

文章编号: 1004-4140 (2009) 02-0041-09

阵列感应测井分辨率匹配方法及应用

高杰¹, 谭茂金², 钟光海¹, 刘焕礼¹

1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249

2. 中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 测井曲线高分辨率处理对薄层测井评价意义重大。俄罗斯感应测井 (HIL) 仪器已经在中国应用, 存在的主要问题之一是 4 种探测深度曲线分辨率不匹配。本文基于感应测井的信息补偿原理, 在分析 HIL 仪器探测特性的基础上, 研究了针对该仪器的分辨率匹配方法和处理技术, 处理了假设模型资料 and 实际资料, 初步验证了方法的正确性和处理实际资料的可行性。

关键词: 阵列感应测井 (HIL); 信息补偿; 分辨率匹配

中图分类号: P 631

文献标识码: A

目前, 俄罗斯阵列感应测井 (HIL) 仪器已经在中国销售, 并已经在长庆、新疆、辽河和四川等油田进行了实际应用, 测量效果得到不同程度的认可。与 HIL 仪器配套的信号处理项目包括井眼校正、趋肤效应校正和反褶积处理, 处理内容比较简单。HIL 仪器通常提供 4 条电阻率曲线 (探测深度分别是 0.72 m、1.23 m、1.82 m 和 2.97 m; 分辨率分别是 0.6 m、1.1 m、1.6 m 和 2.5 m)。可以看出, 不同探测深度的 HIL 曲线的分辨率是不匹配的。这是 HIL 仪器在国内油田现场应用时存在的主要问题。

西方阵列感应测井 (如 AIT、HDIL 和 HRAI 等) 在国内应用较多, 国内也已经研制出类似的阵列感应测井 (如 MIT 等), 阵列感应测井的软件聚焦结果得到较普遍的认可^[1-2]。对于纵向分辨率不同的测井曲线, 如何进行处理以保证它们的分辨率基本一致, 对有侵入现象存在的薄储层的测井评价非常重要^[3-8]。本文基于西方阵列感应测井的聚焦思想, 对 HIL 仪器提供的电阻率曲线进行了信号处理, 将分辨率为 1.1 m、1.6 m 和 2.5 m 的 3 条电阻率曲线分辨率提高到 0.6 m, 力图得到分辨率匹配 HIL 曲线。本文重点介绍了信息补偿方法原理和纵向分辨率匹配技术, 用理想模型结果进行验证, 并通过处理实际资料, 说明本文方法的可行性。

1 分辨率信息补偿原理与分辨率匹配滤波方法

1.1 分辨率信息补偿原理与匹配方法

我们以图 1 所示的 2 条不同分辨率曲线的分辨率匹配为例来说明信息补偿原理^[1]。从响应曲线得知, 若能设计出高与低分辨率曲线差值信息的差值滤波器, 在使低分辨率曲线变为高分辨率曲线时, 只须将低分辨率曲线加上差值信息即可; 反之, 若使高分辨率曲线变

收稿日期: 2009-04-03。

基金项目: 中国石油天然气集团公司重点项目 (2008A-2702)。

为低分辨率曲线，只需将高分辨率曲线减去差值信息即可，这就是分辨率信息补偿原理。

根据上述思路，在利用信息补偿原理进行分辨率匹配时，预先设计将高分辨率曲线变换为低分辨率曲线的滤波器。当处理实际数据时，首先将滤波器应用到高分辨率曲线上，然后用高分辨率曲线减去滤波处理后的曲线，得到高低分辨率曲线的差值信息。最后，如果想将低分辨率曲线变换为新分辨率曲线，只需将差值信息加到低分辨率曲线就得到了新的高分辨率曲线。反之，如果想将高分辨率曲线变换为低分辨率曲线，只需从高分率曲线中减去差值信息，便得低分辨率曲线。

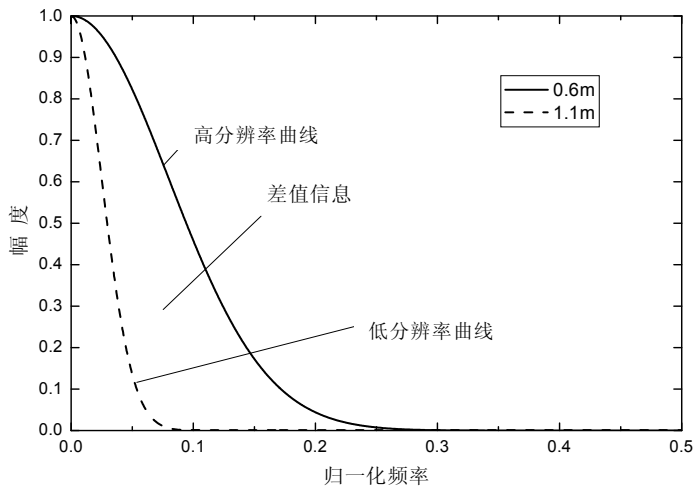


图1 分辨率匹配中的信息补偿原理

Fig.1 Information compensation principle of the resolution matching

设 g_{vgf1} , g_{vgf2} , g_{vgf3} , g_{vgf4} 分别为由浅到深的 4 条不同探测深度、不同分辨率的曲线。首先设计在相邻 2 条曲线中将高分辨率曲线变换为低分辨率曲线的滤波器，即设计滤波器 h_{vgfi} ，使 g_{vgfi} 变换为 $g_{vgf(i+1)}$ ，表示为：

$$g_{vgf(i+1)}(z) = h_{vgfi}(z) * g_{vgfi}(z) \quad (1)$$

式中， $i=1, 2, 3$ ，左侧为需要分辨率匹配的目的函数。

可以用一维最优化方法设计滤波器 h_{vgfi} ，有了 h_{vgfi} 就很容易得到响应函数 g_{vgfi} 和 $g_{vgf(i+1)}$ 之间的差值信息：

$$\Delta g_{vgfi} = g_{vgfi} - h_{vgfi} * g_{vgfi} \quad (2)$$

得到相邻 2 条曲线间的差值信息后，就可以实现 4 条不同探测深度曲线间的分辨率匹配。表 1 是将所有 HIL 曲线匹配到 0.6 m 分辨率曲线时的情况。

例如，如果要将分辨率 2.5 m 曲线匹配到分辨率 0.6 m 曲线，则新的曲线为：

$$g_{vgf4}^2 = g_{vgf4} + \Delta g_{vgf1} + \Delta g_{vgf2} + \Delta g_{vgf3} \quad (3)$$

式中 Δg_{pvf1} , Δg_{pvf2} 和 Δg_{pvf3} 分别为 0.6 m 与 1.1 m、1.1 m 与 1.6 m 和 1.6 m 与 2.5 m 之间的差值信息。其他探测深度曲线与匹配到 0.6 m 曲线的方法类似, 只是增加的信息不同。

表 1 分辨率匹配到探测深度为 0.72 m 时的曲线 (分辨率为 0.6 m)

Table 1 Resolution matching curves with 0.72 m investigation depth (Resolution 0.6 m)

不同探测深度之间的分辨率差值信息	不同探测深度的分辨率匹配			
	0.72 m g_{vgf1}^2	1.23 m g_{vgf2}^2	1.82 m g_{vgf3}^2	2.97 m g_{vgf4}^2
不同探测深度曲线	g_{vgf1}	g_{vgf2}	g_{vgf3}	g_{vgf4}
0.6 m 与 1.1 m: $\Delta g_{vgf1} = g_{vgf1} - g_{vgf1} * h_{vgf1}$		+	+	+
1.1 m 与 1.6 m: $\Delta g_{vgf2} = g_{vgf2} - g_{vgf2} * h_{vgf2}$			+	+
1.6 m 与 2.5 m: $\Delta g_{vgf3} = g_{vgf3} - g_{vgf3} * h_{vgf3}$				+

1.2 分辨率匹配滤波的实现

对于 4 条不同探测深度曲线的纵向分辨率匹配, 可以通过滤波出相邻 2 条曲线的差值信息, 然后根据所需的分辨率匹配到相应的曲线上。需要注意的是, 由于深浅曲线之间的差别是非常大的, 过多的信息补偿易带来不必要的人为影响; 分辨率信息补偿适用于同一物理测量的 2 条曲线, 否则只有数学意义, 没有实际物理意义。

保持测井曲线的分辨率基本一致通常包含两方面的问题, 一是对高分辨率曲线进行滤波以便与低分辨率曲线相匹配; 另外, 对低分辨率曲线进行适当处理以保证与高分辨率曲线相匹配。从数学上, 前者是适定的, 而后者是不适定的, 可以通过匹配滤波与非线性拟合的方法解决这一问题^[2-4]。

设有高低不同分辨率的 2 条测井曲线 d_h 、 d_l , 它们对应的响应函数分别为 H_h 和 H_l , 根据褶积模型可以得到它们与地层真实参数 m 间的近似关系:

$$d_h = H_h * m(z) \quad (4)$$

$$d_l = H_l * m(z) \quad (5)$$

对式 (4)、(5) 进行变换, 得到降低高分辨率曲线的分辨率使其与低分辨率曲线相匹配的计算公式:

$$d_l(z) = f(z) * d_h(z) \quad (6)$$

$$\text{式中: } f(z) = F^{-1}(H_l(\omega)/H_h(\omega)) \quad (7)$$

称为匹配滤波因子。由于 H_h 的频带比 H_l 宽, 所以 $f(z)$ 的计算是稳定的, 式 (6) 的匹配滤波计算是适定的。

形式上, 可以由 d_l 确定 d_h 的计算公式:

$$d_h(z) = f_l(z) * d_l(z) \quad (8)$$

式中, $f_1(z) = F^{-1}(H_h(\omega)/H_l(\omega))$, 由于 $H_h(\omega)$ 的频带比 $H_l(\omega)$ 宽, 在 H_l 的频率范围外, 比值 H_h/H_l 出现奇异, $f_1(z)$ 计算不恒定, 用式 (8) 提高分辨率实现分辨率的相互匹配并不容易。

为了提高某一测井曲线分辨率使其与高分辨率曲线相匹配, 利用式 (7) 匹配滤波因子计算出匹配滤波曲线:

$$d_{hf}(z) = f(z) * d_h(z) \quad (9)$$

由于响应函数难以准确给出, $d_{hf}(z)$ 和 $d_l(z)$ 之间通常存在着差异。为了定量确定两者的关系, 根据最小平方原则计算出 d_l 和 d_{hf} 间的拟合系数 α 、 β 和 γ , 使得:

$$d_e(z) = \alpha + \beta d_{hf}(z) + \gamma d_{hf}^2(z) \quad (10)$$

$d_e(z)$ 是 $d_l(z)$ 的最佳逼近值。利用此拟合系数同样可以计算出另一条高分辨率的模拟测井曲线:

$$d'_e(z) = \alpha + \beta d_h(z) + \gamma d_h^2(z) \quad (11)$$

应用式 (10) 和 (11), 可以得到提高 $d_l(z)$ 的分辨率使其与 $d_h(z)$ 相匹配的计算公式:

$$d_l^2(z) = \frac{1}{2} \left(d_l + d'_e - d_e + d_l \left(\frac{d'_e}{d_e} \right) \right) \quad (12)$$

该式中既有高分辨率项 d'_e 又有低分辨率项 d_l , 所以 d_l' 的处理结果既具有较高纵向分辨率又具有较深的探测深度, 达到了提高分辨率处理的目的。

2 模型检验与实际资料处理

2.1 方法验证与分析

为了验证方法的正确性, 给出两种地层模型: ①地层模型 I: 无侵入的 Oklahoma 地层模型^[2], 具体参数见表 2, 处理结果如图 2 (因量纲转换和处理需要, 模型参数略有变化); ②地层模型 II: 无侵入的国内典型地层模型, 具体参数见表 3, 处理结果如图 3。

表 2 无侵 Oklahoma 地层模型^[2]
Table 2 Oklahoma formation model^[2]

层号	深度段/m	地层电阻率/ $\Omega \cdot m$	层号	深度段/m	地层电阻率/ $\Omega \cdot m$
1	$-\infty \sim 40.350$	10.0	11	57.000~59.025	40.0
2	40.350~45.150	100.0	12	59.025~63.825	1 500.0
3	45.150~47.550	4.0	13	63.825~66.300	400.0
4	47.550~48.750	30.0	14	66.300~68.250	15.0
5	48.750~49.800	9.0	15	68.250~70.650	1 000.0
6	49.800~51.750	200.0	16	70.650~72.000	200.0
7	51.750~52.950	7.0	17	72.000~73.125	1 000.0
8	52.950~54.900	900.0	18	73.125~74.175	15.0
9	54.900~55.800	60.0	19	74.175~75.375	80.0
10	55.800~57.000	1 200.0	20	75.375~76.725	9.0

注: 引自公开发表论文 2, 深度与层数略有变化

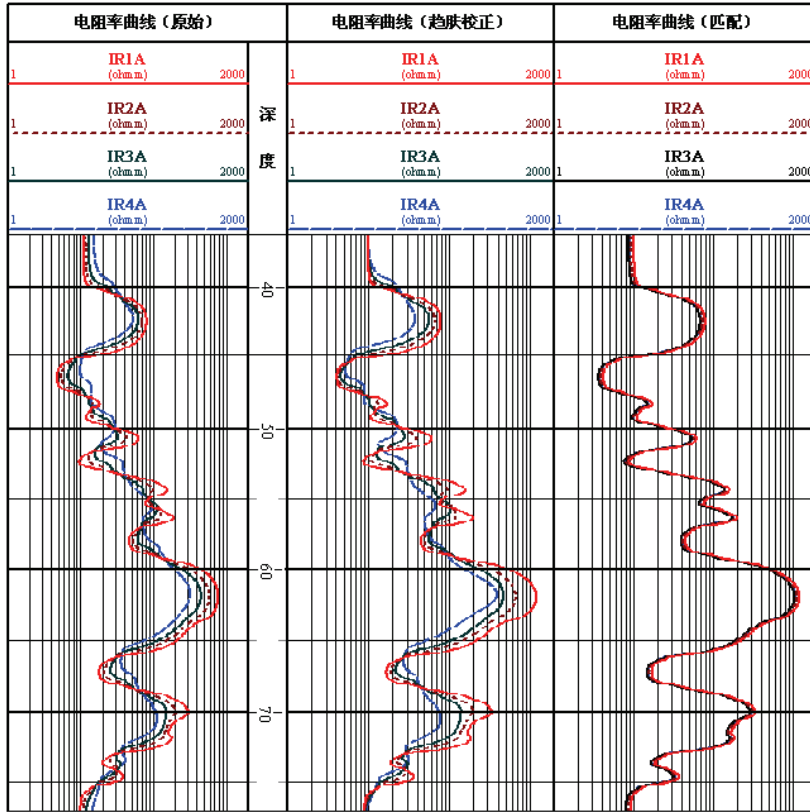


图2 Oklahoma 模型 HIL 曲线处理算例
Fig.2 HIL curves of Oklahoma model

表3 国内典型地层模型
Table 3 Classic formation model of China

层序号	起止深度/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$	层序号	起止深度/m	电阻率/ $\Omega \cdot m$
1	$-\infty \sim 51.0$	5.0	18	97.3~102.0	5.0
2	51.0~54.0	10.0	19	102.0~103.0	20.0
3	54.0~58.0	15.0	20	103.0~103.3	10.0
4	58.0~60.0	20.0	21	103.3~103.8	80.0
5	60.0~62.0	5.0	22	103.8~110.0	5.0
6	62.0~65.0	20.0	23	110.0~113.0	30.0
7	65.0~68.0	50.0	24	113.0~116.0	10.0
8	68.0~72.0	20.0	25	116.0~117.0	15.0
9	72.0~76.0	5.0	26	117.0~119.0	25.0
10	76.0~77.0	9.0	27	119.0~120.0	20.0
11	77.0~79.0	40.0	28	120.0~121.0	5.0
12	79.0~80.0	15.0	29	121.0~121.2	10.0
13	80.0~82.0	8.0	30	121.2~122.0	50.0
14	82.0~84.0	40.0	31	122.0~123.0	10.0
15	84.0~90.0	20.0	32	123.0~125.0	20.0
16	90.0~97.0	5.0	33	125.0~ $+\infty$	5.0
17	97.0~97.3	200.0			

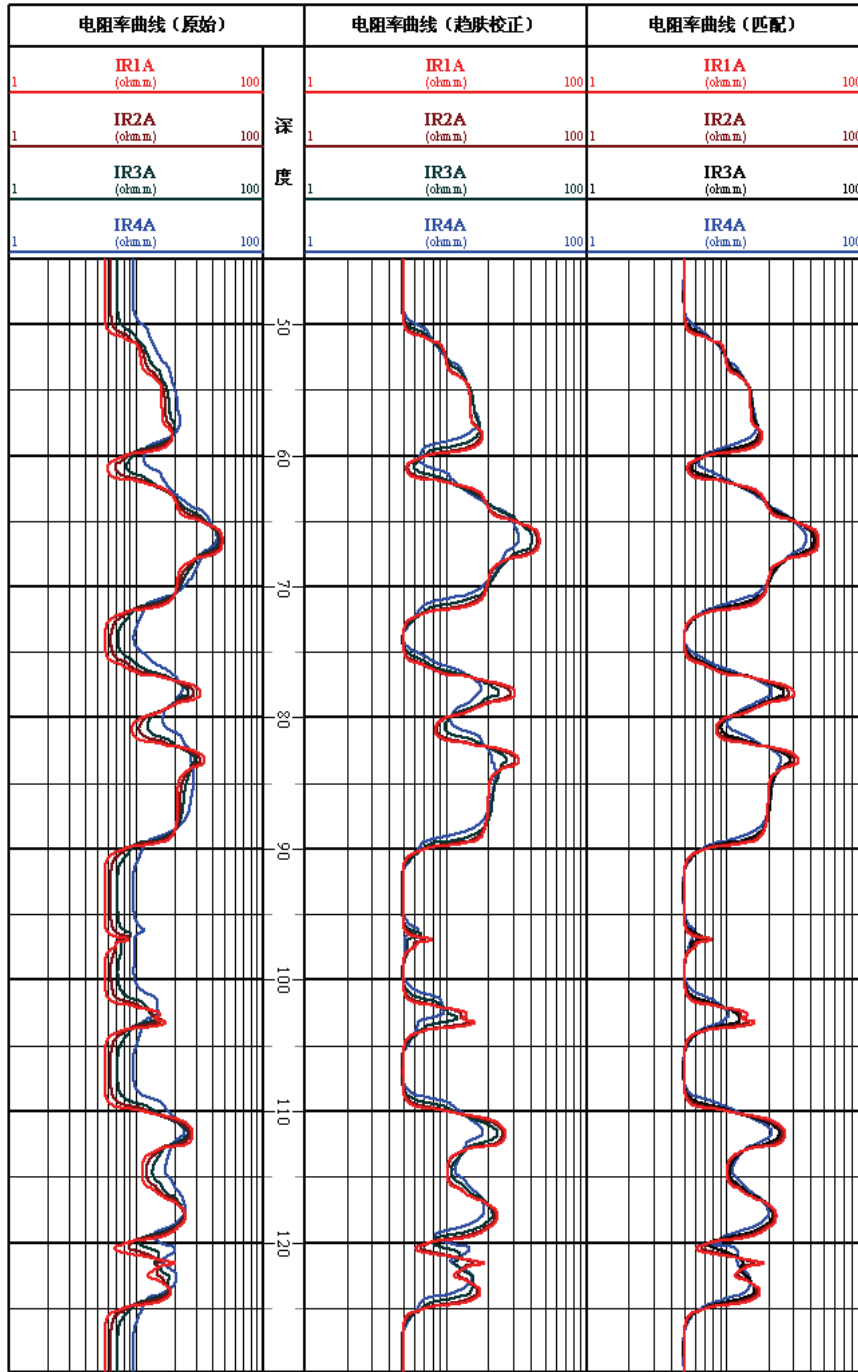


图 3 国内典型地层模型 HIL 曲线处理算例
 Fig.3 HIL curves of the classic model of China

2.2 实际资料处理与分析

图 4 为国内某油田实际测得感应测井仪器 HIL 的曲线。第一道为 HIL 仪器的 4 条原始

曲线, 部分深度有异常负值出现; 第二道为异常值校正后的曲线; 第三道为用本文分辨率匹配方法得到 HIL 曲线。可以看出, 曲线质量得到改善, 更加符合实际地层情况。

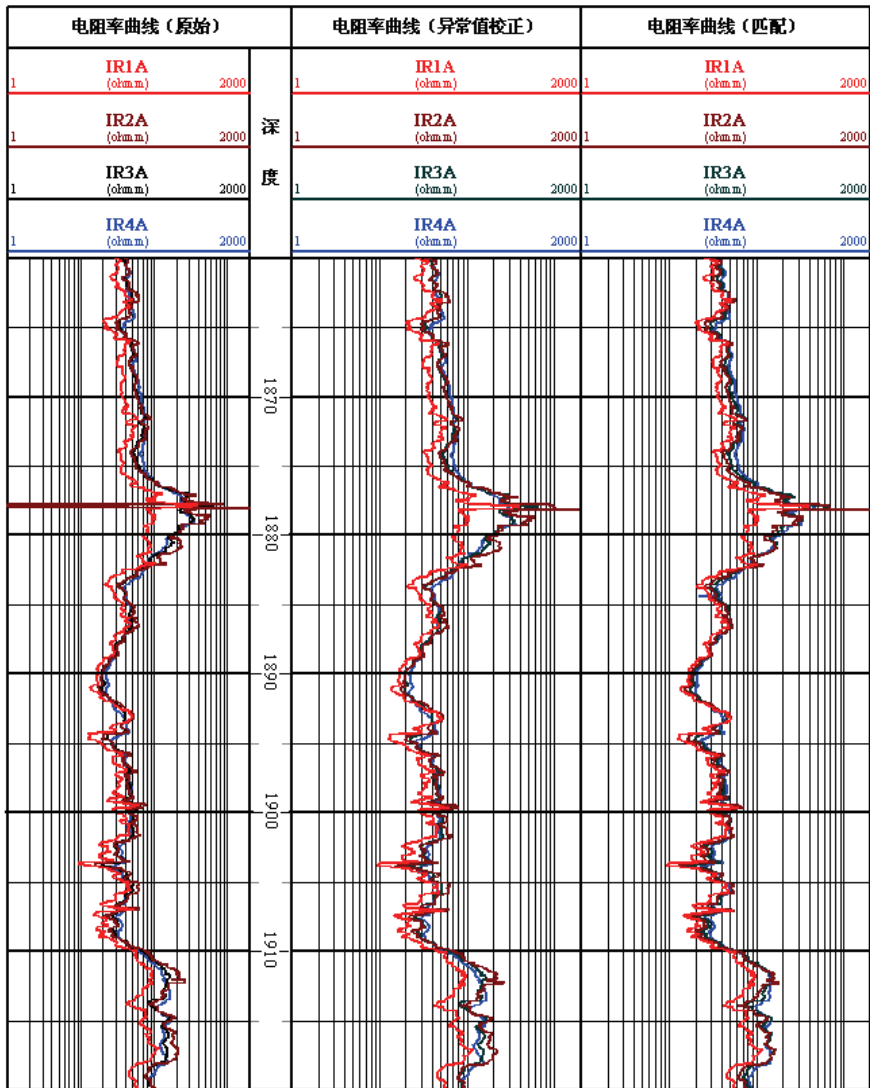


图 4 国内某油田 HIL 曲线处理结果

Fig.4 Processed HIL curves of certain oil field in China

3 结论与讨论

HIL 仪器性价比较高, 可以通过分辨率匹配方法改进 HIL 仪器的纵向分辨率能力, 进一步改善其应用效果。本文给出的方法, 对于假设的无泥浆侵入地层模型, 处理效果良好, 说明所研究的分辨率匹配方法是正确的; 同时, 通过对实际资料的处理, 初步说明了方法的可行性。

但是, 由于 HIL 仪器自身的特性, 有些问题需要注意, 一是 HIL 仪器只有一种测量频率 (100 kHz), 趋肤效应校正值得重视; 二则由于该仪器的最高分辨率为 0.6 m, 本文将分辨率为 1.1 m、1.6 m 和 2.5 m 的 3 条电阻率曲线提高到 0.6 m 的纵向分辨率, 所以小于 0.6 m 的薄层的处理效果并不理想。最后, 需要说明的是, 本研究未考虑泥浆侵入情况, 地层模型相对简单, 虽然结果较好, 但是, 得到的滤波器是否适用于各种地层, 尚需进一步优化处理及深入研究和验证。

参考文献

- [1] 张建华, 刘振华, 仵杰. 电法测井原理与应用[M]. 西安: 西北大学出版社, 2002.
Zhang JH, Liu ZH, Wu J. Electrical logging principle and applications[M]. Xi'an: North-west University press.
- [2] Beard D, Zhou Q, Bigelow EL. A new fully digital full-spectrum induction device for determining accurate resistivity with enhanced diagnostics and data integrity verification[C]. SPWLA 37th Annual Logging Symposium Transaction, 1996: 16-19.
- [3] 汪宏年, 李舟波, 常明澈. 地球物理测井综合高分辨率处理系统及其应用[J]. 测井技术, 1996, 20(6): 441-448.
Wang HN, Li ZB, Chang MC. The integrated processing system to enhance vertical resolution of geophysical well logs and its application[J]. Well Logging Technology, 1996, 20(6): 441-448.
- [4] 李曙光, 杨善德. 感应测井自适应反褶积处理与地层参数的提取方法[J]. 测井技术, 2002, 26(1): 40-45.
Li SG, Yang SD. The adaptive deconvolution of induction logging curves and the method of extracting formation parameters[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(1): 40-45.
- [5] 范宜仁, 焦翠华, 王光海, 等. 用分辨率匹配技术提高感应测井曲线的分辨率[J]. 测井技术, 1994, 18(6): 413-417.
Fan YR, Jiao CH, Wang GH, et al. Enhancement of the vertical resolution of conventional induction log with resolution matching technique[J]. Well Logging Technology, 1994, 18(6): 413-417.
- [6] 张翔, 钟兴水, 张超谟, 等. 测井曲线高分辨率处理[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(2): 48-50.
Zhang X, Zhong XS, Zhang CM, et al. High resolution processing of well logs[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1995, 17(2): 48-50.
- [7] 谭茂金, 张庚骥. 非均匀层状介质中感应测井响应的新型计算方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 31-35.
Tan MJ, Zhang GJ. An improved numerical calculation method for induction log response in inhomogeneous stratified media[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2006, 30(2): 31-35.
- [8] 高杰, 贾晓平. 双感应电阻率反演研究及在吐哈油田的应用[J]. 测井技术, 1999, 23(5): 334-337.
Gao J, Jia XP. Study of dual induction logging resistivity inversion and its application to Tuha oil field[J]. WLT, 1999, 23(5): 334-337.

Resolution Matching Method of High Induction Logging and Applications

GAO Jie¹, TAN Mao-jin², ZHONG Guang-hai¹, LIU Huan-li¹

1. Faculty of Natural Resource and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China
2. Faculty of Geophysics and Information Technology, China University of Geology, Beijing, 100083, China

Abstract: High resolution processing of logs is of great significance to logging formation evaluation in thin beds. Russian High Induction Logging (HIL) tool has been applied in China, but one of main problems is that the resolution of its four curves does not match each other. On the basis of the information compensation theory of the induction logging and the analysis of investigation characteristics of HIL, the method of resolution matching and processing technology have been obtained. The results derived from the assumed formation model and some practical cases show that the resolution matching method is reliable and the processed data in situ is reasonable.

Key words: high induction logging (HIL); information compensation; resolution matching

作者简介: 高杰 (1969—), 男, 博士, 中国石油大学 (北京) 测井研究中心副教授, 主要从事电法测井理论及电测井正、反演数值模拟方面的研究和教学工作, Tel: 010-89733301, E-mail: jiegao@cup.edu.cn。