

Gabor 反褶积在隧道地质超前预报信号处理中的应用研究

孙静涛

三门峡职业技术学院

DOI:10.12238/btr.v4i4.3791

[摘要] 文章将Gabor反褶积技术应用隧道地质超前预报数据处理中,提高了隧道地质超前预报三维成像的纵向分辨率。文章首先简述了非平稳地震褶积模型和Gabor反褶积的基本原理;然后分析噪声、Q值、时窗宽度对Gabor反褶积结果的影响,并提出了最优时窗宽度;最后在理论模型分析和AGI-T3三维地质超前预报数据处理流程的基础上提出了:一维滤波、信号能量恢复、“F-K”二维滤波、Gabor反褶积的数据处理流程,并通过工程实例分析验证了该数据处理流程的有效性。

[关键词] 隧道地质超前预报; Gabor反褶积; 非平稳地震褶积模型; 常数Q值模型

中图分类号: TU 文献标识码: A

Research on the Application of Gabor Deconvolution in the Signal Processing of Tunnel Geological Advance Prediction

Jingtao Sun

Sanmenxia Polytechnic

[Abstract] In this paper, Gabor deconvolution technology is applied to the data processing of tunnel geological advance prediction, which improves the longitudinal resolution of 3D imaging of tunnel geological advance prediction. Firstly, we briefly introduce the basic principle of non-stationary seismic convolution model and Gabor deconvolution. Then, we analyze the effects of noise, Q-value and time window width on Gabor deconvolution results, and propose the optimal time window width. Finally, on the basis of theoretical model analysis and AGI-T3 3D geological advance prediction data processing flow, this paper put forward: one-dimensional filtering, signal energy recovery, "F-K" two-dimensional filtering and data processing flow of Gabor deconvolution. Moreover, the validity of the new data processing flow is verified through the analysis of engineering example.

[Key words] tunnel geological advance prediction; Gabor deconvolution; non-stationary seismic convolution model; constant Q-value model

引言

在勘察阶段,通过综合勘探手段,可确定对隧道影响较大的地质构造和主要地质不良现象,对隧道的设计、施工起到宏观的指导作用。但是由于隧道地质条件的复杂形、多变性,在勘察阶段要确定围岩的状态、特征,并准确预测隧道施工中可能引发的地质灾害的位置、规模及性质是十分困难的。在隧道施工阶段,重视和加强地质超前预报,最大限度的利用地质理论和地质超前预报技术,预测开挖面前方的地质情况,对安全施工、提高功效、缩短施工周期、避免事故损失具有重大意义^[1]。

基于地震波的隧道地质超前预报是目前最常用的有效方法之一,其基本原理是一种多波分量地震反射勘探的地球物理方法^[9]。自1954年Robinson将反褶积用于地震信号处理以来,反褶积已成为现代地震勘探数据处理三大基础技术之一^[10]。反褶积的目的是从已知的地震道中估算地层的反射系数,提高信号的纵向分辨率。Robinson反褶积假设震源子波是平稳的即地。

震子波在其传播过程中是不变的,但其并未考虑地层衰减和多次波的影响。1979年,Kjartansson提出了常数Q值理论来描述地层粘弹性引起地震波的

衰减,Borcherdt在2009年给出了粘弹性波传播的完整描述^[1]。针对Robinson反褶积的为考虑地层衰减的问题,Margrave等提出的基于常数Q值理论的Gabor反褶积,在Gabor域实现了时变子波的估计^[2],并模拟记录和实际地震资料处理中取得很好的效果。

本文将Gabor反褶积方法应用到基于地震波法的隧道地质超前预报中,在AGI-T3三维地质超前预报信号预处理流程的基础上提出了:一维滤波、信号能量恢复、“F-K”二维滤波、Gabor反褶积提取反射系数的数据处理流程,并取得了较好的效果。

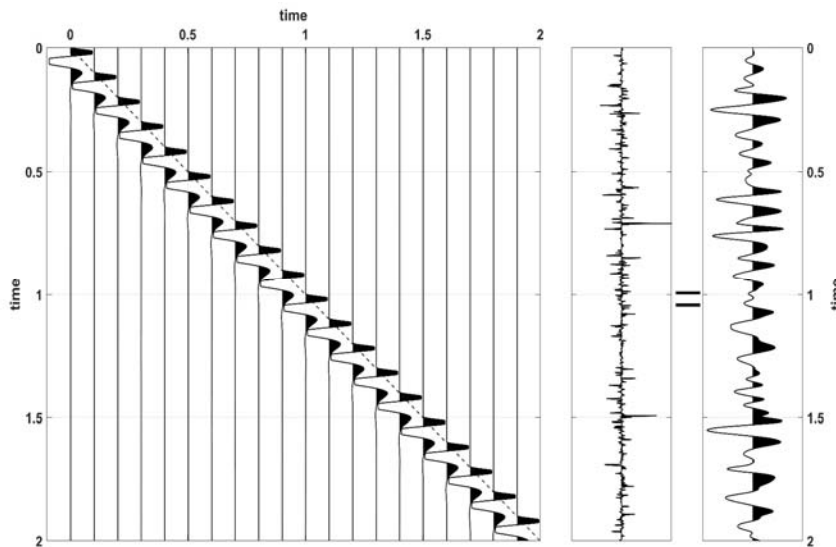


图1 平稳地震褶积模型图示

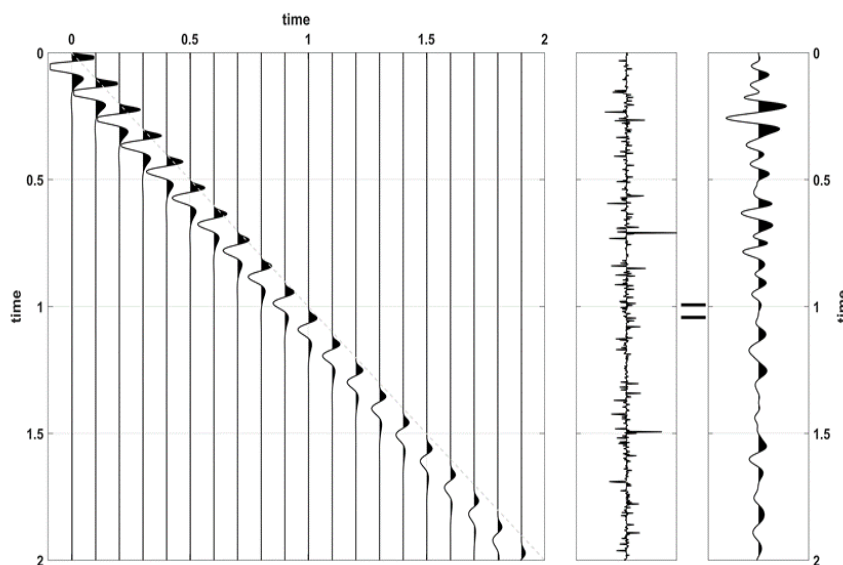


图2 非平稳地震褶积模型图示

1 基本原理

1.1 非平稳地震褶积模型

根据Robinin褶积模型,假设地震子波传播过程中保持不变,地震记录可以写。

(a)地震子波矩阵,每50行显示一次,(b)反射系数 $\vec{r}$ (c)合成平稳地震记录 $\vec{s}_{sat}$ 成地震子波 $w(t)$ 与反射系数的褶积^[5]。

$$s_{sat}(t) = \int w(t-\tau)r(\tau) d\tau \quad (1)$$

现场采集的地震记录实际为离散信号,公式(1)离散之后可写成矩阵形式^[10] $\vec{s}_{sat} = W\vec{r}$ 其中 w 为地震子波生

成的矩阵。

但是地震波在地下介质中传播时,由于实际岩层非完全弹性引起的地层吸收使地震波的弹性能量不可逆转的转化为热能而发生消耗,从而引起了地震子波的变化^[5]。从频域上看,地层吸收造成的能量损失主要表现为振幅衰减,并且频率越高振幅衰减越严重^[1]。1979年Kjartansson提出了常数Q值模型—信号的时频谱的振幅在 ft 为常数的曲线上为常数,来描述地震波传播过程中的因介质粘弹性的能量损失,并给出了常数Q值模型标量波动方程的完整数学描述,Borcherdt在2009年给出了粘弹性波

传播的完整讨论。根据Kjartansson的公式,一维的常数Q值模型在单位脉冲下的响应的被称为Q-Wavelet^[2],其傅里变换为:

$$\hat{e}_Q(t, f) = A(f, t)e^{2\pi i f x/v(f)} \quad (2)$$

其中代表传播距离, f 代表频率(恒正), A 代表振幅谱

$$A(f, t) = e^{-\pi t f/Q} \quad (3)$$

公式(3)说明振幅谱随时间和频率成指数衰减。 $A(f, t)$ 在沿 ft 等于常数所定义的曲线(时频域中的双曲线)上为常数。根据一维常Q模型,单位脉冲作用下的非平稳地震褶积的数学模型为^[1]

$$D(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e_Q(\tau, t-\tau)r(\tau)d\tau \quad (4)$$

对于任意地震子波作用下的非平稳地震褶积模型的为地震子波与 $D(t)$ 的褶积,频域形式如下:

$$\hat{s}(f) = \hat{w}(f) \int_{-\infty}^{\infty} \hat{e}_Q(t, f)r(t)e^{-2\pi i f t} dt \quad (5)$$

如果 $e_Q(t, f) = 1$, 也就是 $Q \rightarrow \infty$, 非平稳地震褶积模型退化为平稳地震褶积模型。

1.2 Gabor反褶积

Gabor变换是窗函数为高斯函数的短时傅里叶变换^[6]。非平稳地震记录S的Gabor变换为 $\hat{s}_g$ 近似等于地震的子波的傅里叶变换 $\hat{w}(f)$ 、衰减函数的时频谱 $\alpha(t_j, f)$ 和反射系数的Gabor变换的乘积 $\hat{r}_g$ ^[1]。

$$\hat{s}_g(t_j, f) \approx \hat{w}_{sat}(f)\alpha(t_j, f)\hat{r}_g(t_j, f) \quad (6)$$

(a)衰减的地震子波矩阵 w' , 每50行显示一次,(b)反射系数向量 $\vec{r}$ (c)合成非平稳地震记录向量 $\vec{s}$ 。Gary F. Margrave等给出了公式(7)的数学推导过程^{[11][3]}, 并给出了相应的物理解释: 在较窄

的时窗内,地震记录可以近似满足平稳地震褶积模型,该段时窗内的衰减函数近似为常数,时窗内的地震子波可近似的等于 $\hat{w}(f)\alpha(t_j, f)$, 但时窗的宽度一定不能明显短于地震子波。根据公式(6)可以估计出反射系数的Gabor变换 $\hat{r}_g(t_j, f)$ 。对比平稳地震记录模型将

$$\hat{w}_{sat}(f)\alpha(t_j, f) \text{ 看作 } \hat{w}(t, f), \text{ Gabor 反褶积的矩阵表达式为: } \vec{s} = W^T \vec{r} \quad (7)$$

$$\hat{r}_g(t_j, f) \approx \frac{\hat{s}_g(t_j, f)}{\hat{w}(f)\alpha(t_j, f)}$$

由于地震子波和衰减函数未知, Margrave等人通过对地震记录的Gabor变换进行平滑处理,估计出衰减地震子波的振幅 $|\hat{s}_g(t_j, f)|^{[1]}$ 。

$$|\hat{s}_g(t_j, f)| \approx |\hat{w}(f)\alpha(t_j, f)| \quad (8)$$

地震子波是最小相位,则可利用Hilbert变换得到 $\hat{w}(f)\alpha(t_j, f)$ 相位谱^{[1][2]}。

$$\Phi_g(t_j, f) = H[\ln|\hat{s}_g(t_j, f)|] \quad (9)$$

将公式(9)(10)代入公式(11),可得出估计出反射系数的Gabor反褶积。

$$\hat{r}_g(t_g, f)_{est} = \hat{s}_g(t_j, f) \left[\frac{e^{-i\Phi_g(t_j, f)}}{|\hat{w}(f)| |\alpha(t_j, f)|} \right] \quad (10)$$

2 Gabor反褶积参数分析与实际资料应用

2.1 理论模型测试

2.1.1 信噪比对反褶积效果的影响

地震子波的主频为20Hz,合成Q值为50的地震记录 S_1 如图4(b)所示;图4(a)反射系数 R ;图4(c)地震记录 S_1 添加信噪比为1的噪声后的地震记录 S_2 ;图4(d)地震记录 S_1 的Gabor反褶积结果 R_1 。 R_1 与 R 的相似系数为0.67, R_2 与 R

的相似系数为-0.03。说明噪声对Gabor反褶积的结果有较大的影响。

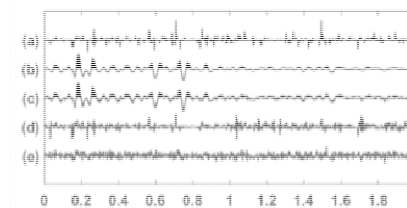
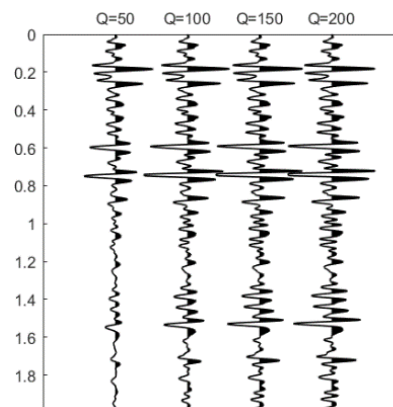


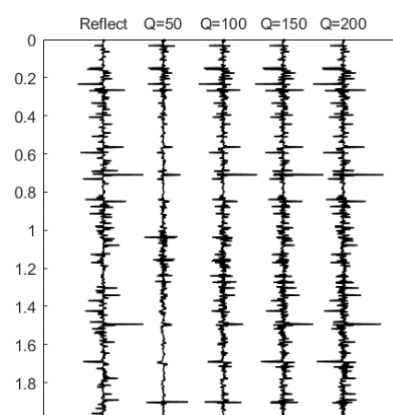
图3 非平稳地震记录模拟分析

2.1.2 Q值对反褶积效果的影响

地震子波的主频为20Hz,合成Q值分别为50, 100, 150, 200的地震记录,如图4(a)所示。不同Q值得Gabor反褶积结果(图4(b))与反射系数的相关系数分别为: 0.46、0.73、0.82、0.86。说明Q值越大Gabor反褶积得结果越好。



(a) 合成地震记录



(b) Gabor反褶积结果

图4 不同Q值信号得Gabor反褶积

令函数 $U(t-i)$ 为单位矩形窗,矩形窗宽度是Gabor变换时窗长度的2倍。定义相关系数函数为:

$$X = \frac{RR_g U(t-i)^2}{|RU(t-i)| |R_g U(t-i)|}$$

图5横坐标表示Gabor反褶积的时窗长度与信号时长得比值,纵坐标表示相关系数函数的值。随着深度的增加地震波的能量越来越小,相关系数函数X的值越小,说明反褶积结果越差;通过对比不同Q值的相关系数函数X值得,说明得出Q值越大,深层反褶积的效果越好。分析结果表明,在Gabor反褶积前对信号能量恢复对Gabor反褶积的结果有益。

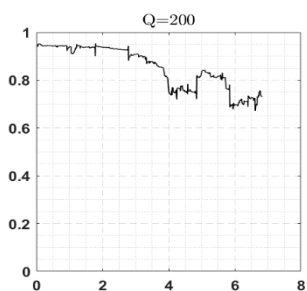
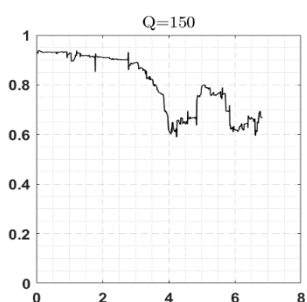
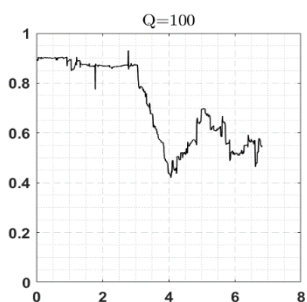
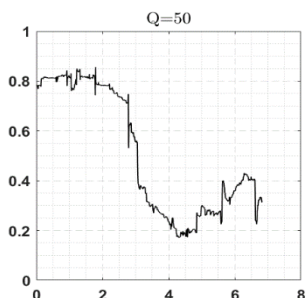


图5 Q值对Gabor反褶积的影响

三维隧道预报成像结果图

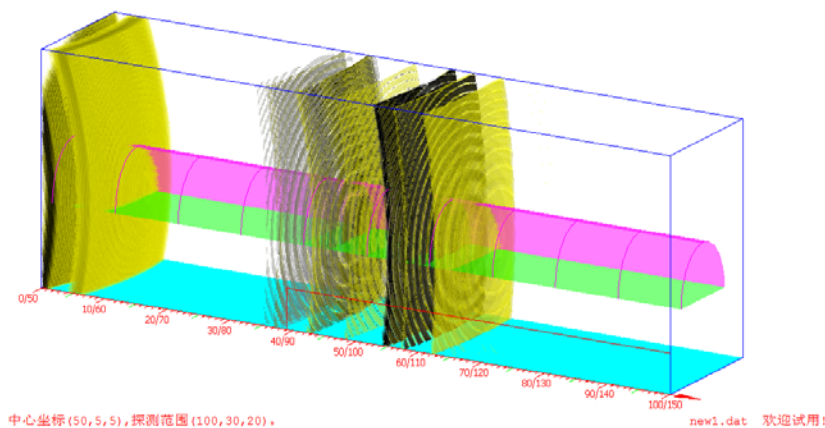


图6 AGI-T3 三维成像结果

三维隧道预报成像结果图

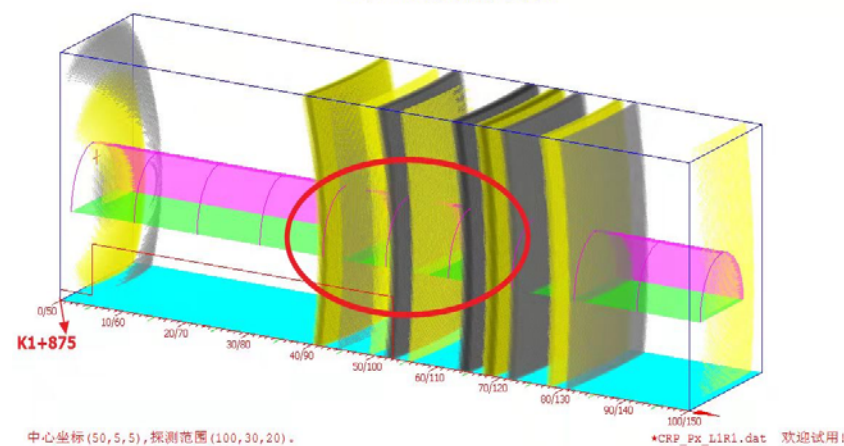


图7 Gabor 反褶积处理后的三维成像结果

3 工程实例分析

根据AGI-T3隧道地质超前预报现场采集信号的特点, 结合理论模型分析的结果, 为了在AGI-T3隧道地质超前预报信号处理中更好的利用Gabor反褶积技术, 优化后的数据处理流程为: 一维滤波、信号能量恢复、“F-K”二维滤波、Gabor反褶积。

图6为AGI-T3三维偏移成像结果, 可以清楚看出在K1+907~935段内具有强烈的反射界面, 与隧道实际开挖结果十分吻合。图7为经过Gabor反褶积处理后的AGI-T3三维偏移成像结果, 纵向分辨率得了显著的提高。

4 结论

(1) 对含噪声信号和不含噪声信号的Gabor反褶积进行相关分析, 说明噪声严重影响了Gabor反褶积的结果; 对不同时窗的Gabor反褶积结果与反射系数的进行相关分析, 说明最佳的时窗为2倍的地震子波有效时长; 对不同Q值信号的Gabor反褶积与反射系数的进行相关性分析, 说明Gabor反褶积对信号的浅层部分效果较好, 随着深度的增加Gabor反褶积的结果越差。

(2) 根据AGI-T3隧道地质超前预报中原始信号含噪声的特点, 结合理论模型的分析结果, 对AGI-T3数据处理流程

进行了优化如下: 一维滤波、信号能量恢复, “F-K”二维滤波、Gabor反褶积。现场实测数据处理结果表明, 该数据处理流程能够提高三维成像的纵向分辨率。

[参考文献]

[1] Gary F. Margrave, Lamoureux, Michael P, Henley, David C. Gabor deconvolution: Estimating reflectivity by non-stationary deconvolution of seismic data[J]. GEOPHYSICS, 2011, 76(3): W15-W30.

[2] Gary F. Margrave, Michael P. Lamoureux. Numerical Methods of Exploration Seismology With Algorithms in Matlab [M]. Cambridge University Press, 2019.

[3] 曹国侯, 王运生, 李耀华, 等. 三维成像系统在地下工程地质灾害预报中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 1735-1739.

[4] 王运生, 苏建黎. 浅层地震联合成像技术及其应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2007, 004(4): 306-311.

[5] 牟永光. 地震数据处理方法[M]. 石油工业出版社, 2007.

[6] 冉启文. 小波变换与分数傅立叶变换理论及应用[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2003.

[7] 倪祥华, 王重玮. 数字信号处理—原理与实现[M]. 上海交通大学出版社, 1998.

[8] 金明霞, 张冰, 易淑昌. 基于Gabor变换反褶积技术在渤海某工区的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 856-861.

[9] 王运生, 刘巍, 高正. 三维成像隧道地质超前预报关键技术与应用[J]. 中国科技成果, 2018, 019(024): 42-45.

[10] 马在田. 地震成像偏移技术[M]. 石油工业出版社, 1989.

[11] 隋修志. 隧道工程[M]. 中国铁道出版社出版, 2010.