

过套管电阻率测井资料预处理方法研究

谢关宝, 李三国, 李永杰

中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

摘要 近几年,随着电子技术的发展和油田中后期寻找剩余油分布的需要,过套管电阻率测井作为一种新技术迅速发展起来。该技术在套后剩余油监测、老井挖潜、油层水淹规律确定、油层生产动态监测等方面具有独特的优势,并取得了较好的应用效果。但在采集过程中其有效信号为纳伏级,套管、测量频率、测量电极距、水泥环、套管非均质性都会使测量信号发生严重的畸变,在过套管电阻率资料预处理中必须对这些因素进行校正。本文针对俄罗斯 ECOS-31-7 过套管测井资料特点,分析了原始离散数据筛选方法、离散数据插值原则,探讨了套管非均质性、水泥环及固井质量校正方法。对实际过套管测井原始资料的处理效果表明,该处理方法有效可行。

关键词 过套管电阻率测井;资料预处理;非均质校正;水泥环校正

中图分类号 P631.811

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.03.009

Data Pre-processing Method for Cased Hole Formation Resistivity Logging

XIE Guanbao, LI Sanguo, LI Yongjie

Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract With the recently development of electronic technology, the cased hole formation resistivity logging has been rapidly developed in order to discover the distribution of residual oil in the middle or late exploitation stage of the oilfields. The logging technology has many advantages that include the monitor of residual oil through casing, tapping potential of old well, the determination of submerged oil layer, and the production dynamic monitoring. They have all received quite good application effects. However, the effective signal during the acquisition process is in the level of nano-volt, the casing, measuring frequency, measured from the electrodes, cement mantle, and the heterogeneity of cased hole all will make measured signal distort, the cased hole resistivity data in the pre-processing must be corrected for these factors. Based on the logging information characteristics of the Russian ECOS-31-7, the filtering and interpolating methods for the original discrete data have been analyzed. Furthermore, the correction methods, such as the heterogeneity of casing, cement mantle, and cement quality, have been discussed. The processing results of the original data by means of actual casing measurements in the oilfield indicate that the method is feasible and effective.

Keywords cased hole formation resistivity logging; data pre-processing; heterogeneity correction; cement mantle correction

0 引言

过套管电阻率测井是在钢套管内测量地层电阻率从而对含水饱和度进行评价和对油藏进行监测的一种新的测井方法。由于其在剩余油监测、老井挖潜、油层水淹规律确定、油层生产动态监测等方面具有巨大的应用价值和潜力,国内外公司纷纷推出自己的产品,如 CHFR 及其改进型 CHFR-plus (美国斯伦贝谢公司)、TCRT (美国贝克休斯公司)、ECOS-31-7 (俄罗斯皮季亚戈地球物理公司)、TCFR (中

国石油天然气集团公司)等^[1-3]。

过套管电阻率测井采用逐点多次测量方式采集数据,采集信号弱,同时受套管、测量频率、测量电极距、水泥环、套管非均质性等多种因素影响^[4-5],在过套管电阻率资料预处理中必须对这些因素进行校正。程希^[2]、张守伟^[3]、高杰等^[4]对过套管电阻率测井的基本原理进行了探讨,高杰^[6]、孙中春^[6]、岳喜洲^[7]等探讨了过套管电阻率测井资料的处理分析方法。本文针对俄罗斯 ECOS-31-7 过套管测井仪的特点,探讨分析了过

收稿日期:2011-12-06;修回日期:2012-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41172130)

作者简介:谢关宝,工程师,研究方向为测井方法、地球物理正反演及资料解释等,电子信箱:baoupc@163.com

套管电阻率测井资料的预处理方法,为过套管电阻率测井资料深入分析与处理做好了技术准备。

1 离散数据筛选

ECOS-31-7 过套管电阻率测井仪器在进行测量时,为保证测井质量,采用逐点多次测量方式采集数据,并将原始数

据存入 *.dbf 文件中。由于其测量信号微弱,且测井响应受地层、套管、水泥环等多种因素影响,常常会出现畸点或坏点。如图 1 所示,在某井 1213m 红圈处即为 1 个坏点。表 1 列出了该点 3 次重复实测数据,可看出第 1 次测量数据明显是错误的。由于仪器系统自带的处理软件没有对类似畸点或坏点进行处理的功能,给正常资料处理解释带来了很大问题。

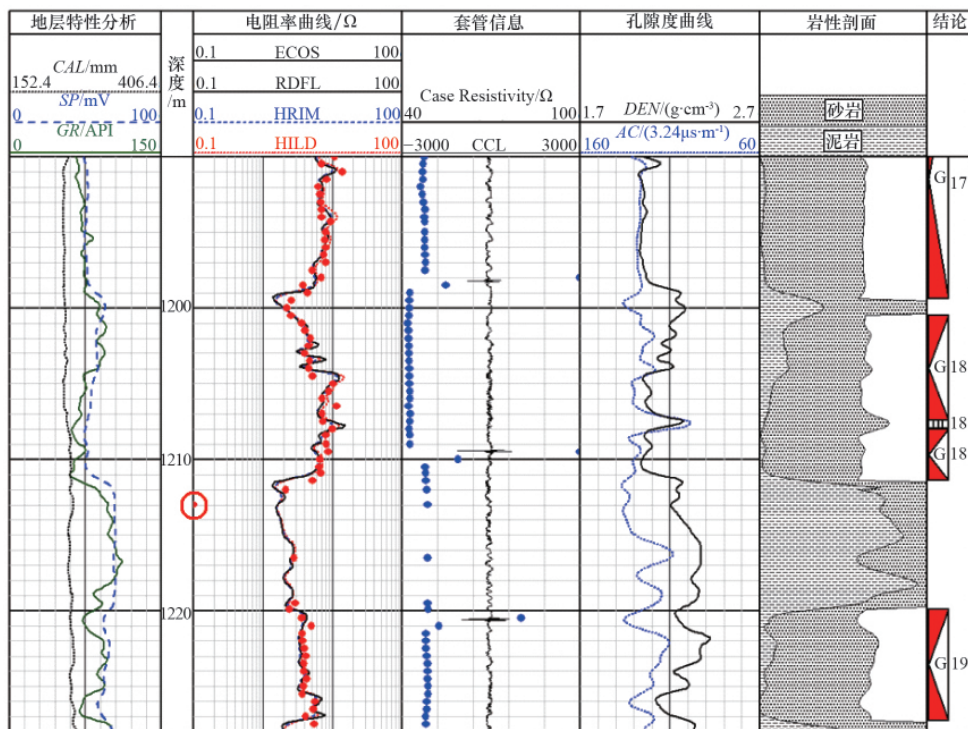


图 1 Z12-X3013 井过套管测井综合曲线图

Fig. 1 Composite curve of well Z12-X3013 cased hole formation resistivity logging

表 1 Z12-X3013 井过套管测井实测数据

Table 1 Measured data of well Z12-X3013 cased hole formation resistivity logging

测量次数	地层电阻率/(Ω·m)	套管电阻率/(Ω·m)
1	-12.2538	48.5903
2	2.2365	48.7241
3	2.0527	48.7382

针对这种情况,提出如下数据筛选处理方法。

可采用 Grubbs 准则实现异常测量值的自动剔除。设过套管电阻率测井仪器在某一深度测得 n 个地层电阻率值 $R_1, R_2, \dots, R_n, 3 \leq n \leq 10$, 则数据自动筛选步骤如下^[6]。

(1) 选定危险率 α 。

(2) 将地层电阻率测量值按从小到大次序排列 $R_{(1)}, R_{(2)}, \dots, R_{(n)}$, 设最小或最大的数据 $R_{(1)}, R_{(n)}$ 是异常的, 分别计算它们的临界值 T

$$T_{(1)} = \frac{\bar{R} - R_{(1)}}{S} \quad T_{(n)} = \frac{R_{(n)} - \bar{R}}{S}$$

其中,

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n R_i \quad S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}$$

令 $T = \max\{T_{(1)}, T_{(n)}\}$ 。若 $T_{(1)} \geq T_{(n)}$, 则 $R_{(1)}$ 为可疑的异常值; 否则, $R_{(n)}$ 为可疑的异常值。

(3) 根据 n 及 α 的值, 查询新颖的临界值 $T_{(n,\alpha)}$ 。

(4) 比较 T 与 $T_{(n,\alpha)}$ 。若 $T > T_{(n,\alpha)}$, 则怀疑数据异常, 从数据中剔除; 返回(2), 重复(3)、(4), 逐一剔除异常值。

2 离散数据插值

现有测井资料处理解释软件, 一般要求输入连续等间距的测井资料。因此需要将不等深度间隔的过套管电阻率测井资料进行插值处理, 加密成等深度间隔的测井数据。

2.1 线性插值

已知坐标 (x_0, y_0) 与 (x_1, y_1) , 要得到 $[x_0, x_1]$ 区间内某一位置 x 在直线上的值, 则 $(y - y_0)(x_1 - x_0) = (y_1 - y_0)(x - x_0)$ 。

假设方程两边的值为 β , 则 β 为插值系数——从 x_0 到 x 的距离与从 x_0 到 x_1 距离的比值。由于 x 已知, 则 β 为

$$\beta = (x - x_0) / (x_1 - x_0) = (y - y_0) / (y_1 - y_0)$$

则

或

$$y = (1 - \beta)y_0 + \beta y_1$$

$$y = y_0 + \beta(y_1 - y_0)$$

2.2 拉格朗日插值

根据 $n+1$ 个点 x_0, x_1, \dots, x_n ($x_0 < x_1 < \dots < x_n$) 的函数值 $f(x_0), f(x_1), \dots, f(x_n)$ 推出 n 次多项式 $p(x)$

$$p_n(x) = \sum_{j=0}^n f(x_j) l_j(x)$$

其中

$$l_j(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{j-1})(x-x_{j+1})\dots(x-x_n)}{(x_j-x_0)(x_j-x_1)\dots(x_j-x_{j-1})(x_j-x_{j+1})\dots(x_j-x_n)}$$

然后利用 n 次多项式 $p(x)$ 求出任意点 x 对应的函数值 $f(x)$ 。

2.3 样条插值

函数 $S(x) \in C^2[a, b]$, 且在每个小区间 $[x_j, x_{j+1}]$ 上是三次多项式, 其中 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ 是给定节点, 则称 $S(x)$ 是节点 x_0, x_1, \dots, x_n 上的三次样条函数。若在节点 x_j 上给定函数值 $y_j = f(x_j)$ ($j=0, 1, \dots, n$), 并成立:

$$S(x_j) = y_j \quad (j=0, 1, \dots, n)$$

则称 $S(x)$ 为三次样条插值函数。

2.4 插值结果分析

分别采用线性插值、拉格朗日插值、样条插值及混合插值算法对 Z12-X3013 井过套管测井资料处理, 见图 2, 使用拉格朗日插值或样条插值插值结果会有奇异值出现, 同时插值曲线与裸眼井测井资料的匹配存在差异, 使用线性插值或混合插值方法得到的过套管电阻率插值曲线与裸眼井测井资料匹配关系良好。因此, 在实际井处理过程中要根据裸眼井电阻率资料选择合适的插值算法。

3 套管非均质性校正

套管井壁电势分布包含了金属套管和地层模型信息, 高杰等^[9]考虑了套管电阻率的变化对传输线方程系数的影响, 实现了非均匀套管测井响应的模拟。结果表明, 套管薄、厚对测井响应均有影响, 当套管突然变厚套管(电阻率变小)或突然变薄(电阻率变大)时, 过套管电阻率测井的异常值就发生

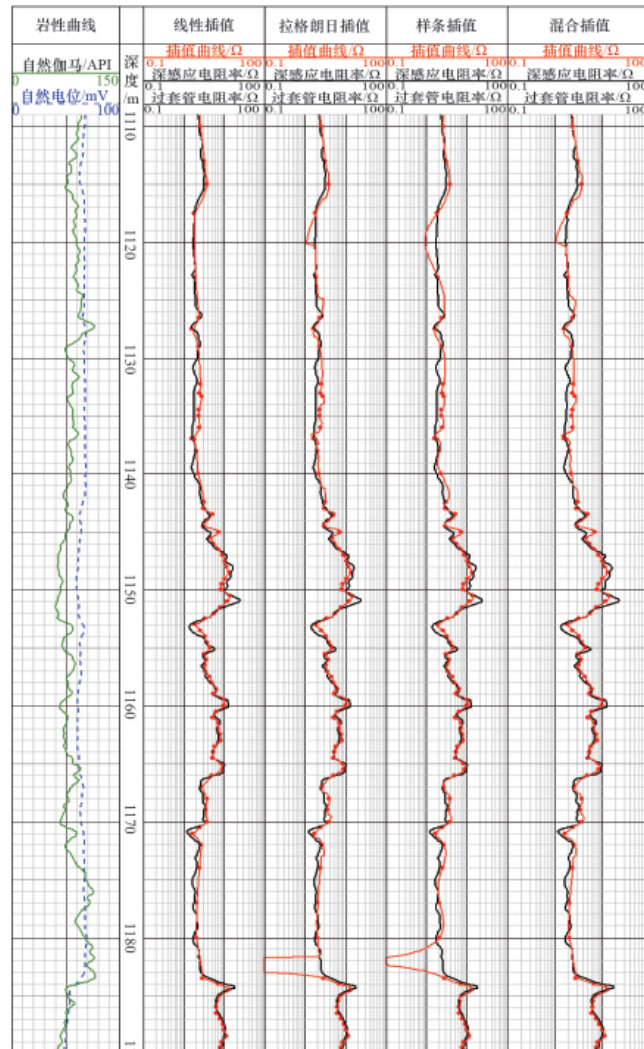


图 2 Z12-X3013 曲线插值结果对比

Fig. 2 Comparison of interpolation results for the well Z12-X3013 logging data

在套管电阻突变界面附近。根据改进的传输线模型考察 ECOS-31-7 的测井响应, 可考查套管损伤或套管接箍的存在而引起的套管变薄或变厚对测井响应的影响。

图 3 为不同长度的金属套管异常对视电阻的影响关系

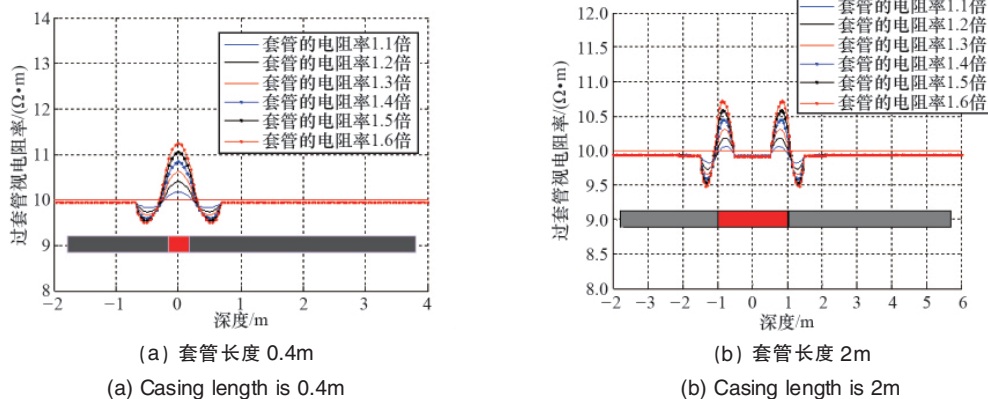


图 3 金属套管异常对视电阻率的影响

Fig. 3 Abnormal effects of metal casing on the apparent resistivity

图^[7],当两段套管的纵向单位长度的电阻为地层电阻1.5倍时,对应套管电阻高处,地层电阻增加约8%,对应套管电阻低处,地层电阻减少约4%。图4第二道为实际测井资料处理结果。

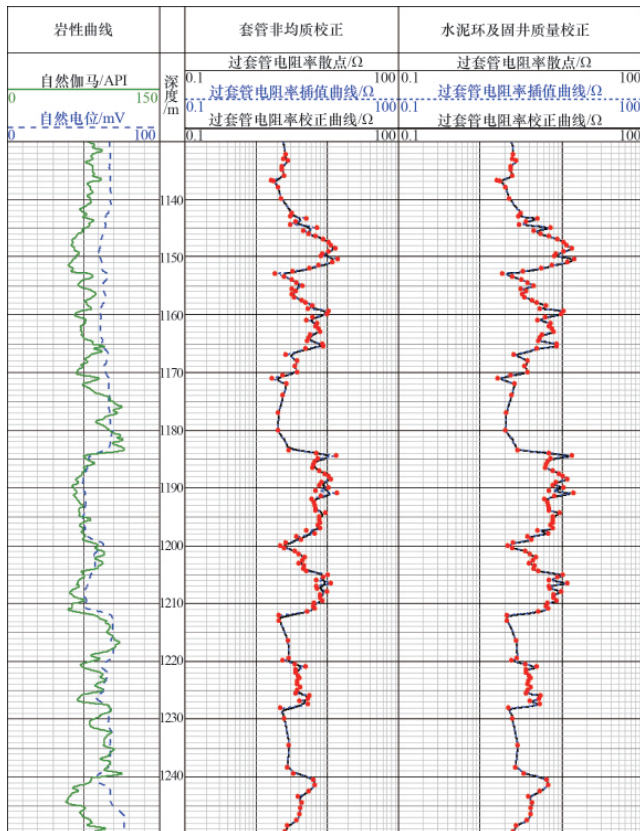


图4 Z12-X3013 过套管测井资料校正曲线对比

Fig. 4 Comparison between calibration curves for the well Z12-X3013 cased hole formation resistivity logging

4 水泥环及固井质量校正

测量电阻率与地层电阻率和水泥环电阻率等效于串联(传输线理论模型),则水泥环厚度与测量误差呈正相关特性。当水泥环厚度过大,则测量误差可达100%甚至更大。如果水泥环电阻率大于地层电阻率,则测量电阻率大于地层真实电阻率,此时水泥环电阻率是造成过套管电阻率测量值与裸眼电阻率数值差异的重要因素之一。反之,过套管测量电阻率则小于真实地层电阻率^[7]。

水泥环电阻率一般在1—10Ω·m之间变化。林旭东等^[8]认为可用阿尔奇公式估算水泥环电阻率:

$$R_{\text{cement,w}} = \frac{aR_{\text{cement,w}}}{\phi^m}$$

其中, $R_{\text{cement,w}}$ 为水泥环内水的电阻率; ϕ 为水泥环带孔隙度; m 为水泥环带胶结指数; a 为地区经验系数。

当固井质量变差或发生窜漏时,如果充满水,相当于水泥环带电阻率变小,厚度变薄,或者水泥环带不存在;如果充满油气,则相当于水泥环带电阻率变大,厚度增大。可以根据

地区经验,模拟经验公式给出校正量。图4第三道为实际测井资料处理结果。

5 结论

过套管电阻率测井信号微弱,资料的质量受到多种因素的干扰而经常出现畸点或坏点,影响了资料的正常处理和应用效果。为了满足过套管电阻率测井资料的处理解释需要,本文针对俄罗斯ECOS-31-7测井仪提出了相应的一套预处理方法。

(1) 利用离散数据自动筛选法,可快速剔除原始数据中的畸点或坏点。

(2) 通过选择合适的插值算法,可将不等深度间隔的过套管电阻率测井资料加密成等深度间隔的测井数据,实现与常规测井资料的综合处理解释。

(3) 提出的套管非均质性、水泥环及固井质量校正方法,可有效消除套管厚度不均匀、水泥环厚度和固井质量差异造成的影响,基本满足实际测井资料处理解释的需要。

上述方法思路也适用于其他过套管电阻率测井资料的处理解释。

参考文献 (References)

- [1] 吴银川, 张家田, 严正国. 过套管地层电阻率测井技术综述[J]. 石油仪器, 2006, 20(5): 1-5.
Wu Yinchuan, Zhang Jiatian, Yan Zhengguo. *Petroleum Instruments*, 2006, 20(5): 1-5.
- [2] 程希, 余坤, 翟芳芳. 过套管地层电阻率测井方法研究[J]. 国外测井技术, 2007, 22(3): 26-31.
Chen Xi, Yu Kun, Zai Fangfang. *World Well Logging Technology*, 2007, 22(3): 26-31.
- [3] 张守伟, 孙建孟, 伍东, 等. 俄罗斯过套管电阻率测井资料预处理软件的设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(5): 1189-1192.
Zhang Shouwei, Sun Jianmeng, Wu Dong, et al. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(5): 1189-1192.
- [4] 高杰, 刘福平, 包德洲, 等. 过套管电阻率测井数值模拟研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(S1): 186-190.
Gao Jie, Liu Fuping, Bao Dezhou, et al. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 38(S1): 186-190.
- [5] 高杰, 刘福平, 包德洲, 等. 非均匀套管井中的过套管电阻率测井响应[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1255-1261.
Gao Jie, Liu Fuping, Bao Dezhou, et al. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4): 1255-1261.
- [6] 孙中春, 罗兴平, 周继宏, 等. 过套管电阻率测井资料预处理方法[J]. 测井技术, 2011, 35(2): 151-154.
Sun Zhongchun, Luo Xingping, Zhou Jihong, et al. *Well Logging Technology*, 2011, 35(2): 151-154.
- [7] 岳喜洲. 过套管电阻率测井解释方法研究 [D]. 东营: 中国石油大学, 2009.
Yue Xizhou. Research on the interpretation method of through casing resistivity logging[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2009.
- [8] 林旭东, 谭辉红. 过套管地层电阻率测井及其应用[J]. 测井技术, 2004, 28(1): 65-74.
Lin Xudong, Tan Huihong. *Well Logging Technology*, 2004, 28(1): 64-74.

(责任编辑 刘志远)