

doi: 10.11720/wtyht.2014.6.32

胡瑞卿,夏振华,桂志先,等.基于 ARX 模型的地震资料提频方法[J].物探与化探,2014,38(6):1270-1274.http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.32

Hu R Q, Xia Z H, Gui Z X, et al. High-frequency compensation in seismic data based on system identification of ARX model[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1270-1274. http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.32

基于 ARX 模型的地震资料提频方法

胡瑞卿^{1,2}, 夏振华^{1,3}, 桂志先^{1,2}, 孙璞^{2,4}

(1.长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2.长江大学 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉 430100; 3.长江大学 电信学院, 湖北 荆州 434023; 4.江苏煤炭地质物测队, 江苏 南京 210000)

摘要: 地层对地震波的吸收效应是限制地震数据分辨率的主要原因之一,其机制、估计与补偿对提高地震资料的分辨率具有重要意义。文中基于 ARX 模型,针对地层吸收过程进行逆向建模,将实际地面地震资料与井资料、井间地震资料分别作为模型的输入与输出,从而得到模型结构参数,建立地层吸收过程的逆向模型以进行高频信息补偿,达到地震资料的提频目的。对实际地震资料的处理结果表明,该方法可将主频提高 10~15 Hz,频带拓宽 8~10 Hz。在保持原资料基本特征的同时,有效提高了地面地震资料的纵向分辨率。

关键词: 地面地震;井间地震;系统辨识;ARX 模型;高频补偿

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)06-1270-05

分辨率较低一直都是地面地震资料面临的难题之一,特别是在纵向上,地震资料无法对细致地层信息进行精细描述。国内外也一直在对提高地震分辨率的方法进行研究,提出了如反褶积、小波变换等方法。这些方法主要是调整信号的能量分布,进行地震资料频带的拓宽。

地面地震高频信息衰减的主要因素就是地层对高频成分的吸收效应。而测井资料、井间地震、VSP 资料都在一定程度上减少了地层对高频信息的吸收,其资料具有较高的主频与较宽的频带。作为同一地质对象的不同分辨率尺度下的数据,可以建立其间的映射关系,从而估计地层对高频信息的吸收过程,并建立模型进行高频信息恢复。因此文中采用井震联合建模方法,对理解、分析和估计地层吸收效应,提高地面地震资料分辨率具有重要意义。

文中基于时间序列自回归 (ARX) 模型对地层的吸收过程进行建模,关联不同尺度下的两套资料 (地震资料与测井资料)。ARX 模型是一种“黑箱”模型,依赖输入与输出数据建立数学模型来模拟系统的运行机理。在地球物理中,地层对地震信号的

吸收过程其物理机制至今仍无法进行明确的解析表达,可视为一种“黑箱”模型,而其输入、输出数据明确,故可采用 ARX 模型进行建模。笔者将地层地震信号的吸收系统逆响应看作一个“黑箱”系统,以不同分辨率尺度的低频、高频数据作为该系统的输入和输出,利用系统辨识理论求取模型的结构参数,进而模拟高频吸收的逆过程,得到其系统响应函数,最后进行高频信息补偿,提高地面地震资料的纵向分辨率。

1 利用 ARX 模型提频的基本原理

1.1 系统辨识与 ARX 模型建模

在数学上,一个系统可以定义为输入数据与输出数据之间的映射关系。对于一个未知的系统,由于不清楚其内在的数学物理机制,便只能通过其已知的输入与输出数据,去模拟一个与其等价的系统,即系统辨识的基本思想。在不同的误差准则 (AIC, FPE, MDL) 条件下,将模拟出的系统反复调整,使其逼近实际的“黑箱”系统。在构建一个等价的数学模型时,需要选定三个主要参数:

(1)输入、输出数据:即实际系统的输入、输出数据。以确保模拟系统的等价性。

(2)模型的结构:不同的物理模型,其内在机制是不同的,对于文中所要处理的地层吸收机制,选用 ARX 模型较为合适。

(3)误差准则:一个数学模拟系统与实际系统是否足够近似,可以通过选定的误差准则进行判定。常用的准则包括:AIC(最小信息准则)、FPE(最小误差准则)、MDL(最小描述长度准则)。

1.2 ARX 模型的结构参数计算与优化

在 ARX 模型中, H 与 G 是以 q^{-1} 为变量的函数

$$H(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)}, G(q) = \frac{1}{A(q)} ; \quad (1)$$

$$A(q) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na}, \quad (2)$$

$$B(q) = b_1 + b_2 \cdot q^{-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb+1}, \quad (3)$$

其中: B, A 分别为延迟算子 q^{-1} 的多项式, na, nb 为多项式阶数, nk 为滞后阶数。

根据式(1),则该模型^[2]为

$$A(q)y(n) = B(q)u(n - nk) + e(n), \quad (4)$$

或

$$y(n) + a_1 \cdot y(n - 1) + \dots + a_{na} \cdot y(n - na) = b_1 \cdot u(n - nk) + b_2 \cdot u(n - nk - 1) + \dots + b_{nb} \cdot u(n - nk - nb + 1) + e(n), \quad (5)$$

其中: $u(n-nk)$ 为输入序列,即地面地震数据; $y(n)$ 为输出序列,即测井数据或井间地震数据; $e(n)$ 为误差项; $A(q)$ 与 $B(q)$ 如式(1)中所示,为系统响应函数的分母与分子; $G(q)$ 为噪声系统的响应函数。针对系统描述模型,给定观测到的输入、输出数据 u, y , 模型预测误差可用

$$e(n) = G^{-1}(q) [y(n) - H(q) \cdot u(n)] \quad (6)$$

计算。因此预测误差 $e(n)$ 是 H, G 的函数,而 H, G

可由式(1)~式(3)表示。

首先进行系统响应函数的定阶,即确定系统响应函数的分子与分母的参数个数:确定式(2)中 na 、式(3)中 nb 与式(4)中 nk 的值。文中采用 MDL 误差控制准则来选取最佳阶数 na, nb, nk 所对应的模型。MDL 误差控制准则为

$$e_{MDL}(d) = V[1 + d \lg(N)/N], \quad (7)$$

其中: N 为采样数据的长度,文中取测井数据样点个数 $N_{测井}$ 与井旁地震道采样点数 $N_{地震}$ 较小者为 N ; $d = na + nb + nk$, 为待估计参数的个数总和; V 为预测误差。随着 d 值的增加, V 值变小,而 $[1 + d \lg(N)/N]$ 的值增大。选取合适的 d 值使得 $e_{MDL}(d)$ 最小,即得到最佳阶数 na, nb 与 nk 。对垦 71 工区实际资料进行处理,对 20 口井资料与井旁地震道数据进行模型定阶,结果如图 1 所示,定阶结果为 $na = 6, nb = 1, nk = 0$ 。

对于垦 71 地区,其井位分布图如图 2 所示,井位处的系统响应阶数已知,即式(1)、式(2)中 $na = 6, nb = 1, nk = 0$ 已明确。

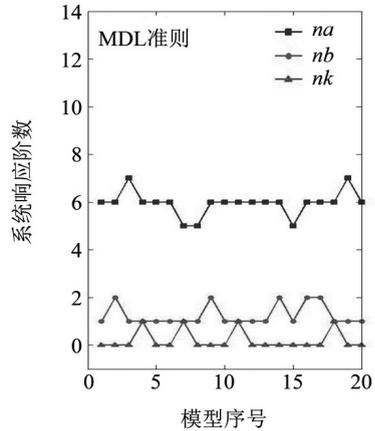


图 1 MDL 准则下系统响应阶数统计

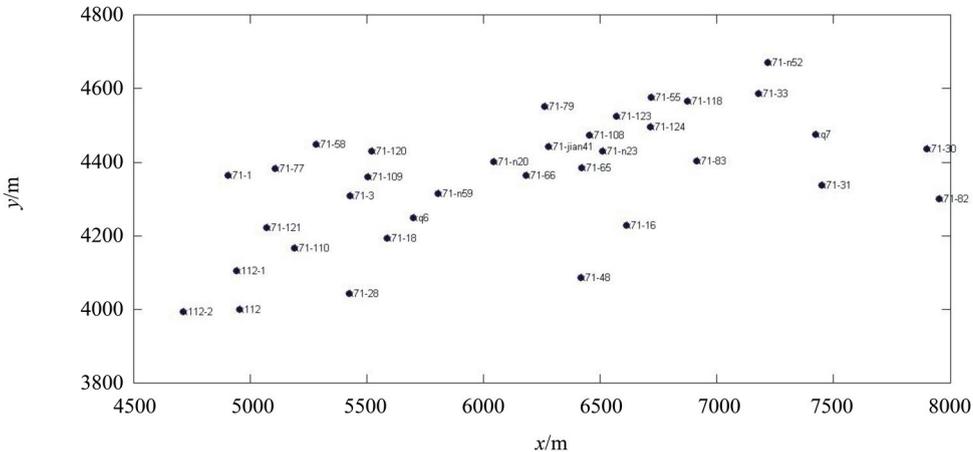


图 2 垦 71 工区井位分布

明确系统响应的阶数后,需要进一步明确的各井位系统响应参数包括: $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1$, 共 8 个值。此时系统响应函数^[6]形式为

$$H(q) = \frac{1}{1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + a_3q^{-3} + a_4q^{-4} + a_5q^{-5} + a_6q^{-6}}, \quad (8)$$

$$y(n) = a_1y(n-1) - a_2y(n-2) - a_3y(n-3) - a_4y(n-4) - a_5y(n-5) - a_6y(n-6) + b_1x(n) + e(n)。 \quad (9)$$

选取若干对井旁地震道与测井数据作为式(9)的输入与输出,建立方程组,解方程组即可得到系统响应参数 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1$ 的值。

2 实际资料效果分析

为验证上述方法的可行性,文中以垦 71 工区实际资料应用效果为例。实际资料处理流程如下:

(1) 选取坐标相同的测井数据与地面地震道。

(2) 根据 MDL 准则确定模型阶数。图 3 为垦 71 工区模型预测误差随模型阶数变化统计图,在 MDL 准则下确定最佳阶数为 6。

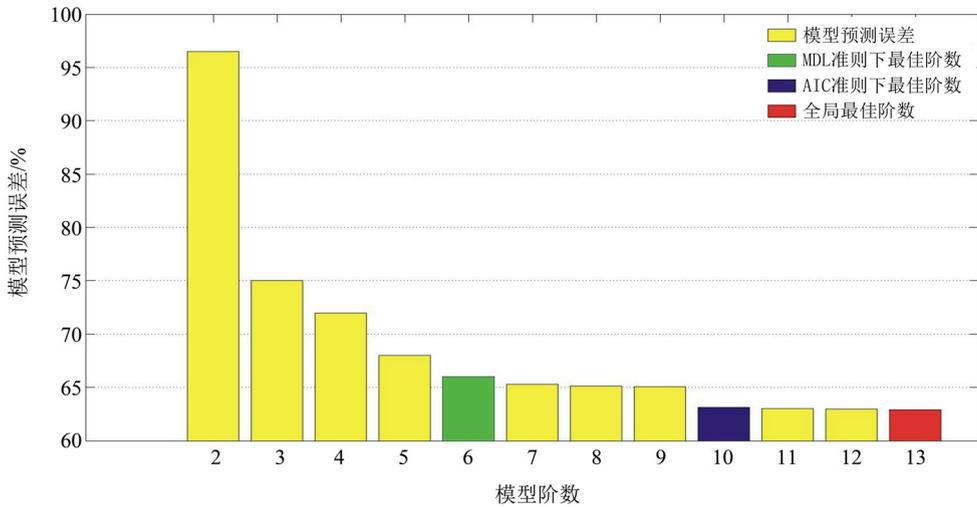


图 3 实际资料中模型预测误差随模型阶数变化统计

(3) 以地面地震道作为式(10)的输入 $x(n)$, 以测井数据合成记录作为输出 $y(n)$ 。建立系统响应参数方程组。

(4) 解方程组得到系统响应参数 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1$ 。垦 71 区域的部分系统响应参数如表 1 所示。

表 1 垦 71 工区内部分系统响应参数

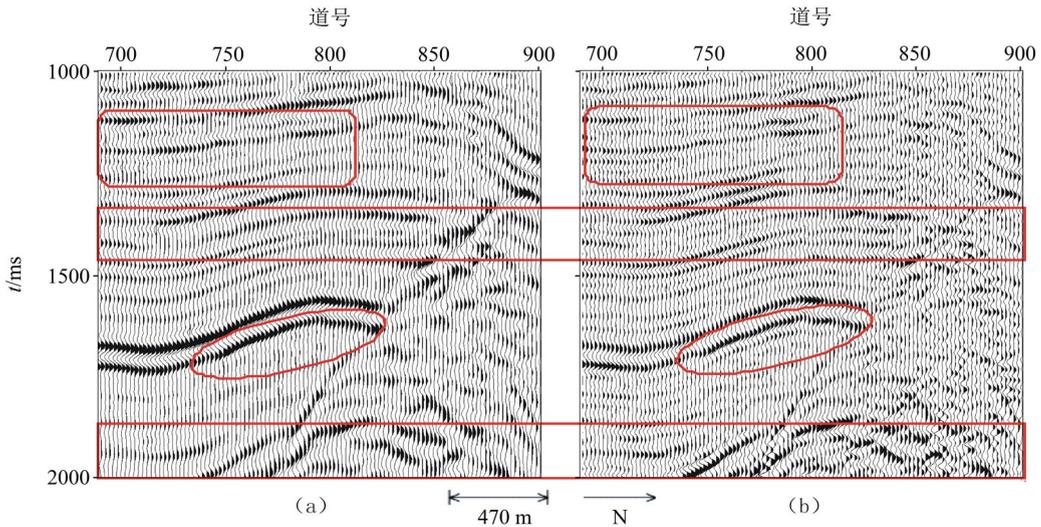
编号	x 坐标	y 坐标	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	b_1
1	644941	184261	1	-0.44	0.863	-0.404	0.592	-0.157	0.236	-0.753
2	644714	183984	1	-0.529	1.058	-0.416	0.697	-0.22	0.218	0.66
3	644956	183998	1	-0.57	0.926	-0.412	0.58	-0.172	0.277	0.714
4	646453	185182	1	-0.354	0.752	-0.18	0.522	-0.129	0.267	-0.773
5	645505	184901	1	-0.34	0.839	-0.29	0.533	-0.098	0.252	-0.757
6	645190	184417	1	-0.321	0.898	-0.167	0.594	-0.108	0.201	0.711
7	645867	184995	1	-0.276	0.853	-0.161	0.423	-0.018	0.196	-0.735
8	646152	185230	1	-0.249	0.773	-0.127	0.56	-0.083	0.211	0.768
9	646874	185413	1	-0.171	0.755	-0.168	0.459	-0.097	0.228	-0.791
10	645520	185074	1	-0.318	0.839	-0.258	0.522	-0.188	0.213	-0.754
11	645072	184556	1	-0.319	0.786	-0.107	0.432	-0.117	0.121	-0.743
12	646569	185311	1	-0.467	0.828	-0.29	0.56	-0.168	0.249	-0.747

(5) 对工区各点求得的系统响应参数进行三维插值外推,得到工区范围内每个点的系统响应参数。

(6) 建立工区范围内各点处的系统响应函数。

(7) 将各点处的地面地震道作为其系统响应函数的输入,得到的输出即为提频后的地震资料。

以胜利油田垦 71 区块资料为例,采用本文的方法,对垦 71 地区地面地震资料进行提频处理,从 Line680 线原始剖面与提频处理后的剖面对比(如图 4 所示),可看出原地面地震资料的主要地层信息不变,较弱的地层信息得以增强,部分缺失的高频



a—原始剖面; b—提频处理后剖面

图 4 Line680 原始剖面与提频处理后剖面对比

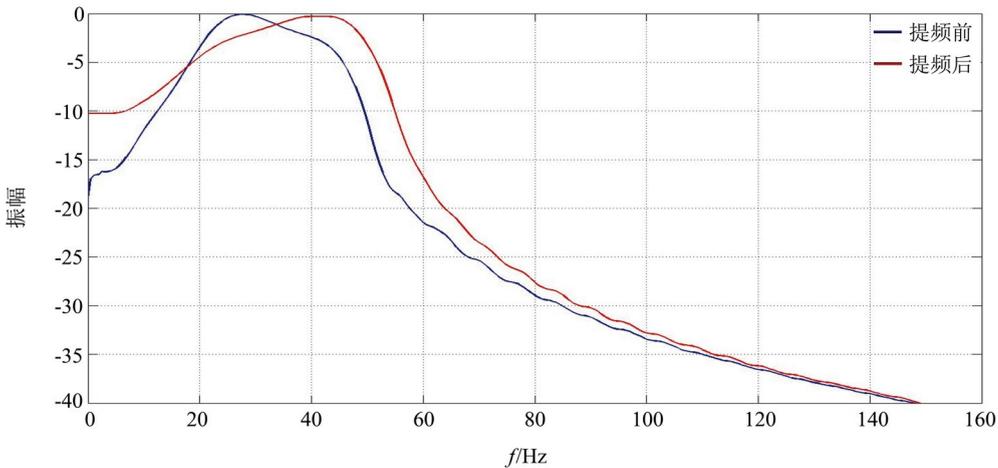


图 5 Line680 原始资料与提频后资料频谱对比

信息得到一定程度的补偿。通过实际应用与验证,提频后的资料与合成记录匹配度更高。图 5 为资料处理前后的频谱对比,可看出提频后的剖面主频较高,提高约 15 Hz,优势频带更宽。

3 结论

文中提出的基于系统辨识理论与 ARX 模型的方法是一种提高地震资料分辨率的新思路。联合测井资料与地面地震资料,通过 ARX 模型,估算反向地层吸收系统的结构参数,进而对地面地震资料进行处理,从而提高地面地震资料的分辨率。在理论上,该方法具有较高的可靠性;在实际应用中,该方法具有较高的有效性,处理结果效果明显。对垦 71 区域实际地震资料处理结果表明,该方法在保留原始资料主要特征的基础上,不明显的信息得到了加强,部分高频信息得到了补偿。处理后资料主频提高约 15 Hz,与合成记录更加吻合,地面地震资料分

辨率得到了提高。

在外推过程中,笔者采用了克里金插值法,在实际处理中也可使用反距离加权外推或最近距离外推方法。可根据资料的实际情况,选择最佳方法,而对于较复杂区域或井信息有限区域,外推效果会受到一定的影响。

参考文献:

- [1] Chopra S, Alexeev V, Sudhakar V. High-frequency restoration of surface seismic data[J]. The Leading Edge, 2003, 22(8): 730-738.
- [2] 曾锐,刘洪.柯西约束盲反褶积技术在井间地震的应用[J].地球物理学进展,2004,19(1):166-172.
- [3] 轩仁飞,曹俊兴.地震反褶积处理技术[J].地球物理学进展,2012,27(3):1183-1188.
- [4] 刘浩杰,王延光,韩文功.基于系统辨识提高地震资料分辨率研究[J].地球物理学进展,2010,25(3):1-5.
- [5] 李庆忠,王建花.井间地震勘探的误区及出路[J].石油地球物

- 理勘探,2004,39(1):1-11.
- [6] Bouzrara K, Garna T, Ragot J, et al. Online identification of the ARX model expansion on Laguerre orthonormal based with filters on model input and output [J]. *International Journal of Control*, 2013, 86(3):369-385.
- [7] 刘文岭,夏海英.同位协同克里金方法在储层横向预测中的应用[J]. *勘探地球物理进展*, 2004, 27(5):367-370.
- [8] Gunnarsson S. Frequency domain accuracy of recursively identified ARX models [J]. *International Journal of Control*, 1991, 54(2):465-480.
- [9] 周彤.面向控制的系统辨识导论[M].北京:清华大学出版社, 2009.
- [10] Millnert M. Identification of ARX models with markovian parameters [J]. *International Journal of Control*, 1987, 45(6):2045-2058.
- [11] Byehan S, Alci M. Fuzzy functions based ARX model and new fuzzy basis function models for nonlinear system identification [J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2009, 10(2):439-444.
- [12] 靳国栋,刘衍聪,牛文杰.距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. *长春工业大学学报:自然科学版*, 2003, 31(3):46-48.
- [13] Nounou M N, Nounou H N. Improving the prediction and parsimony of ARX models using multiscale estimation [J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2006, 7(3):711-721.
- [14] Nicolao G D, Magni L, Scattolini R. Stabilizing predictive control of nonlinear ARX models [J]. *Automatica*, 1997, 33(9):1691-1697.
- [15] Golob M, Tovornik B. Input-output modeling with decomposed neuro-fuzzy ARX model [J]. *Neurocomputing*, 2007, 71(4):875-884.

High-frequency compensation in seismic data based on system identification of ARX model

HU Rui-Qing^{1,2}, XIA Zhen-Hua^{1,3}, GUI Zhi-Xian^{1,2}, SUN Pu^{2,4}

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources; Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. School of Geophysics and Oil Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3. School of Electronics and Information, Yangtze University, Jinzhou 434023, China; 4. Jiangsu Coal Geophysical Prospecting and Surveying Party, Nanjing 210000, China)

Abstract: Absorptive attenuation has always been one of the reasons for the limited resolution of the seismic data. The mechanism of the absorption in strata, the evaluation of the attenuation quantity and the compensation of the high frequency components are essential in the seismic resolution improvement. Based on ARX model, the authors simulated the reversion of the absorption process in strata by establishing a numerical model with system identification technology. The low frequency data (the surface seismic data) and the high frequency data (the well log data or the cross-well seismic data) are respectively set as the input and the output of the model, and then the structure parameters of the model can be obtained. The model in this paper can establish an interconnection between the conventional seismic data and the well log data, the cross-well data or the VSP data. It is shown by processing the practical data that the main frequency can be increased by 10~15 Hz, and the frequency band width can be expanded by 8~10 Hz.

Key words: ground seismic survey; cross-well seismic survey; system identification; ARX model; high frequency compensation

作者简介: 胡瑞卿(1989-),男,湖北荆门人,硕士研究生,从事地球信息与探测研究工作。