

## 基于6FF40测量信息反演方法的研究\*

杨峰\*\*<sup>1</sup> 聂在平<sup>1</sup> 彭健<sup>1</sup> 卢涛<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 610054; 2. 中海油田服务有限公司 北京 101149)

**【摘要】**针对深感应测井仪6FF40的测量信息,在非均匀背景介质中采用一种迭代方法对地层电导率分布进行反演和剖面成像。该方法是基于场点在目标区内、外的电场积分方程,建立适合于6FF40的反演积分方程。在每次反演迭代过程中,用数值模式匹配法(NMM)求解6FF40的测量信息。利用沿井轴的6FF40不完备的低信息量对地层剖面进行反演,数值模拟结果表明该迭代方法在实际工程应用中的潜力。另外,还讨论了6FF40的纵向、径向分辨率和先验知识的利用等问题。

**关键词** 电磁逆散射; 非线性反演方法; 深感应测井仪; 分辨率; 先验知识  
**中图分类号** O441 **文献标识码** A

## Reconstruction Formation Conductivity Distribution Using Inverse Method Based on 6FF40 Induction Measurement

Yang Feng<sup>1</sup> Nie Zaiping<sup>1</sup> Peng Jian<sup>1</sup> Lu Tao<sup>2</sup>

(1. School of Microwave Engineering, UEST of China Chengdu 610054;

2. China National Offshore Oil Corporation, Services Beijing 101149)

**Abstract** Reconstruction of formation conductivity distribution for 6FF40 measurement information using an inverse method was described in this paper. Based on the internal and external electrical field integral equation, the inversion equation is derived. Then, the Numerical Mode-Matching is used to solve the logging response of the 6FF40. Numerical simulations show that satisfactory inversion result of the complicated formation can be obtain from the incomplete measurement of the 6ff40. In addition, prior information, the radial and vertical resolution of the 6FF40 is also investigated.

**Key words** electromagnetic inverse scattering; nonlinear inverse method; 6FF40; resolution; prior information

自从文献[1]提出感应测井理论以来,诸如6FF40感应测井这样传统电测井手段已被广泛应用于各大油田中。目前,各大油田仍保存着以前许多感应测井资料,如何利用这些资料产生更好的解释效果,以利于生产井的二次开发,已成为测井分析家亟待解决的问题。

近年来,文献[2, 3]利用变形玻昂迭代(DBIM)方法在单线圈系下,在均匀背景介质中对待反演目标进行反演,文献[4]又用该方法在一维非均匀介质中利用6FF40的测量数据对地层进行了反演。文献[5]将其发展至二维非均匀背景介质中的反演,提高了每次反演迭代的计算效率,同时提出了一种更有效的反演迭代方法—变分玻昂迭代法(VBIM)<sup>[6]</sup>。但这些迭代方法在每次迭代过程中,都要利用Born近似使非线性方程线性

2003年3月10日收稿

\* 国家自然科学基金资助项目,编号:49874032

\*\* 男 41岁 博士 副教授 主要从事电磁散射与逆散射、超宽带通信和移动通信中天线技术方面的研究

化,对于弱散射体时该近似成立,如果是高对比度等强散射体时,如仍用Born近似,将使解的收敛速度变慢,甚至不收敛。

本文针对6FF40在非均匀背景介质中采用一种反演迭代方法来重建地层剖面<sup>[7]</sup>。首先利用场点在待反演目标区外电场积分方程,并结合场点在目标区内电场积分方程来建立反演方程,而不象DBIM那样,在每次迭代过程中利用Born近似,即用入射场来替代总场,又是直接计算总场。该迭代方法能够反演比DBIM更高的对比度,而且收敛速度也有一定的提高。在实际工程中,仪器仅能沿井轴移动测量,这样又造成数据采集的不完备性,又进一步加深问题的病态特性。利用文献[8]正则化方法来消除病态特性,并用双共轭梯度(BCG)法求解矩阵方程<sup>[9]</sup>。除了考察6FF40的纵向分辨率和径向分辨率外,还充分利用6FF40的测量信息作反演迭代初值,以期提高反演的成象质量。

## 1 6FF40反演积分方程的建立及反演迭代方法

在非磁性二维轴对称非均匀介质结构中反演物理模型如图1所示,图中磁导率 $\mathbf{m}(\mathbf{r},z) \equiv \mathbf{m}_0$ ,则只有电导率 $\mathbf{s} = \mathbf{s}(\mathbf{r},z)$ 和介电常数 $\mathbf{e} = \mathbf{e}(\mathbf{r},z)$ 是 $\mathbf{r}$ 和 $z$ 向函数,位于轴线上的 $\mathbf{d}$ 环天线仅产生 $E_j$ 分量的场且满足以下积分方程(设时间因子为 $e^{-j\omega t}$ )<sup>[2]</sup>:

$$E_j(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t) = E_j^{inc}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t) + \int_{z_1}^{z_2} dz' \int_{r_1}^{r_2} d\mathbf{r}' g_b^{out}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}',z') \times dO(\mathbf{r}',z') E_j(\mathbf{r}',z',\mathbf{r}_t,z_t) \quad \mathbf{r}',z' \in S \quad (1)$$

式中 $\mathbf{r}$ 、 $z$ 和 $\mathbf{r}_t$ 、 $z_t$ 分别是收、发线圈的坐标; $S$ 是待反演目标区域;而 $z_2$ 、 $z_1$ 和 $r_2$ 、 $r_1$ 则分别是 $S$ 的 $z$ 向和 $\mathbf{r}$ 向的边界; $E_j(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t)$ 、 $g_b^{out}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}',z')$ 是总场和目标区外的格林函数,分别满足下列波动方程:

$$\left[ \frac{\nabla}{\nabla \mathbf{r}} \left( \frac{1}{\nabla \mathbf{r}} \right) + \frac{\nabla^2}{\nabla z^2} + k^2 \right] E_j(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t) = -i\omega \mathbf{m}_0 \mathbf{d}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_t) \mathbf{d}(z - z_t) \quad (2)$$

$$\left[ \frac{\nabla}{\nabla \mathbf{r}} \left( \frac{1}{\nabla \mathbf{r}} \right) + \frac{\nabla^2}{\nabla z^2} + k_b^2 \right] g_b^{out}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}',z') = -\mathbf{d}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \mathbf{d}(z - z') \quad (3)$$

式中 $k$ 和 $k_b$ 分别是目标区和背景介质中的波数;而 $dO(\mathbf{r}',z')$ 是待求目标函数;且 $dO(\mathbf{r}',z') = k^2 - k_b^2$ 。由于散射场包含有散射体的信息,则散射场为

$$E_j^{scat}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t) = E_j(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t) - E_j^{inc}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t) \quad (4)$$

式(1)改写为

$$E_j^{scat}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}_t,z_t) = \int_{z_1}^{z_2} dz' \int_{r_1}^{r_2} d\mathbf{r}' g_b^{out}(\mathbf{r},z,\mathbf{r}',z') \times dO(\mathbf{r}',z') E_j(\mathbf{r}',z',\mathbf{r}_t,z_t) \quad \mathbf{r}',z' \in S \quad (5)$$

在求解非线性积分方程时,基于Born近似的反演方法在迭代过程中利用Born近似使复杂问题简单化,即在每次迭代过程中,将总场用入射场来替代,使非线性积分方程线性化。这在弱散射情形下是可以的,但在大区域或是高对比度等强散射体时,如果仍做线性化处理就会带来很大的误差或使解不收敛。在此利用场点位于目标区内的电场积分方程求出总场。目标区内的电场积分方程为

$$E_j(\mathbf{r}',z',\mathbf{r}_t,z_t) = E_j^{inc}(\mathbf{r}',z',\mathbf{r}_t,z_t) + \int_{z_1}^{z_2} dz'' \int_{r_1}^{r_2} d\mathbf{r}'' g^{in}(\mathbf{r}'',z'',\mathbf{r}',z') \times O(\mathbf{r}'',z'') E_j(\mathbf{r}'',z'',\mathbf{r}_t,z_t) \quad \mathbf{r}'',z'' \in S \quad (6)$$

式中 $g^{in}(\mathbf{r}'',z'',\mathbf{r}',z')$ 是目标区内的格林函数。将待求目标区分为 $N$ 个子区域,并将式(6)化为矩阵形式为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^{inc} + \bar{\mathbf{G}}^{in} \cdot \bar{\mathbf{O}} \cdot \mathbf{E} \quad (7)$$

由式(7)可得出总场与入射场之间的关系为

$$\mathbf{E} = (\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{G}}^{in} \cdot \bar{\mathbf{O}})^{-1} \mathbf{E}^{inc} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{E}^{inc}$ 均为 $N \times 1$ 的矩阵; $\bar{\mathbf{I}}$ 为 $N \times N$ 的单位阵; $\bar{\mathbf{O}}$ 为 $N \times N$ 的对角阵; $\bar{\mathbf{G}}^{in}$ 也为 $N \times N$ 的矩阵;

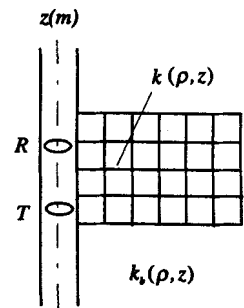


图1 反演物理模型

其矩阵元素为

$$G_{mn}^{in} = \int_{cell\ n} ds' g^{in}(\mathbf{r}', z', \mathbf{r}', z') \quad \mathbf{r}', z', \mathbf{r}', z' \in S \quad (9)$$

将式(8)代入式(5), 写成矩阵形式为:

$$\mathbf{E}^{scat} = \bar{\mathbf{G}}^{out} \cdot \mathbf{d}\bar{\mathbf{O}} \cdot (\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{G}}^{in} \cdot \bar{\mathbf{O}})^{-1} \mathbf{E}^{inc} \quad (10)$$

式中  $\mathbf{E}^{scat}$  是  $M \times 1$  的矩阵( $M$ 是测试数据),  $\bar{\mathbf{G}}^{out}$  是  $M \times N$  的矩阵, 其矩阵元素为:

$$G_{mn}^{out} = \int_{cell\ n} ds' g_b^{out}(\mathbf{r}, z, \mathbf{r}', z') \quad \mathbf{r}', z' \in S \quad (11)$$

在已知目标区外的散射场时, 式(10)则是反演方程。

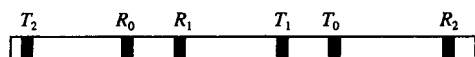


图2 6FF40电极系示意图

6FF40电极系如图2所示, 从图中看出是由三个发射线圈和三个接收线圈组成, 依靠收发线圈的不同绕向和线圈匝数来对消直耦信号提取有用信息。电极系的总感应电动势可表示为各收、发线圈对感应电动势的叠加形式<sup>[10]</sup>:

$$V = 2\pi a \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 N_i N_j E_j^{scat}(\mathbf{r}_j, z_j, \mathbf{r}_i, z_i) \quad (12)$$

式中  $N_j$ 、 $N_i$  分别是收发线圈的匝数。因为以前的测井资料均是以视电导率(或视电阻率)的形式给出。求出视电导率

$$\mathbf{s}_a = V / K \quad (13)$$

式中

$$K = -\frac{w^2 m^2 \pi^2 a^4 I_T}{4\pi} \sum_{i,j=0}^{2,2} \frac{N_i N_j}{L_{ij}} \quad (14)$$

式中  $K$ 称为6FF40电极系的仪器常数;  $a$ 为电极系的半径;  $L_{ij}$ 为第  $i$  发射线圈与第  $j$  接收线圈的间距。将式(10)、式(12)代入式(13)得到

$$\mathbf{s}_a = \frac{2\pi a}{K} \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 N_i N_j \bar{\mathbf{G}}^{out} \cdot \mathbf{d}\bar{\mathbf{O}} \cdot (\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{G}}^{in} \cdot \bar{\mathbf{O}})^{-1} \mathbf{E}^{inc} \quad (15)$$

在已知视电导率值时, 式(15)则是6FF40的反演方程。由于上式是非线性方程, 为了简化方程令圆括号内的  $\bar{\mathbf{O}}$  为上次迭代结果作为已知的背景介质, 将式(15)离散后写成矩阵形式为:

$$\mathbf{s} = \bar{\mathbf{M}} \cdot \mathbf{d}\mathbf{O} \quad (16)$$

式中

$$\mathbf{s} = [\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_m]^t \quad (17)$$

$$\bar{\mathbf{M}} = \frac{2\pi a}{K} \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 N_i N_j \bar{\mathbf{G}}^{out} \cdot (\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{G}}^{in} \cdot \bar{\mathbf{O}})^{-1} \mathbf{E}^{inc} \quad (18)$$

式(16)是不定方程。由于仅能在井轴上获取离散的测量数据, 这又进一步加重了问题的病态程度。为了消除病态, 文献[8]利用正则化方法来将不稳定的问题转化成良态问题, 所以式(16)等价于

$$(\bar{\mathbf{M}}^+ \cdot \bar{\mathbf{M}} + g\bar{\mathbf{R}}^+ \cdot \bar{\mathbf{R}}) \cdot \mathbf{d}\mathbf{O} = \bar{\mathbf{M}}^+ \cdot \mathbf{s} \quad (19)$$

式中  $+$ 表示共轭转置;  $g$ 为正则化参数;  $\bar{\mathbf{R}}$ 为正则化矩阵(文中为单位矩阵)。

利用文献[9]求解式(19)便可得到待反演目标区的电参数。再将该电参数作为新的背景介质, 利用文献[11]求解目标区内外的格林函数、入射场及散射场, 代入式(19)求出新的电参数分布。再将这些电参数作为新的背景介质, 重复上面的步骤, 直至迭代结果满足所给定的误差时终止迭代, 此时的结果便是待反演目标区的重建结果。

## 2 数值反演结果

### 2.1 地层剖面的反演

由于6FF40是复合线圈系, 一次测量仅能获得一个测井响应, 而不象阵列感应测井仪(AIT)一次测量可

获得八个测量数据<sup>[12]</sup>,所以是一种低信息量的反演。设背景介质的电导率是0.1 S/m,而井内电导率为0.01 S/m的非均匀介质作背景。正则化参数 $g$ 取 $\bar{M}^+ \cdot \bar{M}$ 矩阵第一个元素的0.01倍。待反演区域为 $-0.368 \text{ m} \leq z \leq 0.368 \text{ m}$ 及 $0.279 \text{ m} \leq r \leq 0.75 \text{ m}$ 。目标区分为 $5 \times 5$ 个子区域。电极系沿 $z$ 轴从 $-0.762 \text{ m}$ 以 $0.0762 \text{ m}$ 的步长移到 $0.762 \text{ m}$ ,有21个测试点,故21个测量数据,这是个欠定问题,6FF40的成像结果如图3所示。图3a是真实电导率分布,峰值电导率为 $1.0 \text{ S/m}$ ;图3b是第一次迭代结果,无论是在形状上还是电导率值都与真实电导率分布相差甚远。而图3c则是第八次迭代结果,此时峰值已达 $1.02 \text{ S/m}$ ,迭代结果已十分接近真实电导率剖面分布。由图3d的散射场的相对剩余误差与迭代次数的关系曲线可看出,该反演方法的收敛速度是很快的,尤其是前面几次的收敛更快。

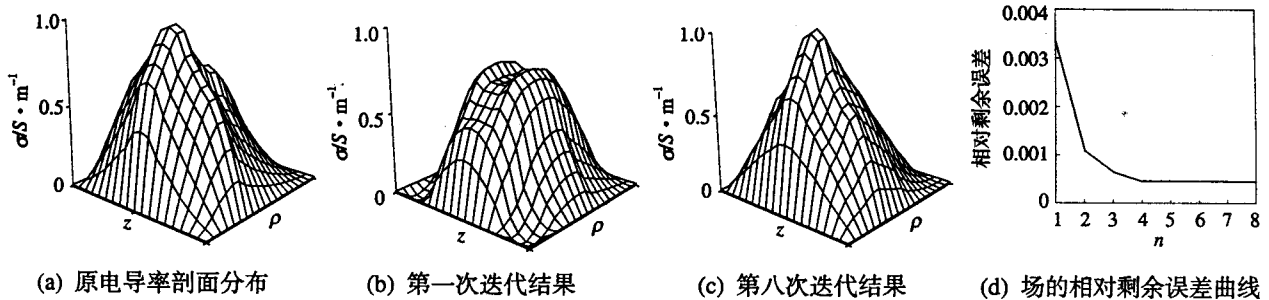


图3 6FF40的成像结果图

2.2 纵向分辨率和径向分辨率的考察

在实际工程中对仪器的纵向分辨率和径向分辨率非常重视,本文采用方法对6FF40的纵向分辨率和径向分辨率在高对比度情况下分两步进行考察:第一步先考察6FF40纵向分辨率,如图4所示。图4a有两个大小为 $0.15 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 的介质块,其电导率的最大值为 $10.0 \text{ S/m}$ ,而背景介质的电导率是 $0.01 \text{ S/m}$ (此时待反演目标与背景介质的对比度高达1 000),井内泥浆电导率为 $0.1 \text{ S/m}$ ,井眼半径为 $0.127 \text{ m}$ 。电极系从 $-0.75 \text{ m}$ 以 $0.075 \text{ m}$ 步长移到 $0.75 \text{ m}$ ,测量数据为21个。以下分别考虑两个介质块相距 $0.1 \text{ m}$ 和 $0.15 \text{ m}$ 两种情况。图4b是两个介质块相距 $0.1 \text{ m}$ 时的第八次迭代结果。由图可看出重建结果虽能反映出两个介质块的峰值来,但区分这两个峰的效果并不太好,尤其是两个介质块之间的电导率值。而图4c是两个介质块相距 $0.15 \text{ m}$ 时的第八次迭代结果,从图中可非常清晰地分辨出两个介质块。又由图4d的场相对剩余误差曲线可看出,相距远些收敛速度也要快些。

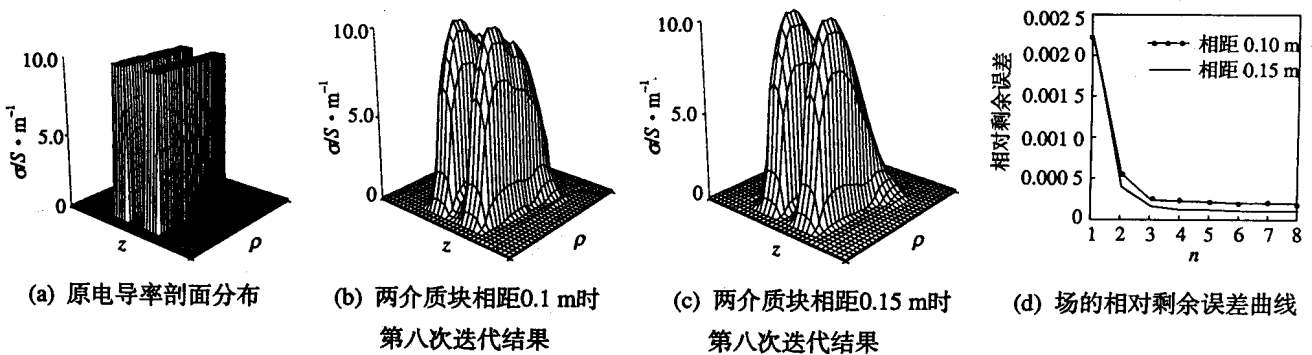


图4 6FF40纵向分辨率的考察图

第二步考察6FF40径向分辨率。从图中看出由于电极系仅能在 $z$ 轴移动测量,所以对径向剖面的病态程度更高,其反演效果要差些。图5a是两个大小为 $0.25 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ ,在径向分布的介质块,其峰值电导率仍为 $10.0 \text{ S/m}$ 。背景介质与井内电导率、井眼半径和测试点的移动距离如同前面实例。以下是分别考察两个介质块相距 $0.1 \text{ m}$ 和 $0.175 \text{ m}$ 时两种情况。图5b是两个介质块相距 $0.1 \text{ m}$ 时的第八次迭代结果,由图中的重建结果来看,两个介质块的分辨效果并不好。图5c是两个介质块相距 $0.175 \text{ m}$ 时第八次迭代结果,已能较好地分辨出两个介质块的区别。

### 2.3 先验信息的利用

在前面的反演过程中,都是利用背景介质或是井内电导率作为待反演目标区的迭代初值。在实际测井工程中所得到的响应已经是视电导率(或是视电阻率),虽然该响应有时(主要是在薄层或薄互层中)与真值相差较远,但可用作待反演目标区的迭代初值。文献[13]讨论利用先验信息来反演,但是基于DBIM的方法。本文采用正演数据作为初值对地层剖面进行反演,其反演结果如图6所示。图6a为地层模型的电参数和几何参数。图6b为实线框是真实地层剖面,实曲线为文献[11]的计算结果,该结果又作为反演的测量值。图中圆点线表示没考虑先验知识,而是直接利用背景值作初值的第七次重建结果,图中的三角形则表示利用正演数据(各层中点的电导率值)为初始值的第七次迭代结果。图中还可看出利用正演电导率值作初值的反演结果比没有利用正演电导率值作初值的反演效果要好,并更接近真实剖面分布。由图6c的相对均方误差可看出,利用正演数据的方法所获得的成像质量显然要高,其第三次的迭代结果要优于无先验知识的第七次迭代结果。由此可知,利用先验的知识对提高成像质量和减少迭代次数是大有好处的。

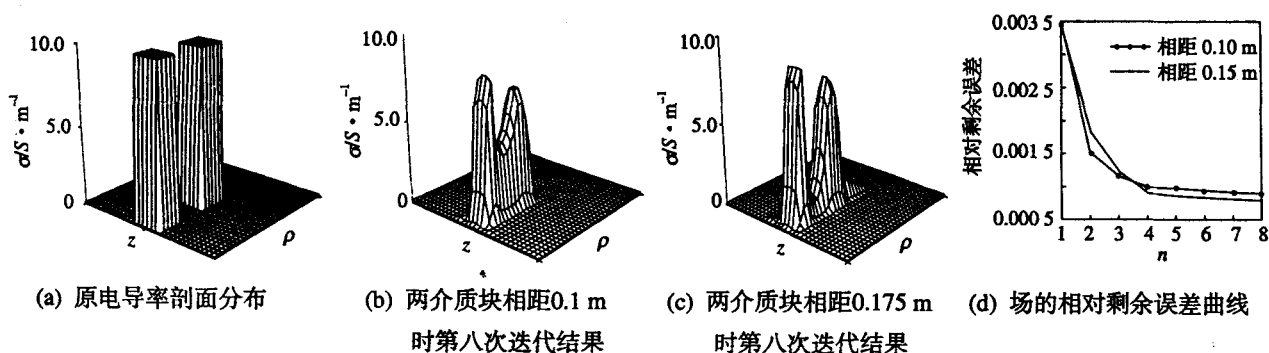


图5 6FF40径向分辨率的考察图

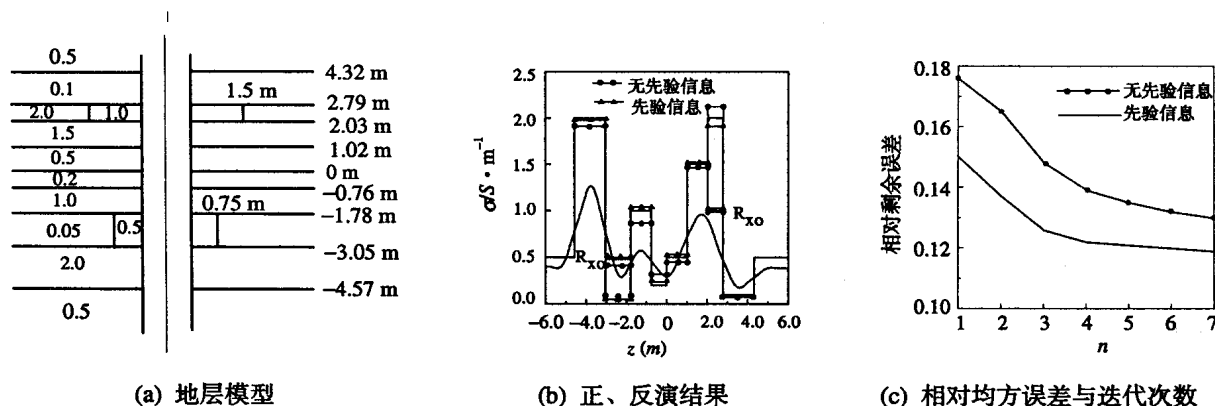


图6 利用6FF40电极系正演数据作为试解的反演结果

## 3 结 论

本文基于场点在目标区内、外的电场积分方程,针对6FF40建立起反演积分方程,通过迭代方法和BCG来重建地层的电导率剖面。数值结果表明,该方法不仅能解决超定问题,对欠定问题也可取得较好的反演结果,同时还可看出仅需几次迭代就能达到较好的成像结果。另外,对6FF40的纵向和径向分辨率进行了仿真和分析考察,从图4和图5看出,在同等情况下纵向分辨率优于径向分辨率,这是由于测量仪器仅在 $z$ 向取值,因此导致径向数据采集的不完备性所造成。最后利用6FF40的测量信息作为反演迭代的初值,可大大减少迭代次数和提高成像质量。

(下转第402页)

## 4 结束语

本文通过大量的数值计算,设计了一支性能优良的电子枪,纵向速度零散达到的千分之几。电子枪已用于永磁包装回旋管制管实验中,并获得了很好的性能。同时,本文给出的方法与编制的通用软件可为电子枪的分析和设计提供更为可靠的依据和方便。

### 参 考 文 献

- [1] Li Hongfu, Du Pinzhong. A self-consistent field theort and simulation for complex cavity with abrupt transition[J]. Acta Physica Sinica, 2000,49(2):409-503
- [2] Tsimring S E. NRL memorandum[R]. Report, 3 937
- [3] Boris V R, Shulim E T. Numerical Simulation of nonstationary processesin intense helical electron beams of gyrotrons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1996,24 (3): 992-998
- [4] Kuftin A N, Lygin V K, Tsimring S E, *et al.* Numerical simulation and experimental study of magnetron-injection guns for powerful short-wave gyrotrons[J]. Int.J.Electronics, 1992,72(5): 1 145-1 151
- [5] Wang Huajun, Li Hongfu. Design of a single anode magnetron injection electronic gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(3): 337-341
- [6] Wang Huajun, Li Hongfu. Design of a double anode magnetron injection electronic gun[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(3): 331-334
- [7] Wang Huajun, Li Hongfu. Design and calculation of a double magnetic injection electronic gun for gyrotron[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(6): 98-101

编辑 孙晓丹

(上接第384页)

### 参 考 文 献

- [1] Doll H G. Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oilbased mud[J]. J.of Petrol Technology ,1949,1:148-162
- [2] Chew W C, Wang Y M. Reconstruction of two-dimensional permittivity using the distorted Born iterative method[J]. IEEE Trans- Med. Imag., 1990,9(2):218-225
- [3] Liu Q H. Reconstruction of two-dimensional axisymmetric inhomogeneous media[J]. IEEE Trans-GE, 1993, 31(3): 587-594
- [4] Chen S Y, Chew W C, Kennedy W D. Inversing of 6FF40 induction tool measurement using the distorted born iterative Method[C]. In IEEE Antennas and Propgation Society International Symposium, Montrea,Canada, 1997. 1 714-1 717
- [5] 杨 峰, 聂在平, 张业荣, 等. 重建二维轴对称电导率剖面分布的快速有效方法[J]. 系统工程与电子技术, 1999,21(12):1-4
- [6] 杨 峰, 聂在平. 用变分玻恩迭代方法重建二维非均匀介质结构[J]. 地理物理学报, 2000,43(4):550-556
- [7] 杨 峰, 聂在平. 轴对称二维非均匀介质结构的非线性反演方法[J]. 红外与毫米波技术, 2000,19(6):419-424
- [8] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solutions of ill-posed problems[C]. New York, Winston-Wiley, 1977
- [9] Pockock M D, Walker S P. The complex Bi-Conjugate gradient solver applied to large electromagnetic scattering problems, computational costs, and cost scalings[J]. IEEE Tans-AP, 1997, 45 (1): 140-146
- [10] 田子立, 孙以睿, 刘桂兰. 感应测井仪应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1984
- [11] 聂在平, Chew W C, Liu Q H. 电磁波对轴对称二维层状介质的散射[J]. 地球物理学报, 1992, 35(4): 479-489
- [12] 杨 峰, 聂在平. 基于阵列信息的二维轴对称电导率分布的有效反演方法[J]. 电子学报, 2000, 28(6):135-137
- [13] 杨 峰, 聂在平. 利用感应测量信息快速反演地层电导率[J]. 计算物理, 2000, 17(1,2): 89-94

编辑 刘文珍