

doi:10.3799/dqkx.2017.036

活断层的地震响应特征与瞬时地震属性

罗登贵^{1,2}, 刘江平^{3*}, 金 聪^{1,2}, 周黎明⁴

1. 中国地震局地震研究所地震预警湖北省重点实验室, 湖北武汉 430071
2. 武汉地震工程研究院有限公司, 湖北武汉 430071
3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074
4. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北武汉 430010

摘要:活断层探测是断层活动性评判的基础,也是天然地震灾害预防的依据,而浅层地震勘探是活断层探测的有效方法之一;而目前利用浅层地震方法评判断层活动性的能力亟待提高。通过构建了不同宽度破碎带的活断层理论模型,采用二维粘弹性波动方程有限差分法进行了波场响应特征模拟,运用希尔伯特变换方法提取了瞬时频率和相位属性。结果表明:地震水平叠加剖面和瞬时属性相结合可有效获取穿过第四系活断层的响应特征和实现断层活动性评判;当相干噪声达到 30% 时,水平叠加和瞬时频率属性剖面已难以追踪第四系中弱反射信号,而瞬时相位属性剖面仍可有效追踪;在实际活断层判定中,水平叠加、瞬时频率与瞬时相位地震属性剖面均可判断断层的存在,而穿过第四系的断层(或破碎带)特征瞬时相位属性最为明显和突出,水平叠加剖面次之,瞬时相位地震属性是判定断层活动性的重要和有效的属性。

关键词:活动断层;二维粘弹性;有限差分;瞬时属性;地震。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2017)03-0462-09

收稿日期: 2016-08-30

Instantaneous Seismic Attributes and Response Characteristics of Active Faults

Luo Denggui^{1,2}, Liu Jiangping^{3*}, Jin Cong^{1,2}, Zhou Liming⁴

1. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China
2. Whuhan Institute of Earthquake Engineering, Wuhan 430071, China
3. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Key Laboratory Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China

Abstract: Active fault detection is not only the foundation for the fault activity evaluation, but also the basis for prevention of natural earthquake disasters. The shallow seismic exploration is one of the effective methods for active fault detection. This study aims to further improve the fault activity evaluation with shallow seismic methods. We construct theoretical models of active fault of different fracture zone widths, apply the finite difference method of two-dimensional viscoelastic wave equation to simulate wave field response characteristics, use Hilbert transform method to extract the attributes of instantaneous frequency and instantaneous phase, and analyze the performance in the field of anti-noise and effect of practical applications of method. The results show: Combination of the vertical travel time section and seismic attributes can effectively obtain the response characteristics of active faults which cut through the Quaternary and achieve the evaluation of fault activity; However, when coherent noise reaches thirty percent, it is difficult to trace and identify the weak reflection signals in the Quaternary by the vertical travel time section and instantaneous frequency section, but instantaneous phase attributes can still effectively trace and identify the weak reflection signals with a high anti-noise ability. In the practical determination of active faults, both the vertical travel time section, instantaneous frequency section and instantaneous phase section can determine the existence of faults. The instantaneous phase attribute is the most obvious and prominent to show the characteristics of faults or fracture zones which cut

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.41202223);湖北省“十一五”重点建设项目:“湖北省地震背景场探测工程”。

作者简介:罗登贵(1970—),男,高级工程师,主要从事工程地震、工程物探、岩土工程研究。ORCID:0000-0002-6934-9644.E-mail:1512574001@qq.com

*通信作者:刘江平,ORCID:0000-0001-9221-2817.E-mail:liujp_geop@126.com

引用格式:罗登贵,刘江平,金聪,等.2017.活断层的地震响应特征与瞬时地震属性.地球科学,42(3):462—470.

through the Quaternary, whereas the vertical travel time section takes the second place. It is concluded that the instantaneous phase attribute is an important and effective seismic attribute to determine the fault activity.

Key words: active fault; two-dimensional viscoelastic; finite difference; instantaneous attributes; activity evaluation; earthquake.

0 引言

活断层一般是指第四纪晚更新世以来曾经活动、未来仍可能活动的断层,是否穿过第四系是判别断层活动性的标志之一。大量地震灾害调查结果表明,活断层不仅是产生地震的根源,而且沿断层线地震破坏也最为严重,因而进行活动断层探测显得尤为重要(酆少英等,2010)。

近年来,浅层地震勘探在国内外城市活断层探测中取得了许多宝贵的经验,多是采用多种方法的联合应用或进行钻孔来抑制地震勘探反演问题解的非单值性,进一步提高地震资料解释的精度(何正勤等,2010;顾勤平等,2013;贺赤诚等,2015;徐甫坤等,2015)。在实际探测中,由于受到环境噪声的干扰严重,地震记录中往往难以判别断层是否穿过第四系,因此迫切需要寻找可有效判别断层是否穿过第四系的地震弱反射信号的动力学属性,而通过地震数值模拟和“三瞬”(瞬时振幅、频率和相位)地震属性提取与分析相结合,是有效提高穿过第四系断层的识别能力和解释精度的方法之一。

地震数值模拟是通过所建立的地质模型,求解地震波在地下的传播过程,通过模拟地震剖面与实际地震剖面的最佳逼近,使地质解释人员能正确认识复杂条件下地震波的传播机理、传播规律以及地震反射波场特性,进而提高地质解释精度(兰晓雯等,2008)。地震波在地下传播过程中,必定发生波的吸收与衰减,而实际地层更接近于粘弹性介质。地震属性种类很多,“三瞬”属性是最常用和有效的地震属性,尤其是瞬时频率和相位属性,它们与反射信号强弱无关。因此本文基于粘弹性波动方程,采用一阶速度—应力方程高阶交错网格有限差分方法和结合完全匹配层(PML)边界条件(Hastings *et al.*, 1996)进行理论模型数值模拟与特征分析,并采用希尔伯特变换对模拟记录和实例进行地震瞬时频率和相位属性提取及抗噪特性分析,归纳分析活断层的波场响应和地震属性特征,以及追踪和识别活断层的有效性和优越性,可以为工程场地稳定性评价、地震小区划、地震预测提供基础性资料。

1 基本原理

1.1 有限差分正演

有限差分法数值模拟技术开始于20世纪70年代初,Altermann and Karal(1968)使用显式有限差分格式获得了层状介质二阶弹性波方程的离散数值解,由于其开创性的工作,差分方法很快被用于解决各种勘探地震学的实际问题,并在应用中不断得到发展。

地层均具有粘弹性特征,尤其是第四系,因此采用粘弹性介质模型进行地震模拟,能更真实反映第四系和活断层的地震响应特征。Kelvin粘弹性介质模型是人们在描述地震波衰减时用的较多的一种介质模型,在加入粘滞项以后,其表达类型可以同均匀弹性各项同性介质的情况相对应。假定不存在外力项,考虑二维的情况,Kelvin粘弹性波方程的一阶速度—应力方程形式(奚先和姚姚,2004):

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial t} + \lambda' \frac{\partial^2 v_z}{\partial z \partial t}, \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} + \lambda' \frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial t} + (\lambda' + 2\mu') \frac{\partial^2 v_z}{\partial z \partial t}, \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial t} = \mu(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}) + \mu'(\frac{\partial^2 v_x}{\partial z \partial t} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial t}), \\ \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ 和 μ 是均匀弹性各向同性介质的弹性拉梅系数, λ' 和 μ' 是粘性拉梅系数,由下式计算:

$$\begin{aligned} \lambda + 2\mu &= \rho V_p^2, \mu = \rho V_s^2, \\ \lambda' + 2\mu' &= \rho V_p^2 / (Q_p \omega), \mu' = \rho V_s^2 / (Q_s \omega). \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为圆频率, V_p 和 V_s 为介质纵横波速度, Q_p 和 Q_s 分别表示描述纵波和横波衰减特性的品质因子。深层固结状态好的岩石的品质因子 Q 计算经验公式(李庆忠和魏继东,2007;狄帮让等,2009):

$$\begin{aligned} Q_p &= a V_p^{2.2}, \\ Q_s &= b \left[\frac{V_s}{V_p} \right]^2 Q_p. \end{aligned} \quad (3)$$

式中:速度 V 的单位是 km/s, $a = 14.0$, $b = 2.07$ 。由上述经验公式是从深层固结状态好的岩石中得到

的结论,而一般情况下第四系具有更大系数 a ,依据实际第四系 Q 统计分析,本次模拟采用以下经验公式计算 Q :

$$Q_P = 56.0V_P^{2.2},$$

$$Q_S = 2.07 \left[\frac{V_S}{V_P} \right]^2 Q_P. \quad (4)$$

从而实现粘弹性波场数值模拟.

1.2 地震瞬时属性原理及算法

设 $x(t)$ 为地震信号时间序列,则其复数道 $z(t)$ 为(Taner *et al.*, 1979):

$$z(t) = x(t) + iy(t), \quad (5)$$

式中 $y(t)$ 为 $x(t)$ 的希尔伯特变换,即虚地震道.利用复地震道分析可定义瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率等属性.实地震道 $x(t)$ 可以用信号的瞬时振幅 $a(t)$ 和瞬时相位 $\theta(t)$ 两个基本属性来表示:

$$x(t) = a(t) * \cos(\theta(t)), \quad (6)$$

式中: $a(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}$ 只随时间变化,也称瞬时包络; $\theta(t) = \arctan(y(t)/x(t))$ 表示坐标原点为起点, t 时刻指向 $(x(t), y(t))$ 的射线在复平面上与 x 轴正方向之间的角度,范围为 $[-\pi, \pi]$.

定义瞬时频率为瞬时相位的导数,在计算上可表示为(陈林和宋海斌, 2009):

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{x(t) \frac{dy(t)}{dt} - y(t) \frac{dx(t)}{dt}}{x^2(t) + y^2(t)}, \quad (7)$$

式中: dx/dt 和 dy/dt 采用五点中心差分代替微分:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x(t-2\Delta T) - 8x(t-\Delta T) + 8x(t+\Delta T) - x(t+2\Delta T)}{12\Delta T},$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{y(t-2\Delta T) - 8y(t-\Delta T) + 8y(t+\Delta T) - y(t+2\Delta T)}{12\Delta T}. \quad (8)$$

由于微分运算对相位的突变和噪声极其敏感,当信号瞬时包络趋于 0 时,瞬时频率会产生无意义的尖峰频率,或正或负、且值异常大,通过在分母部分加一个较小的阻尼因子 ϵ 可以在一定程度上避免瞬时频率尖峰值的出现(Matheney and Nowack, 1995).通常取 $\epsilon = (0.001A)^2$ 可算得较理想结果, A 为瞬时包络最大值.

2 理论地质模型数值模拟与分析

是否穿过第四系是判别断层活动性的标志之一,而通常情况下断层都伴随着破碎带的存在,活动断层破碎带与围土之间存在较小物性差,即物性界面反射能量较弱,并且活动断层常被素填土所覆

盖.在实际探测中,由于噪声存在,地震记录中往往难以判别断层是否穿过第四系.因此,为了获取非活动和活动断层的地震响应和波场特征,以及说明利用地震动力学属性来提高判别断层是否穿过第四系的可能性和有效性,笔者设计了多个水平层状介质理论地质模型,并进行了基于二维粘弹性波动方程有限差分数值模拟和希尔伯特变换“三瞬”地震动力学属性提取与分析.

2.1 理论地质模型建模

为了说明数值模拟和地震动力学属性提取方法及判别断层活动性的正确性和有效性,笔者设计了 5 个水平层状介质理论地质模型,均由 4 层水平层状介质(第 1、2、3 和 4 层分别为素填土层、第四系粘土层、风化层和基岩)和 1 条倾角为 45° 的正断层(断距为 4 m)构成,网格大小均为 0.2 m(即 $\Delta x = \Delta z = 0.2$ m).

2.1.1 非活动断层模型 I 该模型为非活动断层模型,断层未穿过第四系,并且不存在破碎带.如图 1 和表 1 所示.

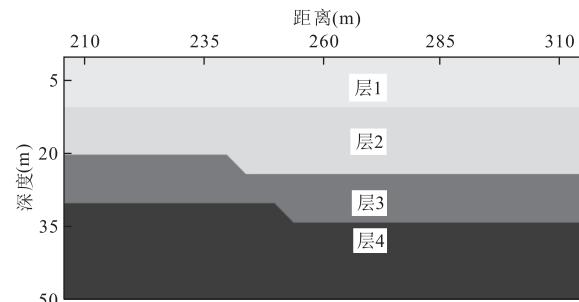


图 1 非活动断层模型(模型 I)

Fig.1 Inactive fault model (model I)

2.1.2 活动断层模型 II ~ V 模型 II ~ V 为存在不同宽度破碎带的活动断层模型,且均穿过第四系,但未穿过素填土层,4 层水平层状介质物性参数与模型 I 相同.模型 II、III、IV 和 V 的破碎带厚度分别为 $1/8\lambda$ 、 $1/4\lambda$ 、 $1/2\lambda$ 和 λ (波长 λ 取为 8.3 m,即粘土层纵波速度 V_P /子波主频 f , V_P 和 f 分别采用 1 000 m/s 和 120 Hz),即 1.0、2.1、4.2 和 8.3 m,相应的水平宽度分别为 1.5、2.9、5.9 和 11.8 m,破碎带的物性参数见表 2 所示,模型 III 见图 2 所示.

2.2 波场模拟与特征分析

二维粘弹性波动方程有限差分数值模拟参数如下:网格大小为 0.2 m、采样间隔为 0.025 ms、雷克子波频率为 120 Hz、偏移距为 2.0 m,等偏移距模拟范

表1 非活动断层模型I参数

Table 1 The parameters of inactive fault model

模型层号	厚度(m)	界面深度(m)	断层性质	断层倾角(°)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q_p	Q_s	备注
1	10	10	正		960	288	1 568	51.2	9.5	素填土层
2	10/14	20/24	正	45	1 000	300	1 600	56.0	10.4	第四系粘土层
3	10	30/34	正	45	1 400	600	1 800	117.4	44.6	风化层
4			正	45	2 000	900	2 000	257.3	107.9	基岩

注: V_p 、 V_s 、 ρ 、 Q_p 和 Q_s 分别为纵波速度、横波速度、密度、纵波品质因子和横波品质因子。

表2 活动断层破碎带模型参数

Table 2 The parameters of fracture zone in active fault model

模型 编号	破碎带 厚度(m)	第四系粘土层破碎带					风化层破碎带					基岩破碎带				
		V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q_p	Q_s	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q_p	Q_s	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	Q_p	Q_s
II	1.5	960	288	1 568	51.2	9.5	1 344	576	1 764	107.3	40.8	1 880	846	1 920	224.6	94.1
III	2.9	960	288	1 568	51.2	9.5	1 344	576	1 764	107.3	40.8	1 880	846	1 920	224.6	94.1
IV	5.9	960	288	1 568	51.2	9.5	1 344	576	1 764	107.3	40.8	1 880	846	1 920	224.6	94.1
V	11.8	960	288	1 568	51.2	9.5	1 344	576	1 764	107.3	40.8	1 880	846	1 920	224.6	94.1

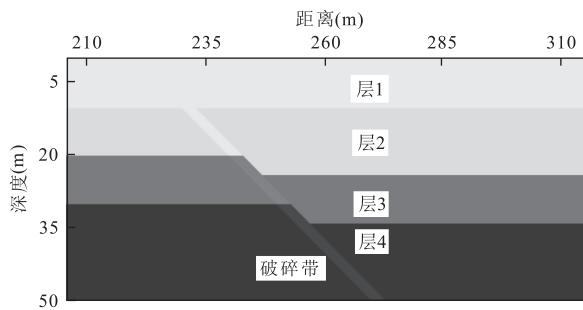


图2 活动断层模型(模型III)

Fig.2 Active fault model (model III)

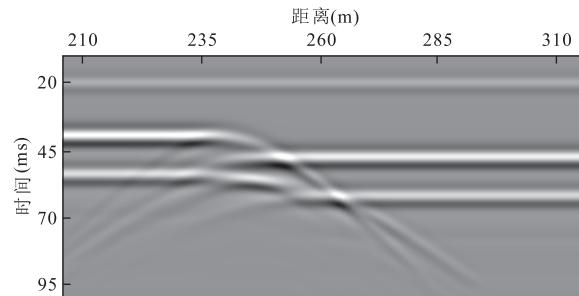


图3 非活动断层模型I等偏移距模拟时间剖面

Fig.3 Simulation time section in equal offset of inactive fault model I

围为 206~316 m, 输出记录道间距、采样间隔和记录时间长度分别为 1.0 m、0.1 ms 和 100 ms, 为了突出反射信号, 进行了直达波切除, 切除时间为 10 ms, 所以时间剖面起始时间为 10 ms。

2.2.1 模型I 如图3所示, 可见各层反射、断面

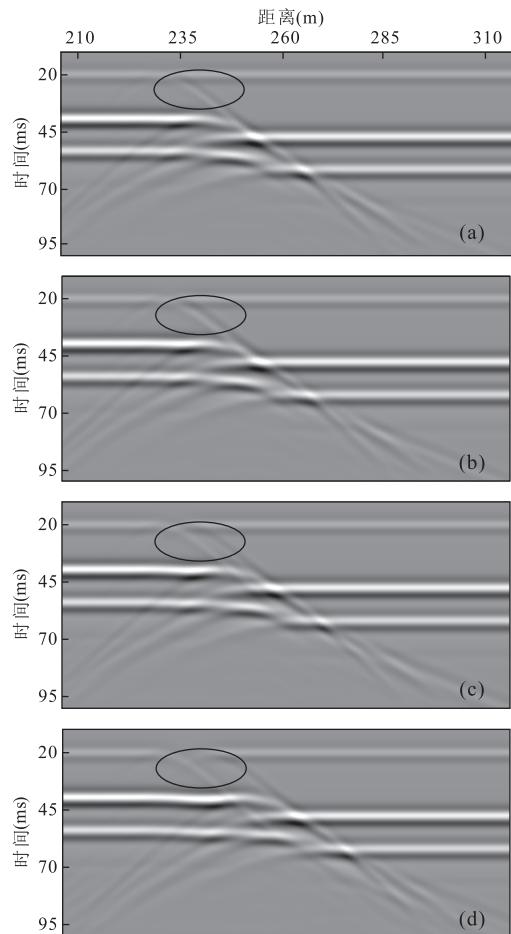


图4 活动断层模型等偏移距模拟时间剖面

Fig.4 Simulation time section in equal offset of active fault model

a、b、c 和 d 分别为模型 II、III、IV 和 V 的时间剖面, 图中圆圈处为第四系地层中断层所在位置

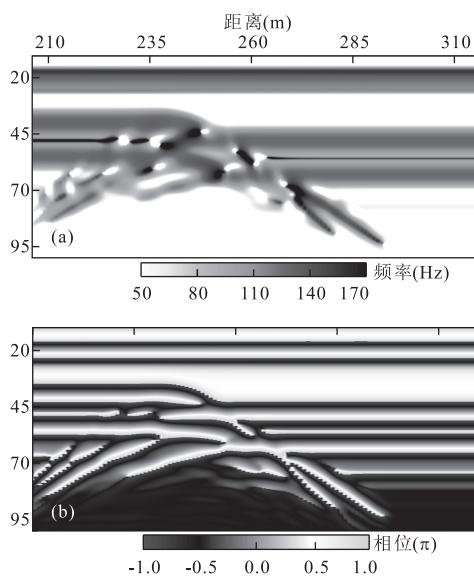


图 5 非活动断层模型 I 的瞬时属性剖面

Fig.5 Instantaneous attribute section of model I

a 和 b 分别为瞬时频率和相位属性剖面

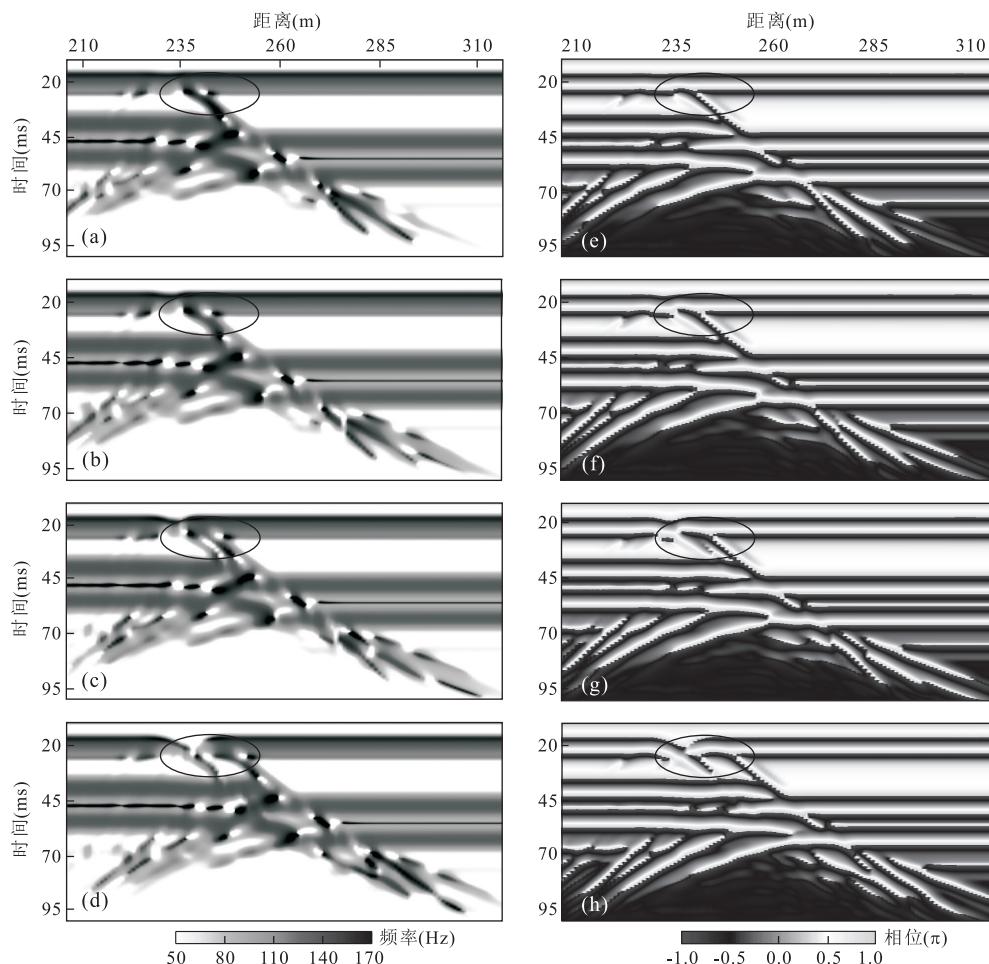


图 6 活动断层模型 II ~ V 的瞬时属性剖面

Fig.6 Instantaneous attribute section of active fault model II ~ V

a、b、c 和 d 分别为模型 II、III、IV 和 V 的频率剖面, e、f、g 和 h 分别为模型 II、III、IV 和 V 的相位剖面, 图中圆圈处为第四系地层中断层所在位置

和断点绕射波清晰可辨,且各波旅行时与理论计算值相符,说明了数值模拟的正确性。

2.2.2 模型 II ~ V 如图 4 所示,各反射和绕射波清晰可辨,断面波(或破碎带反射波)强弱与破碎带的厚度有关,厚度为 $1/4\lambda$ 时能量最强, $1/8\lambda$ 时次之, $1/2\lambda$ 和 λ 时最弱,在存在噪声的情况下有可能无法有效确定它们的存在。

2.3 地震属性提取与分析

为了有效追踪和识别各反射波和绕射波,尤其是第四系中的断面波(或破碎带反射波),笔者对模型 I ~ V 模拟时间剖面进行了瞬时频率和相位地震属性的提取和分析,说明采用这两种地震属性识别第四系中的断面波(或破碎带反射波)弱信号的有效性及优势,实现对断层活动性的有效评判。

2.3.1 模型 I 如图 5 所示,各反射和绕射波清晰可辨,断层明显未穿过第四系,瞬时频率随深度的增

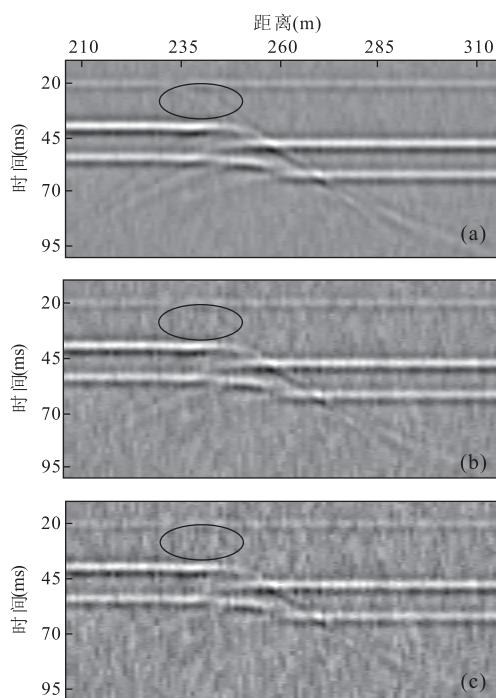


图 7 模型IV加不同相干噪声后的时间剖面

Fig. 7 Simulation time section with different coherent noise of active fault model IV
a、b 和 c 分别为加 15%、30% 和 45% 相干噪声后的时间剖面, 图中圆圈处为第四系地层中断层所在位置

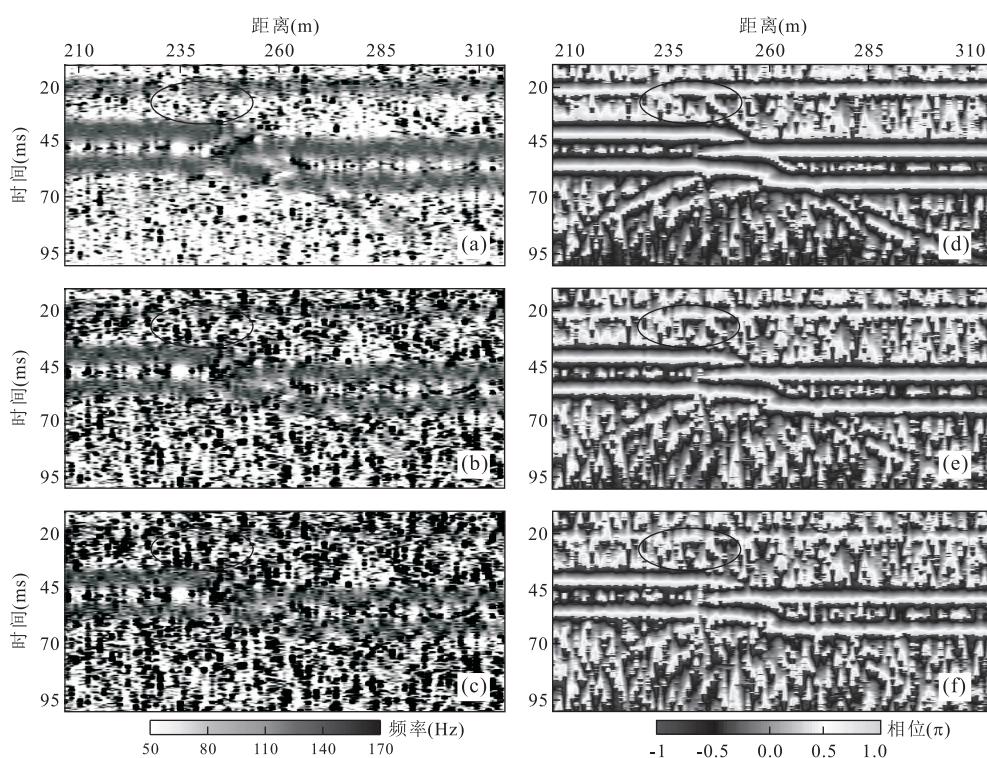


图 8 模型IV加不同相干噪声后的瞬时属性剖面

Fig. 8 Instantaneous attribute section with different coherent noise of active fault model IV
a、b 和 c 分别为加 15%、30% 和 45% 噪声后的频率剖面, d、e 和 f 分别为加 15%、30% 和 45% 噪声后的相位剖面, 图中圆圈处为第四系地层中断层所在位置

加而降低, 可获得频率的纵横向变化规律; 各波的连续性与时间剖面基本相当, 在波相互叠加处的连续性不如时间剖面。瞬时相位剖面各波的连续性总体优于时间剖面和瞬时频率剖面, 尤其是断面和绕射波, 因此瞬时相位可用于弱反射界面的有效追踪和识别。

2.3.2 模型Ⅱ~V 如图 6 所示, 各反射和绕射波清晰可辨, 断层穿过第四系特征明显, 均可有效追踪和识别破碎带的存在, 其特征明显优于时间剖面, 并且当破碎带厚度大于 $1/4\lambda$ 时可有效追踪和识别破碎带的顶底反射。瞬时频率均随深度的增加而降低, 可获得频率的纵横向变化规律, 当破碎带厚度为 $1/8\lambda$ 和 $1/4\lambda$ 时破碎带顶底瞬时频率表现为低—高频率特征, 而当破碎带厚度为 $1/2\lambda$ 和 λ 时破碎带顶底瞬时频率表现为高—低频率特征, 因此可依据此特性来确定破碎带的宽度或厚度; 各波的连续性与时间剖面基本相当, 在波相互叠加处的连续性不如时间剖面; 瞬时频率剖面中第四系破碎带响应特征比时间剖面明显和突出。瞬时相位剖面各波的连续性总体优于时间剖面和瞬时频率剖面, 断面和绕射波的连续性明显优于两者, 尤其是穿过第四系的破碎

带弱反射波,因此瞬时相位可用于弱反射界面的有效追踪和识别,以及确定破碎带的宽度或厚度。

2.3.3 加噪对地震属性提取的影响 为了说明瞬时频率和相位地震属性在相干噪声干扰情况下追踪和识别穿过第四系断层(或破碎带)的有效性、抗噪能力和优越性。笔者利用计算机生成原时间剖面最大振幅值的 15%、30% 和 45% 的随机数后,选取窗口大小为 2/3 周期的时间长度,对每道随机噪声进行中值滤波得到相干噪声记录道,对活动断层模型 IV 时间剖面进行加噪处理,形成加噪时间剖面。并进行瞬时频率和相位地震属性的提取和分析。

如图 7 所示,素填土层和断层破碎带与第四系粘土层之间的物性分界面反射波,以及断面(或破碎带)和绕射波清晰度随相干噪声的增加而变模糊,即使是加入 15% 的相干噪声,第四系中的断面(或破碎带)反射波也不易有效追踪和识别;加入大于 15% 的相干噪声后各断面和绕射波基本已无法追踪和识别,尤其是穿过第四系的断面(或破碎带)反射波,即此时已无法判断断层的活动性。如图 8 所示,瞬时频率剖面随相干噪声的增加反射波和绕射波的连续性而明显变差;当加入 15% 相干噪声时瞬时频率剖面中断面和

绕射波已不易追踪和识别,大于 15% 相干噪声时已无法追踪和识别,反射波和绕射波的连续性不如对应的时间剖面,说明瞬时频率地震属性具有较低的抗噪能力。瞬时相位剖面随相干噪声的增加反射波和绕射波的连续性而变差,但其速率远低于瞬时频率和时间剖面;当加入 45% 相干噪声时瞬时相位剖面中反射和绕射波基本上还可追踪和识别,穿过第四系的断层(或破碎带)仍有显示,小于等于 30% 相干噪声时反射和绕射波可有效追踪和识别,各波的连续性远高于瞬时频率和时间剖面,说明瞬时相位地震属性具有较高的抗噪能力,可有效用于高噪声和弱振幅反射与绕射波的追踪和识别。

3 实例应用与分析

为了进一步说明瞬时属性在活断层追踪和识别的有效性和优越性,笔者对某城市活断层实例进行了瞬时频率和相位地震属性提取和与时间剖面的对比分析,如图 9 所示。时间剖面中基岩强风化顶板反射同相轴连续性较好,可连续追踪和识别,基岩埋深左段浅右段深;由于受断层的影响,左段基岩中风化

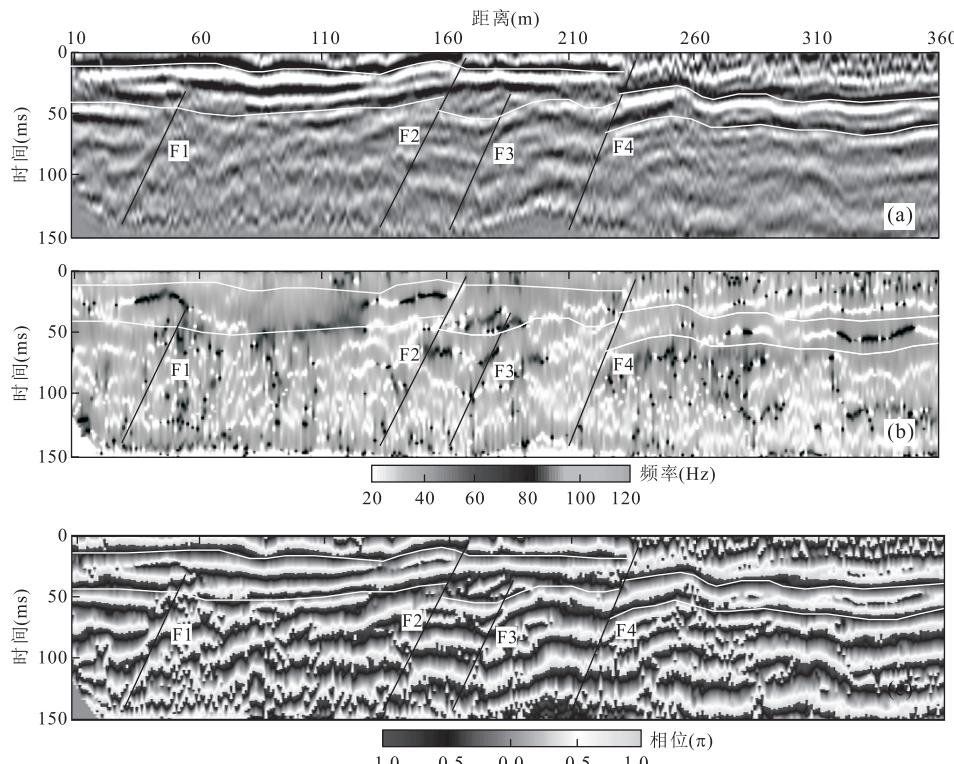


图 9 实例时间剖面和瞬时属性剖面

Fig.9 Time section and instantaneous attribute section of an example

a、b 和 c 分别为实例时间、瞬时频率和相位剖面

顶板反射同相轴连续性相对较差,基本上可追踪和识别;右段基岩中风化顶板反射同相轴连续性相对较好,基本上可连续追踪和识别。主要存在4条断层(即F1、F2、F3和F4),F2和F4可确定为逆断层,且有可能穿过第四系(即活断层),而F1和F3不易确定其性质。

时间剖面对应的瞬时频率地震属性剖面各反射波的连续性总体不如时间剖面,但F2和F4穿过第四系的特征比时间剖面明显,进一步说明了F2和F4为活断层的可能性;瞬时相位地震属性剖面各反射波的连续性明显比水平叠加时间剖面和瞬时频率剖面高,且F2和F4穿过第四系的特征明显突出,以及F1和F3逆断层特征显示明显,但未穿过第四系,可确定F1和F3为活动逆断层,进一步说明在活断层与反射波的追踪和识别及判定上,瞬时相位地震属性剖面比水平叠加时间和瞬时频率剖面具有明显的优越性。瞬时相位地震属性是判定断层活动性的重要和有效的地震属性。

4 结论

(1)无噪声情况下,瞬时频率和相位地震属性剖面中的各反射和绕射波清晰可辨,断层穿过第四系特征明显,均可有效追踪和识别破碎带的存在,其特征明显优于时间剖面。瞬时频率剖面中第四系破碎带响应特征比时间剖面明显和突出,瞬时相位剖面各波的连续性总体优于瞬时频率剖面,尤其是穿过第四系的破碎带弱反射波。

(2)加入相干噪声后的瞬时频率剖面随相干噪声的增加各波的连续性明显变差,相干噪声大于15%时瞬时频率剖面已无法追踪和识别断面波(或破碎带反射波)和绕射波。瞬时相位剖面随相干噪声的增加各波的连续性而变差,但其变化程度远低于瞬时频率和时间剖面,加入小于等于30%相干噪声后各波可有效追踪和识别,说明瞬时相位地震属性具有高的抗噪能力,瞬时相位地震属性可有效实现高噪声和第四系中的弱反射断面波(或破碎带反射波)的追踪和识别。

(3)在实际活断层判定中,地震水平叠加时间剖面、瞬时频率和瞬时相位地震属性均可用于穿过第四系的断层(或破碎带)的有效追踪和识别与判定,而瞬时相位属性优于瞬时频率属性和时间剖面,其特征更为明显和突出,是判定断层活动性的重要和有效的地震属性。

References

- Alterman, Z., Karal, F. C., 1968. Propagation of Elastic Waves in Layered Media by Finite Difference Methods. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58 (1):367—398.
- Chen, L., Song, H.B., 2009. The Estimation of Instantaneous Frequency of Seismic Signal. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(1):206—214(in Chinese with English abstract).
- Di, B.R., Pei, Z.L., Xia, J.Z., et al., 2009. Forward Simulation of Viscoelastic Wave Equation in Thin-Interbedded Reservoir Model. *Oil Geophysical Prospecting*, 44 (5): 622—629(in Chinese with English abstract).
- Feng, S.Y., Long, C.X., Gao, R., et al., 2010. Joint Application of High-Resolution Refraction and Shallow Reflection Seismic Exploration Approach to Active Fault Survey. *Acta Seismologica Sinica*, 32(6):718—724(in Chinese with English abstract).
- Gu, Q.P., Kang, Q.Q., Xu, H.G., et al., 2013. Seismic Exploration Methods for Buried Faults and Its Up-Break Point in Thin Sediment Areas—An Example of The Feihuanghe Fault. *Chinese Journal of Geophysics*, 56 (5):1609—1618 (in Chinese with English abstract).
- Hastings, F.D., Schneider, J.B., Broschat, S.L., 1996. Application of the Perfectly Matched Layer (PML) Absorbing Boundary Condition to Elastic Wave Propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(5): 3061—3069.doi:10.1121/1.417118
- He, C. C., Li, X. R., Wang, J., et al., 2015. Seism-Tectonic Background, Deep Rheological Structure and Triggering Mechanism of Diqing Earthquake (M_s 5.9), Yunnan. *Earth Science*, 40 (10): 1653—1666 (in Chinese with English abstract).doi:10.3799/dqkx.2015.149
- He, Z.Q., Pan, H., Hu, G., et al., 2010. Study on the Seismic Exploration Method to Detect Buried Fault in the Site of Nuclear Power Plant. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(2): 326—334 (in Chinese with English abstract).
- Lan, X.W., Yan, X.F., Wang, C.H., 2008. Application of Seismic Modeling in the Shallow Seismic Prospecting Method to Urban Active Fault Detection. *Northwestern Seismological Journal*, 30 (4): 354—359 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q.Z., Wei, J.D., 2007. Influence of Array Effect on Cutoff Frequency of High Frequency in High-Density Seismic Acquisition. *Oil Geophysical Prospecting*, 42(4):363—369(in Chinese with English abstract).
- Matheney, M. P., Nowack, R. L., 1995. Seismic Attenuation Values Obtained from Instantaneous-Frequency Matching and Spectral Ratios. *Geophysical Journal International*

- tional, 123(1): 1—15. doi: 10.1111/j.1365—246X.1995.tb06658.x
- Taner, M. T., Koehler, F., Sheriff, R. E., 1979. Complex Seismic Trace Analysis. *Geophysics*, 44 (6): 1041—1063. doi: 10.1190/1.1440994
- Xi, X., Yao, Y., 2004. The Analysis of the Wave Field Characteristics in 2D Viscoelastic Random Medium. *Progress in Geophysics*, 19(3): 608—615 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F.K., Liu, Z.F., Zhang, Z.Q., et al., 2015. Double Difference Relocation and Focal Mechanisms of the Jinggu $M_{\text{s}} 6.6$ Earthquake Sequences in Yunnan Province in 2014. *Earth Science*, 40(10): 1741—1754 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2015.156
- 附中文参考文献**
- 陈林, 宋海斌, 2009. 地震信号瞬时频率的估算. 地球物理学报, 52(1): 206—214.
- 狄帮让, 裴正林, 夏吉庄, 等, 2009. 薄互层油藏模型黏弹性波方程正演模拟研究. 石油地球物理勘探, 44(5): 622—629.
- 顾勤平, 康清清, 许汉刚, 等, 2013. 薄覆盖层地区隐伏断层及其上断点探测的地震方法技术——以废黄河断层为例. 地球物理学报, 56(5): 1609—1618.
- 贺赤诚, 李献瑞, 王杰, 等, 2015. 云南迪庆 5.9 级地震构造背景、深部流变结构与发震机制. 地球科学, 40(10): 1653—1666.
- 何正勤, 潘华, 胡刚, 等, 2010. 核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究. 地球物理学报, 53(2): 326—334.
- 兰晓雯, 晏信飞, 王成虎, 2008. 地震正演模拟在高分辨率隐伏断层地震勘探中的应用. 地震工程学报, 30(4): 354—359.
- 李庆忠, 魏继东, 2007. 高密度地震采集中组合效应对高频截止频率的影响. 石油地球物理勘探, 42(4): 363—369.
- 奚先, 姚姚, 2004. 二维粘弹性随机介质中的波场特征分析. 地球物理学进展, 19(3): 608—615.
- 徐甫坤, 刘自凤, 张竹琪, 2015. 2014 年云南景谷 $M_{\text{s}} 6.6$ 地震序列重定位与震源机制解特征. 地球科学, 40(10): 1741—1754.

* * * * *

(上接 452 页)

- Scanlon, B. R., Healy, R. W., Cook, P. G., 2002. Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1): 18—39. doi: 10.1007/s10040-001-0176-2
- Simunek, J., van Genuchten, M. T. V., Šejna, M., 2008. Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 587—600. doi: 10.2136/vzj2007.0077
- Tian, Y., Lei, X. H., Jiang, Y. Z., et al., 2010. Comment on Parameter Sensitivity Analysis of Hydrological Model. *Journal of China Hydrology*, 30(4): 9—12 (in Chinese with English abstract).
- van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5): 892—898. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- van Genuchten, M. T., Leij, F. J., Yates, S. R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Vogel, T., Císlarová, M., 1988. On the Reliability of Unsat-

- rated Hydraulic Conductivity Calculated from the Moisture Retention Curve. *Transport in Porous Media*, 3(1): 1—15. doi: 10.1007/BF00222683
- Wang, Z. T., Jiao, X. Y., Han, H. L., et al., 2013. Sensitivity Analysis of VG Model Parameters with Vertical One-Dimensional Soil Infiltration. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 41(1): 80—84 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 毕经纬, 张佳宝, 陈效民, 等, 2003. 农田土壤中土壤水渗漏与硝态氮淋失的模拟研究. 灌溉排水学报, 22(6): 23—26.
- 霍思远, 2015. 潜水位下降对入渗补给的影响研究——以华北平原为例(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学(武汉), 29—30.
- 孟江丽, 2004. 水盐与排水系统的模拟研究(硕士学位论文). 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 35—36.
- 田雨, 雷晓辉, 蒋云钟, 等, 2010. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述. 水文, 30(4): 9—12.
- 王志涛, 缙锡云, 韩红亮, 等, 2013. 土壤垂直一维入渗对 VG 模型参数的敏感性分析. 河海大学学报(自然科学版), 41(1): 80—84.