

中国大陆科学钻探 CCSD-1 井 0 ~ 2000 米 测井曲线井深自动校正

曾冲 陈超 余丰 吴云超

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院 湖北 武汉 430074)

摘要: 中国大陆科学钻探(CCSD)主孔 CCSD-1 井第一阶段 0 ~ 2 000 m 钻进完成后, 前后 2 次测井的深度值差异较大, 必须对事故后测井的深度值进行校正, 以保证数据的正确性。首先对该测井数据进行了系列的预处理, 然后使用多种方法对比分析进行深度校正。在大多数井段取得了良好的效果, 达到了事先要求的精度。校正结果表明, 相关分析是一种行之有效的方法, 但曲线形态差异较大的井段处理还有待研究。全部过程采用计算机自动完成, 提高了数据处理工作的效率。

关键词: 大陆科学钻探 地球物理测井 深度校正 相关分析

中图分类号: P631.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2005)02-0157-04

中国大陆科学钻探(CCSD)工程是当代地球科学具有划时代意义的系统工程, 地球物理测井是其重要组成部分之一, 测井曲线的深度校正是测井数据处理的一个重要环节。中国大陆科学钻探主孔 CCSD-1 井于 2001 年 6 月开钻, 预定钻进 5 000 m, 2002 年 4 月 6 日已完成钻进 2 000 m 的第一阶段钻进计划。随后胜利测井公司(以下均简称为 SL)和国际大陆科学钻探组织(以下均简称为 ICDP)先后对其开展了一系列地球物理测井工作。但 ICDP 与 SL 前后 2 次测井所得曲线虽然大体形态相似, 但具体数值在深度上不一致, 且各深度段差异也不相同(图 1)。为了保证后续数据处理和解释的准确性, 必须对所测数据进行深度校正。由于测井数据量庞大, 那么用人工直接进行深度校正, 工作量会很大。根据 SL 与 ICDP 对 CCSD-1 井自然伽马测井数据差异的特殊性, 采用计算机自动校正方法无疑能使工作量大大减轻, 提高数据处理和解释的效率。

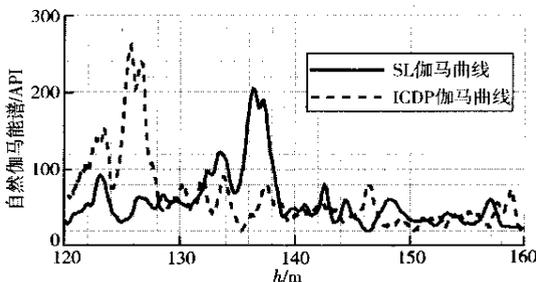


图 1 ICDP 与 SL 伽马测井数据深度差异示意

1 测井数据的预处理

由于 SL 与 ICDP 所测数据间存在较大差异, 直接进行深度校正有一定的困难, 故须对其进行预处理。预处理主要包括 SL 与 ICDP 数据点距的统一、测井数据的去噪和测井数据的归一化处理。

1.1 统一间距

由于 ICDP 与 SL 测井时采用的点距不同(ICDP 为 0.03 m, 而 SL 为 0.125 m), 为了后续处理的方便性, 需将两者点距统一。由于两者点距均较小, 自然伽马值在两相邻测点间的深度范围内可视为线性变化, 故采用分段线性插值的方法将 SL 的点距变为 0.03 m, 使其与 ICDP 点距一致。分段线性插值是一种常用的局部性分段低次插值方法, 在几何上就是用折线代替曲线。对点 (x_i, y_i) 与点 (x_j, y_j) 之间的某点 (x, y) , 其插值计算公式为:

$$y = y_j \frac{x - x_i}{x_j - x_i} + y_i \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (1)$$

对 SL 所测伽马曲线采用分段线性插值, 既能尽量不丢失数据, 又能达到改变点距的效果。实际插值计算出的伽马曲线与原始实测伽马曲线几乎重合。

1.2 去噪处理

由于测井仪器灵敏度等方面的原因, 实测数据存在一定的干扰波动。ICDP 所测伽马曲线相对 SL 而言变化十分剧烈, 依此进行深度校正存在较大的误差, 故需要预先消除干扰。这里选用 2 种方法进

行了试验 滑动平均方法和频率域滤波方法。

滑动平均方法的基本原理是在一定深度范围(窗口)内,假设测量值随深度呈线性变化,即用一个线性函数来预测。根据最小二乘原理,建立

$$\sum_{i=-N}^{i=N} [g_i - (a_0 + a_1 z_i)]^2 = \min \quad (2)$$

方程。式中 g_i 为实测值 z_i 为该点与窗口中心点深度差 a_0, a_1 为线性函数的待定系数。一个窗口内共有 $2N + 1$ 个点参与统计,待定系数 a_0 即为窗口中心点处的计算结果。将窗口逐点移动,便可得到全部结果(两端各有 N 个点无法得到计算值)。

频率域滤波的基本原理是首先将原始实测数据由时间-空间域通过 Fourier 变换转化到频率-波数域,然后利用原始数据中的干扰信息频率(或波数)与实际有效数据频率(或波数)的差别,截取有效的数据,最后再经过 Fourier 逆变换获得有效的时间-空间域数据信息。

图2显示了2种方法去噪的不同效果。2种去噪方法相比较,滑动平均方法具有简单、保留原始信息多的优点,但去噪效果不如频率域滤波方法明显,且曲线的相位发生了变化。频率域滤波方法不改变曲线上有效数据的相位,但往往会丢弃一些频率与噪声相近的有效原信息。通过实际试验,频率域滤波方法在计算机自动校正的过程中能够较好地保留原相位信息,保证了深度校正的精确性。

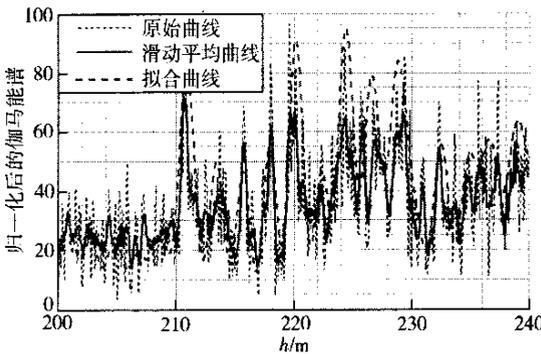


图2 ICDP 伽马曲线去噪效果

1.3 归一化处理

由于 SL 与 ICDP 测井数据的伽马值不尽相同,为了便于自动校正,还需将两者的伽马数据值进行归一化处理,即取整个深度段内的最小伽马值(记为 G_{\min})为 0,最大伽马值(G_{\max})为 100,则其中某点 i 的归一化后伽马值($G_k^{归}$)为:

$$G_k^{归} = 100 \times \frac{G_i - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}}, \quad (3)$$

($k = 1, 2, \dots, n$)

式中 G_i 为某点处的实测伽马值。

需要注意的是,由于这里的归一化处理可以看作纯粹的数学变换,只在描述曲线形态方面起作用,故原伽马能谱数据的量纲在图中未给予出。

2 测井曲线深度校正值的自动计算

计算机自动校正方法的基本原理是模拟人工校正的过程,在合适的深度段(窗口)内,依据一定的原则对测井曲线进行对比,有规律地改变待校正曲线的深度数据,分析待校正曲线与标准曲线之间的相似性,反复尝试直到两曲线相似性最佳,则此时对应的深度值就是已校正的深度值。将窗口逐点滑动,重复以上搜寻过程,便可得到整个深度段的校正深度值,从而实现了测井曲线的深度校正。

曲线本身的相似性和分析方法的有效性直接决定了深度校正结果的好坏。这里采用了3种方法进行对比分析试验。

2.1 几何距离分析校正

几何距离分析校正的基本原理是直接利用待校正曲线和标准曲线之间的几何距离来判断它们的相似性。在待校正曲线 C_1 和标准曲线 C_2 上分别取一系列深度点,得其深度值序列($d_{01}, d_{02}, \dots, d_{0i}, \dots, d_{0n}$),对应的伽马值序列分别为($yc_{11}, yc_{12}, \dots, yc_{1i}, \dots, yc_{1n}$)和($yc_{21}, yc_{22}, \dots, yc_{2i}, \dots, yc_{2n}$),则曲线 C_1 和 C_2 在该段的几何距离(即 Euclid 距离) D_k 可用

$$D_k = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (yc_{2i} - yc_{1i})^2} \quad (4)$$

($k = 0, 1, \dots, n$)

表示,然后保持伽马值不变,移动深度序列,得各点新的深度值为($d_{11}, d_{12}, \dots, d_{1i}, \dots, d_{1n}$);再次计算两曲线之间的几何距离为 D_1 。这样多次移动深度序列并计算,得距离序列($D_0, D_1, D_2, \dots, D_n$)。取其中的最小距离值 D_m ,则此时两曲线必定重合性最好(最相似),其对应的深度值序列($d_{m1}, d_{m2}, \dots, d_{mi}, \dots, d_{mn}$)也就是该段内的校正深度值。

从理论上分析,几何距离分析校正的序列长度越长,校正结果越精确,但实际上若取的序列太长,曲线之间的差异会变得更大,从而降低校正结果的准确性,有时甚至会出现校正结果完全面目全非的情况。所以,正确选择校正窗口的长度是几何距离分析校正方法的关键^[1]。

2.2 标志点分析校正

标志点分析校正的基本原理是模拟人工校正时判断曲线标志点的方法来确定曲线是否相似的^[2]。这里以伽马曲线的波峰和波谷点作为标志点,首先找到待校正曲线上的某2个标志点 $F_1(D_1, G_1)$ 和

$F_2(D_2, G_2)$,然后在标准曲线上搜寻与 F_1, F_2 对应的标志点 $f_1(d_1, g_1)$ 和 $f_2(d_2, g_2)$ 。由于 SL 与 ICDP 深度值差异是随深度增加而增大的,故可以将两标志点中间的深度差看作是线性变化的,则两标志点中间某点 i 处的校正深度值 d_i^* 为

$$d_i^* = d_1 + (d_i - d_1) \frac{(D_2 - d_2) - (D_1 - d_1)}{d_2 - d_1}, \quad (5)$$

($i = 0, 1, \dots, n$)

式中 d_i 为点 i 处的原始深度值。

标志点校正分析方法的实现过程与人工校正方法最为接近,但实际计算机处理时,由于测井曲线的复杂性,许多地方的标志十分接近,有时会出现待校正曲线的标志点与标准曲线的标志点并非一一对应的关系。为防止标志点找错,实际计算时还需限定窗口范围,并反复尝试比较,当窗口内对应标志点不唯一时,需继续判断其他标志点的对应情况。只有当窗口内所有标志点都唯一对应的几率最大时,所得到的深度值才是真正的校正值。

2.3 相关分析校正

相关分析校正的基本原理是利用相关系数或相关函数来确定曲线之间的相似性,以达到校正深度的目的。对于进行深度校正的 2 条测井曲线,相当于等长的 2 个离散序列 x_n, y_n 各有 N 个采样点,利用它们之间的线性相关程度来确定 2 条曲线同一层位的深度是否相同。相关分析校正方法又可分为固定窗长对比法和可变窗长对比法。

固定窗长的相关对比法是:以标准曲线上的一个固定的相关窗长(如 N 个采样点)内深度数据为准,将待校正曲线上相同窗口内的 N 个点在某一范围内的数据与之对比,找出相关系数最大的 2 个层位,再确定它们的深度是否一致。每对比一次,相关窗口移动一个深度间隔。

设窗长为 N , x_i 为标准曲线窗长内的第 i 个数据, y_i 为待校正曲线相应长度内的第 i 个数据,若两者的厚度相当,形状相似,则它们之间有线性关系

$$y_i = ax_i + b, \quad (6)$$

($i = 0, 1, \dots, n$)

y_i 与 x_i 线性相关程度可用相关系数来衡量。相关系数的计算公式^[1]如下:

$$\gamma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2]^{1/2}}. \quad (7)$$

万方数据 $i = 1, 2, \dots, n$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$, 显然 $|\gamma_{xy}| \leq 1$ 。当 $|\gamma_{xy}| = \pm 1$ 时, x_i 与 y_i 完全相关; $|\gamma_{xy}| = 0$ 时, x_i 与 y_i 线性无关。 $\gamma_{xy} > 0$, 说明 x_i 与 y_i 同向变化; $\gamma_{xy} < 0$, 说明 x_i 与 y_i 反向变化。

可变窗长的相关对比法是在标准曲线与待校正曲线上截取相同的一段(如 N 个采样点),将标准曲线的相关窗长依次减少 τ 个采样点($\tau = 0, 1, 2, \dots, N-1$)。

若标准曲线与待校正曲线所截取的相同长度的数据列分别为

$$\{x(i)\}, \quad i = 1, 2, \dots, N - \tau$$

$$\{y(i)\}, \quad i = 1, 2, \dots, N - \tau$$

其相关系数为:

$$\gamma_{xy}(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\tau} [(x(i) - \bar{x})(y(i + \tau) - \bar{y})]}{[\sum_{i=1}^{N-\tau} [x(i) - \bar{x}]^2 \sum_{i=1}^{N-\tau} [y(i + \tau) - \bar{y}]^2]^{1/2}} \quad (\tau = 0, 1, 2, \dots, N - 1) \quad (8)$$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} x(i)$, $\bar{y} = \frac{1}{N - \tau} \sum_{i=1}^{N-\tau} y(i)$ 。

不难看出对比窗长随着时移 τ 值的增加而减小。采用这种变窗长相关对比的优点是,可以在不同的窗长内考虑曲线的相似性,因此可以找出 2 段曲线中相似性最大的部分^[1]。

2.4 实际计算

相关分析校正方法在大多数井段取得了较好的效果,几何距离分析校正方法和标志点分析校正互相结合也能取得一定的效果,但总体效果不如相关分析理想。实际计算时采取了相关分析校正方法,结果表明,相关分析校正法可以将大多数井段的深度值校正到误差要求范围(0.2 m)之内,图 3 示出校正的良好结果。

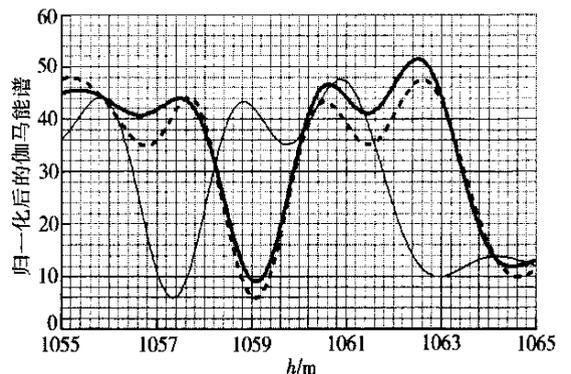


图 3 相关分析法深度校正结果

尽管大多数井段校正效果良好,但还有少部分井段校正效果不太理想,究其原因,是由于该段ICDP与SL所测的伽马曲线差异太大,计算机无法识别该段曲线的相似性所致。

3 结论与问题

ICDP与SL对CCSD-1井的测井数据差异较大,因此在常规的校正处理之前必须进行一系列的预处理才能保证校正的精度。实际资料处理表明,无论使用何种校正方法,均对原始曲线本身的形态相似性要求较高。相关分析校正是一种行之有效的办法,整个过程可使用计算机自动完成,无需人工干

预,在大多数井段完全达到了精度要求,有效地解决的大陆科学钻探测井深度标定的问题,提高了数据处理效率,但是该方法对曲线形态差异较大井段的处理仍有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 罗晓永. 地层倾角数据处理中的深度校正[J]. 测井技术, 1996, 20(1): 65-67.
- [2] 金友春, 邢凤荣, 王艳丽, 等. 同位素注水剖面测井资料深度校正的几种方法[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 165-167.
- [3] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.

0 ~ 2000m DEPTH CORRECTION OF CHINA CONTINENTAL SCIENTIFIC DRILLING PROGRESSIVE CCSD-1 WELL

ZENG Chong ,CHEN Chao ,YU Feng ,WU Yun-chao

(Institute of Geophysics and Geomatics ,China University of Geosciences ,Wuhan 430074 ,China)

Abstract : The depth data logged again from China Continental Scientific Drilling (CCSD) progressive CCSD-1 well after the completion of the first 0 ~ 2 000 m drilling plan are different from the data measured last time. Corrections must be made for the veracity of the logging data. In this paper , the logging data were pre-processed before the correction , and several methods were applied for analysis during the correction. The results of correction are satisfactory and fully meet the required precision. It is shown that the correction analysis is an effective method for correction. Nevertheless , the processing of the parts with obvious different logging curve shapes needs further investigation. The whole process is automatically done on computer , and the technique can obviously improve the data-processing efficiency.

Key words : CCSD ; geophysical logging ; depth correction ; correction analysis

作者简介:曾冲(1982 -)男,中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院硕士研究生,主要从事地球物理信息处理与研究工作。

上接 156 页

THE INVESTIGATION OF HYDROGEN MACROSCOPIC NUCLEAR RELAXATION

SUN Shu-qin ,LIN Jun ,ZHANG Qing-wen ,JI Yan-ju

(Jilin University Institute of Intelligent Measurement and Control Technology , Changchun 130026 ,China)

Abstract : The relaxation principle of the atomic nucleus system magnetization is discussed in this paper. Relaxation of hydrogen macroscopic nuclear magnetization is analyzed , Bloch equation of nuclear magnetization is given , free induction decay in receiving coil is presented , and relaxation about components of the nuclear magnetization and free induction decay is computed. In addition , the relationship of nuclear magnetization and free induction decay to the longitudinal and transverse time constants is analyzed.

Key words : nuclear magnetic resonance ; nuclear magnetization ; Larmor frequency ; free induction decay ; relaxation

作者简介:作者简介:孙淑琴(1970 -)女,吉林大学智能仪器与测控技术研究所在读博士。研究方向:核磁共振找水仪器研制及正反演理论的研究。