

核磁共振测井仪探头设计中的数值方法*

胡海涛 肖立志[†] 吴锡令

(油气资源与探测国家重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249)

(2011年8月4日收到; 2011年10月18日收到修改稿)

核磁共振测井仪探头的优化设计能够增强仪器的探测特性, 提高仪器的信噪比, 而探头设计中的数值方法对设计结果至关重要. 本文利用电磁场有限元方法对贴井壁型核磁共振测井仪探头静磁场和射频场进行了 2D 和 3D 的数值模拟, 深入分析了数值模型形状、模型尺寸、单元形状对数值模拟结果的影响, 并将有限元数值模拟结果与实测数据做了对比. 结果显示: 数值模拟结果与实测数据符合. 在设计核磁共振测井仪探头结构时, 选取与井眼形状一致的圆形模型, 模型尺寸范围在 10—15 倍探头外径, 并采用三角形单元可以有效提高数值模拟方法精度, 增强优化设计结果的可靠性.

关键词: 核磁共振测井, 探头设计, 有限元, 磁场分布

PACS: 93.85.Tf, 93.90.+y

1 引言

核磁共振技术在油气勘探开发中的应用是从 20 世纪 60 年代开始, 由于核磁共振测井^[1]测量得到的信号只来自于地层孔隙中的流体, 不包含岩石骨架的贡献, 它可以提供岩石孔隙中流体数量^[2,3]、流体特性、孔隙尺寸分布等信息, 而这些信息是常规测井仪器所无法提供的. 因此, 核磁共振测井技术在过去的几十年中得到了快速的发展. 由于受到井底条件的研制, 核磁共振测井仪始终面临着信号强度低, 信噪比低这一难题. 探头是核磁共振测井仪的关键技术之一, 探头的探测特性^[4]直接决定了仪器的应用效果. 设计合理、性能良好的探头能够大大提高仪器的信号强度, 增强仪器信噪比, 并且能够通过改进的观测模式^[5,6]和新的数据处理方法^[7-9]获得更多的地层信息. 而核磁共振测井仪探头设计结构复杂, 部件制作要求高, 价格昂贵, 因此在研制核磁共振测井仪探头前期, 需要大量的数值模拟工作来对探头结构进行优化设计, 确定探头参数、工艺要求等, 为后续的研制工作提

供依据和参考, 因此探头方案实施前的数值模拟分析工作尤为重要. 数值方法能够很好地模拟电磁场的分布^[10], 优化磁场形状及工程结构的设计, 因此在工程设计中得到广泛应用. 有限元数值模拟方法应用于电磁场问题^[11], 能适应各种复杂的工程结构, 因此, 能够分析核磁共振测井仪探头的磁场分布, 研究各参数对磁场分布的影响以及评价核磁共振测井仪的探测特性^[12]. 核磁共振测井仪在井底条件下工作, 探头的结构和部件性能参数受到很大的限制. 在数值模拟的过程中, 模型形状、模型尺寸、单元形状对数值模拟结果的精度有很大的影响, 这主要是因为不同的模型形状、模型尺寸和单元形状会影响数值模拟结果的磁场的分布. 而建立合适的数值模型、设定合适的模型尺寸、选取合适的单元形状会大大提高数值方法的精度, 为仪器的研制工作提供可靠的依据.

本文利用电磁场有限元方法, 模拟分析了一种贴井壁型核磁共振测井仪探头 2D 和 3D 磁场分布, 分别研究了模型形状、模型尺寸和单元形状对其径向磁场分布以及横向磁场分布的影响, 并对比分析了径向静磁场数值模拟结果和实测数据、轴向

* 国家自然科学基金(批准号: 41074102)和科技部国际合作项目(批准号: 2009DFA61030)资助的课题.

[†] E-mail: xiaolizhi@cup.edu.cn

静磁场数值模拟结果和实测数据、射频场数值模拟结果和实测数据. 结果显示: 数值模拟结果与实测数据具有很好的一致性; 有限元方法在核磁共振测井仪探头结构设计中具有良好的适用性.

2 核磁共振测井仪探头模型与数值方法

核磁共振测井仪探头模型如图 1 所示. 探头主要包含永磁体, 用来产生核磁共振所需要的静磁场; 射频天线, 用来激发地层流体中的极化质子并接收核磁信号. 在该模型中, 包含有永磁体、天线线圈、井眼流体、地层. 对于永磁体考虑其矫顽力 H_c , 磁导率 μ_m ; 对于天线线圈考虑其电阻率 ρ_a , 磁导率 μ_a ; 对于井眼流体, 地层考虑其电阻率 ρ_f , 磁导率 μ_f .

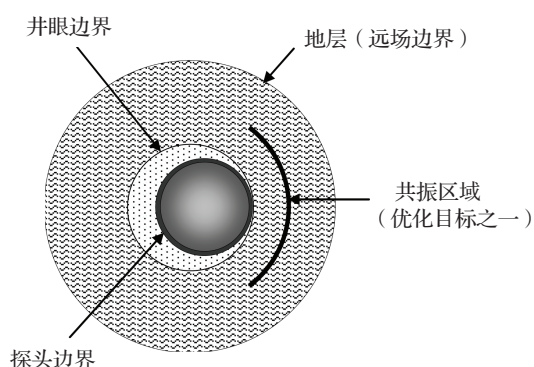


图 1 核磁共振测井仪探头模型

核磁共振测井仪探头设计采用电磁场有限元数值模拟方法^[13], 在求解电磁场问题时首先引入矢量磁势 $\mathbf{A}(\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A})$, 在二维问题中, 磁势只有 z 方向分量, 并且满足泊松方程, 则有

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times A_z \hat{z} \right) = \mu_0 J_z \hat{z}. \quad (1)$$

在求解区域 Ω 内, 磁势常用的边界条件 Dirichlet 边界条件和 Neumann 边界条件

$$A_z|_{\Gamma_1} = A_{z0}, \quad \frac{\partial A_z}{\partial n}|_{\Gamma_2} = -\frac{H_t}{\gamma}. \quad (2)$$

利用变分原理构造泛函

$$\begin{aligned} \Omega : \Pi(\mathbf{A}) &= \left\{ \iint_{\Omega} \frac{\gamma}{2} \left[\left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \\ &\quad \left. - \mathbf{J}_z \mathbf{A} \right\} dx dy + \int_{\Gamma_2} H_t \mathbf{A} dl \\ &= \min, \end{aligned}$$

$$\Gamma_1 : \mathbf{A} = A_0, \quad (3)$$

其中, \mathbf{A} 为矢量磁势, H_t 为磁场强度切向分量, μ 为磁导率, \mathbf{J} 为电流密度矢量.

再利用有限元方法^[12]对条件变分问题(3)式进行离散化处理得到问题的总体方程:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{A}\} = \{\mathbf{R}\}, \quad (4)$$

其中, $[\mathbf{K}]$ 为系数矩阵, $\{\mathbf{A}\}$ 为待求的势函数列向量, $\{\mathbf{R}\}$ 为已知列向量. 求解得到磁势 \mathbf{A} , 然后即可用 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 计算出磁通密度.

3 核磁共振测井仪探头数值模拟分析

3.1 模型形状对数值方法的影响

本文利用 MATLAB 程序来调用有限元分析软件 ANSYS 模拟井底条件下核磁共振测井仪探头磁场分布特性, 并完成探头参数的传递, 这主要是因为 MATLAB 可以方便对模型参数进行计算和输出, 同时可以对计算结果做进一步的分析 and 处理, 优化探头的结构参数.

对核磁共振测井仪探头磁场分布进行数值模拟, 首先要确定的是数值模型的建立, 不同的模型得到的数值模拟结果也不相同. 对于核磁共振测井仪探头而言, 其模型的建立需要考虑两方面的因素: 1) 核磁共振测井仪探头横截面形状为圆形, 且其工作环境是在井眼之中, 井眼形状也为圆形; 2) 核磁共振测井仪探头数值模拟问题本质上是电磁场问题, 其静磁场和射频场都散射进入地层, 磁场在井

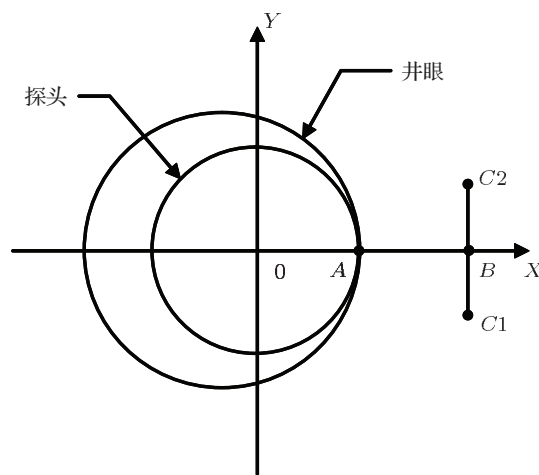


图 2 模型坐标定义

眼周围的地层中形成一个磁场环路. 基于上述因素, 核磁共振测井仪探头数值模型的远场边界应该为弧形, 这样才能够准确地反映出远场边界处的磁场分布特性. 在进行数值模拟分析之前定义如图 2 所示的坐标.

分别建立圆形地层模型和方形地层模型对核磁共振测井仪探头静磁场分布进行数值模拟, 并分别比较了这两种不同模型得到的径向磁场分布和纵向磁场分布, 如图 3 所示. 图 3(a) 为径向磁场分布偏差 (方形模型磁场分布与圆形模型磁场分布之差), 径向路径为图 1 中所示的 $A-B = 15$ cm.

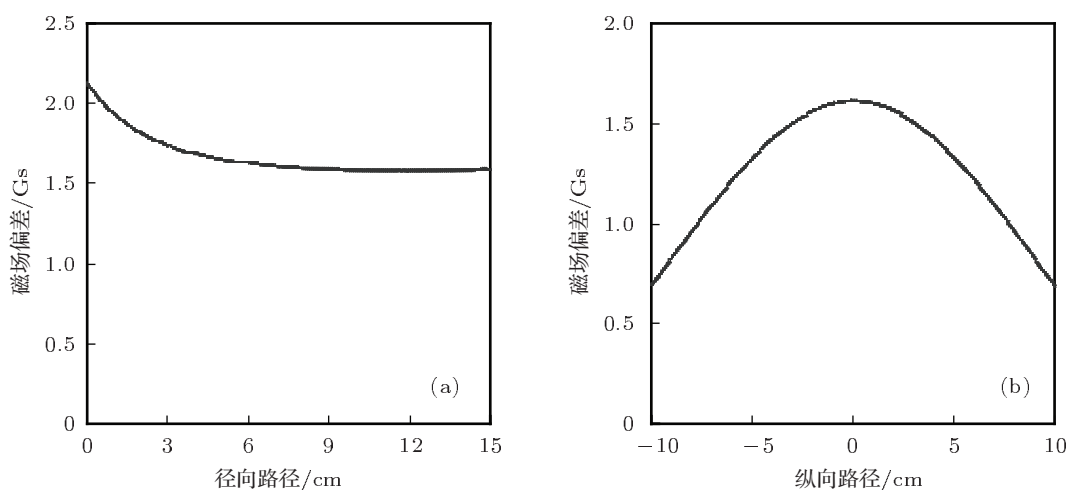


图 3 模型形状对核磁共振测井仪探头磁场分布的影响 (a) 径向 ($A-B$) 磁场偏差; (b) 纵向 ($C1-C2$) 磁场偏差

3.2 模型尺寸对数值方法的影响

在数值模拟计算的过程中需要对问题进行分析, 确定合适的模型尺寸. 全尺寸模型最能反映真实问题, 但是在一些数值问题中全尺寸的模型并不一定适合该问题的求解. 在电磁场问题中, 磁场在空间的分布认为在无限远处磁场为零, 然而在实际环境中, 由于地磁场 (约为 0.5 Gs) 的影响以及其他环境因素的影响, 全尺寸或超大尺寸的模型并不适合问题的求解. 对于核磁共振测井仪探头的磁场分布, 选取合适的模型尺寸能够提高数值模拟结果的准确度. 图 4 所示为直径为 1 m 圆形模型与直径为 3 m 圆形模型数值模拟结果对比. 图 4(a) 为路径 $A-B$ 直径为 1 m 圆形模型与直径为 3 m 圆形模型磁场分布之差, 其差值在 -35 Gs— -20 Gs. 图 4(b) 为路径 $C1-C2$ 上的磁场分布之差, 其差值在 -25 Gs— -10 Gs. 可以看出, 模型尺寸越大, 磁

从图 3(a) 中可以看出, 在径向方向上, 方形模型磁场分布比圆形模型磁场分布大 1.5 Gs—2.5 Gs. 图 3(b) 为在纵向路径上方形模型磁场分布与圆形模型磁场分布之差, 其中纵向路径为图 2 中所示 $C1-C2 = 20$ cm, 且此时 $A-B = 7$ cm, 点 B 为 $C1-C2$ 中点. 从图 3(b) 中可以看出, 在纵向路径上, 方形模型磁场分布比圆形模型磁场分布大 0.5 Gs—2.0 Gs. 出现这一现象的主要原因是由于方形模型并不能很好地适应核磁共振测井仪探头磁场的分布与回路走向, 造成在边界附近的磁力线偏离其实际回路, 引起磁场的增大.

场强度越大. 这是因为在磁场场源一定的情况下, 模型边界范围选取过小, 造成磁场快速衰减, 数值模拟得到的结果比实际结果偏小; 而模型边界选取过大, 磁场衰减变慢, 造成数值模拟的结果比实际结果偏大. 因此, 对于核磁共振测井仪探头而言, 其数值模型边界范围应选取在 $10D-15D$ 之间, 其中, D 为探头直径. 在这一范围内, 核磁共振测井仪探头磁场已经衰减至与地磁场相当的水平.

3.3 单元形状对数值方法的影响

根据有限元理论, 在连续体应力分析中, 四边形单元的形函数是双线性的, 其单元内部应变分布状态是变化的, 精度高. 而三角形单元的形函数是线性的, 所以单元内部应变是常数, 因此只能反映简单的应变状态. 由于四边形单元不能很好地

逼近曲线边界或非直角的直线边界,且不能随意改变大小实现局部加密,因而在工程应用中受到限制.在保持单元尺度不变的情况下,改变单元类型,模拟了核磁共振测井仪探头的磁场分布.图5为不同单元类型得到的核磁共振测井仪探头静磁场等值线分布.其中图5(a)为三角形单元数值模拟结果,在图中虚线椭圆区域中,磁场等值线分布光滑.图5(b)为四边形单元数值模拟结果,在图中虚线椭圆区域中,磁场等值线分布出现多处畸变的情况(图中箭头所指处).

图6为单元类型对核磁共振测井仪探头磁场分布的影响.图6(a)为三角形单元与四边形单元磁场数值模拟径向分布之差,从图中可以看出四边形单元模拟得到的核磁共振测井仪径向静磁场发生畸变,范围在 -3Gs — 2Gs .图6(b)为三角形单元与四边形单元磁场数值模拟纵向分布之差,四边形单元模拟得到的核磁共振测井仪径向静磁场畸变

范围在 -4Gs — 1Gs .这说明四边形单元不能很好地拟合模型中的圆形边界,并且由于在核磁共振测井仪探头中部件尺寸变化范围大,其中天线部件最小尺寸可达 0.1mm ,这些因素共同导致四边形单元的数值模拟结果发生畸变.

4 磁场数值模拟结果与实测数据对比分析

4.1 磁场数值模拟结果

对探头磁场进行2D数值模拟,建立圆形模型,模型尺寸设置为15倍探头外径.采用三角形单元对贴井壁型核磁共振测井仪探头磁场进行分析,得到如图7所示的磁场分布.图7(a)为探头磁场磁力线分布,图7(b)为磁场等值线分布,其中磁场等值线分布平滑,磁场梯度清晰.

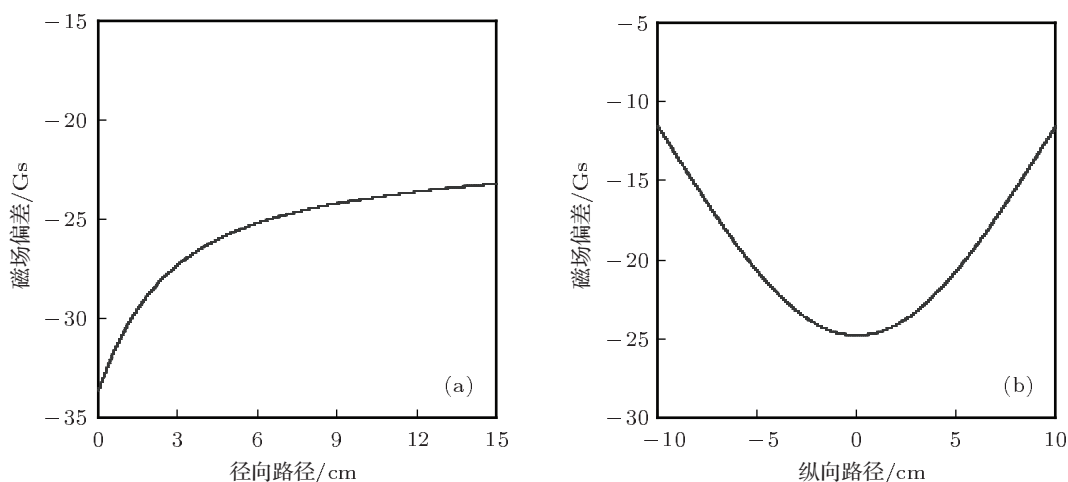


图4 模型尺寸对核磁共振测井仪探头磁场分布的影响 (a) 径向(A—B)磁场偏差; (b) 纵向(C1—C2)磁场偏差

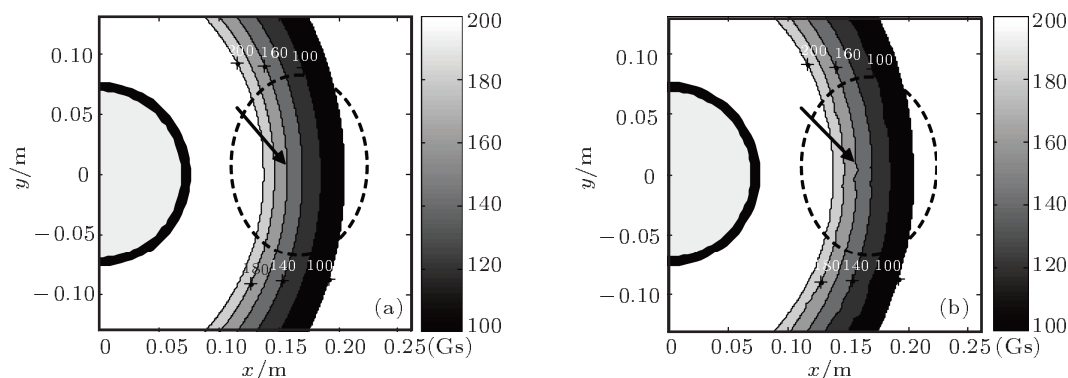


图5 核磁共振测井仪静磁场等值线分布 (a) 三角形单元; (b) 四边形单元

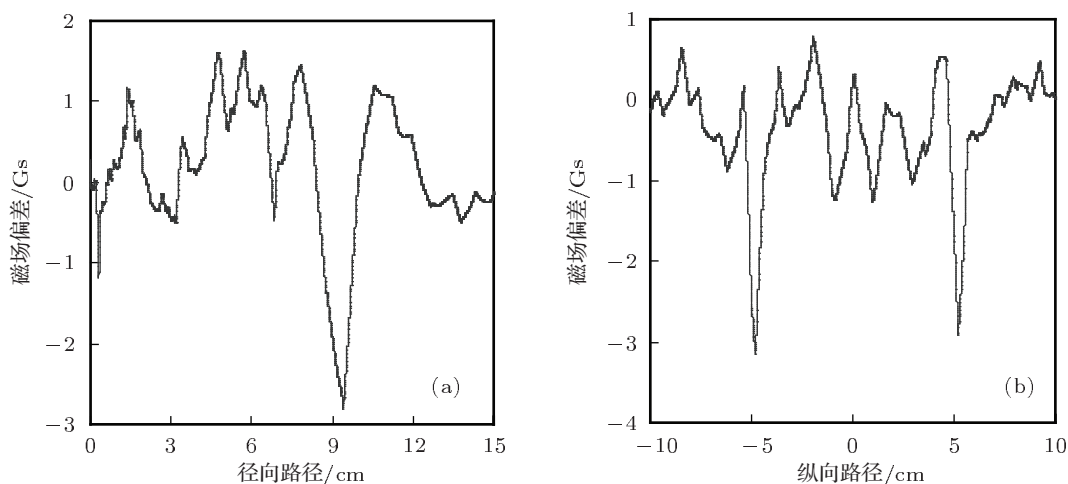


图6 单元类型对核磁共振测井仪探头磁场分布的影响 (a) 径向(A—B) 磁场偏差; (b) 纵向(C1—C2) 磁场偏差

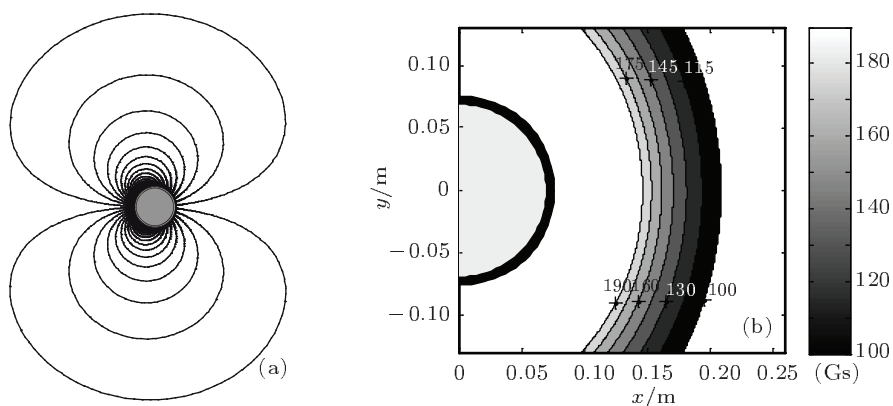


图7 贴井壁型核磁共振测井仪探头磁场分布 (a) 磁力线分布; (b) 磁场等值线分布

4.2 径向静磁场数据对比与分析

根据以上分析,对核磁共振测井仪探头的静磁场进行模拟分析,并将数值模拟得到的静磁场分布与实际测量得到的静磁场相对比,如图8所示.图中实测数据点的间隔为1 cm,总共15个数据点.数值模拟数据在靠近仪器外壳的地方静磁场强度稍高于实际测量的数据,随着探测深度的增大,磁场强度趋于一致.从整体上看,数值模拟数据与实际测量数据具有良好的一致性,验证了以上分析的正确性以及数值模拟结果的可靠性.

4.3 轴向静磁场数据对比与分析

轴向静磁场分布是指在距离探头表面7 cm,

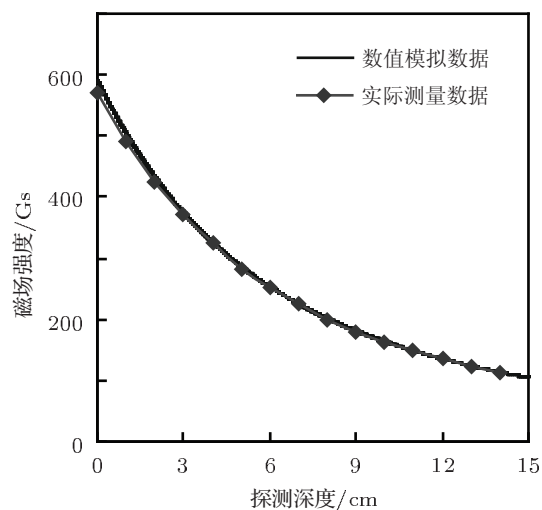


图8 径向静磁场数值模拟数据与实测数据对比

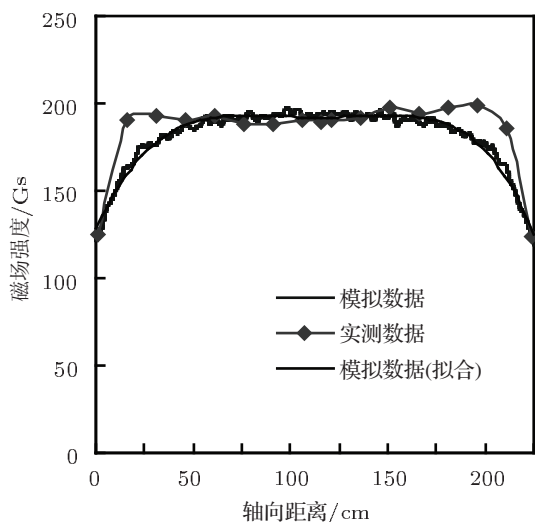


图9 轴向静磁场数值模拟数据与实测数据对比

从探头磁体的一端到另一端之间的磁场分布. 建立 3D 核磁共振测井仪探头数值模型计算得到轴向静磁场分布如图 9 所示. 图 9 为轴向静磁场模拟数据与实测数据的对比, 实测数据显示在探头磁体的两端磁场强度低, 磁体中间范围磁场强度高. 在 0—25 cm 和 200—225 cm 范围内, 越靠近磁体中间位置磁场强度越大; 在 25—200 cm 范围之间, 磁场强度趋于平衡. 数值模拟数据显示在 0—50 cm 和 175—225 cm 范围内, 越靠近磁体中间位置磁场强度越大, 然而其变化趋势比实测数据缓慢; 在 50—225 cm 之间, 模拟数据与实测数据具有良好的一致性. 模拟数据与实测数据在总体趋势上一致, 能够准确反映实际磁场的分布特性.

4.4 天线效率对比与分析

核磁共振利用射频场激发极化质子, 以此来产生核磁共振. 在核磁共振测井中采用 CPMG 序列进行测量, 极化质子的扳转角 $\theta_0 = \gamma B_1 t_p$, 其中, γ 为旋磁比, B_1 为射频场强度, t_p 为射频脉冲持续的时间. 可知, 扳转角与射频场强度成正比. 而天线效率越高则单位电流产生的射频场强度越大, 对仪器功率的要求就越低. 图 10 为核磁共振测井仪天线效率模拟数据与实测数据的对比. 实测数据从仪器

外壳 1 cm 处开始, 共 9 个测量点. 数值模拟得到的结果与实际测量得到的结果一致, 有限元法在核磁共振测井仪探头设计中具有很好的适用性.

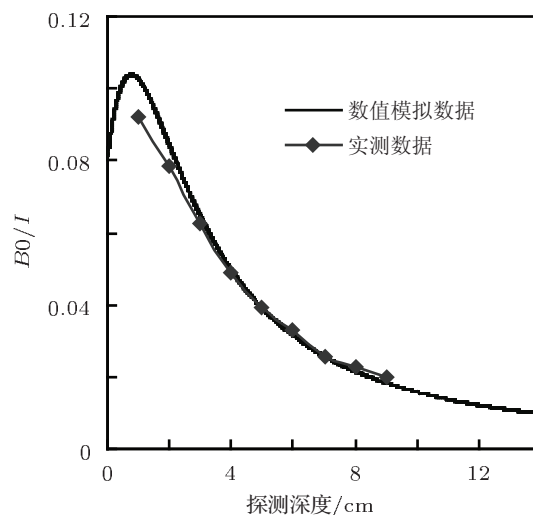


图10 核磁共振测井仪天线效率模拟数据与实测数据对比

5 结论

核磁共振测井仪在井底条件下工作, 其结构受到井眼尺寸的严格限制. 为了满足测井需要, 仪器结构设计复杂; 同时由于核磁共振测井仪信号强度低, 因此数值模拟优化设计对提高仪器的探测性能至关重要. 在利用有限元数值方法分析探头的磁场分布时, 建立与井眼形状一致的圆形模型能够提高数值方法的精度, 增强设计结果的可靠性, 大大提升仪器的探测性能. 而有限元数值模拟方法作为一种近似解法, 其求解的精度受到模型尺寸范围的影响, 对于核磁共振测井仪探头的磁场设计, 模型尺寸范围应设定在 10—15 倍探头外径. 并且在数值模拟过程中采用三角形单元可以有效提高数值模拟结果的准确性, 优化核磁共振测井仪探头设计结构. 改进后的数值方法结果与实测数据一致, 大大增强了有限元数值方法在核磁共振测井仪探头设计中的适用性.

- [1] Coates G R, Xiao L Z, Prammer M G 1999 *NMR Logging Principles and Applications* (Houston: Halliburton Energy Services)
 [2] Xie R H, Xiao L Z, Wang Z D, Dunn K J 2008 *Science in China D*

Earth Sciences 51 (Suppl. II) 212

- [3] Wang X W, Xiao L Z, Xie R H, Zhang Y Z 2006 *Science in China G* 49 313

- [4] Hu H T, Xiao L Z 2010 *Chinese J. Magn. Reson.* **27** 572 (in Chinese) [胡海涛, 肖立志 2010 波谱学杂志 **27** 572]
- [5] Sun B Q, Dunn K J 2005 *J. Magn. Reson.* **23** 259
- [6] Xie R H, Xiao L Z 2009 *Chinese J. Geophys.* **52** 2410 (in Chinese) [谢然红, 肖立志 2009 地球物理学报 **52** 2410]
- [7] Sun B Q, Dunn K J 2005 *J. Magn. Reson.* **172** 152
- [8] Sun B Q, Mark S, Dunn K J 2009 *AIP Conf. Proc.* **1081** 87
- [9] Sun B Q, Dunn K J, Clinch S 2010 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 51st Annual International Conference Perth, June 19–23 2010 YY*
- [10] Deng L Y, Lan H M, Liu Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025213 (in Chinese) [邓立赞, 蓝红梅, 刘悦 2011 物理学报 **60** 025213]
- [11] Lu H P, Han M G, Deng L J, Liang D F, Ou Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2090 (in Chinese) [陆海鹏, 韩满贵, 邓龙江, 梁迪飞, 欧雨 2010 物理学报 **59** 2090]
- [12] Hu H T, Xiao L Z, Wu X L 2011 *Chinese J. Magn. Reson.* **28** 76 (in Chinese) [胡海涛, 肖立志, 吴锡令 2011 波谱学杂志 **28** 76]
- [13] Jin J M 2002 *The Finite Element Method in Electromagnetics* (2nd Ed.) (New York: Wiley-IEEE Press)

Numerical method of designing nuclear magnetic resonance logging device sensor*

Hu Hai-Tao Xiao Li-Zhi[†] Wu Xi-Ling

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

(Received 4 August 2011; revised manuscript received 18 October 2011)

Abstract

Optimal design of nuclear magnetic resonance (NMR) logging device sensor can enhance its detection performance and improve signal-to-noise ratio, and the accuracy of results from numerical method is absolutely critical for optimal design. In this paper, an eccentric NMR logging device static field distribution and radio frequency field distribution are simulated by the electromagnetic finite element method, and the influences of model shape, model size and element shape on simulation results are analyzed. A comparison between the measurements and simulation data indicates that they are in good agreement with each other. In the design process of NMR logging device sensor, by choosing a circinal model which is similar to the shape of borehole, setting model size to be 10–15 times the sensor diameter, and adopting triangle element, the accuracy of numerical simulation can be improved and the reliability of optimization design can also be enhanced.

Keywords: NMR logging, sensor design, finite element method, field distribution

PACS: 93.85.Tf, 93.90.+y

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41074102) and China International Science and Technology Cooperation (Grant No. 2009DFA61030).

[†] E-mail: xiaolizhi@cup.edu.cn