \quad v_n]$，通过射线追踪判断与实际到时差值符号 t_{total} (以偏小为例)。

(2) 加以 a 的扰动求得速度模型 (图 1)，直到检波器接收到时大于实际到时为止。

(3) 以 p 为百分比，将每一个扰动速度模型进行分解，交叉互换得到多个子代速度模型 $v = [v_1 + v' \quad v_2 \quad \cdots \quad v_n]$ 等。

(4) 通过射线追踪，计算每一个速度模型与实际到时之差，筛选出时间差较小的一组速度模型作为初始速度模型 $v = [v_{11} \quad v_{22} \quad v_{33} \quad \cdots \quad v_{nn}]$。

(5) 通过 Levenberg-Marquardt 算法，以 v 为初值条件进行搜索，得到满足 E 最小的速度模型。

(6) 判断时间差值是否满足设定的阈值 λ_2，如果满足，则输出作为反演速度模型结果，否则调整 a 的值，重复 (2) ~ (5)。

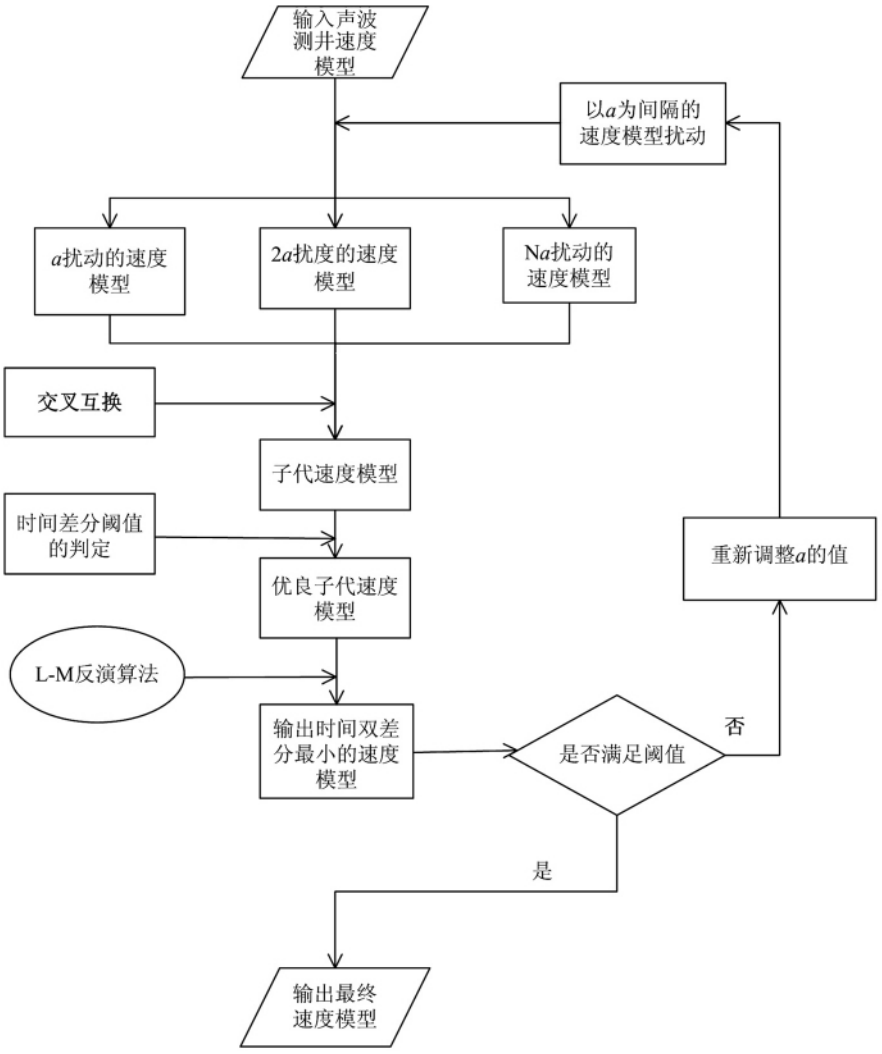


图 1　微地震速度模型构建流程图

Fig. 1　Forward algorithm flowchart of simulating microseism velocity models

2　模型试算

2.1　数据正演模拟

建立一个水平方向同性，竖直方向异性的 6 层层状速度模型 (表 1)。以 p 波模拟地下传播波形，以 $v = [3\,800$ m/s，1 000 m/s，1 600 m/s，2 000 m/s，2 200 m/s，2 700 m/s] 模拟声波测井初始速度模型。震源坐标位置为 $x = 225$ m，$y = 147$ m，

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$z=-900$ m，以黄色原点表示（图 2），起始检波器的坐标为 $x=500$ m，$y=200$ m，$z=0$ m，以 -80 m 为间隔沿着 z 轴方向向下移动，且检波器序号由 10 到 1，红色射线代表波形的传播路径且每一条射线均满足 Snell 定律及 Fermat 原理，波形的传播速度以地层颜色的深度表示，颜色越深速度越大。通过射线追踪计算到达每一个检波器的时间，由于模拟的是井中检波器，信号受到外界干扰较小，信噪比较高，所以用雷克子波加入信噪比为 10 dB 的高斯白噪声，通过滤波处理后模拟检波器接收原始波形，以 10 个检波器波形为例（图 3），横坐标代表检波器序号，纵坐标代表采样时间。

表 1 地层模型参数

Table 1 Parameters for assumed models

层位	深度/m	直达 p 波的速度/m·s^{-1}
1	0～100	1 200
2	100～250	1 600
3	250～350	2 200
4	350～600	2 600
5	600～800	3 000
6	800～1 100	3 200

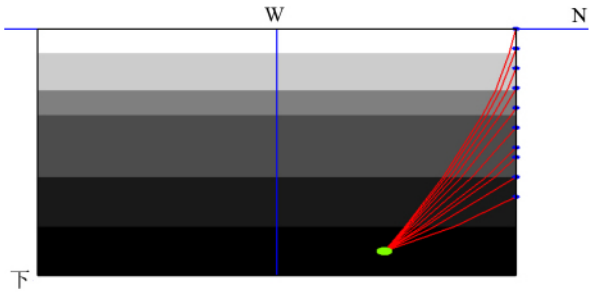


图 2 射线追踪模型图

Fig. 2 Models for ray tracing

2.2 反演结果比较

将信号小波阈值去噪[14]，50 倍前后能量窗比拾取每一道信号，记录下每道信号初至时间，以时间双差分函数作为目标函数，当目标函数值最小时，为反演的震源坐标。x 方向 30～330 m，y 方向 60～270 m，z 轴方向 -800～$-1\,000$ m，为震源可能发生区域，以 5 m 为间隔，进行离散化，每一个正方体代表需要扫描的假定震源。

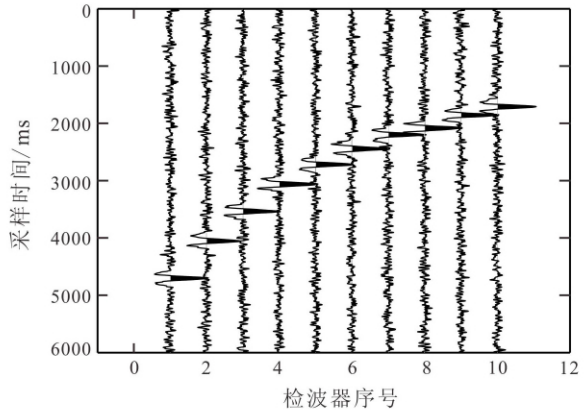


图 3 10 个检波器接收的波形图

Fig. 3 Waveform image of 10 receivers

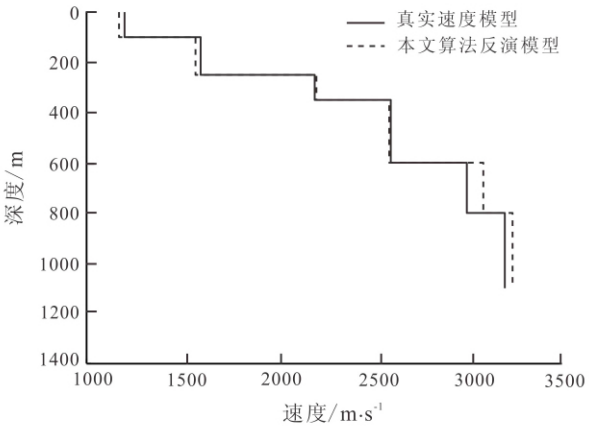


图 4 10 个检波器反演速度模型与实际速度模型对比

Fig. 4 Inverted velocity models for 10 detectors against actual velocity models

通过反演速度模型与实际速度模型对比（图 4），第 5 层与实际速度相差较大，约 27.6×10^{-3}，第 6 层约 12.2×10^{-3}，其余各层相差不多，以 $z=-900$ m 时间切片为例，逐步扫描离散化网格的每一个点，得出与波形初至时间相对应的双差分结果（图 5），颜色由蓝变成红色代表目标函数值由小到大，$x=240$ m，$y=160$ m，颜色为深蓝色时，则为反演出的震源点坐标。经反演震源与实际震源坐标位置（$x=225$ m，$y=147$ m，$z=-900$ m）对比（图 6），三角形代表检波器，五角星代表实际震源位置，正方形代表反演震源的位置，相距约 20 m，可以近似代替实际震源位置。为验证反演结果是否与检波器数量有关，增加检波器的数量观察反演结

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

果的变化。

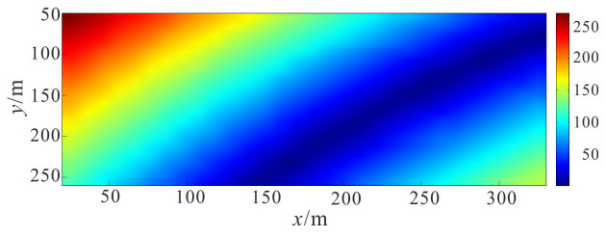


图 5　900 m 深时间双差分切片

Fig. 5　Double differential time slice of 900 m

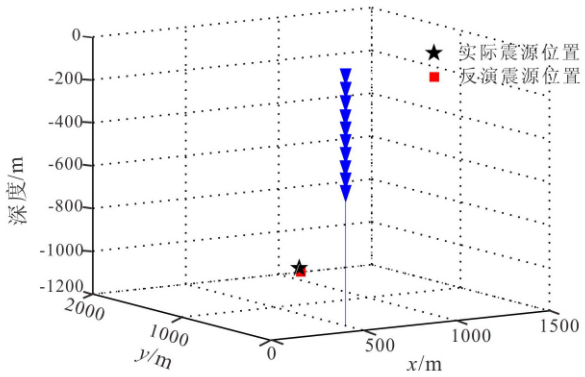


图 6　反演震源与实际震源位置对比

Fig. 6　Inverted source location against actual source location

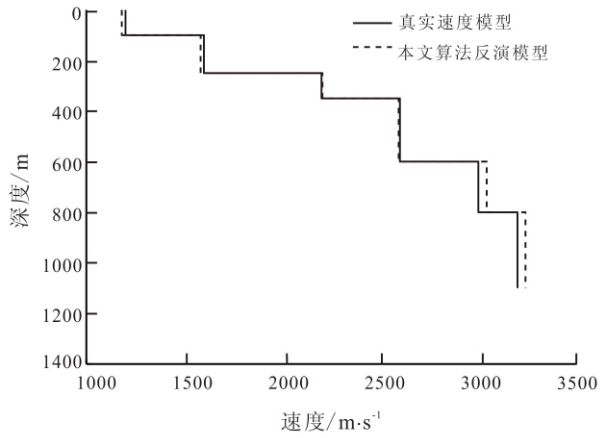


图 7　20 个检波器的反演速度模型与真实速度模型

Fig. 7　Inverted velocity models for 20 detectors against actual velocity models

当检波器增加到 20 个时，通过所得的速度模型与实际速度模型结果对比（图 7）以及反演的震源（$x=220$ m，$y=155$ m，$z=-900$ m）与实际震源的位置比较（图 8），可以看出与 10 个检波器的速度模型相比，第 5 层误差减小 9.1×10^{-3}，这是因为该层检波器数量增多，而第 6 层未见明显提高，是由于没有检波器的缘故。其他层速度更趋于实际层速度，也是由于层段检波器数量增加。第 4 层的精度最高，是因为该层位检波器数量最多。反演震源与实际震源位置相距减少为 10 m，更接近实际震源位置。因此野外施工条件允许情况下，每层检波器数量应在 2 ~ 3 个以上。

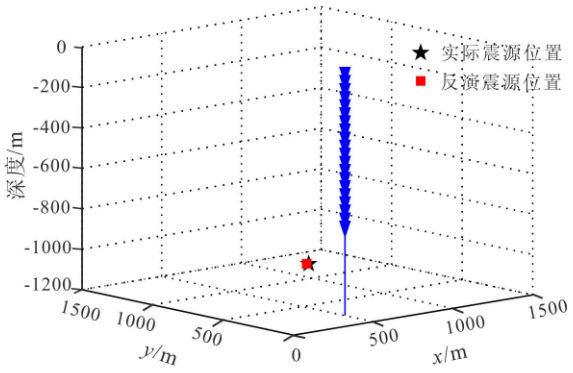


图 8　反演震源与实际震源位置对比示意图

Fig. 8　Inverted source location against actual source location

3　结论

（1）构建微震速度模型准确性随着检波器数量增加而提高，目的层检波器数量越多，构建的层速度越准确；当目的层没有检波器时，构建的此层速度与实际层速度相差较大。

（2）构建微震速度模型与实际微震速度模型相差较小，反演震源与实际震源距离接近，说明此方法可以在射孔时间未知条件下构建微震速度模型。

参考文献：

[1] XU Nu-wen，TANG Chun-an，HONG Li，et al. Excavation-induced microseismicity：microseismic monitoring and numerical simulation [J]. Journal of Zhejiang University (Sci. A)，2012，13 (6)：445-460.

[2] Maity D，Salehi I. Neuro-evolutionary event detection technique for downhole microseismic surveys [J]. Computers and Geosciences，2016，86 (1)：23-33.

[3] 宋维琪，王新强，高艳可. 地面监测微地震事件等效

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

速度反演定位方法 [J]. 石油物探，2012，51 (6)：606-612.
SONG Wei-qi，WANG Xin-qiang，GAO Yan-ke. The inversion positioning method of the surface microseismic with equaivalent velocity [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum，2012，51 (6)：606-612.

[4] 谭玉阳，何川，张洪亮. 基于初至旅行时差的微地震速度模型反演 [J]. 石油地球物理勘探，2015，50 (1)：54-60.
TAN Yu-yang，HE Chuan，ZHANG Hong-liang. Microseismic velocity model inversion base on moveouts of first arrivals [J]. Oil Geophysical Prospecting，2015，50 (1)：54-60.

[5] 赵忠，谭玉阳，张洪亮，等. 基于 Occam 反演算法的微地震速度模型反演 [J]. 北京大学学报：自然科学版，2015，51 (1)：43-49.
ZHAO Zhong，TAN Yu-yang，ZHANG Hong-liang，et al. Velocity model inversion for microseismic monitoring based on Occam inversion algorithm [J]. Acta Scientiarum Nayuralium Universitatis Pekinensis：Earth Science Edition，2015，51 (1)：43-49.

[6] Bardainne T，Gaucher E. Constrained tomograph of realistic velocity models in microseismic monitoring using calbration shoots [J]. Geophysical Prospecting，2010，58 (5)：739-753

[7] 田连玉. 基于模拟退火和遗传算法的剩余静校正方法研究：硕士研究生论文 [D]. 北京：中国石油大学，2007.
TIAN Lian-yu. Research of residual static correction using and genetic algorithm：master's degree thesis [D]. Beijing：China University of Petroleum，2007.

[8] 黄月腊. 基于遗传算法的波阻抗反演方法研究：硕士研究生论文 [D]. 西安：长安大学，2008.
HUANG Yue-la. The methodological research of wave impedance inversion based on genetic algorithms：master's degree thesis [D]. Xi'an：Chang'an University，2008.

[9] 王泉栋，李国和，吴卫江，等. 多种群遗传算法在微震震源定位中的应用 [J]. 计算机测量与控制，2015，23 (4)：1285-1288.
WANG Quan-dong，LI Guo-he，WU Wei-jiang，et al. Application of multiple-population genetic algorithm in micro-seismic source location [J]. Computer Measurement & Control，2015，23 (4)：1285-1288.

[10] 宋维琪，杨晓东. 解域约束下的微地震事件网格搜索法、遗传算法联合反演 [J]. 石油地球物理勘探，2011，46 (2)：259-266.
SONG Wei-qi，YANG Xiao-dong. A joint inversion combining the grid-search algorithm and the genetic algorithem under solution-domain constraints for microseimic events [J]. Oil Geophysical Prospecting，2011，46 (2)：259-266.

[11] 马永杰，云文霞. 遗传算法研究进展 [J]. 计算机应用研究，2012，29 (4)：1201-1206.
MA Yong-jie，YUN Wen-xia. Research progress of genetic algorithm [J]. Application Research of Computer，2012，29 (4)：1201-1206.

[12] 刘军. 基于射线追踪的微地震模型多波场正演模拟：硕士研究生论文 [D]. 北京：中国石油大学，2009.
LIU Jun. Research on field forward simulation of microseismic model based on ray tracing：master's degree thesis [D]. Beijing：China University of Petroleum，2009.

[13] 王鸣云. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的入侵检测系统的研究：硕士研究生论文 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2012.
WANG Ming-yun. Research of IDS based on the improved Levenberg-Marquardt algorithm：master's degree thesis [D]. Harbin：Harbin University of Science and Technology，2012.

[14] 李雨红，杨长保，吴燕冈，等. 小波变换在位场资料去噪和位场分离中应用 [J]. 世界地质，2014，33 (1)：200-208.
LI Yu-hong，YANG Chang-bao，WU Yan-gang，et al. Application of wavelet transform for de-noising and potential field separation in gravity and magnetic data processing [J]. Global Geology，2014，33 (1)：200-208.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net