

多元回归方法校正扩径对密度曲线声波曲线的影响

廖 茂 辉

(中国石油化工集团西北石油局 勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 测井曲线的质量易受井眼环境因素的影响,井径扩径段井壁凹凸不平、泥浆侵入、泥饼等容易造成曲线畸变失真,特别是探测深度较浅的密度和声波时差曲线。笔者利用曲线之间的内在关系,用多元回归分析的方法把畸变失真的曲线校正到了真实的测量范围。校正后曲线制作的合成地震记录与井旁地震道相关性较高,得到了满意的结果。该方法快速高效、易操作,为井震标定提供了高质量的数据。

关键词: 井眼环境;井径;扩径;多元回归;井震标定

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2014)01-0174-06

随着油气勘探进程的发展,油气勘探的目标在逐渐地缩小,勘探的精度在逐步地提高,勘探的难度在逐渐地增大。现在已逐渐从大型构造油气藏过度到地层、岩性、构造复合型油气藏,这为储层预测增加了难度。油田开发后期,预测剩余油分布需要更加精细的储层描述,地震反演是进行储层定量预测的核心技术^[1]。测井曲线作为地震反演的输入数据,它的作用巨大,可谓影响地震反演的成败。一是为井震标定提供可靠的时深关系;二是辅助地震资料提取高质量的地震子波;三是低频模型、波阻抗初始模型和岩石物理建模的主要来源。因此地震反演之前作好测井曲线的评价和预处理是必不可少的。

1 影响测井曲线质量的因素

影响测井曲线质量的因素可以分为两大类(系统误差和非系统误差),系统误差主要来自仪器本身的技术性能与探测能力、仪器刻度偏差、某种稳定性的仪器故障和操作人员不合理的操作等因素;非系统误差指曲线测量时测量探头周围的环境因素。系统误差主要由曲线标准化方法消除,非系统误差则由曲线环境校正方法消除。

测井环境如井径、泥浆密度与矿化度、泥饼、井壁粗糙度、泥浆侵入带、地层温度与压力、围岩以及仪器外径、间隙等等非地层因素,不可避免地对各种测井曲线产生一定的影响;特别是在井眼及泥浆质量不好的情况下,这些非地层因素的影响会使测井曲线发生严重的失真^[2]。井眼条件对曲线的测量

影响,主要来自两个方面:一是井眼的几何形状的影响,二是泥浆的影响。其受影响的程度主要取决于仪器的探测深度,而尤以贴井壁的测井仪器受影响最甚。井眼几何形状的影响:理想的井眼几何形状应是直径与钻头大小相近的圆柱体,并具有光滑的井壁。但实际情况下会出现井壁塌陷,使井眼不规则。井壁的塌陷会在井剖面上出现大直径的洞穴,测井仪器在这些位置上所记录的信号往往不是地层特性的反映,而主要来自井内的泥浆。在扩径处,密度测井探测深度小受影响最大,测量值偏小;补偿声速测井受影响小些,但测量值略微偏大;深侧向电阻率探测深度大,基本不受影响^[3]。所以,在应用测井曲线之前要进行各种处理,以消除非地质因素对测井曲线的影响^[4]。

2 测井曲线环境校正方法

环境校正常用的有扩径校正法、标准层统计分析和岩石物理建模法。扩径校正法即:在井径扩径段设立门槛值来代替曲线异常值。如扩径段密度测量值减小,用此门槛值代替减小的那部分测量值。该方法只是对曲线异常值进行了切除,不满足曲线的变化规律。

岩石物理建模法即:在标准井点处利用岩石物理建模方法(如: Xu-White 方法、Greenberg-Castagna 方法、Krief's 方法等),用岩石的孔隙度、组分及各组分的含量进行岩石骨架混合,根据含水饱和度、含油饱和度等选择一种或多种流体进行混合,然后

把流体充填到岩石骨架中,根据空隙的长宽比和 Gassmann-Boit 理论建立岩石物理模型。用此岩石物理模型则可正演出纵波速度 v_p 、横波速度 v_s 和密度 ρ 。用正演的 v_p 和 ρ 替换畸变失真的曲线即可得到校正后的新曲线。该方法所用基础资料多、步骤繁琐和周期长,较难掌握,推广困难。

标准层统计分析法即:在标准层统计分析目标曲线和参考曲线的关系,用一条或多条受井眼影响小的测井曲线为母曲线(参考曲线),待校正的曲线为目标曲线。在非扩径段建立母曲线与目标曲线之间的相关关系,预测待校正跨井段的目标曲线^[5]。函数关系式的建立用多元回归分析方法,解方程得到各参考曲线的系数,然后用得到的系数和参考曲线建立数学模型。该方法就是在井径扩径段应用该数学模型得到新曲线。笔者正是利用这种分析方法,编程实现了曲线的校正。

2.1 可行性分析

由于储层岩石物理学性质上的差异性必然在地球物理场上表现出某种差异,而不同信息是地下同一地质体的综合反映。同一地质体的不同地球物理特征之间是具有某种相关性和互补性的,这也意味着它们之间可以通过某种方法进行转换^[6]。

不同类型的测井曲线在某种条件下存在线性或非线性的关系,如经常用到的 Gardner 公式描述了纵波速度与密度之间的关系 $\rho = \alpha v^\beta$, 式中: α 、 β 是系数, ρ 密度, v 纵波速度。再如 Faust 公式描述了电阻率与纵波速度之间的关系 $v_p = \alpha \times (D \times R_l)^\beta$, 式中: α 、 β 是系数, v_p 纵波速度, D 深度, R_l 电阻率。这些经验公式用不同属性描述同一地质体,不同属性之间存在线性或非线性关系,因此曲线之间的转换具有局限性,也是有前提条件的^[6]。

2.2 方法原理

2.2.1 多元线性回归分析

随机变量 y 及 m 个自变量 $x_0, x_1, \dots, x_{m-1}$ 。给定自变量的 n 组观测值 $(x_{0k}, x_{1k}, \dots, x_{m-1,k}, y_k), (k = 0, 1, \dots, n-1)$, 用线性表达式

$$y_k = a_0x_{0k} + a_1x_{1k} + \dots + a_{m-1}x_{m-1,k} + a_m, \quad k = 0, 1, \dots, n-1$$

对观测数据进行回归分析。其中 $a_0, \dots, a_m$ 为回归系数。根据最小二乘原理,为使

$$q = \sum_{k=0}^{n-1} [y_k - (a_0x_{0k} + \dots + a_{m-1}x_{m-1,k} + a_m)]^2$$

达到最小,回归系数 $a_0, a_1, \dots, a_{m-1}, a_m$ 应满足方程组

$$[CC^T] \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{m-1} \\ a_m \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{n-2} \\ y_{n-1} \end{bmatrix},$$

其中

$$C = \begin{bmatrix} x_{00} & x_{01} & x_{02} & \cdots & x_{0,n-1} \\ x_{10} & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m-1,0} & x_{m-1,1} & x_{m-1,2} & \cdots & x_{m-1,n-1} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

采用乔里斯基(Cholesky)分解法解出回归系数 $a_0, a_1, \dots, a_{m-1}, a_m$ 。

2.2.2 多元非线性回归分析

常用的非线性数学模型,如幂函数模型,指数模型等,根据实测曲线的关系选择合理的数学模型。

二次函数模型, $y_k = (a_0x_{0k} + a_1x_{1k} + \dots + a_{m-1}x_{m-1,k} + a_m)^2, (k = 0, 1, \dots, n-1)$, 方程两边开方,用换元法简化成线性关系,用多元线性回归的方法解出回归系数 $a_0, a_1, \dots, a_{m-1}, a_m$ 。

指数函数模型, $y_k = a^{(b_0x_{0k} + b_1x_{1k} + \dots + b_{m-1}x_{m-1,k})} + c, (k = 0, 1, \dots, n-1)$, 方程两边取对数,可简化成线性函数,用多元线性回归的方法解出回归系数 $a_0, a_1, \dots, a_{m-1}, a_m$ 。

2.3 校正过程

(1)选择校正深度。泥岩层段井壁容易垮塌造成扩径,扩径后密度曲线测量值会变小,声波时差测量值会变大。一般选择密度曲线或声波时差曲线作为待校正的目标曲线,选择井径扩径层段作为待校正的深度。

(2)选择标准层。标准层选择的原则是:与待校正层段的岩性相似,井径曲线平滑、测井曲线质量较高;一般选取区域性大套泥岩作为标准层。

(3)多元回归分析。在标准层内作曲线交会分析,了解曲线之间的相关性,选择与目标曲线相关性好的曲线作为参考曲线;然后选择数学模型进行多元回归分析,得到回归系数,把该数学模型和回归系数应用到井径扩径段进行曲线校正。

(4)效果分析。校正后的曲线与校正前的曲线作对比分析或者制作合成地震记录分析,如果效果满意则结束操作,如果不满意则重复以上步骤直到得到满意的结果。

3 实际资料测试

塔河地区碎屑岩泥岩段受泥浆的浸泡容易垮塌,测井曲线测量时容易受井径扩径影响致使测量数据失真。为验证多元回归分析方法的适用性,选择 AT1 井和 AT9 井作为测试井。

AT1 井在 4 003~4 085 m、4 161~4 250 m 泥岩段井壁垮塌,密度曲线和声波时差曲线在该深度段严重失真,如图 1。经分析认为井径扩径段受钻井泥浆的影响密度测量值偏低,声波时差受井壁凹凸

不平的影响成周期跳跃。4 003~4 085 m 泥岩段上部扩径较小,密度和声波时差基本不受影响,因此选择 4 003~4 038 m 深度段作为标准层,分析了目标曲线与参考曲线之间的相关性,如图 2。在标准层段选择 AC 曲线和 RT 曲线作交会图分析,从交会图上看 AC 曲线与 RT 曲线有一定的相关性,并且用曲线拟合方法得到 AC 曲线与 RT 曲线的指数关系,拟合误差较小,因此 RT 曲线适合作为参考曲线。同理分析了 AC 曲线与 SP 曲线、AC 曲线与 CNL 曲线、AC 曲线与 DEN 曲线的相关性,交会图上曲线拟

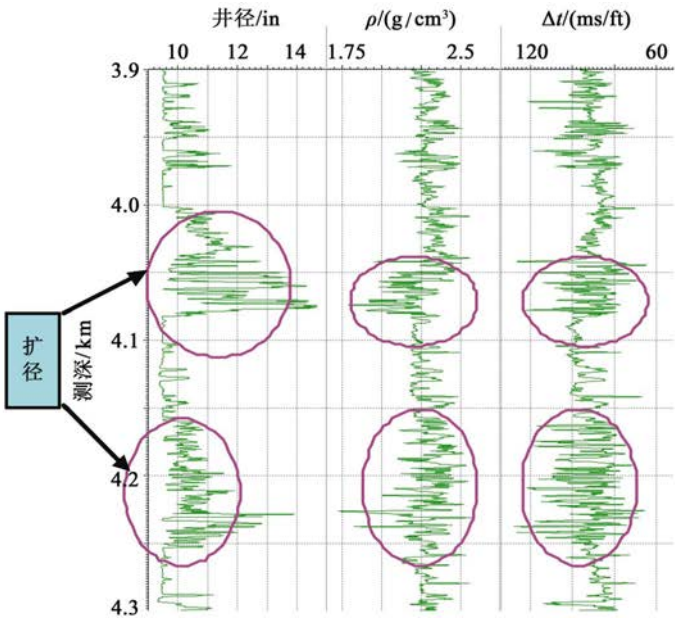
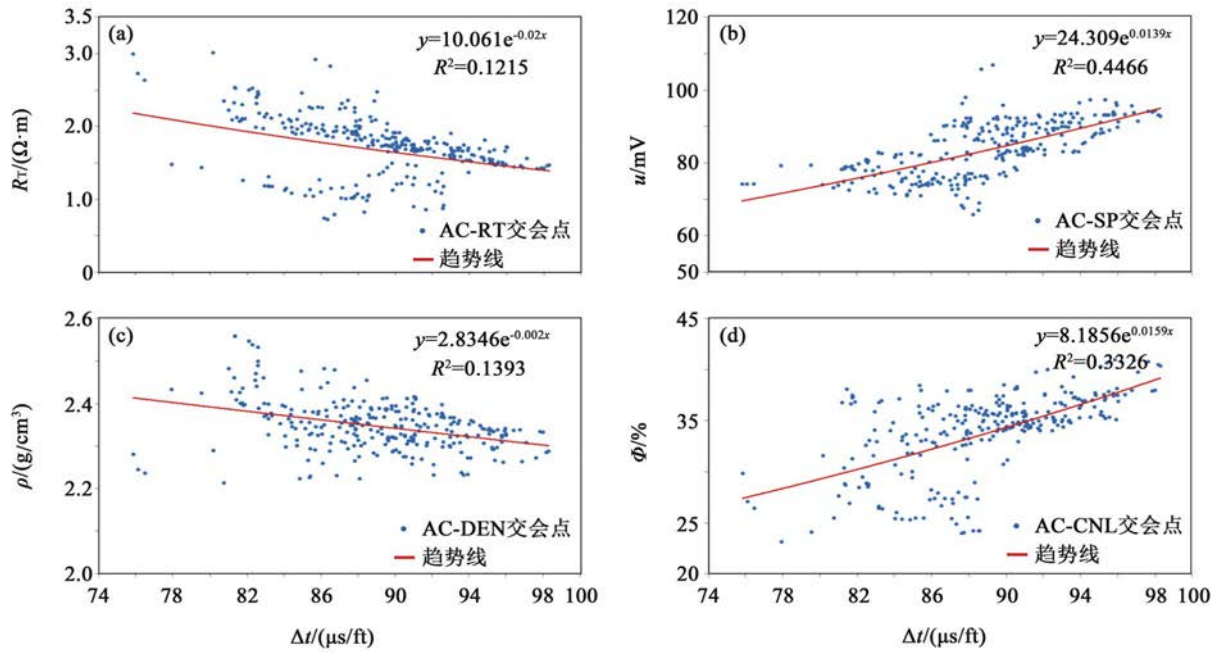


图 1 AT1 井原始测井曲线



a—AC-RT 交会图;b—AC-SP 交会图;c—AC-DEN 交会图;d—AC-CNL 交会图

图 2 AT1 井标准层曲线交会分析

合结果为指数关系,曲线拟合误差都很小,因此 SP 曲线和 CNL 曲线也可以作为参考曲线。AC 曲线校正选择 RT 曲线、SP 曲线和 CNL 曲线作为参考曲线,应用指数数学模型作多元回归分析,并把数学模型应用到 4 043~4 085 m 扩径段得到校正后的 AC 曲线;同理得到校正后的 DEN 曲线。重复以上步骤得到 4 161~4 250 m 层段校正后的曲线。因此参考曲线的选择尤为重要,而且要与目标曲线有一定的相似性,才能为多元回归分析提供数据保障。

AC 曲线和 DEN 曲线校正前后的对比,如图 3。

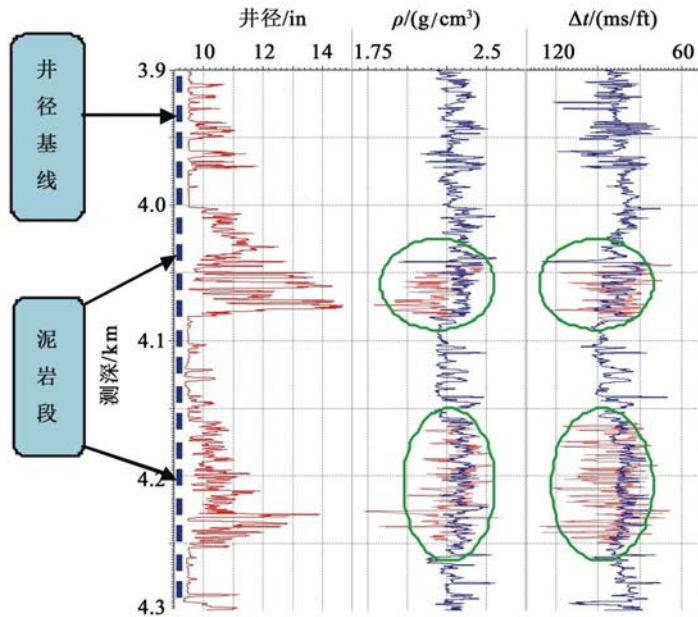


图 3 AT1 井 AC 和 DEN 曲线校正前(红色)后(蓝色)对比

曲线校正的结果是否合理? 能不能作为后续工作的基础数据? 不仅要从地质规律的认识来判断,还可以用定量分析来质控。用校正后的曲线来合成地震记录(井震标定)作为质控手段也是非常有效的,前提是地震记录要真实要保幅,提取的地震子波要合理。AT1 井曲线校正前后的井震标定如图 4,左图为原始曲线的井震标定结果,右图为校正后曲线的井震标定结果。从图上来看,地震子波形态规则、相位合理,原始测井曲线的合成地震记录与实际地震记录相比,第二个波峰振幅大小不对应,第三、第四个波峰相位和振幅都不对应;校正后曲线的合成地震记录与井旁地震记录相位和振幅都对得得很好;从曲线校正前后的合成地震记录与井旁道的相关性来看,曲线校正前的相关性差(相关性颜色不统一,出现红色),曲线校正后的相关性好(相关性颜色统一,都成黄色)。因此从井震标定来看 AT1 井曲线校正合理,校正后的曲线比原始曲线可靠,可以作为后续工作的基础数据。

如图 5,目的层段内 AT1 井曲线校正前与校正

红色曲线为原始曲线,蓝色曲线为校正后的曲线,从图上看 AC 曲线和 DEN 曲线的失真都发生在井径扩径段,DEN 曲线幅值减小,AC 曲线周波跳跃;通过多元回归分析的校正,在井径扩径段 DEN 曲线的幅值适当增加,AC 曲线的周波跳跃得到抑制。从地层的沉积演化规律来看,沉积背景相同的同一岩性段岩石的物理性质大致相似,遵循这一规律的认识来分析我们的曲线校正结果,同一岩性段校正后曲线的幅值变化平缓、曲线的形态更平滑、曲线的变化趋势也更符合地质规律。

后 AC-DEN 交会图。从图上可知,AC 曲线与 DEN 曲线校正前的交会图比较散乱,有些散点偏离趋势线,纵轴方向有些散点的密度值较低(左图);校正后的 AC 曲线与 DEN 曲线的交会散点较集中,去除了异常点,校正后的 AC 曲线与 DEN 曲线的规律性更强,趋势线的拟合度更高。因此也能说明 AT1 井曲线校正的合理性。

AT9 井在 4 160~4 480 m 深度段以泥岩为主夹少量砂岩,泥岩段垮塌严重,井壁凹凸不平,经分析曲线畸变正是在井径扩径深度段内。用 AT1 井曲线校正方法,得到 AT9 井校正后的曲线,如图 6。图上红色为原始曲线,蓝色为校正后的曲线,目的层段内原始 AC 曲线和 DEN 曲线(红色曲线)高低幅值变化较剧烈,不符合地层沉积变化规律;校正后的 AC 曲线和 DEN 曲线(蓝色曲线)在小范围内较平滑,大范围内有高低变化,符合沉积规律。从地质规律的认识上来讲校正后的曲线更能描述真实地层的物理性质。

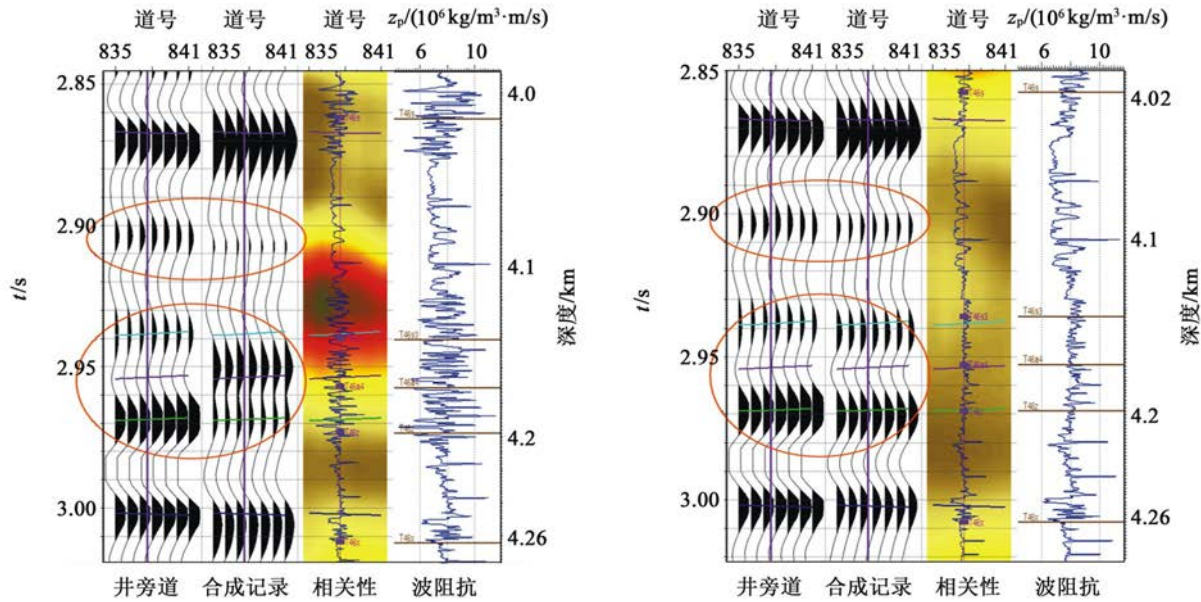


图 4 AT1 井原始曲线合成记录 (左) 与校正后曲线合成记录 (右) 对比

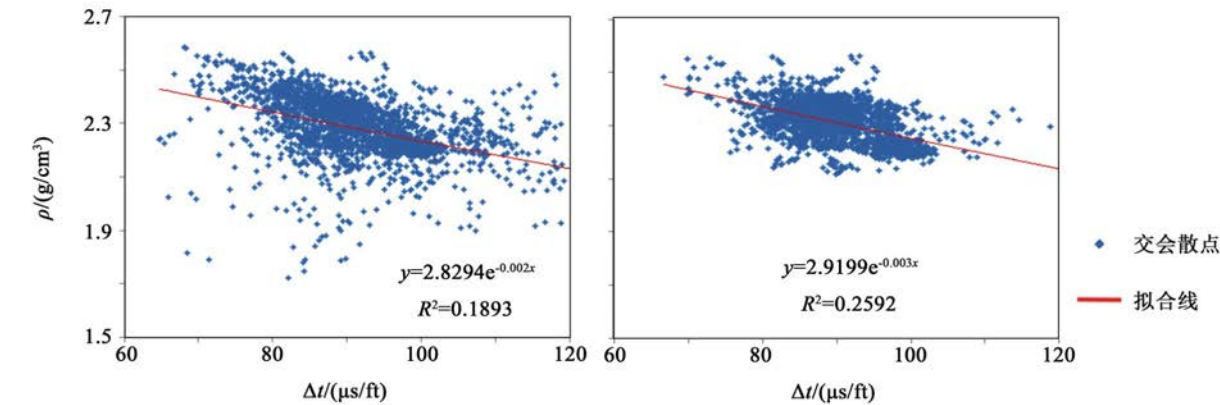


图 5 AT1 井原始 AC-DEN 交会图 (左) 与校正后的 AC-DEN 交会图 (右) 对比

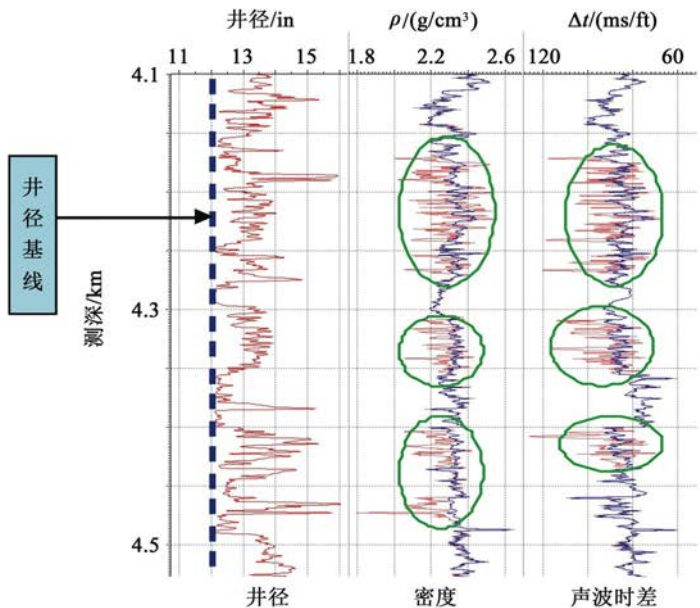


图 6 AT9 井 AC 和 DEN 曲线校正前 (红色) 后 (蓝色) 对比

AT9 井曲线校正的质控手段也采取井震标定方法,如图 7。左图为原始 AC 和 DEN 曲线的井震标定结果,原始曲线的合成地震记录与井旁地震道的相位数量不相等,振幅对应不好,且有个别波峰对波谷的现象,因此合成地震记录与井旁地震道的相关性较差。右图为校正后 AC 和 DEN 曲线的井震标定结果,合成记录与井旁道的相位数量基本相当,相

位和振幅都对应很好,合成地震记录与井旁地震道的相关性也较高(相关性颜色大部分较统一,为黄色)。从井震标定的结果分析,AT9 井的曲线校正也合理,得到了较为满意的新的 AC、DEN 曲线。校正后的 AC、DEN 曲线也可以作为后续研究的基础数据。

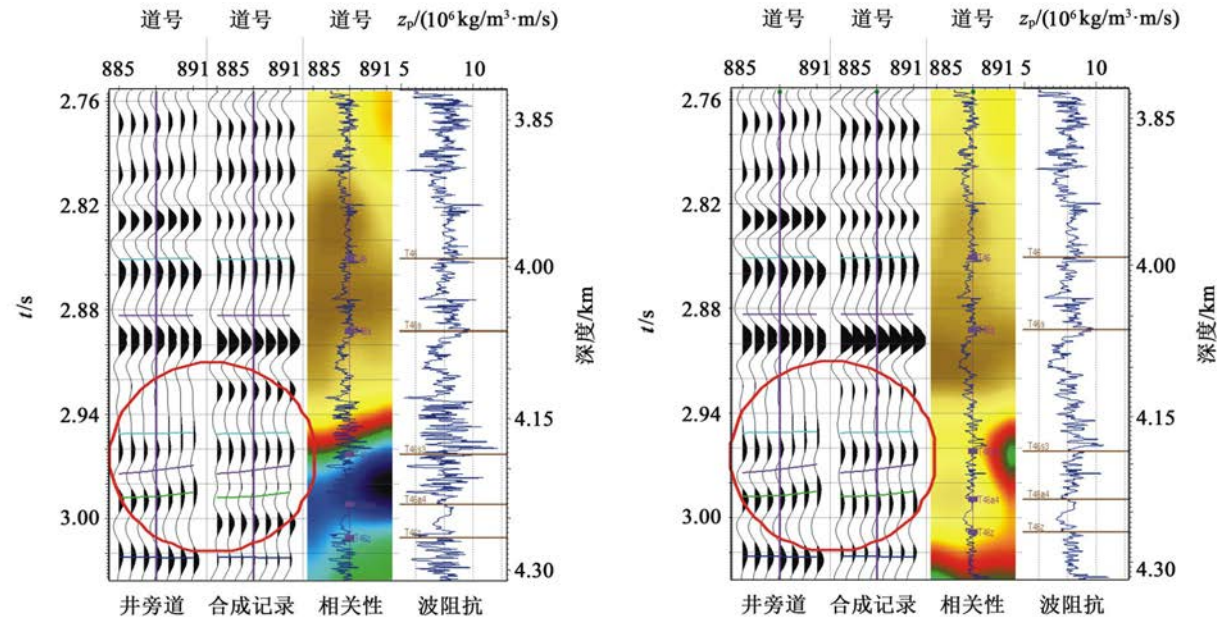


图 7 AT9 井原始合成记录(左)与曲线校正后合成记录(右)对比

4 结论

- (1)经实际资料测试,该方法能够校正受井径扩径影响的畸变曲线,经合成地震记录检验得到了满意的效果。
- (2)多元回归测井曲线环境校正方法简单实用、快速高效;提高了井震标定的精度,为层位解释提供了可靠的依据;修正了失真的测井曲线,为地震反演提供了合理的地震子波和波阻抗初始模型;经校正后的曲线还可以解释地层的岩性物性或者为岩石物理建模提供基础数据。
- (3)不同深度曲线校正应选择相应的标准层进行分段校正。
- (4)该方法也存在一定的局限性,即标准层内

参考曲线的选择要合理,即参考曲线与目标曲线要有一定的相关性;总之该方法具有一定的实用价值。

参考文献:

[1] 侯伯刚,刘文岭,罗娜.地震反演中测井数据的预处理[J].物探与化探,2009,33(3):331~332.

[2] 王洪亮.复杂井眼条件下的测井环境校正技术[J].新疆石油科技,2006,(2).

[3] 李梅.测井资料环境校正方法及其在大牛地地区的应用[J].江汉石油科技,2010,20(2):15~16.

[4] 姜传金,马学辉,周恩红.拟声波曲线构建的意义及应用[J].大庆石油地质与开发,2004,23(1):12~13.

[5] 孙中春,顾振刚,黎军,等.严重垮塌井眼条件下测井资料的校正方法[J].新疆石油地质,2006,27(5):559~560.

[6] 沈向存,杨江峰.声波曲线重构技术在地震反演中的应用[J].中国西部油气地质,2006,2(4):436~437.

THE EFFECTS OF APPLYING THE PROTEM67D TRANSIENT
ELECTROMAGNETIC EXPLORATION SYSTEM
TO DETECTING MULTILAYER MINED-OUT AREA

ZHANG Yun-xia

(*Geophysical Prospecting and Surveying Party, Henan Bureau of Coal Geology, Zhengzhou 450009, China*)

Abstract: In the detection of the mined-out area in a coal mine of western Linfen, the author used the PROTEM67D transient electromagnetic exploration system, selected suitable work facilities and, through scientific experiment, determined the appropriate work parameters. According to an analysis of the transient electromagnetic electric characteristics of the local known mined-out area, the interpretation method was established for the apparent resistivity variation range suitable for the division of the mined-out area, the analysis and interpretation of the electric character sectional drawing for the whole exploration area were conducted and, on such a basis, the limits of the mined-out area and the mined-out waterlogged area were delineated. It is proved that the geological effects are satisfactory.

Key words: PROTEM67D transient EM system; transient electromagnetic method; mined-out area of the coal mine

作者简介: 张运霞(1962-),女,高级工程师,从事煤田电法勘探工作。

上接 179 页

THE APPLICATION OF MULTIPLE REGRESSION METHOD
TO THE CALIBRATION OF THE INFLUENCE OF HOLE ENLARGEMENT
ON DENSITY AND ACOUSTIC LOGS

LIAO Mao-hui

(*Exploration and Development Research Institute of Northwest Petroleum Bureau, Sinopec, Urumqi 830011, China*)

Abstract: Log tends to be influenced where borehole environmental condition is unfavorable. The uneven wall of a well, the intrusive mud and mud cake are likely to cause the curve distortion in the depth of well diameter expansion. Density and acoustic curves are most likely to be distorted because their geodesic depth is very shallow. In this paper, the numerical value of the distorted curves was corrected to real measurement range with the multiple regression analysis method and the internal relationship between curves. The correlation between the synthetic seismic record based on the corrected curves and the seismic record near the well was relatively high, and the test results were satisfactory. This method is efficient and easily operable. It offers the high quality data for the calibration between the well and seism.

Key words: borehole environment; well diameter; hole enlargement; multiple regression; well seismic calibration

作者简介: 廖茂辉(1978-),男,四川仁寿人,硕士研究生,助理工程师,目前从事储层预测研究。