

文章编号:1673-5005(2010)01-0029-05

基于叠前波场模拟的合成地震记录层位标定

李国发^{1,2}, 王尚旭^{1,2}, 马彦彦^{1,2}

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
2. 中国石油大学 中国石油天然气集团公司物探重点实验室, 北京 102249)

摘要:常规合成地震记录层位标定方法没有考虑多次波和转换波以及处理过程对层位标定的影响。为减小合成地震记录与井旁地震道在波场特征上的差异,提高合成地震记录层位标定的精度,提出基于叠前波场模拟的合成地震记录层位标定方法:首先,利用常规方法进行测井曲线编辑和地震子波提取;第二,利用反射率法模拟井旁共反射点道集;第三,对模拟的共反射点道集进行正常时差校正和叠加;最后,以叠加道作为合成地震记录对地震反射进行层位标定。试验结果表明,此方法改善了合成地震记录与井旁地震道之间在地震反射上的一致性,提高了层位标定的可靠性。

关键词:合成地震记录;层位标定;褶积模型;波场模拟;反射率法;多次波

中图分类号:P 631.4 **文献标志码:**A

Well-ties with log synthetic seismogram based on prestack wavefields simulation

LI Guo-fa^{1,2}, WANG Shang-xu^{1,2}, MA Yan-yan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Key Laboratory of Geophysical Exploration of CNPC, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The effects of multiples, converted-waves and the processing procedure on well-ties were not taken into account in conventional well-ties method. In order to decrease the differences of wavefield characteristic between log synthetic seismogram and nearby-well seismic trace, and improve the reliability of well-ties, a new well-ties method based on prestack wavefield simulation was proposed. Firstly, the well log was edited and the wavelet was extracted by conventional method. Secondly, the common-reflection-point gather located at the well was simulated by the reflectivity method. Thirdly, normal time difference correction and stack were applied to the simulated common-reflection-point gather. Finally, the stack trace was used as synthetic seismogram to calibrate the seismic reflections for well-ties. The results show that the consistency of synthetic seismogram and well-nearby traces was improved, and the reliability of well-ties was enhanced by using the new method.

Key words: synthetic seismogram; well-ties; convolution model; wavefield simulation; reflectivity method; multiples

合成地震记录层位标定是连接地震和地质的桥梁,在地震资料精细解释过程中发挥着重要作用^[1-2]。关于合成地震记录影响要素和改进方法的文献较多,尽管各自的视角不同,但主要集中在测井曲线和成像射线校正以及子波和噪声影响等方面^[3-5]。随着对合成地震记录层位标定研究工作的不断深入,产生机制和处理过程的差异对合成地震

记录与井旁地震道一致性的影响逐渐引起了人们的关注^[6]。常规的合成地震记录层位标定技术基于一维褶积模型,既没有考虑地震反射随炮检距的变换规律,也没有考虑处理因素对地震反射的改造,更没有考虑多次波和转换波对地震反射的影响,尽管这种方法曾经而且还在发挥着重要作用,但其在地震资料精细解释中的表现已经捉襟见肘,失败的实

收稿日期:2009-08-13

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2007CB209608);国家“863”高技术研究发展计划项目(2007AA06Z218)

作者简介:李国发(1966-),男(汉族),河北大城人,副教授,博士,研究方向为高分辨率地震勘探。

例屡见不鲜,甚至引发了人们对合成地震记录层位标定技术解决地质问题能力的置疑和争论^[7-9]。笔者在继承和吸收现有研究成果的基础上,从波场和处理的角对褶积模型层位标定方法进行分析,提出基于叠前波场模拟的合成地震记录层位标定方法,以改善合成地震记录层位标定技术在地震资料精细解释中的应用效果。

1 常规合成地震记录存在的问题

常规的合成地震记录制作方法基于一维褶积模型,其数学表达式为

$$x(t) = w(t) * r(t) = \int_0^T w(\tau)r(t - \tau) d\tau.$$

式中, $r(t)$ 为由声波测井数据和密度测井数据得到的反射系数序列; $w(t)$ 为由井旁地震记录提取的子波; $x(t)$ 表示合成地震记录; T 为子波的延续时间。

制作过程可归纳为:①由声波测井曲线和密度测井曲线相乘得到波阻抗曲线;②对波阻抗曲线进行深时转换,由深度域转到时间域;③由波阻抗曲线计算反射系数曲线;④由井旁地震数据提取地震子波;⑤反射系数与子波褶积,得到合成地震记录。

生成合成地震记录之后,将合成地震记录与井旁地震道进行对比,实现测井层位(或地质分层)到地震反射的映射和标定。合成地震记录层位标定的基本流程见图1。可以看出,合成地震记录层位标定的核心工作是利用测井曲线和地震子波模拟井旁地震记录,由此实现测井层位到地震层位的标定和映射。井旁地震道的模拟精度显然取决于测井曲线、地震子波和模拟方法3个基本要素。

图1 合成地震记录层位标定基本流程

Fig. 1 Basic flowchart of well-ties by synthetic seismogram

常规的合成地震记录方法基于简单的褶积模型,通过反射系数与地震子波的褶积产生合成地震记录,而井旁地震记录经历了从野外采集到室内处理,从叠前数据到偏移成像的完整过程。两者在形成机制上存在明显的差异,褶积模型无法模拟野外

采集要素(主要是观测系统)和处理过程等对井旁地震道的影响。

一维褶积模型合成地震记录没有考虑多次波和转换波对地震波场的影响。褶积模型主要考虑了不含透射损失的一次反射信号,而实际地震记录的波场不仅包含一次波,还包含多次波和转换纵波等各类波场。各类波场在空间方向和时间方向相互干涉,产生地震记录上的波组关系和波场特征。实际地震资料处理过程中虽然也使用了多次波衰减技术对多次波进行了衰减和压制,但主要是针对与一次波时差较大的多次波,对于层间多次波和微曲多次波,目前还没有有效的消除方法。对于波场多次转换形成的转化纵波,只能认可它的存在,也没有有效的识别和压制方法。用于地质解释的地震数据中还存在一定能量的残余多次波和转换波,它们改变了井旁地震记录的波组关系和反射特征,导致合成地震记录与井旁地震道的差异(特别是波组特征上的差异),这种差异对合成地震记录精细层位标定产生不可忽略的影响。

图2显示了多次波和转换纵波对地震记录反射特征的影响。图2左侧是由理论模型得到的只包含一次波的共反射点地震波场,右侧是包含一次波、多次波和转换纵波的地震波场,两者在反射特征和波组关系上存在明显差异。

图2 多次波和转换波对地震记录反射特征的影响

Fig. 2 The effect of multiples and converted-wave on reflection characteristics of seismogram

另外,合成地震记录没有考虑不同炮检距上的波场差异,没有经历由叠前到叠后的处理过程。在地震资料处理过程中,对井旁地震道反射特征影响较大的是动校正和叠加处理,由于动校正拉伸、剩余时差、反射振幅随炮检距变化、以及地震波场在不同炮检距干涉效应的差异,经过动校正之后不同炮检距上的地震

记录在反射特征上存在差异,叠加的结果是将不同炮检距上的反射进行平均,得到不同炮检距地震反射的平均响应。而褶积模型的合成地震记录只是对零炮检距反射特征的近似模拟,两者在波组关系上存在差异。在实际地震记录处理过程中,为压制面波和多次波的影响,往往采用内切除的方法阻止小炮检距的地震数据参与叠加处理,这在一定程度上加剧了合成地震记录与井旁地震道的差异。

2 反射率法叠前波场模拟合成地震记录

为改进合成地震记录与井旁地震道的一致性,合成地震记录至少应该包含2个基本过程:一是模拟野外地震波场的反射特征,使得合成地震记录与井旁地震道的波场特征尽量一致;二是模拟地震资料处理过程(尤其是动校正叠加)对合成地震记录的影响,以叠加道代替褶积模型道作为合成地震记录,减小处理过程对两者一致性的影响。

为模拟野外地震记录的波组关系和反射特征,合成地震记录所采用的模拟方法不仅要有较高的运行效率和计算精度,而且还能够模拟多次波和转换纵波对地震波场的影响。一维褶积模型显然不再适用;射线追踪虽然成本较低,但不能准确描述地震波场的动力学特性;Zoeppritz方程虽然能够反映地震波的动力学特征,但很难模拟多次波和转换纵波对地震记录的影响;弹性波动方程正演虽然可以模拟完整的地震波场,但波场过于复杂,纵横波分离困难,且其运行效率也不适合于合成地震记录层位标定工作。

由于测井数据只提供了地层岩性在纵向上的一维特征,因此在进行叠前波场模拟时,需要假设地下为水平层状介质,而反射率法尤其适合于对层状介质进行波场模拟^[10],利用传播矩阵模拟波场的反射、透射和转换过程,通过对传播矩阵的控制可以很方便地考虑多次波和转换波对地震波场的影响^[11-12]。反射率法不要求均匀采样,有利于测井曲线的块状化处理,且在运算量增加不大的情况下,很容易引入地层吸收对地震波反射特征的影响。

为了增强模拟波场与实际波场的一致性,在利用反射率法进行共反射点波场模拟之前,需要根据实际地震数据的采集情况,确定波场模拟所使用的主要观测系统参数,包括道间距、最小炮检距、最大炮检距和覆盖次数等,以保证覆盖次数和炮检距分布等因素对两者影响的一致性。

反射率法叠前波场模拟之后,需要进一步模拟处

理过程对合成地震记录的影响,包括速度分析、动校正、切除和叠加等。首先将声波测井速度转换为均方根速度,对模拟的共反射点道集进行动校正处理并进行适当的拉伸切除,然后进行共反射点叠加,完成叠前数据到叠后数据的模拟,以叠加道代替褶积模型道作为合成地震记录,进行层位的对比和标定。

反射率法叠前波场模拟合成地震记录的具体过程为:①测井曲线编辑和子波提取;②利用反射率法产生叠前共反射点道集;③测井速度转化为时间域的均方根速度;④对共反射点道集进行动校正;⑤叠加动校正后的共反射点道集;⑥以叠加道作为合成地震记录进行层位标定和对比。

图3中给出了利用上述过程产生合成地震记录的具体实例。图3(a)为声波测井曲线,图3(b)是利用反射率法产生的共反射点道集,图3(c)是共反射点道集动校正之后的结果,从图中可以清晰地看到反射特征随炮检距的变化情况,图3(d)是共反射点道集叠加的结果,以此代替常规的合成地震记录对反射层位进行标定和对比。

图3 反射率法合成地震记录

Fig. 3 Synthetic seismogram for well-ties by reflectivity method

3 应用实例和效果分析

对大港油田某区块的地震资料进行合成地震记录层位标定试验。图4为X1井褶积模型合成地震记录与井旁地震道的对比。其中插入地震剖面的地震道为褶积模型合成的地震记录,虽然在2.3s左右强反射附近合成地震记录与井旁地震道具有较为相似的反射特征,但在强反射之下的弱反射层段(图中圆圈所标注部位),两者在波组关系上差异较大。一般而言,由于褶积模型没有考虑透射损失,合成地震记录的能量应该高于井旁地震记录,而图4中合成地震记录的能量明显弱于井旁地震记录。为此利用反射率法对X1井进行了叠前波场模拟和对

比,图5显示了只包含一次波的共反射点道集和包含多次波和转换波的共反射点道集的对比情况。可以看出,包含多次波和转化波之后,不仅2.4 s之下的弱反射能量明显增强,而且波组关系也产生了变化。显然上覆地层的多次波和转换波不仅改变了下伏弱反射的能量,也改变了地震反射特征和波组关系。图6显示了反射率法制作X1井合成地震记录的完整过程,其中图6(a)是X1井的声波测井曲线,图6(b)是反射率法模拟的包含多次波和转换波的共反射点道集,图6(c)是动校正后的共反射点道集,图6(d)是共反射点道集叠加形成的合成地震记录,图6(e)是合成地震记录与井旁地震道进行对比的结果。由图6可以看出,在弱反射层段合成地震记录与井旁地震道的一致性得到了改进。

图5 X1井不包含(左)和包含(右)多次波和转换波的共反射点道集
Fig. 5 Common-reflection-point gather of with(right) and without(left) multiples and converted-wave for well X1

图4 X1井褶积模型合成地震记录与井旁地震道的对比

Fig. 4 Comparison of well-nearby traces and synthetic seismogram by convolution model at well X1

图7是X2井褶积模型合成地震记录与本文中方法的对比。虽然两者在主要的强反射界面上都与井旁地震道具有较好的对应关系,但从图中圆圈所标注的层间弱反射界面可以看出,反射率法在弱反射波组特征上与实际地震记录具有更好的相似性,这对于沉积内幕的精细解释和储层预测具有重要意义。

需要指出的是,尽管本文中方法在理论上较褶积模型有所改进,但由于此方法不仅需要密度和纵波速度,还需要横波速度,而目前的大部分测井数据并没有横波速度信息,需要利用岩石物理或经验公式进行转换和计算,在一定程度上降低了该方法的标定精度和实用价值。因此,就目前的条件而言,该方法只能作为褶积模型的扩展和补充,尚不具备取代褶积模型

图6 X1井反射率法模拟合成地震记录
Fig. 6 Synthetic seismogram simulated by reflectivity method

图7 X2井褶积模型(左)与反射率法(右)合成地震记录对比
Fig. 7 Comparison of well-ties by convolution model (left) and reflectivity method (right) for well X2

成为层位标定常规技术的能力和条件。

4 结 论

(1) 层间多次波和转换纵波影响褶积模型合成地震记录与井旁地震道的一致性。

(2) 褶积模型合成地震记录与井旁地震道之间经历了不同的处理过程,处理过程对井旁地震道反射特征的影响降低了两者的—致性。

(3) 叠前波场模拟合成地震记录方法考虑并模拟了地震波场和处理过程对地震反射特征的影响,提高了精细层位标定和小层对比的质量。

参考文献:

- [1] 董艳蕾,朱筱敏,曾洪流,等. 歧南凹陷地震沉积学研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(4):8-11.
DONG Yan-lei, ZHU Xiao-min, ZENG Hong-liu, et al. Study of seismic sedimentology in Qinan sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(4):8-11.
- [2] 李磊,王英民,杨绍国,等. 混合地震反演技术及其在东海南部陆架盆地中的应用[J], 中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(5):29-34.
LI Lei, WANG Ying-min, YANG Shao-guo, et al. Application of hybrid seismic inversion: a case study from the southern shelf basin of east China Sea[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(5):29-34.
- [3] 曾正明. 合成地震记录层位标定方法改进[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(5):576-578.
ZENG Zheng-ming. Improving horizon-labeling method on seismic synthetic records[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005,40(5):576-578.
- [4] 陈裕明,李晶,周亚同. 合成地震记录的改进方法讨论[J]. 石油地球物理勘探,2001,36(4):496-498.
CHEN Yu-ming, LI Jing, ZHOU Ya-tong. A discussion on method for improving synthetic seismogram[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001,36(4):496-498.
- [5] 靳玲,苏桂芝,刘桂兰,等. 合成地震记录制作的影响因素及对策[J],石油物探,2004,43(3):267-271.
JIN Ling, SU Gui-zhi, LIU Gui-lan, et al. Influencing factors in making synthetic seismogram and counter measures[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004,43(3):267-271.
- [6] 李国发,廖前进,王尚旭. 合成地震记录层位标定若干问题的探讨[J]. 石油物探,2008,47(2):145-149.
LI Guo-fa, LIAO Qian-jin, WANG Shang-xu. Discussions about horizon calibration based on synthetic seismogram[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008,47(2):145-149.
- [7] 陈广军. 合成地震记录制作与标定中的争论及注意的问题[J]. 西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(4):19-23.
CHEN Guang-jun. Some controversial issues and matters needing attention to in the process of producing and calibrating synthetic seismogram[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2002,17(4):19-23.
- [8] WHITE R E. How accurate an a well tie be? [J]. The Leading Edge, 1998,17(8):1065-1071.
- [9] HENRY S. Pitfalls in synthetics[J]. The Leading Edge, 2000,19(6):604-606.
- [10] 印兴耀,赵剑,张繁昌,等. 面波叠前地震记录的合成方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):26-31.
YIN Xing-yao, ZHAO Jian, ZHANG Fan-chang, et al. Method of generating prestack synthetic seismograms of spherical wave[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(1):26-31.
- [11] KENNETT B L N. Seismic wave propagation in stratified media [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [12] 寻浩,董敏煜,牟永光. 各向异性介质中反射率法波场模拟及体波辐射图案[J]. 石油地球物理勘探,1997,32(5):605-614.
XUN Hao, DONG Min-yu, MOU Yong-guang. Wave field simulation using reflectivity method and body-wave radiation patterns in anisotropic media [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997,32(5):605-614.

(编辑 徐会永)