

· 测井技术应用 ·

# 高分辨率双侧向测井响应数值模拟分析

朱军\*<sup>①②</sup> 冯琳伟<sup>②</sup>

(①中国石油勘探开发研究院; ②中国石油集团测井有限公司)

朱军,冯琳伟. 高分辨率双侧向测井响应数值模拟分析. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 457~462

**摘要** 我国自行研制的新型的高分辨率双侧向测井仪已逐渐投入大规模的生产应用, 可为解决油田薄层油气藏的勘探开发问题提供有力的支持。本文利用有限元方法对新型的高分辨率双侧向测井仪及国内目前大规模应用的常规双侧向测井仪的分层能力、探测深度、侵入影响和井眼影响等响应特征进行了数值模拟, 并对其测井响应进行了对比分析。数值模拟表明: 与常规双侧向测井相比, 虽然高分辨率双侧向测井资料井眼的影响更复杂, 但测量结果既能得到较高纵向分辨率, 又具有较深的径向探测深度, 基本上可以取代常规双侧向测井仪在测井中应用。文中数值模拟结果可以为测井作业人员和解释人员在资料验收及解释处理等方面提供参考和指导。

**关键词** 高分辨率双侧向 测井 测井响应 数值模拟 分层能力 探测深度 井眼影响

## 1 引言

双侧向测井自从20世纪70年代问世以来已成为广泛应用的电阻率测井方法之一, 它对于油气田勘探与开发中识别油水界面和估计含油(水)饱和度等方面起到了重要作用。随着油田勘探开发的不断深入, 薄层、裂缝层等油气藏的开发显得日趋重要, 要求测井方法能对更薄的地层进行探测。常规双侧向测井仪虽具有较深的探测深度, 但垂直分辨率较低, 仅0.6~0.9m, 难以识别薄层和薄互层, 无法满足油田对薄层油气藏勘探开发的需要; 另外电极系又太长, 不利于现场测井施工和组合测井。

为了克服常规双侧向测井仪的不足, 我国的新型高分辨率双侧向测井方法及仪器应用而生, 经过大量地层模型的数值模拟研究选定了电极系参数, 并通过大量现场试验, 现逐渐进入大规模生产和油田应用, 可为解决油田薄层油气藏的勘探开发问题提供有力的支持。文中通过数值模拟阐述了高分辨率双侧向测井仪的探测特性和响应特征, 旨在为测井作业人员和测井解释人员提供参考和指导。

## 2 电极系结构及工作原理

高分辨率双侧向测井仪和常规双侧向测井仪的

电极系电极排列和理论设计尺寸如图1所示。从图中可知, 两种电极系的电极排列主要区别在电极系中部。高分辨率双侧向测井仪的电极系由中心的第

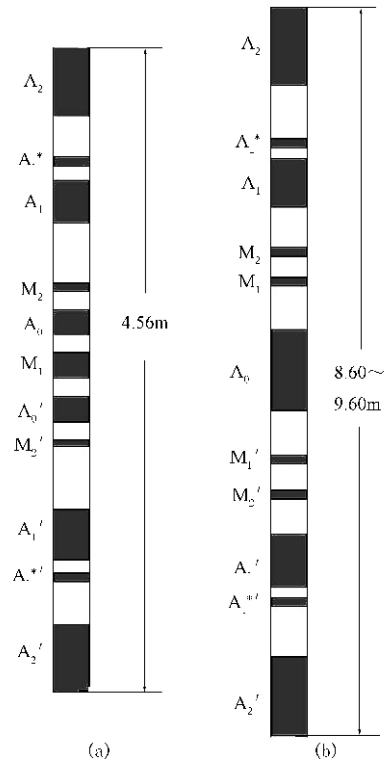


图1 两种仪器双侧向电极系对比  
(a)高分辨率双侧向;(b)常规双侧向

\*北京市海淀区学院路中国石油勘探开发研究院, 100083

本文于2006年9月26日收到。

一监督电极 ( $M_1$ )、上下对称的主电极 ( $A_0$ 、 $A_0'$ )、上下对称的第二监督电极 ( $M_2$ 、 $M_2'$ )、上下对称的两对屏蔽电极 ( $A_1$ 、 $A_1'$ 和  $A_2$ 、 $A_2'$ )及上下对称的取样电极 ( $A_1^*$ 、 $A_1^{*'}$ )等组成。该电极系可看成是在常规双侧向电极系的基础上改进而成,即将常规双侧向测井的主电极  $A_0$  一分为二变成  $A_0$ 、 $A_0'$ ,并将其监督电极  $M_1$  ( $M_1'$ )移到  $A_0$ 、 $A_0'$ 中间合并为一个电极  $M_1$ 。另外,目前几种常规双侧向测井电极系排列是相同的,但电极系长度有所不同,大致长度为 8.60~9.60m。而高分辨率双侧向测井仪的电极系比常规双侧向测井仪的电极系短得多,大约为 4.56m,便于仪器组合和现场测井作业。

两种双侧向测井仪器的工作原理基本相同,区别在于高分辨率双侧向测井仪的  $A_0$ 、 $A_0'$  电流合在一起作为主电流,工作时保持三个监督电极  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_2'$  等电位,而常规双侧向测井仪的中心主电极  $A_0$  供主电流,工作时保持  $M_1$ 、 $M_1'$ 、 $M_2$ 、 $M_2'$  等电位。

高分辨率双侧向测井仪的深、浅视电阻率计算公式如下

$$\text{深侧向 } R_{ad} = K_d \frac{V_{d(M_1)}}{I_{d(A_0)} + I_{d(A_0')}} \quad (1)$$

$$\text{浅侧向 } R_{as} = K_s \frac{V_{s(M_1)}}{I_{s(A_0)} + I_{s(A_0')}} \quad (2)$$

式中:  $K_d$ 、 $K_s$  分别为深、浅侧向的仪器常数;  $V_{d(M_1)}$ 、 $V_{s(M_1)}$  分别为深、浅侧向在  $M_1$  电极上的电位;  $I_{d(A_0)}$ 、 $I_{d(A_0')}$ 、 $I_{s(A_0)}$ 、 $I_{s(A_0')}$  分别为深、浅侧向主电极的电流。

### 3 数值模拟模型

在二维轴对称情况下,采用柱坐标系,此时高分辨率双侧向测井方法(常规双侧向测井方法与之相似)所计算的场可以简化为如图 2 所示的二维全非均匀介质模型。

在电阻率  $\rho$  等于常数的每一个区域中的任意一点 ( $r$ ,  $z$ ), 电位函数  $u(r, z)$  应满足微分方程

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{\rho} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{r}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

在地层的交界面上满足

$$u_- = u_+ \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho_-} \left( \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} \right)_- = \frac{1}{\rho_+} \left( \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} \right)_+ \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{n}$  为交界面的单位法向矢量; “+” 和 “-” 分别表示各量在交界面两侧各自的取值。

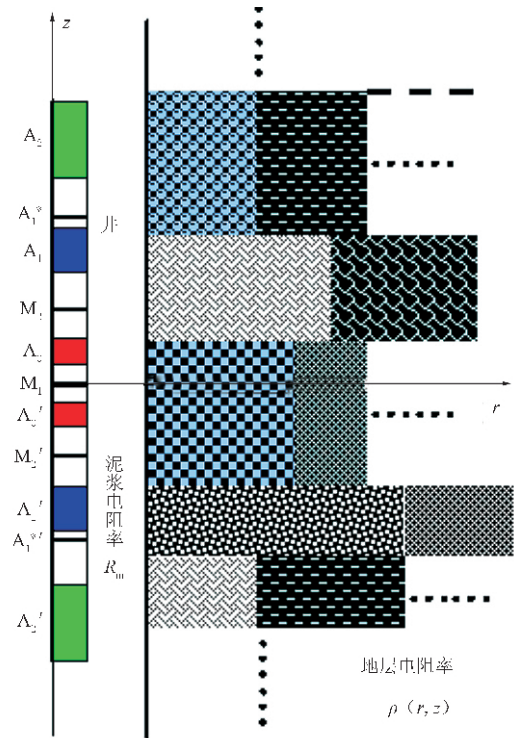


图 2 简化的二维介质模型

在无穷远边界上满足

$$u |_{r=\pm\infty} = 0 \quad (6)$$

在对称轴 ( $r=0$ ) 上满足

$$u |_{r=0} = 0 \quad (7)$$

在主电极  $A_0$ 、 $A_0'$  上满足

$$u = u_{A_0} = u_{A_0'} = C_0 \quad (8)$$

$$\int_{A_0, A_0'} \frac{r}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} ds = \frac{I_0}{2\pi} \quad (9)$$

在监督电极  $M$  (包括  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_2'$ ) 上满足

$$u = u_{M_1} = u_{M_2'} = C_M \quad (10)$$

$$\int_M \frac{r}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} ds = 0 \quad (11)$$

在取样电极  $A_1^*$ 、 $A_1^{*'}$  上满足

$$u = u_{A_1^*} = u_{A_1^{*'}} = C_* \quad (12)$$

$$\int_{A_1^*, A_1^{*'}} \frac{r}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} ds = 0 \quad (13)$$

在屏蔽电极  $A_1$ 、 $A_1'$  上满足

$$u = u_{A_1} = u_{A'_1} = C_1 \quad (14)$$

$$\int_{A_1, A'_1} \frac{r}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} ds = \frac{I_1}{2\pi} \quad (15)$$

在电极  $A_2$ 、 $A'_2$  (作为深侧向的屏蔽电极和浅侧向的返回电极) 上满足

$$u = u_{A_2} = u_{A'_2} = C_2 \quad (16)$$

$$\int_{A_2, A'_2} \frac{r}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} ds = \frac{I_2}{2\pi} \quad (17)$$

在任何两个电极环之间的绝缘表面上满足

$$\frac{\partial u}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (18)$$

本文采用二维有限元方法进行数值计算, 其具体算法在参考文献[2, 3]中有详细介绍, 这里不再重复。下面的讨论分析都是基于有限元方法数值模拟的结果。

## 4 分层能力及层厚影响

### 4.1 层厚影响

开发高分辨率双侧向测井仪最重要的目的是提高对薄层的探测能力, 在设计电极系参数时重点考虑在不明显降低常规双侧向探测深度的情况下, 提高纵向分辨率。图 3 是由两种测井仪器得到的深、浅侧向响应  $R_a$  随层厚变化的关系曲线。图中 LLD、LLS 分别代表常规双侧向测井的深、浅侧向曲线, HLLD、HLLS 分别代表高分辨率双侧向

测井仪器测得的深、浅侧向曲线, 地层模型为 8in 井眼的纵向三层无侵介质, 目的层电阻率为  $R_t$ , 目的层厚度为  $H$ , 上、下围岩电阻率为  $R_s$ 。从该图中可以看出, 当层厚为 0.4m 时, 高分辨率双侧向测井仪可以近似测到地层真电阻率  $100\Omega \cdot m$ , 而常规双侧向测井仪要测到真电阻率的层厚为 0.8m 左右。可见高分辨率双侧向测井仪的分层能力远高于常规双侧向测井仪。

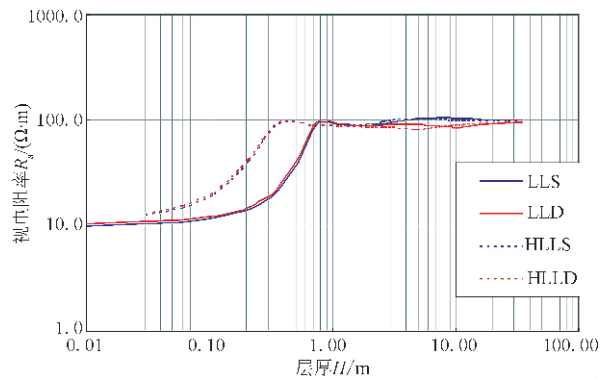


图 3 两种仪器双侧向测井响应与层厚的关系曲线  
模型:  $R_t/R_s=10$ ,  $R_s=10\Omega \cdot m$ ,  $R_m=1\Omega \cdot m$ , 井径=8in

为了证实高分辨率双侧向测井仪较高的分层能力, 图 4 中给出了不同厚度地层的高分辨率双侧向的测井响应。图中地层模型有 12 个相对高阻目的层, 厚度分别为 0.1、1.0、1.2、2.4m, 围岩为相对低阻。从图中可以清楚地看到, 在无泥浆侵入时高分辨率双侧向测井仪可以分辨 0.1m 的薄层。

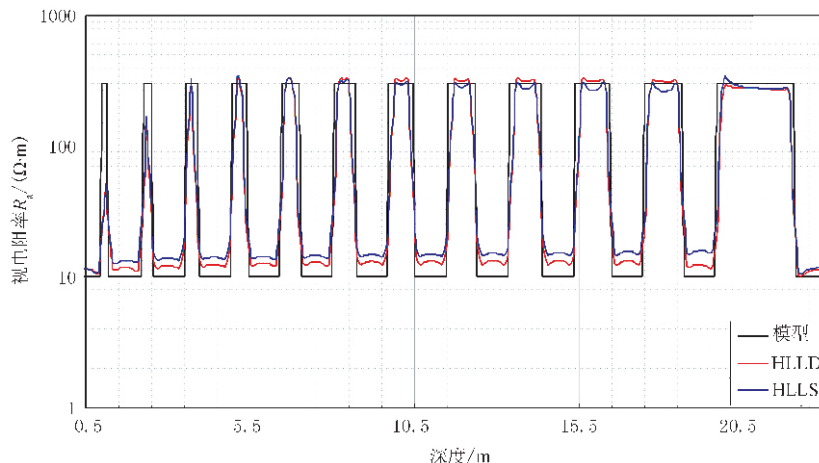


图 4 不同厚度地层的高分辨率双侧向的测井响应  
模型:  $R_s=10\Omega \cdot m$ ,  $R_t=300\Omega \cdot m$ , 井径=8in,  $R_m=1\Omega \cdot m$

### 4.2 电阻率对比度对分层能力的影响

图 5 是将图 3 的目的层与围岩电阻率对比度

从 10 : 1 提高到 500 : 1 得到的结果。对比两图可以看出, 当电阻率对比度为 10 : 1 时, 高分辨率双侧

向测井仪可近似测到的真电阻率层厚约为 0.4m, 常规双侧向测井仪近似测到的真电阻率层厚约为 0.8m; 而当电阻率对比度为 500:1 时, 高分辨率双侧向测井仪测得的真电阻率层厚则变为 0.5m 以上, 常规双侧向测井仪测得真电阻率值层厚变为约 1.0m。图 6 是将图 4 的目的层与围岩电阻率对比度从 10:1 提高到 500:1 得到的结果。对比两图可以看出, 电阻率对比度高的薄层, 视电阻率明显降低。可见, 随着地层电阻率对比度的增加, 高分辨率双侧向测井仪的薄层分辨能力会降低, 这与常规双侧向测井仪相同。

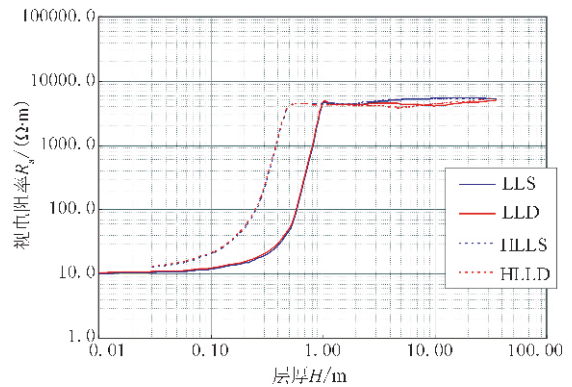


图 5 两种双侧向测井仪在高电阻率对比度时的层厚影响模型:  $R_t/R_s=500, R_s=10\Omega\cdot m, R_m=1\Omega\cdot m$ , 井径=8in.

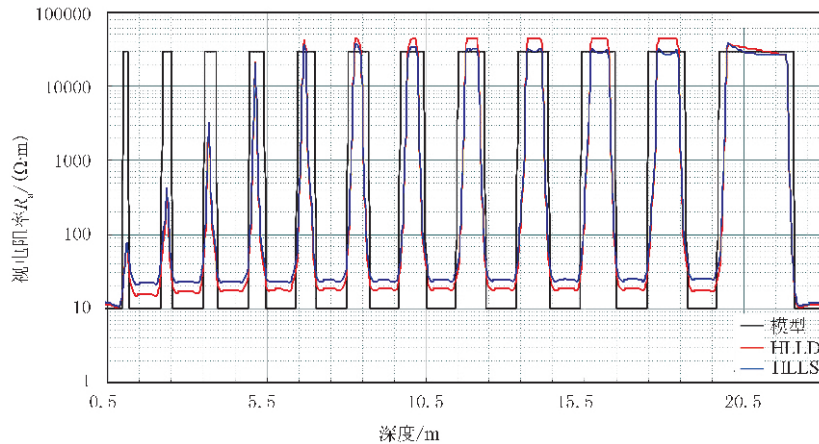


图 6 高电阻率对比度的高分辨率双侧向测井响应模型:  $R_s=10\Omega\cdot m, R_t=30000\Omega\cdot m, R_m=1\Omega\cdot m$ , 井径=8in.

## 5 探测深度及侵入影响

### 5.1 侵入半径的影响

高分辨率双侧向仪和常规双侧向测井仪的侵入响应对比如图 7 所示。图中介质模型为纵向无限厚, 径向分为井眼、侵入带和原状地层(泥浆电阻率  $R_m$  为  $1\Omega\cdot m$ , 侵入带电阻率  $R_{so}$  为  $10\Omega\cdot m$ , 原状地层电阻率  $R_t$  为  $50\Omega\cdot m$ )。从图中可以看出:

(1) 随着侵入半径的增加, 对于低阻侵入, 两种测井仪器的电阻率测量值均下降, 即从原状地层电阻率  $R_t$  逐渐变为侵入带电阻率  $R_{so}$ ;

(2) 对于深侧向, 当侵入半径小于 0.72m 时, 高分辨率深侧向 HLLD 受侵入的影响小于常规深侧向 LLD, HLLD 测量值更接近原状地层电阻率, 而当侵入半径大于 0.72m 时, HLLD 受侵入影响大一些, 此时 LLD 测量值更接近原状地层电阻率;

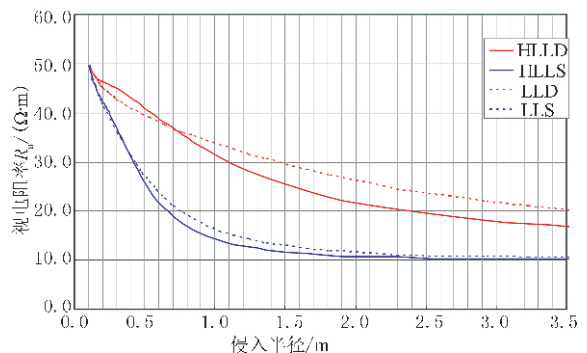


图 7 两种双侧向响应受侵入半径影响的对比

(3) 对于浅侧向, 当侵入半径小于 0.38m 时, 高分辨率浅侧向 HLLS 受侵入影响小一些, 而当侵入半径大于 0.38m 时, LLS 受侵入影响小一些, 但两种仪器浅侧向的侵入影响很接近。

总的来看, 两种仪器受侵入影响比较接近, 即径向探测深度比较接近, 保证了高分辨率深侧向测井的

探测深度不明显低于常规双侧向测井的探测深度。

## 5.2 侵入带电阻率的影响

图 8 和图 9 分别给出了高分辨率双侧向和常规双侧向测井响应随侵入带电阻率  $R_{xo}$  变化的情况。图中地层模型围岩为低电阻率、目的层为高电阻率，围岩无侵入，目的层侵入带半径为 0.5m。从图中可以看出，随着侵入带电阻率  $R_{xo}$  增加，两种仪器的测井响应都随之增加，但高分辨率双侧向测井仪的响应高于常规双侧向测井仪的响应，这与前面讨论的侵入带半径小于 0.72m 时高分辨率双侧向测井响应更接近真电阻率一致。

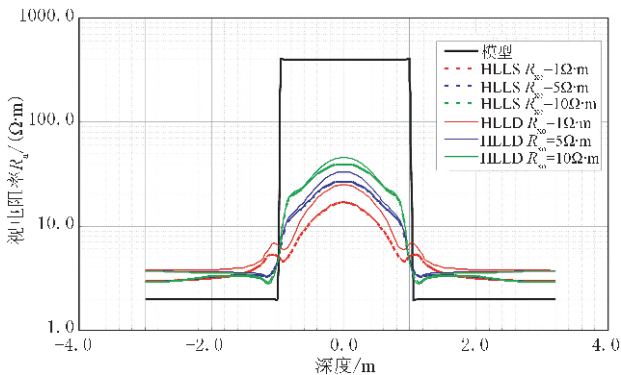


图 8 高分辨率双侧向测井响应受侵入带电阻率的影响  
模型：井径=8in,  $R_s=2\Omega\cdot m$ ,  $R_t=400\Omega\cdot m$ ,  $R_m=1\Omega\cdot m$ ,  
层厚=2.0m, 侵入半径=0.5m

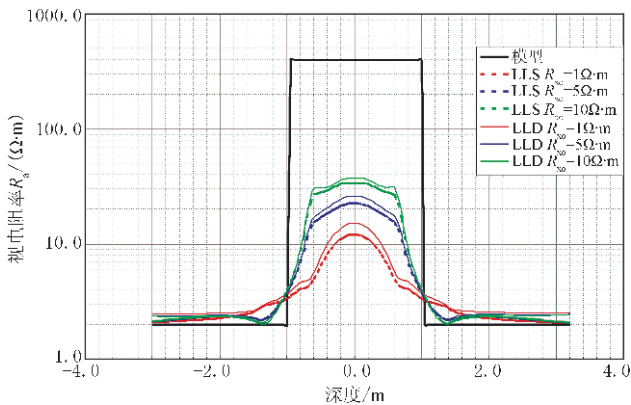


图 9 常规双侧向测井响应受侵入带电阻率影响  
模型：井径=8in,  $R_s=2\Omega\cdot m$ ,  $R_t=400\Omega\cdot m$ ,  $R_m=1\Omega\cdot m$ ,  
层厚=2.0m, 侵入半径=0.5m

## 6 井眼影响

### 6.1 井眼半径的影响

图 10 为高分辨率双侧向测井仪和常规双侧向测井仪的测井响应随井眼直径变化关系曲线，其地

层模型是泥浆电阻率值为  $1\Omega\cdot m$ ，井外为电阻率等于  $30\Omega\cdot m$  的无限大均匀介质。从计算结果可以看出：

(1) 随着井径的增加，常规双侧向测井仪的视电阻率单调下降，井径越大，视电阻率偏离真电阻率越远；高分辨率双侧向测井仪的视电阻率出现非线性的变化，当井径小于 0.25m 时，随井径增大，视电阻率减小；当井径大于 0.25m 时，视电阻率增大；

(2) 当井径小于 0.20m (8in.) 时，两种仪器测得的浅侧向视电阻率均高于它们各自的深侧向视电阻率，当井径大于 0.20m 时，两种仪器测得的深侧向视电阻率均高于它们各自的浅侧向视电阻率；

(3) 无论是小井眼还是大井眼，高分辨率双侧向测井仪测得的视电阻率值均高于常规双侧向测井仪的视电阻率值；当井径小于 0.20m 时，两种仪器测得的视电阻率值均大于地层真电阻率  $30\Omega\cdot m$ ；在井径大于 0.20m 时，常规双侧向视电阻率均低于真电阻率，而高分辨率双侧向测井仪测得的浅侧向在井径为 0.20~0.40m 时很接近地层真电阻率；当井径大于 0.37m 时视电阻率逐渐高于真电阻率，深侧向在井径为 0.20~0.30m 时接近地层真电阻率，大于 0.28m 时视电阻率逐渐高于真电阻率。

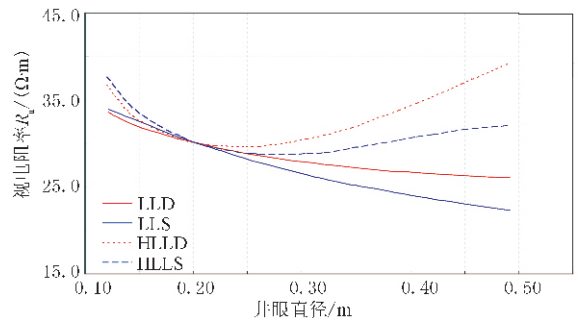


图 10 高分辨率双侧向和常规双侧向测井响应随井径的变化  
模型： $R_m=1\Omega\cdot m$ ,  $R_t=30\Omega\cdot m$

### 6.2 不同地层电阻率响应的井眼影响

图 11 给出了高分辨率双侧向和常规双侧向井眼校正系数(即  $R_c/R_a$ ,  $R_c$  为井眼校正后的电阻率)随地层电阻率变化的关系，地层模型是井眼直径为 8in 时的无限大均匀介质，泥浆电阻率为  $1\Omega\cdot m$ 。从该图可以看出：

(1) 当地层电阻率从  $1\sim 10000\Omega\cdot m$  变化时，两种双侧向测井的井眼校正系数变化范围是不同的，HLLD 为 0.461~1.01；HLLS 为 0.532~1.01；

LLD为0.842~1.00;LLS为0.933~1.03。由此可知,高分辨率双侧向测井的井眼校正系数变化范围远大于常规双侧向测井。

(2)在低阻段(小于 $30\Omega\cdot\text{m}$ ),高分辨率双侧向测井的井眼校正系数变化非常大,受井眼影响远大于常规双侧向测井,使得高分辨率双侧向测量值远高于地层真电阻率值;在高阻段(大于 $30\Omega\cdot\text{m}$ ),两种仪器的深、浅侧向测量井眼校正系数相差不大,且基本上都小于1,即电阻率基本都高于地层真电阻率。

(3)在高阻段,由于受井眼影响,使得高分辨率双侧向测井的深侧向测量值高于常规深侧向测量值,而高分辨率双侧向测井的浅侧向测量值低于常规浅侧向测量值(但仍基本保持深侧向高于浅侧向),这时高分辨率双侧向测井的深、浅侧向正差异(深电阻率大于浅电阻率)大于常规双侧向测井的深、浅侧向正差异。

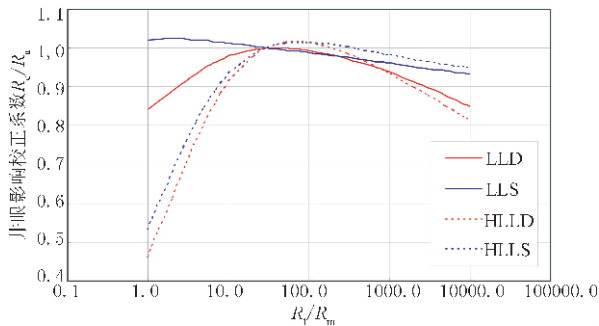


图 11 两种双侧向井眼校正系数随地层电阻率的变化  
模型:8in井眼, $R_m=1\Omega\cdot\text{m}$

## 7 结论与建议

文中简述了新型高分辨率双侧向测井仪的电极系结构、测量原理,给出了简化的实际可行的地层模型和高分辨率双侧向测井响应数值模拟的数学模型,通过编制有限元程序对比考查了高分辨率双侧向和常规双侧向测井仪的纵向分层能力(包括层厚影响)、侵入影响、井眼等方面影响。通过数值分析可以得出以下结论。

(1)高分辨率双侧向测井仪具有很高的纵向分层能力。在无侵入时,能识别0.1m的薄层,并可以测到0.4m薄层的真电阻率,这一点远优于常规双侧向测井仪,但与常规双侧向测井相同的是,

邻层间电阻率对比度的增加都会降低薄层的分层能力。

(2)高分辨率双侧向测井能够取得较深的探测深度,基本上克服了侧向测井仪器的纵向分辨率和探测深度不能兼顾的矛盾。高分辨率双侧向测井与常规双侧向测井受侵入带影响比较接近(即径向探测深度相差不大);随侵入半径的增加,侵入影响都增大,其中两种仪器的深侧向相差较大,浅侧向相差较小。在侵入半径小于0.72m左右时,高分辨率双侧向测井深侧向受侵入影响较小;当侵入半径大于0.72m左右时,常规双侧向测井仪的深侧向受侵入影响较小。当有低阻体侵入时,两种仪器的双侧向响应随侵入带电阻率增加而增加。

(3)高分辨率双侧向测井的井眼影响比常规双侧向测井复杂得多:高分辨率双侧向的视电阻率随井径的增加出现非单调地变化(即先增大后减小,校正系数与之相反),而常规双侧向测井的视电阻率值随井径的增加单调下降;对于同一井眼直径,当地层电阻率从低到高变化时,高分辨率双侧向测井的井眼校正系数变化范围远比常规双侧向测井大得多,特别是在低阻段,高分辨率双侧向测井仪测得的视电阻率值远高于常规双侧向测井仪测得的视电阻率值,且远大于地层真电阻率。这是高分辨率双侧向测井仪的不足之处。

文中对高分辨率双侧向各响应特性的计算分析都是从单方面来做的,实际测井响应是上述各方面的综合反映,为此应针对现场的各方面因素对测井曲线进行全面分析。虽然高分辨率双侧向测井仪基本上可以取代常规高分辨率双侧向测井仪,但是在低阻段井眼影响很大,建议采用有效的方法进行校正处理。

### 参考文献

- [1] Smits J W et al. High resolution from a new laterolog with azimuthal imaging. SPE 30584, 1995
- [2] 张庚骥. 电法测井(下). 北京:石油工业出版社,1986
- [3] 李大潜等. 有限元素在电法测井中的应用. 北京:石油工业出版社,1984
- [4] 朱军等. 贴井壁方位电阻率测井研究. 中国第十二届测井年会优秀论文集. 北京:石油工业出版社,2001
- [5] 朱军等. 阵列侧向测井研究. 第二届中俄测井国际交流会论文集. 北京:石油工业出版社,2002

(本文编辑:冯杏芝)