

· 处理技术 ·

地震数据 Q 吸收补偿应用研究

李合群*^{①②} 孟小红^① 赵波^②

(①中国地质大学(北京),北京 100083;②东方地球物理公司,河北涿州 072751)

李合群,孟小红,赵波. 地震数据 Q 吸收补偿应用研究. 石油地球物理勘探, 2010, 45(2): 190~195, 229

摘要 如今地震数据 Q 吸收补偿技术在实际应用中主要面临如下三方面的问题: 地层品质因子 Q 的准确估算、 Q 吸收补偿中的高频噪声控制以及 Q 吸收补偿结果评价。为此本文提出为了获得更好的补偿效果, 补偿算子的振幅随频率的变化需要具有更灵活的选择, 以适应输入数据信噪比随频率的变化。通过理论数据和野外数据应用结果分析, 总结了实际数据 Q 吸收补偿结果的评价方法, 同时展示了 Q 吸收补偿技术在信号保真性以及提高分辨率方面要优于目前常用的统计性反褶积技术。

关键词 Q 吸收补偿 高频噪声 补偿结果 信号保真 提高分辨率

1 引言

随着岩性解释、开发地震等技术的深入发展, 人们对前期地震数据处理的反射信号保真度提出了越来越高的要求, 因此有关常规处理中可能影响信号保真度的处理技术再度引起人们的关注, 其中提高分辨率的处理技术自然成为人们重点关注的对象。如今地震数据处理中, 作为常规处理的提高分辨率处理主要通过统计性反褶积实现。但这类反褶积技术的数学模型基本以“地震子波为最小相位且不随传播时间改变”、“反射系数为白噪声序列”、“无噪声干扰”等为假设条件, 而实际地震数据只能在一定程度上满足这些假设条件, 因此反褶积结果存在反射信号的失真。与常规统计性反褶积相比, Q 吸收补偿技术对地震子波和反射系数没有以上类似假设, 因此它在提高分辨率处理中具有较大的优势。

然而, 由于 Q 吸收补偿技术具有随频率和传播时间的增大而增加的能量放大作用, 因此地震数据随传播时间增大和频率的增高, 反射信号遭受的 Q 吸收作用加重, 从而导致地震记录信噪比的降低, 使得实际数据 Q 吸收补偿结果往往又因信噪比“过低”而被舍弃。事实上, 造成这种“过低”的可能原因有如下几方面: 第一, 输入数据信噪比确实已经低到不适宜做 Q 吸收补偿; 第二, 补偿所用的 Q 值不合

理; 第三, Q 吸收补偿算子的增益控制欠佳或输入数据预处理不当; 第四, Q 吸收补偿后的数据信噪比并非真正过低——评价方法不合理。所以在实际数据处理中合理有效地应用 Q 吸收补偿技术, 需要综合考虑上述几方面的问题。

围绕地层对地震数据的 Q 吸收及补偿问题, 前人已经做了大量的研究。根据不同的假设条件, 人们提出了不同的地层吸收数学模型^[1~4], 引入了最小相位假设, 对振幅和相位进行补偿^[4]; Hargreaves 等^[5] 借鉴 Stolt 偏移的思路, 通过波场延拓实现了适应时变 Q 值的振幅补偿^[5~7]; Varela 等以提高运算效率为目的, 给出了时域滤波的方法进行振幅和相位补偿^[8]; Wang 在高频噪声(包括数值计算稳定性)控制以及对 Q 模型的适用性方面进行了研究, 并结合分辨率和信噪比对 Q 吸收补偿结果进行了定量分析^[9~11]; 王卫华^[12]、凌云^[13] 及白桦等^[14] 绕开对地层品质因子 Q 的估算, 采用变通的方法来补偿地层吸收对地震数据的影响。前人从理论到实现方法, 再到实际应用, 使地震数据 Q 吸收补偿技术逐步走向成熟和实用化。但是 Q 值的准确估算、高频噪声控制, 特别是“补偿结果评价”等, 仍然是 Q 吸收补偿技术在实际应用中所面临的现实而具体的问题。

本文使用 Kjartansson 模型^[3], 采用类似 Hargreaves 等的波场延拓方法^[6], 在频率域实现适应

* 河北省涿州市东方地球物理公司物探技术研究中心, 072751

本文于 2009 年 10 月 27 日收到, 修改稿于 2010 年 1 月 29 日收到。

时一空变 Q 模型的振幅和相位补偿,并在此基础上重点研究高频噪声控制和补偿结果评价等问题。

2 增益控制

在品质因子为 Q 的地层中,对传播时间为 τ 、频率为 f 的信号分量实行 Q 吸收补偿算子的振幅可表示为

$$P(f, t) = e^{\frac{ft}{Q}} \quad (1)$$

设 Q 吸收补偿前传播时间为 τ 的地震记录 $X_r(f, \tau)$ 由反射系数序列 $R(f, \tau)$ 与 (Q 吸收引起的) 时变子波 $S(f, \tau)$ 褶积加背景噪声 $N(f, \tau)$ 组成 (实际数据中的背景噪声主要包括野外环境噪声、记录仪器噪声以及数字处理中有限字长导致的噪声等), 在频率域可表示为

$$X_r(f, \tau) = R(f, \tau)S(f, \tau) + N(f, \tau) \quad (2)$$

由于背景噪声近似为白噪声, 所以通常以常数 C 表示。这样, 式(2)又可以写为

$$X_r(f, \tau) = R(f, \tau)S(f, \tau) + C \quad (3)$$

用式(1)对式(3)所表示的地震记录做 Q 吸收补偿, 补偿后的地震记录可以表示为

$$\begin{aligned} X(f, \tau) &= R(f, \tau)S(f, \tau) \cdot e^{\frac{ft}{Q}} + C \cdot e^{\frac{ft}{Q}} \\ &= R(f, \tau)S(f, 0) + C \cdot e^{\frac{ft}{Q}} \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, Q 吸收补偿在恢复 Q 吸收前的震源子波 $S(f, 0)$ 的同时, 还对记录中的背景噪声以频率和传播时间的指数关系进行放大。而实际数据无法完全避免背景噪声。由于 Q 吸收导致地震信号随频率和传播时间的增大而减弱, 而背景噪声基本不变; 所以, 实际数据的信噪比 (本文中的信噪比专指有效信号对背景噪声的信噪比) 随频率的增高或传播时间的增大而降低。根据式(4), Q 吸收补偿总会导致数据总体信噪比降低; 随着频率的增高或传播时间增大 (见图 1 中的黑线, 该线代表按照式(1)计算的补偿算子的振幅值), 当 $\frac{ft}{Q}$ 达到一定值时, 补偿结果会因总体信噪比过低而失去实际意义。因此, 实际数据 Q 吸收补偿中必须采取措施来避免背景噪声的过分放大。在 Q 吸收补偿过程中进行增益控制 (也就是对 Q 吸收补偿算子的振幅进行某种方式的限制) 就是必备措施之一。

关于增益控制, 前人提出了多种不同的方法, 这

些方法各具特点, 且在避免总体信噪比过分降低方面都具有较好的实用效果。如定值限幅 (当补偿算子的振幅随频率的增高达到给定的量值时, 高于该频率的所有频率分量的振幅都保持该量值, 图 1 中的红线为给定量值为 100 的振幅谱)、三次函数镶边 (图 1 中的浅蓝线)、余弦镶边 (图 1 中的褐色线) 等。其中三次函数镶边和余弦镶边的终止频率以及对应幅值可以由用户给定。Wang 引入稳定因子来实现 Q 吸收补偿中的增益控制 (图 1 中的粉色线)。

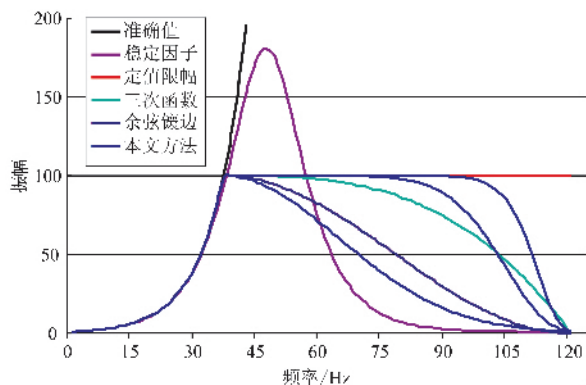


图 1 不同增益控制方式对应的 Q 吸收补偿算子的振幅谱

显然, 增益控制在避免过分降低总体信噪比的同时也导致了信号的补偿作用减弱, 所以最佳的补偿结果取决于符合补偿程度和信噪比二者最佳平衡的增益控制。因此为获得最佳的补偿结果, 增益控制应当最大程度地适应信噪比的变化。由于式(1)中的频率与传播时间成反比关系, 使得达到给定限幅值 (以及稳定因子方法中的峰值) 的频率随着传播时间的增大而降低。上述增益控制方法都具有自动适应地震数据信噪比随传播时间增大而降低 (同时也部分适应了信噪比随频率增高而降低) 的基本特点。但这些方法将算子振幅随频率的变化和随时间的变化关系绑定在一起, 这隐含着地震记录中信噪比随传播时间的变化和随频率的变化具有相同的规律, 而实际数据并非完全如此。为获得更好的补偿效果, 需要补偿算子的振幅随频率的变化具有更灵活的选择, 以最佳适应输入数据信噪比随频率的变化。为此我们对已有的余弦 (或三次函数) 镶边增益控制方法进行了改进, 但仍然采用最大增益振幅 A_{\max} 、控制最小振幅 A_{\min} 、最小振幅对应的频率 f_{\min} 等传统方式控制。对给定的传播时间 t 和地层品质因子 Q, 根据式(1)由 A_{\max} 换算出增益控制的起始频率 f_{\max} 。增加补偿算子振幅

随频率变化方式参数 n , 这样给出式(5)所表达的 控制后的 Q 吸收补偿算子的振幅谱, 即

$$A(f, t) = \begin{cases} \exp\left(\frac{2\pi ft}{Q}\right) & f \leq f_{\max} \\ \exp\left\{\frac{2\pi \left[f_{\max} + \frac{A_{\min} Q - f_{\max}}{27.3t} (f - f_{\max})^n \right] t}{Q}\right\} & f > f_{\max}, n = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

如此进行增益控制, 振幅值随频率的变化不再是按照单一的函数关系变化, 而是按照用户选定的最佳适应信噪比随频率变化而变化。与已有的余弦(或三次函数)镶边增益控制方法相同, 本文提出的方法仍然需要最大增益幅值、最小振幅对应的频率及幅值等参数控制(例如, 图 1 中的最大增益幅值为 100, 最小振幅对应的频率为 121Hz, 控制最小幅值为 1)。与已有方法不同之处是, 本文的方法另外增加了控制振幅值随频率变化方式的参数, 以适应实际数据信噪比随频率的变化。图 1 中三条蓝线分别是本文方法三种不同变化方式的振幅谱, 可以看出该方法具有很大的灵活性。

我们对上述不同增益控制方法在理论数据(图 2a)上进行了试验。从 100ms 起, 每隔 300ms 放置一个 Q 吸收后的、中心频率为 50Hz 的雷克子波形成一个地震道, 并分别使用 400、200、100、50、25 等 5 个不同的 Q 值对该理论数据道模拟常数 Q

值地层吸收情况, 各道对应的 Q 值标在图 2 的上方。使用不同的增益控制方法, 用各道相应的 Q 值对吸收模拟数据进行补偿试验。图 2 为不同增益控制方法理论数据的 Q 吸收补偿结果。图 2b 为无增益控制(输入数据中并没有加入噪声, 尽管运算中使用了双精度, 字长限制所造成的数值误差经 Q 吸收补偿放大后仍表现为很强的高频噪声); 图 2c~图 2f 依次为稳定因子法、定值限幅法、三次函数镶边法及余弦镶边法补偿结果; 图 2g 为本文提出的灵活镶边法补偿结果。其中, 稳定因子法在参数选择上以最佳信噪比为标准(当以信号恢复程度为标准选择参数时, 总体信噪比与定值限幅的相近); 其他几种方法都使用了相同的限幅值和终止频率。从各种补偿方法对比结果可以看出, 由于本文给出的增益控制方法沿频率方向有更灵活的变化方式, 可以更好地适应输入数据信噪比随频率的变化, 所以得到了更好的综合补偿结果。

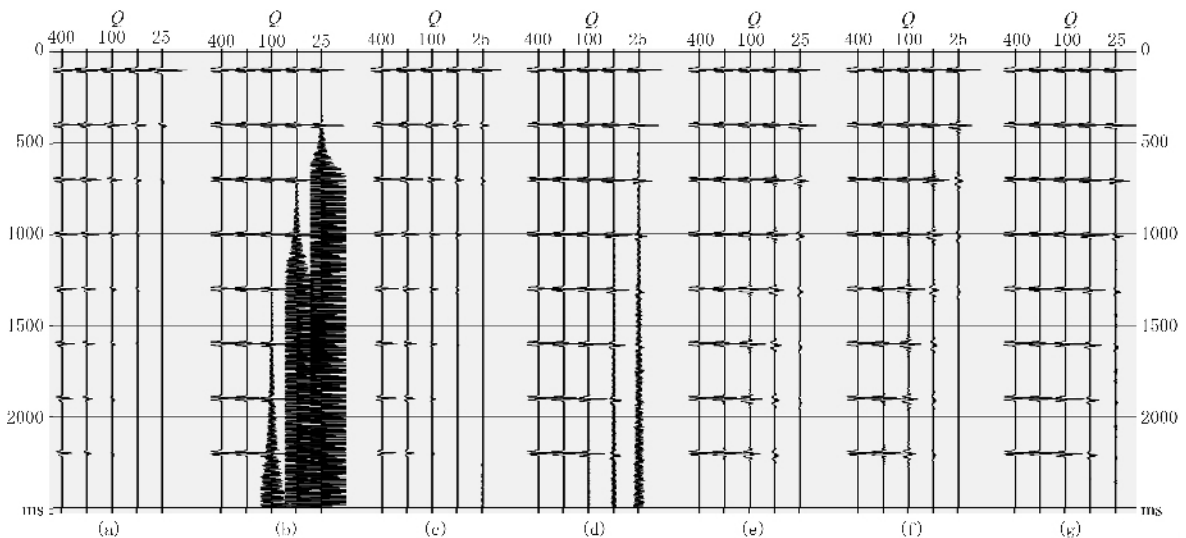


图 2 不同增益控制方法的理论数据 Q 吸收补偿(包括振幅和相位)结果对比

(a) 常数 Q 吸收模拟数据, 用作为 (b)~(g) 等 Q 吸收补偿试验的输入; (b) 无增益控制; (c) 稳定因子法; (d) 定值限幅法; (e) 三次函数镶边法; (f) 余弦镶边法; (g) 本文提出的灵活镶边法

需要注意的是,实际应用中,要尽量避免增益控制参数的剧烈或频繁变化,以免对补偿结果的一致性造成过分的干扰。

3 数据预处理及后续处理

上述增益控制可以在一定程度上避免背景噪声的过分放大。但是,应该看到,只要有背景噪声存在,Q 吸收补偿总难免会使信噪比降低。所以应在进行 Q 吸收补偿前尽量压制背景噪声(减小式(3)中的常数 C),力求减小因 Q 吸收补偿导致信噪比降低的程度。当然,在完成 Q 吸收补偿后再压制背景噪声,也可以在一定程度上恢复被降低了的信噪比。下面我们在理论数据上对上述推断进行分析。理论数据的产生及试验方法为:从 100ms 起,每隔 150ms 设置一个 50Hz 的雷克子波,形成合成数据

道,将该道重复 66 次,以模拟一个 66 次覆盖的 CDP 道集(为方便描述,下文称该数据为“源数据”)。该理论数据试验中,用常 Q 值模拟地层吸收,用随机噪声代表背景噪声,用随机噪声衰减(RNA)技术压制背景噪声,Q 吸收补偿中使用上文提出的改进了的增益控制方法。

图 3 为源数据经不同处理后的叠加结果,叠后都未做任何其他处理。图 3a 为直接叠加后的源数据;图 3b 为源数据经 Q(Q=50)吸收之后加随机噪声(信噪比从 100ms 处的 6.2,到 500ms 处的 2.0,1600ms 处的 0.25,2350ms 处的 0.1,随时间和频率以指数关系递减;平均信噪比为 0.66667);图 3c 为源数据经 Q(Q=50)吸收后做叠前 Q 吸收补偿;图 3d 为(b)的叠前数据做 Q 吸收补偿的结果;图 3e 为(b)的叠前数据经 RNA 后做 Q 吸收补偿的结果;图 3f 为(d)的叠前数据做 RNA 的结果。

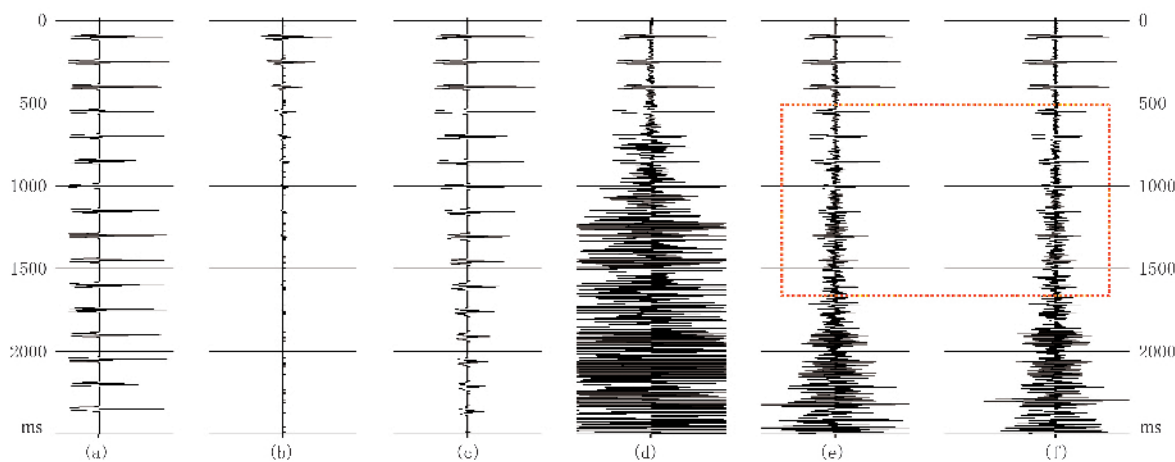


图 3 同一 CMP 理论数据经不同叠前处理后的叠加数据

(a)源数据的叠加结果;(b)源数据经 Q(Q=50)吸收后加背景噪声(信噪比从 100ms 处的 6.2,到 500ms 处的 2.0,1600ms 处的 0.25,2350ms 处的 0.1,随时间以指数关系递减,平均信噪比为 0.66667);(c)源数据经 Q(Q=50)吸收后做叠前 Q 吸收补偿;(d)(b)的叠前数据做 Q 吸收补偿;(e)(b)的叠前数据经 RNA 后再做 Q 吸收补偿;(f)(d)的叠前数据做 RNA

由试验结果可以看出:图 3a 是理想中的 Q 吸收补偿结果;图 3c 是 Q 吸收补偿后信号所能恢复的最佳结果;当存在背景噪声时,Q 吸收补偿后,随着传播时间的增加,该恢复后的信号逐渐淹没在被放大的背景噪声中(图 3d);对比图 3b、图 3d 可以看出 Q 吸收补偿降低信噪比的强度;由图 3e、图 3f 与图 3d 比较可知,无论是 Q 吸收补偿前,还是 Q 吸收补偿后再做背景噪声压制,在一定的信噪比范围内都能收到良好的效果;由图 3e、图 3f 可以看出,在虚线框出的部分(图中已经给出这部分的信噪比),Q 吸收补偿前做背景噪声压制的效果略好于 Q

吸收补偿后再做噪声压制(这种差异对不同的应用目的具有不同的意义),而在信噪比更高的虚线框之上,两种做法的结果没有实用意义上的差异,在信噪比更低的虚线框之下,两种做法基本都没有产生有意义的作用。

需要注意的是,上述对比都是在叠后数据上进行的,而叠加本身也具有很强的压制背景噪声的能力。再者,上述所展示的是在信号和噪声都接近理想条件下,用某一特定方法和参数压制背景噪声的结果。对实际数据使用不同的噪声压制方法或参数,结果会有相应的变化,但基本道理不会改变。

该试验在展示 Q 吸收补偿前的数据预处理及补偿后的后续处理效果的同时,还为 Q 吸收补偿结果的评价提供了依据,即对信噪比偏低的数据,若想正确地评价 Q 吸收补偿效果,必须经过补偿前或补偿后的背景噪声压制。

4 补偿结果评价

Q 吸收补偿的目的是恢复 Q 吸收前的震源子波,但由于 Q 吸收补偿对背景噪声的放大作用,在实际数据 Q 吸收补偿应用中不得不考虑补偿结果的总体信噪比,从而影响对震源子波的恢复程度。

所以,补偿结果评价中应当结合补偿后数据的应用目的,综合考虑信噪比和震源子波的恢复程度。具体的评价工作分解为“对震源子波恢复情况的分析”和“对补偿后的信噪比及可改善潜力的分析”。

图 4 给出了一个实际数据 Q 吸收补偿结果评价及分析验证的实例。左侧的三张图分别给出了 Q 吸收补偿前、后的同一个动校正后的 CMP 道集和补偿后数据的叠加以及相应的振幅谱。仅从叠前数据来看,补偿后的数据信噪比很低,振幅谱上的高频部分也过强,像补偿过度,似乎该补偿结果不可用。但从叠加后的数据看,信噪比并不低,与 Q 吸收补偿前相比,主频已有明显提高,并且与常见的子波振

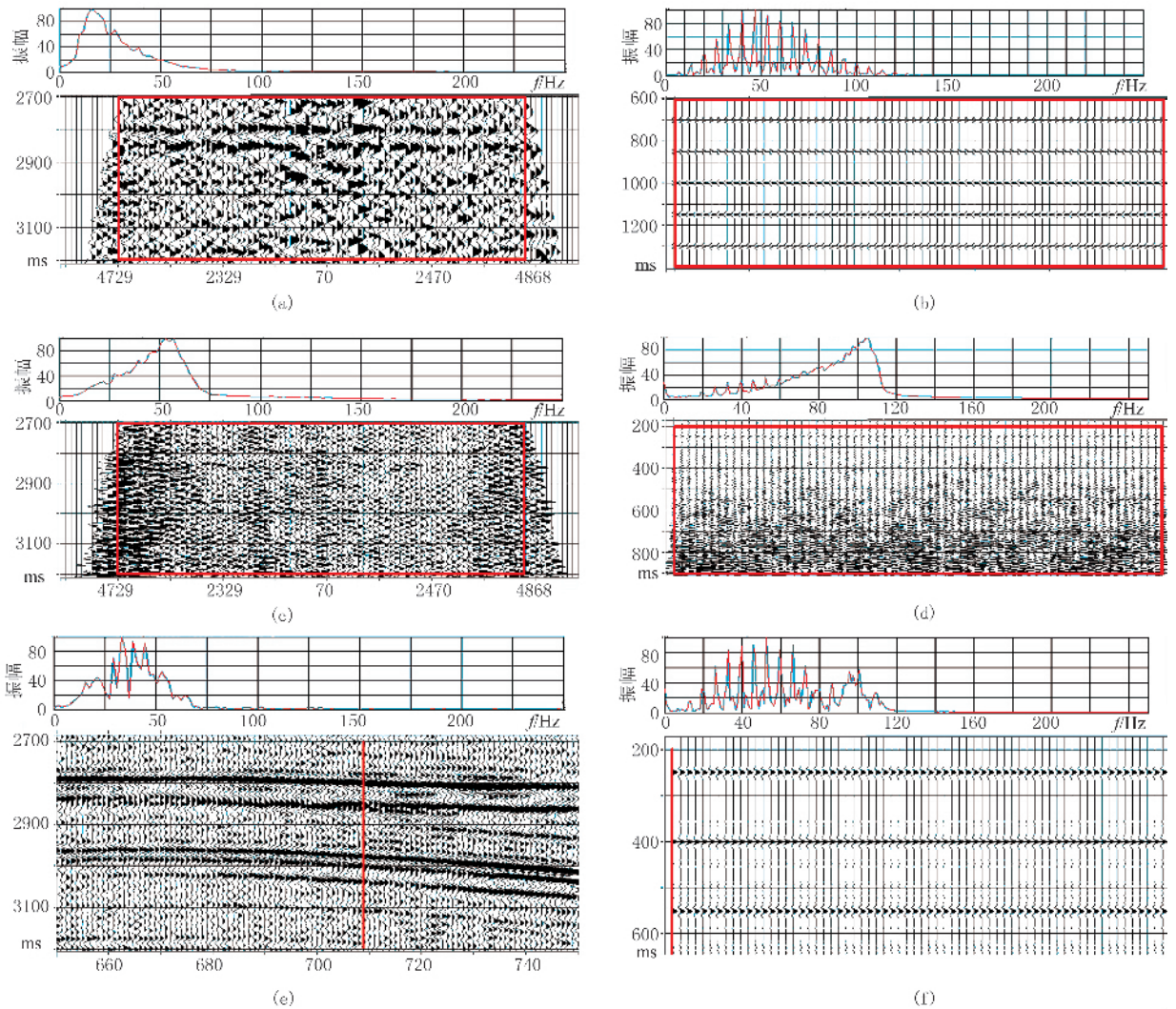


图 4 实际数据 Q 吸收补偿结果评价及与理论数据的分析验证

(a)Q 吸收补偿前、动校正后的实际 CMP 道集及其平均振幅谱; (b)动校正后的 CMP 道集理论数据及其平均振幅谱; (c)图 a 数据经 Q 吸收补偿后的结果及其平均振幅谱; (d)对图 b 数据经 Q 吸收之后加入背景噪声再用已知的 Q 值进行 Q 吸收补偿后的结果及其平均振幅谱; (e)图 c 数据的叠加结果(红线段标出的道)及其振幅谱; (f)图 d 数据的叠加结果及其振幅谱。各图中的振幅谱对应于相应图中红框或红线标出位置的数据

幅谱很像。因此可以推断,图 4c 过强的高频实际是被放大的背景噪声,并不是信号补偿过度的反映,叠加(压制背景噪声)后数据所反映的才是更为真实的补偿效果。右侧的三张图用来确认这一推断,其中图 4b 为动校正后的 CMP 道集理论数据及其平均振幅谱,图 4d 为对图 4b 数据做 Q 吸收之后加入背景噪声、再用已知的 Q 值做 Q 吸收补偿后的数据及其平均振幅谱,图 4f 为图 4d 数据的叠加结果及其振幅谱。对于该理论数据试验,不存在 Q 吸收补偿过度的问题,但补偿后的叠前数据仍然表现为高频过强,而叠加后的数据及其振幅谱都基本恢复到了 Q 吸收前的状况。该理论数据试验确认了上述对实际数据补偿结果的推断。

从上面这一简单的实例可以得出下列对 Q 吸收补偿结果评价的认识,即对 Q 吸收补偿结果的评价,应当结合补偿后数据的应用目的,在最大可能压制背景噪声后,要综合考虑信噪比和震源子波的恢复(分辨率的提高)程度。由于实际应用中得不到准确的震源子波,对补偿结果的评价还要尽可能利用井数据或其他先验信息。

另外,在实际应用中,人们习惯于把 Q 吸收补偿的结果和提高分辨率为目的统计性反褶积(这里不包括地表一致性反褶积)结果进行比较。对此,有两点需要注意。第一,Q 吸收补偿的目的在于

对经地层 Q 吸收的震源子波进行恢复,而反褶积的目的在于消除或压缩地震子波,所以不要简单地以频宽来决定二者的优劣或取舍。第二,从理论上讲,Q 吸收补偿可以消除或减小震源子波随传播时间的变化,从而改善以“子波不变”为假设条件的反褶积方法的处理效果,但是这类反褶积方法还有“反射系数为白噪”、“无噪声及其他干扰”等假设条件,单靠“子波不变”这一条件的满足不能确保实际数据反褶积效果的改善。所以实际应用中要根据具体试验结果来确定是单独使用 Q 吸收补偿,单独使用反褶积,还是两者联合使用。

上述有关 Q 吸收补偿结果评价的道理都非常简单,但常常被人们忽视,从而影响 Q 吸收补偿技术的应用。这些用于评价 Q 吸收补偿结果的道理同样适用于利用生产数据进行统计性 Q 值估算(如常 Q 扫描等)。

5 Q 吸收补偿技术的实际应用效果

Q 吸收补偿技术与常规统计性反褶积相比有诸多优点,下面以实际数据的对比试验说明。图 5 是中国西部 T 区同一测线地震资料 Q 吸收补偿与常规统计性反褶积处理的效果对比。从中可以看出,不论是从分辨率的角度还是从信号保真度角度,应

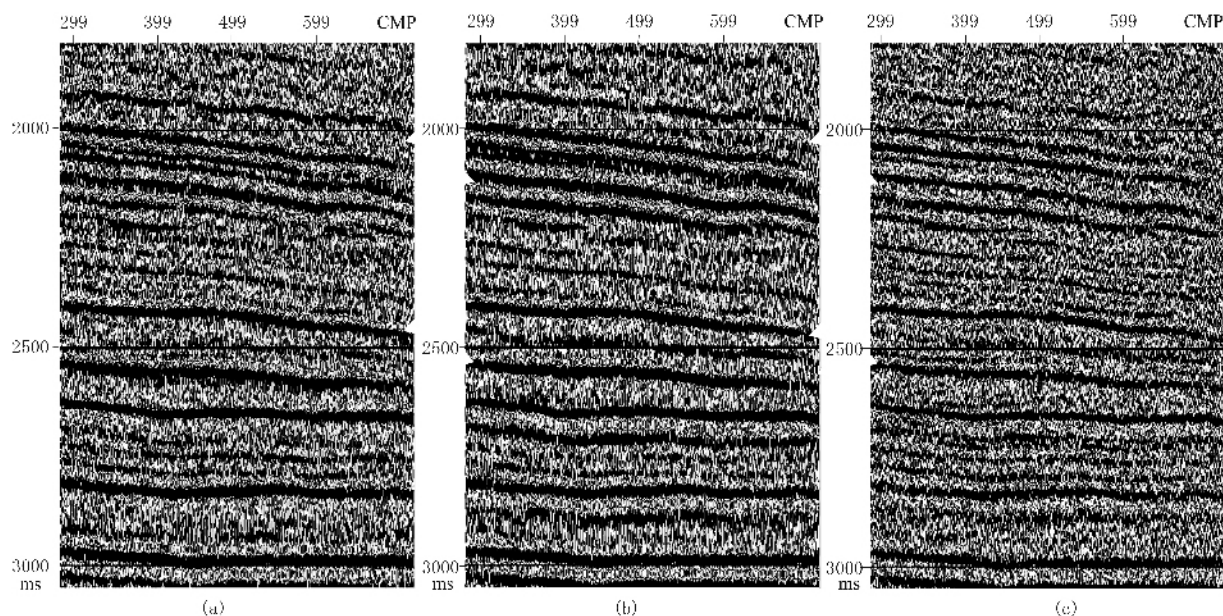


图 5 叠前 Q 吸收补偿与叠前反褶积在叠加剖面上的效果对比

(a) 叠前反褶积的叠加剖面; (b) 原始的叠加剖面; (c) 在叠前数据上用 Q 吸收补偿替换反褶积后的结果

(下转第 229 页)