

# 基于可视化技术的 3D 井地磁测人机交互反演

冯杰, 刘天佑, 杨宇山

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**可视化技术可以直观、方便地描述诸多地质现象,被广泛地应用于地球物理工作中。井中磁测和地面磁测资料的单一资料反演具有一定的局限性,容易产生多解性。笔者阐述了基于可视化技术的 3D 井地磁测人机交互反演的方法原理和关键技术,并应用于大冶铁矿实际资料的反演解释。实践证明,该方法不但可以利用地面和井中两种资料的优势,还可以充分发挥解释人员的经验,克服了单一资料反演的缺陷,在找矿过程中获得了良好的效果。

**关键词:**3D 可视化技术;井中磁测;地面磁测;人机交互反演;大冶铁矿

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2010)04-0541-05

三维可视化技术是用于显示、描述和理解地下和地面诸多地质现象的一种技术,它广泛应用于地质与地球物理解释。1990 年美国 SEG 年会以后,可视化技术在地球物理中,尤其在三维地震解释中得到广泛应用。随着高性能微机和工作站的广泛应用,重磁资料三维可视化反演在固体矿产勘查方面得到了长足发展。

林振民等<sup>[1-2]</sup>在承担地矿部“八五”攻关项目中,采用了一种橡皮膜技术来研究重磁三维可视化反演。吴文鹏、管志宁、田黔宁<sup>[3-5]</sup>采用可视化技术及混合优化算法进行三维重磁反演,实现了三角形多面体模型的人机交互反演及自动反演,并把该方法应用于内蒙古布敦化地区航磁资料反演,取得显著地质效果。尽管该项技术十分先进,但由于实际情况中地下地质(矿)体的空间位置、形态、走向非常复杂,造成了模型难以修改和细化,适用性有限。笔者所提出的三维可视化人机交互反演技术是在 Windows 环境下,用 Visual C++ 语言与 OpenGL 函数实现的,该方法可以将地下三维空间分为若干个剖面,通过修改各剖面中地质体的形态、位置和磁性参数,逐条拟合地面磁异常和井中磁异常曲线,当拟合误差满足要求后,得到最终反演结果。

## 1 3D 井地磁测人机交互反演的方法原理

### 1.1 任意形状三度体的地面磁异常正演计算

设直角坐标系中  $z$  轴向下为正,  $y$  轴向右为正,在该坐标系中,有一均匀磁化任意形状三度体  $Q$ ,地

质体外部有任意一点  $P$ ,将地质体分为许多小体积元  $dv$ ,则小体积元的引力位  $dV$  为<sup>[6-11]</sup>

$$dV = \frac{f\rho}{R} dv,$$

式中  $f$  为引力常数,  $\rho$  为密度。

利用重磁位场关系的泊松公式,并令  $f\rho = 1$ ,则可得  $P$  点磁位  $U$  为

$$U = \frac{M}{4\pi} \text{grad}_p V. \quad (1)$$

由  $T = -\mu_0 \text{grad}_p U = -\mu_0 \Delta U$ , 可求出  $P$  点磁场的三个分量:

$$X_a = -\mu_0 \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ M_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + M_y \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + M_z \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} \right],$$

$$Y_a = -\mu_0 \frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ M_x \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} + M_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + M_z \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} \right],$$

$$Z_a = -\mu_0 \frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ M_x \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial z} + M_y \frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} + M_z \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right],$$

$$\Delta T = X_a \cos I \cos A' + Y_a \cos I \sin A' + Z_a \sin I. \quad (2)$$

其中,  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  为磁化强度  $M$  的三个分量,  $\mu_0$  为真空中的磁导率,  $I$  为地磁倾角,  $A'$  为测线磁方位角。引力位分别为

$$V_x = \iiint_Q \frac{3(x_Q - x_P)(z_Q - z_P)}{R^5} dx_Q dy_Q dz_Q$$

$$V_y = \iiint_Q \frac{3(y_Q - y_P)(z_Q - z_P)}{R^5} dx_Q dy_Q dz_Q$$

$$V_z = \iiint_Q \frac{3(z_Q - z_P)^2 - R^2}{R^5} dx_Q dy_Q dz_Q$$

收稿日期:2009-09-30;修回日期:2010-03-16

基金项目:全国危机矿山接替资源找矿项目(200799084)资助

$$V_{xx} = \iiint_Q \frac{3(x_Q - x_P)^2 - R^2}{R^5} dx_Q dy_Q dz_Q$$

$$V_{xy} = \iiint_Q \frac{3(x_Q - x_P)(y_Q - y_P)}{R^5} dx_Q dy_Q dz_Q$$

$$V_{yy} = \iiint_Q \frac{3(y_Q - y_P)^2 - R^2}{R^5} dx_Q dy_Q dz_Q$$

其中,  $R$  表示  $Q$  点到观测点  $P$  之间的距离。对于球体、棱柱体等规则几何形体, 上述 6 个三重积分可以解析求出, 而对于不规则形体, 则只能采用数值积分方法。

## 1.2 任意形状三度体的井中磁异常正演计算

任意形状三度体井中磁异常的正演公式实质上与地面磁异常的公式是相同的<sup>[12-15]</sup>, 只不过由于观测面从地面转向井中, 旋转了  $90^\circ$ , 所以井中磁异常的  $\Delta H$  和  $\Delta Z$  分量与地面磁异常的对应分量有一个转换关系<sup>[8]</sup>。

## 2 三维可视化的关键技术

所谓可视化就是指在反演的过程中, 实测的位场曲线、地质模型及其正演位场曲线可以同时显示在计算机屏幕上, 解释人员可以通过对地质模型的形状和属性进行修改, 实时地计算修正后的地质模型, 并将所产生的位场值与实测值比较, 当正演曲线与实测曲线拟合完整时, 达到最终的反演目的。该技术在实际应用中包括三维模型的建立、编辑、显示、成图等过程, 其中三维地质体的添加和成图是关键技术。

### 2.1 添加三维地质体

通常我们利用已知信息, 如地震解释结果、钻井、测井、物性等资料建立初始模型。在交互反演过程中, 根据实际情况, 需要添加一个 (或多个) 地质体时, 我们可以通过在若干个剖面内添加地质体截面来实现。首先要设置所添加地质体的磁性参数, 然后在该地质体所经过的地质断面上添加地质体截面, 各剖面上的该地质体截面编号相同, 在空间上相互连接构成三维地质体。地质体的尖灭情况如图 1 所示。

(1) 当地质体的两端都在剖面控制范围之内时, 如地质体 2, 其两端尖灭点的位置根据尖灭点与截面  $x_3$ 、 $x_5$  的距离来确定;

(2) 当地质体的某一端在剖面控制范围之内时, 如地质体 1 和 3, 地质体 1 的北端点位于  $(x_3 + x_4)/2$ , 南端点的位置根据与  $x_1$  截面的距离来确定, 地质体 3 同理;

(3) 当地质体的两端都在剖面的控制范围以外

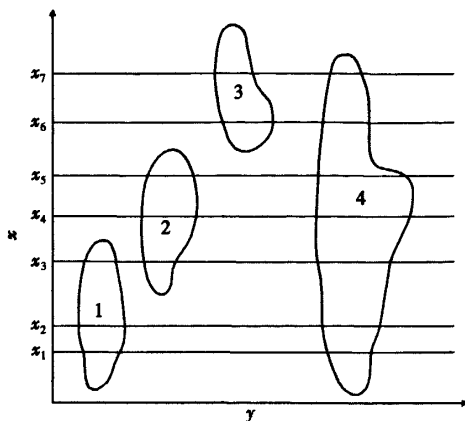


图 1 地质体尖灭点设置

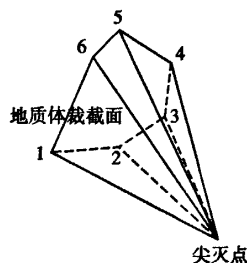
时, 如地质体 4, 其南北两端点的位置根据与  $x_1$ 、 $x_7$  截面的距离来确定。

如果要删除一个地质体则需要所有截面将该地质体删除。

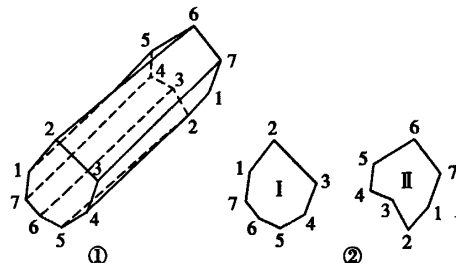
### 2.2 立体成图方案

三维地质体的立体成图十分复杂, 在成图过程中需要考虑两种情况:

(1) 尖灭点与相邻截面的连接。这种情况比较简单, 只要将尖灭点与相邻截面的各角点相连 (如图 2a 所示), 就可利用 OpenGL 绘制出其表面。



(a) 尖灭点与相邻截面的连接示意



(b) 两相邻截面的连接示意

图 2 截面连接示意

(2) 两相邻截面之间的连接情况。首先将两截面角点按顺时针 (或逆时针) 方向排列, 然后寻找各个截面最左端、最上端、最右端、最下端的角点, 如图

2b 截面 I 的 7、2、3、5 角点和截面 II 的 4、6、7、2 角点,最后将截面分成 4 段进行连接,即截面 I 的 7 号到 2 号之间的角点与截面 II 的 4 号到 6 号之间的角点相连,截面 I 的 2 号到 3 号之间的角点与截面 II 的 6 号到 7 号之间的角点相连,截面 I 的 3 号到 5 号之间的角点与截面 II 的 7 号到 2 号之间的角点相连,截面 I 的 5 号到 7 号之间的角点与截面 II 的 2 号到 4 号之间的角点相连,这样就绘制出了截面 I 到截面 II 的地质体表面图。

考虑上述两种情况之后,即可得到地质体的三维立体图像。

### 3 3D 井地磁测人机交互反演的流程

3D 井地磁测人机交互反演的过程(图 3)主要分为以下几个步骤:

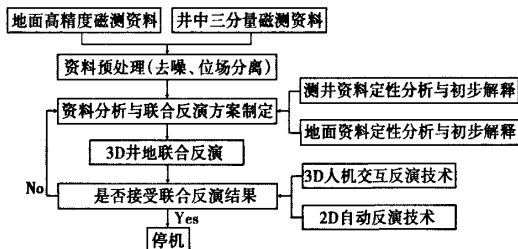


图 3 3D 井地磁测人机交互反演的流程

(1) 对地面和井中磁测资料进行预处理;

(2) 根据地面磁测资料和井中磁测资料的特征,结合地质及钻孔资料,给出定性分析和初步解释;

(3) 建立 3D 模型。将已知的地质(矿)体、围岩、接触带、钻孔等信息矢量化,根据定性分析的结果在各剖面中添加推断地质(矿)体,并可以通过任意拖动、增加、删除脚点来实现地质(矿)体形态的改变,双击地质(矿)体可改变其属性(如地质体走向的延伸长度、磁化强度、地磁倾角、颜色、标注等等);

(4) 通过修改各剖面地质体的形态、位置、磁性参数等来拟合地面磁异常和井中磁异常,当拟合误差达到精度要求后,得到最终的反演结果。

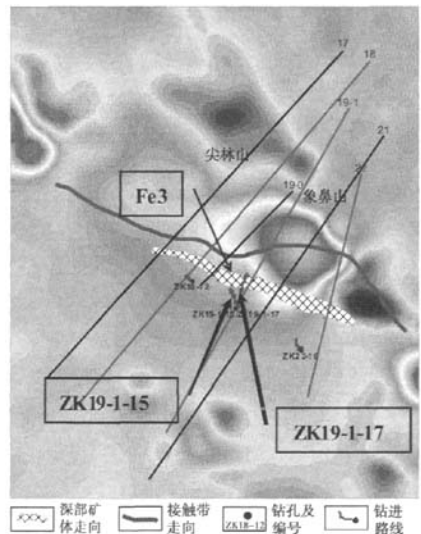
### 4 实例应用

以大冶铁矿某矿段为例,对该矿段的地面  $\Delta T$  高精度磁测资料和井中三分量磁测资料作 3D 井地磁测人机交互反演解释。

该区铁属接触交代型铁矿,矿体基本沿接触带分布。区内与成矿关系最为密切的是三叠系大冶

群灰岩、大理岩,位于接触带的南缘,接触带的北缘是燕山期早期的铁山侵入体,主要为闪长岩,接触带整体呈“S”形展布。

前人曾对本区 17 线、19-1 线的地面磁测资料,做过精细处理解释,对 ZK18-12、ZK19-1-15、ZK21-8 和 ZK22-16 等钻孔的井中三分量磁测资料作了解释,但大冶铁矿经过多年的开采,废弃的矿石、回填物等对本区的地面磁异常造成严重干扰,深部矿体引起的地面异常难以发现,而井中磁测资料控制范围有限,所以前人的解释结果并没有给出该区矿体的空间位置和形态,并且推断 ZK19-1-15 在标高 -220 ~ -320 m 之间有一旁侧矿体(Fe<sub>3</sub>),但没有确定其空间位置,并认为该矿体在 19-1 剖面的旁侧。



底图为  $\Delta Z$  磁异常图,测线为 2.5D 反演解释剖面

图 4 大冶铁矿尖林山-象鼻山矿段测线及钻孔分布

为此对该矿段的 6 条测线(17 线、18 线、19-0 线、19-1 线、21 线和 22 线)和 3 个钻孔(ZK18-12、ZK19-1-15 和 ZK22-16)做 3D 人机交互反演,其中 18、19-1 和 22 线已经作了 2.5D 反演。为了提高 3D 反演的精度,在 18 线西侧增加了 17 线,在 18、19-1 线之间增加了 19-0 线,在 19-1、22 线之间增加了 21 线,如图 4 所示,以 18、19-1、22 线的 2.5D 反演结果和其余各线的先验信息来建立 3D 反演初始模型,反演结果如图 5 所示。

### 5 结论

笔者阐述了基于可视化技术的 3D 井地人机交互反演的基本原理及过程,并以大冶铁矿某矿段为例作了反演解释,得出以下结论。

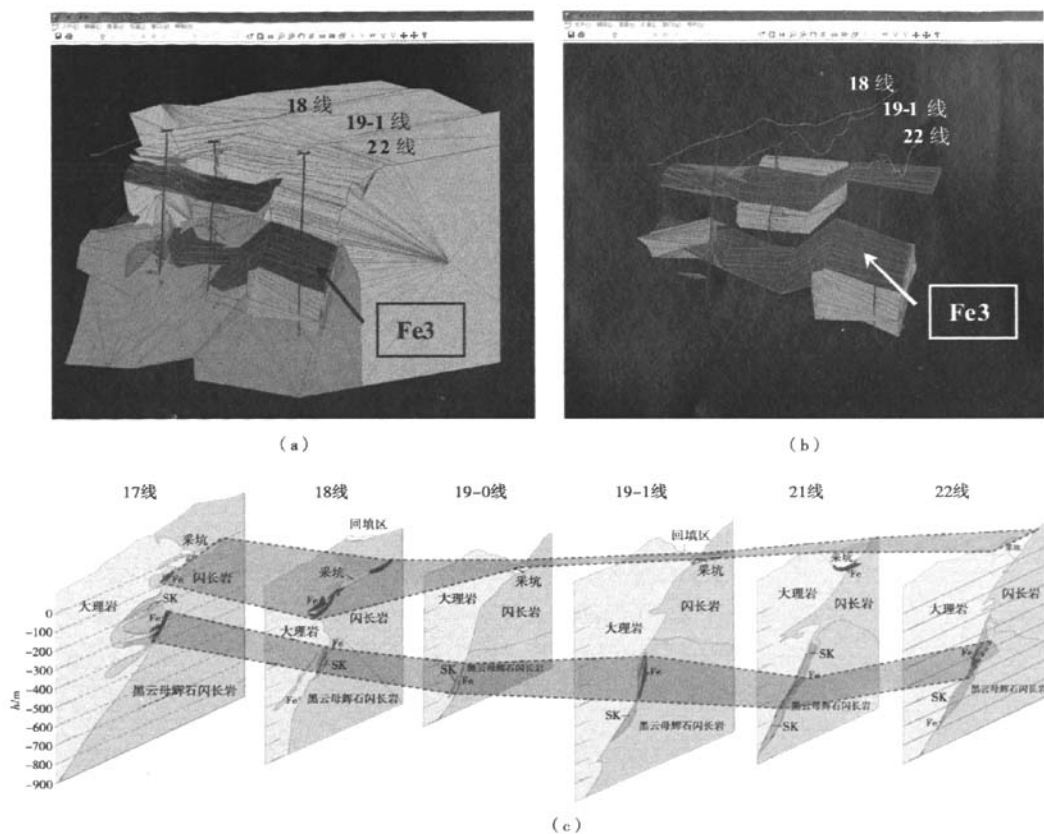


图5 大冶铁矿尖林山—象鼻山矿段3D井地磁测联合反演结果

(1) 由于受到地面磁测和井中磁测资料各种情况的限制,在单一资料的反演过程中,无法获得地下矿(地质)体的空间位置和形态,而3D井地人机交互反演不但可以利用两种资料的优势,还可以充分发挥解释人员的经验,得到较好的反演结果。

(2) 研究区域内的铁矿总体上沿接触带分布,且矿体的赋存标高具有明显的“台阶”特征,即矿体的赋存位置在标高上有两个富集地段。

(3) 经过3D井地人机交互反演,发现前文讨论的Fe<sub>3</sub>矿体实际上是穿过了19-1剖面,而ZK19-1-15只不过是Fe<sub>3</sub>的旁边穿过,并未打到。后期布置钻孔证实了上述推断。由此可见,该方法的实际应用效果优于单一资料的反演结果。

#### 参考文献:

- [1] 林振民,陈少强. 三维可视化技术在固体矿产中的应用[J]. 物探化探计算技术,1994,16(4):338-344.
- [2] 林振民,陈少强. 计算机上的橡皮膜技术[J]. 物探化探计算技术,1996,18(1):6-16.
- [3] 吴文鹏,管志宁. 基于八叉树结构的可视化三维位场正反演

[J]. 物探与化探,1997,21(4):282-288.

- [4] 吴文鹏,管志宁,高艳芳,等. 重磁异常数据三维人机联作模拟[J]. 物探化探计算技术,2005,27(3):227-232.
- [5] 田黔宁,吴文鹏,管志宁. 任意形状重磁异常三度体人机联作反演[J]. 物探化探计算技术,2001,23(2):125-129.
- [6] Bosum W, Casten U, Fieberg F C, et al. Three-dimensional interpretation of the KTB gravity and magnetic anomalies[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(8):18037-18321.
- [7] Li Yaoguo, Oldenburg D W. Joint inversion of surface and three-component borehole magnetic data[J]. Geophysics, 2000, 65(2):540-552.
- [8] 潘贤炽,刘行义. 井中磁测与地面磁测的关系[J]. 物探与化探,1982,1(5):265-269.
- [9] 张大莲,刘双,陶德益,等. 井中磁测与地面磁测资料联合反演[J]. 工程地球物理学报,2008,5(1):60-64.
- [10] 张胜业,潘玉玲. 应用地球物理学原理[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [11] 刘天佑. 位场勘探数据处理新方法[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [12] 蔡柏林,王作勤,杨坤彪,等. 井中磁测物理—地质模型及其应用[M]. 北京:地质出版社,1989.
- [13] 地质矿产部第一综合物探大队. 井中磁测[M]. 北京:地质出版社,1985.

- [14] Wang X, Hansen R O. Inversion for magnetic anomalies of arbitrary three-dimensional bodies[J]. *Geophysics*, 1990, 55(10): 1321 - 1326.
- [15] Silva J B C, Hohmann G W. Interpretation of three-component borehole magnetometer data[J]. *Geophysics*, 1981, 46(12): 1721 - 1731.

## 3D MAN-MACHINE INTERACTIVE INVERSION OF SURFACE AND BOREHOLE MAGNETIC DATA BASED ON VISUALIZATION TECHNOLOGY

FENG Jie , LIU Tian-you , YANG Yu-shan

(*Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** Because of its intuition and convenience, visualization technology is generally applied in geophysics. However, there exist certain limitations in inverting surface or borehole magnetic data alone, which may easily cause multiplicity. In this paper, the authors demonstrated the principle and crucial technology of 3D man-machine interactive inversion of surface and borehole magnetic data, and applied it to the Daye iron mine. This method not only has the full advantage of the surface and borehole magnetic data but also possesses the experience gained by interpretation workers. At the same time, it overcomes the disadvantages of inverting either of them alone and can get favorable result in mineral exploration.

**Key words:** 3D visualization technology; borehole magnetic survey; surface magnetic survey; man-machine interactive inversion; Daye iron mine

**作者简介:** 冯杰(1982 - ),男,山西太原人,博士研究生在读,从事地球物理数据处理与解释研究。