

doi: 10.11720/wtyht.2015.6.12

郭博,潘和平,杨怀杰,等.地—井方式激电确定矿体空间位置[J].物探与化探,2015,39(6):1167–1175.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.6.12

Guo B, Pan H P, Yang H J, et al. The application of the surface-to-borehole induced polarization method to determining the spatial location of the orebody [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1167–1175. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.6.12

地—井方式激电确定矿体空间位置

郭博, 潘和平, 杨怀杰, 姚静

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:为更好地解决井旁矿体的勘探及盲矿的预测问题,探讨了地—井方式激发极化法对于井旁的规则形体(矿体)的激电影响;采用解析投影法,以球体和板状体两种模型为例,遵循“单井—多井”的激电规律来判别矿体的空间位置。最后,归纳总结出地—井方式激电在实际工作中的使用条件,能够快速判别井旁盲矿体的空间位置。结论指出,合理的施工方式以及适量的观测数据对预测矿体的产状具有积极作用。

关键词:地—井方式;井中激发极化法;深部找矿;井旁矿体

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)06-1167-09

地—井方式激发极化法是一种在实际矿体勘探中十分流行的物探方法,具有分辨率高、操作方便等优点,引起很多学者的关注。国内从 20 世纪 70 年代开始,黄智辉等人就对地—井方式方位测量资料解释问题进行了探讨^[1];吴至善等人对井中激发极化法的理论与实践做出了研究^[2];吕玉增、张国艳等人对地井方位激电异常正反演研究做了很大贡献^[3-7];潘和平、周峰等人对井中激电井旁球体的正反演进行了深入研究^[8-10],拓宽了其在井中物探的应用范围。国外的相关研究大多是以三维可视化的角度,运用一些复杂原理例如有限元的方法对地—井方式激电进行正反演^[11-18],取得了很好的效果。

此次在前人研究的基础上完成了论证工作,用 matlab 实现球体和板状体的激电模型计算,达到了预期的效果。

1 工作原理及方法技术

1.1 工作原理

井中激发极化法可分为地—井、井—地、井—井三种方式,其中地—井方式^[19]在近年来的金属矿勘查中取得了较好的效果^[20]。

总体而言,井中激电同地面激电原理一样,都是以岩矿石的激发极化机理为基础,包括(电子导体)超电压的形成和(离子导体)薄膜极化的产生。地—

井方式激电指的是将供电电极 A、B 布置在地面,其中 A 极置于距井口一定距离(L)处或者置于井口(L=0),B 极置于无穷远,测量电极 M、N 置于井中(图 1)。

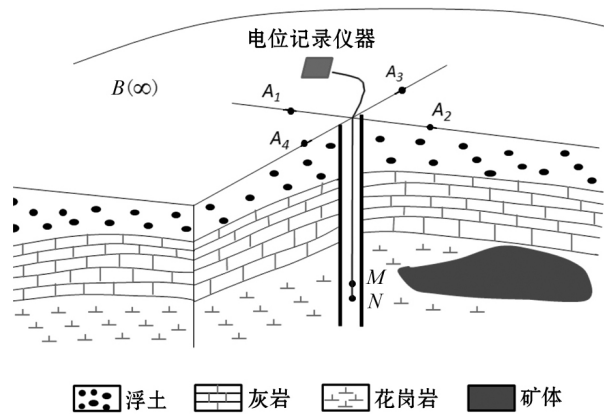


图 1 地—井激电工作方式示意

地—井方式激电利用井的天然优势使得测量端接近矿体,矿体激电异常更容易被检测到。在测量操作中,地面上不同方位或不同距离的 A 极布置会改变矿体的极化方向和强度。可以把 A 极依次布置在东、南、西、北各个方向上,在每个方位做测量,通过对各个方向上的激电异常曲线形态和强弱的差异来推断井旁盲矿体的相关地质信息^[19,20]。

1.2 野外工作方法

地-井方式方位测量时,把 A 极布置在盲矿的方位称为主方位,布置在盲矿的相反方位称为反方位。为防止主、反方位的激电异常曲线变化不明显,选取的 L 应满足: $L \geqslant$ 井距(d)。实际工作中最常见的测量组合是:主剖面上进行主、反方位及 $L=0$ m 这样的 3 条地-井曲线,除此之外,还要在垂直主剖面的辅助方位做测量,增强方位测量结果的对比性;需注意各个 A 极方位的 L 值应该相等,测量装置及供电电流强度应尽量相同^[19]。

1.3 参数和背景值的选择

地-井方式常用视极化率 η_s 和二次场异常电位差 ΔU_2^a 两个参数,其关系为^[19-20]:

$$\eta_s = \frac{\Delta U_2}{\Delta U} \times 100\% ,$$

$$\Delta U_2^a = \Delta U_2 - \eta_s \Delta U。$$

通常方法是在激电测井曲线上选取非激化围岩段视极化率的平均值作为背景值,这样就突出了井旁盲矿的异常^[19,20]。因此,可以用二次场异常电位差曲线代替视极化率曲线。

2 单井多方位 ΔU_2^a 的模型计算

2.1 球形矿体

单井球情况下主剖面的程序参数设定为:球体中心埋深 $h=100$ m,井距 $d=50$ m,供电距离 L 分别为 100、-100、0 m,梯度极距 $\overline{MN}=5$ m,测量范围 0~300 m。经过编程处理后,得到主剖面球体二次场异常电位差曲线(图 2)。

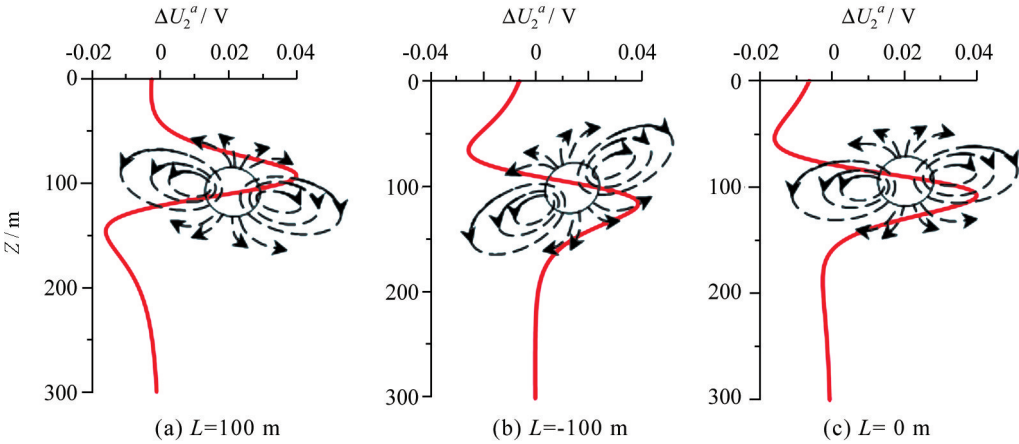


图 2 主剖面球体二次场异常电位差程序结果

- 1) 当 A 极置于球体所在正方位($L=100$ m),球体也以垂直极化为主,忽略上部小的负异常,则主方位上特征曲线是上正下负的“反 S 形”。球心深度位置在正极值与第二个零值之间。
- 2) 当 A 极置于球体所在反方位($L=-100$ m),垂直极化减弱,以水平极化加强,曲线形态为上正下负的“正 S 形”,球心深度位置则在第一零值点与正极值之间。
- 3) 当 A 极置于套管接地处($L=0$ m),因 $h>d$,球体以垂直极化为主,出现上下不对称的负异常,其水平极化方向与 $L=100$ m 相反,球心深度位置约在异常正极值与第一个零值之间。

接下来引入几何投影法模拟八方位辅助供电,从而更完整地掌握地-井方式激电在各个方位的激发极化效应(图 3)。八方位辅助供电点设为 $A_5、A_6、A_7、A_8$,为了方便起见,设 A_5 和 $A_7、A_6$ 和 A_8 为关于主

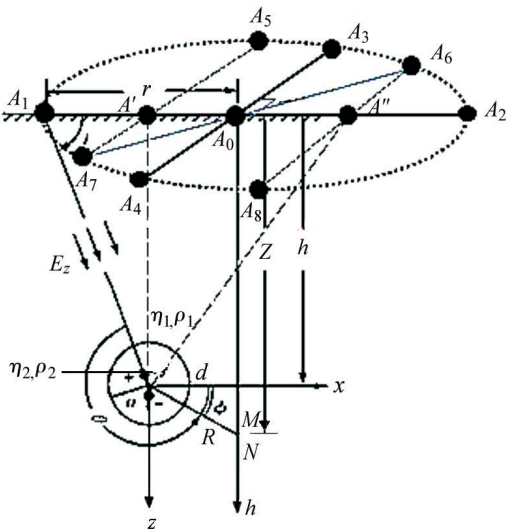


图 3 八方位供电(辅助方位)位置示意^[19-20]

剖面的对应点,并且均为四方位供电点的角平分点,圆心角均为 45°。

模拟采用偶极子等效电流场^[19],表达式为
$$U_2^a = K \cdot (\cos\theta/R^2),$$
其中, K 为激电系数, R 为球心至观测点 MN 的距离, θ 为变化角。在 xOz 坐标中对 z 微分,得到二次场异常电位差表达式^[19]:
$$\Delta U_2^a = K \frac{[d^2 - 2(z - h)^2] \sin i - 3d(z - h) \cos i}{[d^2 - (z - h)^2]^{5/2}} \overline{MN}.$$

需要说明的是, A_3 和 A_4 供电点其极化方向在垂直主剖面方向的分量效果为零,则主剖面方向分量投影效果相当于井口 A_0 供电^[21],最终的思路是将八方位辅助供电点投影到主剖面上。此时要注意,投影点 A' 和 A'' 两点的等效极化倾角 i 的数学关系可以由投影点相对于球心的距离和中心埋深 h 求出。若供电点固定,则 A_5 、 A_7 等效投影距离相同, A_6 、 A_8 的距离也相同,因此对应方位的激发极化异常曲线趋势两两相同。这点从图 4 中得到了验证。

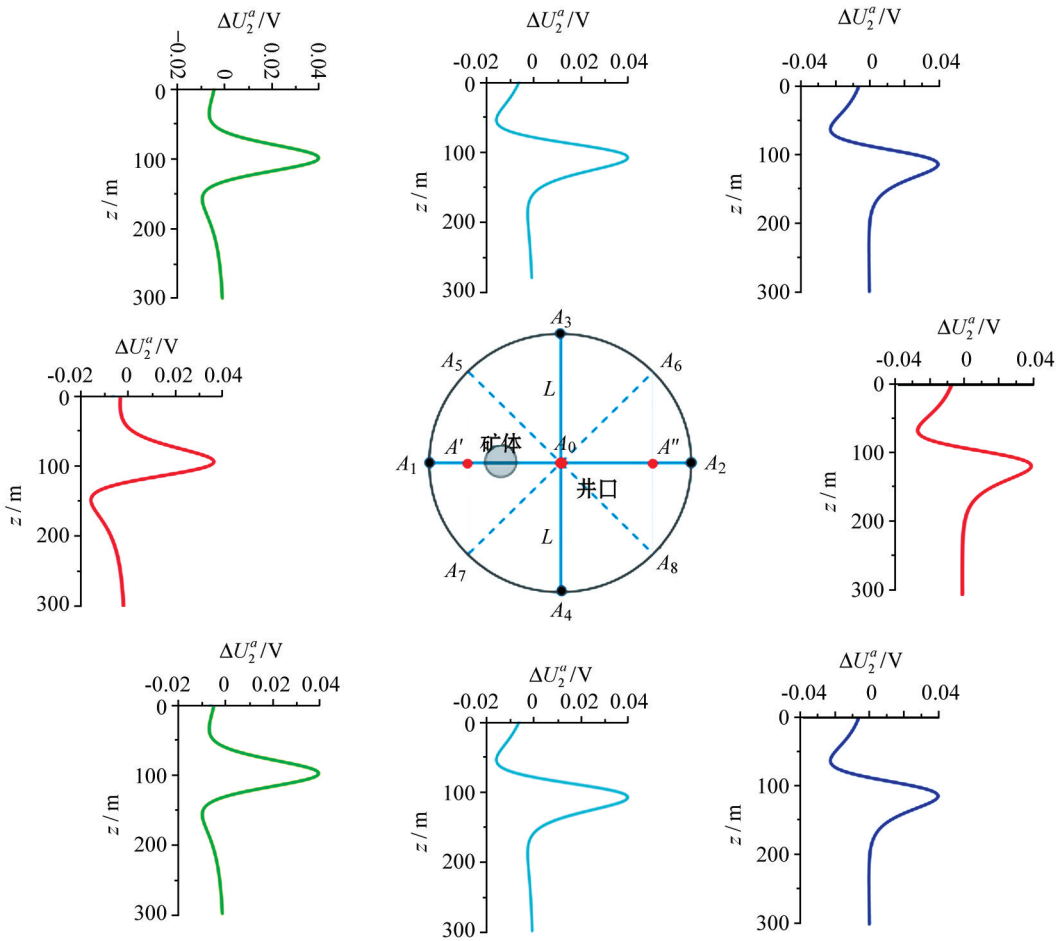


图 4 $L=200\text{ m}$ 时的八方位供电点球体二次场电位差曲线

2.2 单井板状体

主剖面供电是关于板状体研究里最基础的切入点,因此依然遵循球体的研究思路,即:将图 2 中球形矿体模型变为板状体。图 5 为计算得到的 $L=200\text{ m}$ 时得到的不同产状二次场电位差曲线。

1) 主方位($L=200\text{ m}$)特征曲线异常明显,幅值比反方位要大,板在井轴上的投影都落在主方位 ΔU_2^a 曲线的正异常区域内。当板延伸有限时,主方位的 ΔU_2^a 曲线基本是上正下负的“反 S 形”。当板无限延伸时,向井倾斜板(板尾近井)的特征曲线仍

为“反 S 形”,而直立板状体和离井倾斜板状体(板顶近井)除外,曲线呈“正 S 形”。

2) 反方位($L=-200\text{ m}$)特征曲线异常减弱,这是因为对于板状体的极化强度减弱,曲线异常幅值减小,对于所有的产状的板状体特征曲线形态都是上负下正的“正 S 形”。可以根据特征曲线的幅值强弱和符号变化特征来推断矿体的方位。

3) 板状体延伸越大,主方位上的特征曲线正异常区沿其延伸方向伸展也越大。延伸很大的板状体曲线形态主要由其近端决定的,所以当板状体向着

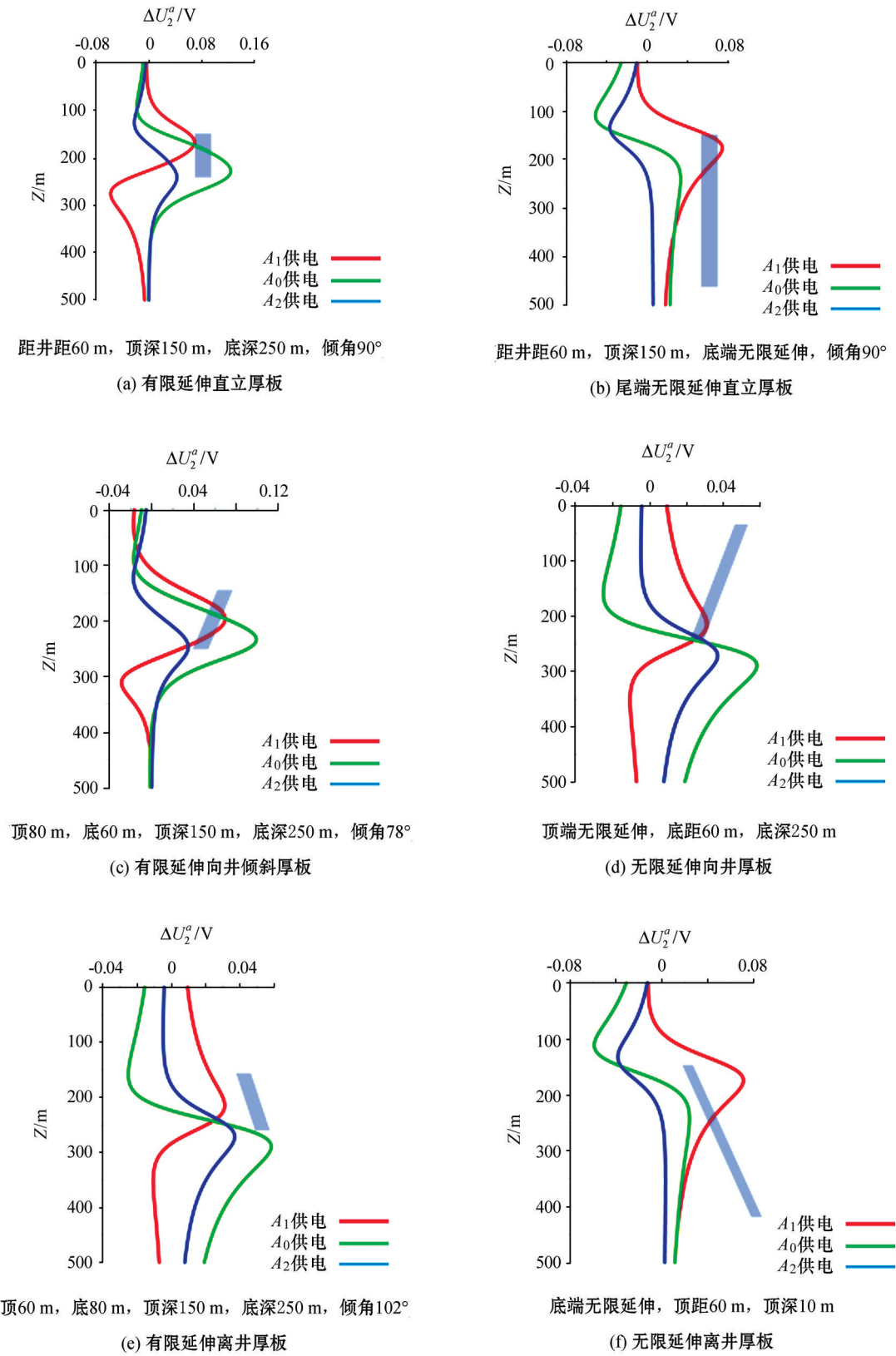


图 5 $L=200\text{ m}$ 时的不同产状二次场电位差曲线

井倾斜时(板尾近井),主方位特征曲线正极值出现在正异常区下部,离井倾斜(顶端近井)时情况正好相反,正极值出现在正异常区上部。正极值的深度位置应该与板状体近端的埋深相对应^[22-23]。

3 多井 ΔU_2^a 曲线特征

本节研究内容是上文传统单井 IP 情况下的延伸。多井是指虚拟井,是为了满足本次研究的正演模拟实验。

首先,建立多井 IP 模型(图 6),以矿体为中心,环绕其打 4 个(或 8 个)井,然后,分别以每个井为观测所在位置来总结其规律。

无论是球体还是板状体,初步的研究思路是以

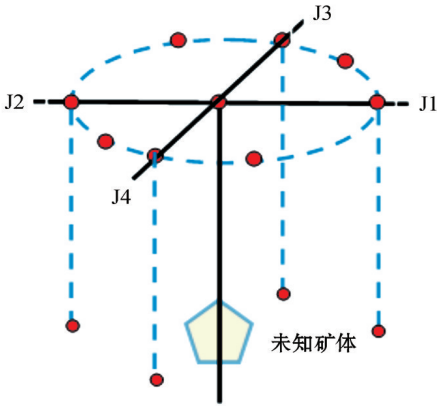


图 6 多井情况下矿体的井口布置示意

“正井口—矿体—反井口”为主线,采用同一个对应剖面来进行研究,这样使得所在同一个剖面上的测量参数有对应性。除此之外,还应注意将环绕矿体四周的 4 个(或 8 个)钻井看作是以矿体中心在地面的投影点为圆心,以 d 为矿体距井距离而均匀分布。为了方便起见,将规则几何体分为球体和板状体两类,且各个钻井的距井距离 d 保持不变。

3.1 球状矿体激电特征曲线

关于多井环绕矿体的激电问题,关键是要找准主剖面,此时需要对每一个井进行不同供电距离多次测量,进行模型分类,考虑到球体的各项同性,则激电特征曲线只研究某一个剖面上不同供电距离的模型。多井球情况下主剖面的程序参数设定见表 1,计算结果见图 7。

表 1 多井球主剖面在不同供电距离下的程序参数

	$L>d$	$L=d$	$L<d$
中心埋深/m	100	100	100
距井距离/m	50	100	100
供电距离	100/0/-100	50/0/-50	30/0/-30
梯度极距/m	5	5	5
测量范围/m	0~300	0~300	0~300

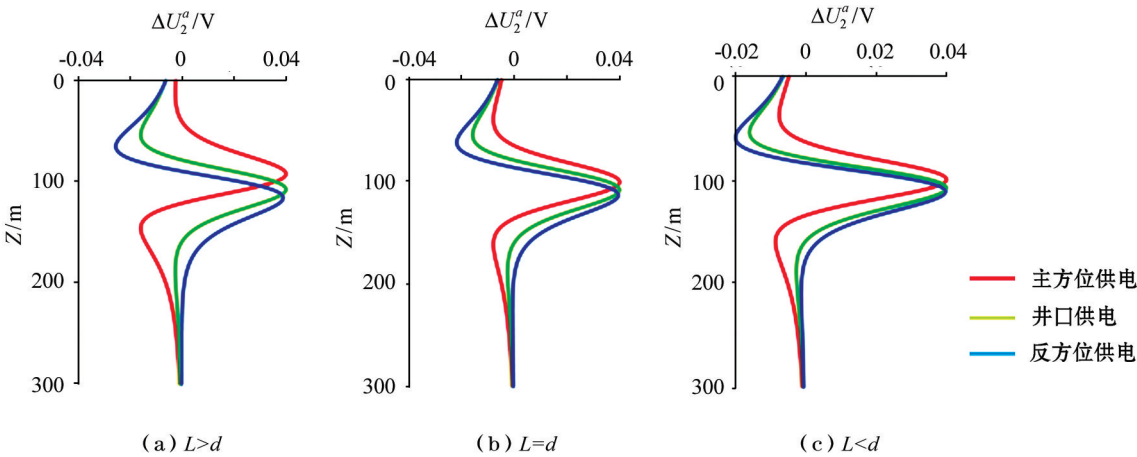


图 7 多井情况下($L>d$)、($L=d$)、($L<d$)时的二次场异常曲线

在 $L>d$ 情况下,可以看出主方位供电的曲线呈“反 S 形”,井口供电与主方位曲线关于 x 轴对称,反方位曲线呈现“正 S”形,特征分辨明显。

在 $L=d$ 情况下,主方位供电点 A_1 刚好位于球体中心的正上方,主方位激电曲线的辨识度较 $L>d$ 的情况下降低。当主方位供电点 A_1 位于球体中心点正上方时,此时的曲线辨识度较好。主方位的红色曲线由于二次场激电垂直向下,故关于 $z=100\text{ m}$ 对称;而随着供电点向反方位移动,曲线逐渐呈现“正 S”形,反方位供电比井口供电明显。

$L<d$ 情况下的辨别度是三种中最差的,因此实际工作中最好不要这样布置供电电极的位置,使供电距离 L 大于等于矿体距井距离 d 。

综上,在多井条件下,供电电极距 L 最好是大于或者等于矿体的距井距离,方便探测。这样的施工方式必定要使供电方式多样化和数据多样化,才能约束测井结果的不确定性。

3.2 板状体激电特征曲线

在多井情况下,板状体的供电电极布置方位与球体是一致的(图 8),但是考虑到板状体的各相异

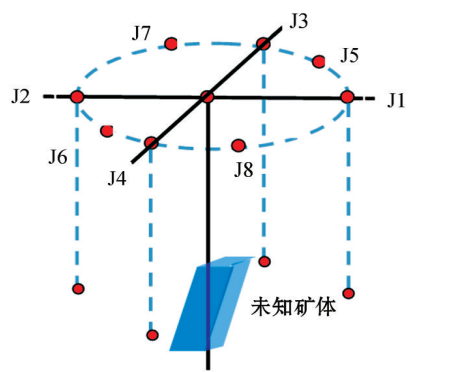


图 8 多井情况下板状体的井口布置示意

性(板长、板厚、板倾斜、延伸等的差异),不同方位的钻井所测得的激发极化特性曲线比球体情况复杂得多。由于前面一节探讨的供电电极距条件,因此设定的参数为 $L>d$ 。

为了方便计算该模型,使其在东西方向倾斜(对于 J1 为离井倾斜,对于 J2 为向井倾斜),借鉴单井情况下板状体的激电问题。同样,其中红色曲线代表主方位供电,绿色曲线代表井口供电,蓝色曲线代表反方位供电。

3.2.1 正剖面(J1—中心投影点—J2)

为了很清楚地进行对比,将与矿体中心点在地面上的投影连线的对应矿井作为一个剖面(图 9)。需要注意的是板状体的倾斜方向对于 J1 是离井方向,而对于 J2 是向井方向,这样就可以和单井情况下的板状体激发极化特性曲线相结合起来了。表 3 给出了 J1、J2 的主剖面供电参数,图 10 为 2 口井的特征曲线。

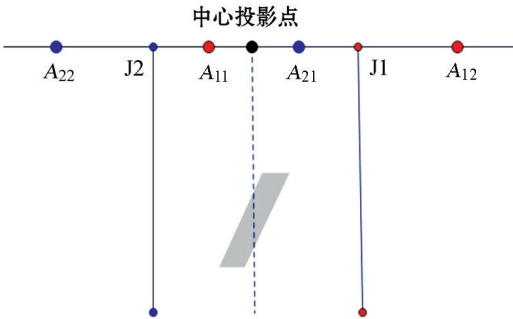


图 9 多井板状体正剖面示意(J1—中心投影点—J2)

表 3 J1、J2 的主剖面供电参数

井名	供电距/m	顶端埋深/m	底端埋深/m	顶端井距/m
J1	200	150	250	60
2	200	150	250	80
井名	底端井距/m	探测深度/m	板体状态	板厚/m
J1	80	500	离井	10
J2	60	500	向井	10

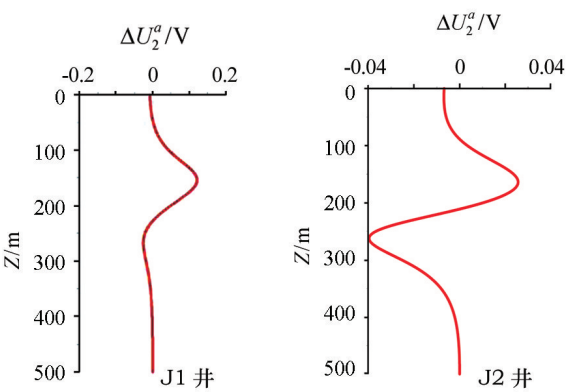


图 10 J1、J2 特性曲线

3.2.2 副剖面(J3—中心投影点—J4)

因为板状体在副剖面上的激电等效几何形状为直立板状体,故可以运用单井情况下的板状体曲线进行模拟(图 11,图 12)。J3 和 J4 的主剖面供电参数为:供电距 $L=200\text{ m}$,顶端埋深 $h_1=150\text{ m}$,底端埋深 $h_2=250\text{ m}$,顶端井距 $d_1=70$,底端井距 $d_2=70\text{ m}$,探测深度 $z=500\text{ m}$,板体直立,板厚 10 m 。

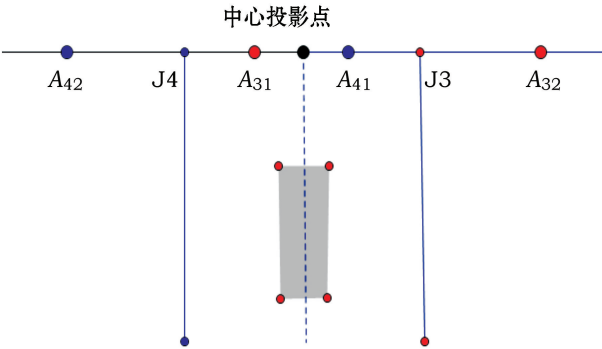


图 11 多井板状体副剖面示意(J3—中心投影点—J4)

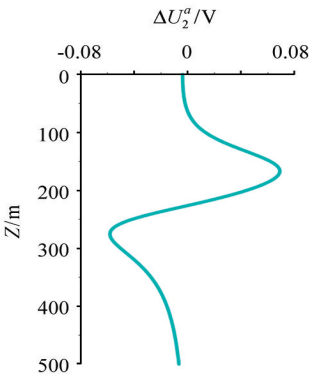


图 12 J3 和 J4(竖直)特征曲线

3.2.3 斜剖面(J5—中心投影点—J6、J7—中心投影点—J8)

首先要说明的是,研究 J5、J6、J7 和 J8 井的激电曲线情况需要考虑到三维板状体,这将会比二维

板状体要更加复杂。解决这种三维几何体的模型其实最好的方法是运用数值模拟的方法来进行处理,但是矩阵理论过于复杂,因此寻求另外一种比较简便的方法来阐述,即投影法。

由于一个三维倾斜板状体在竖直非垂直剖面的投影倾向均与原来一致(图 13),因此可以采取定性

的思维来解决斜剖面的模型问题。需要说明的是,由于对称性,其对应的 2 个斜剖面(J7—中心投影点—J6,J7—中心投影点—J8)的情况是一样的,这次一起进行阐述。

由图 14 比较可知,斜剖面(J5—中心投影点—J6,J7—中心投影点—J8)情况下,其板状体模型倾向不变,倾角介于直立与倾斜之间。

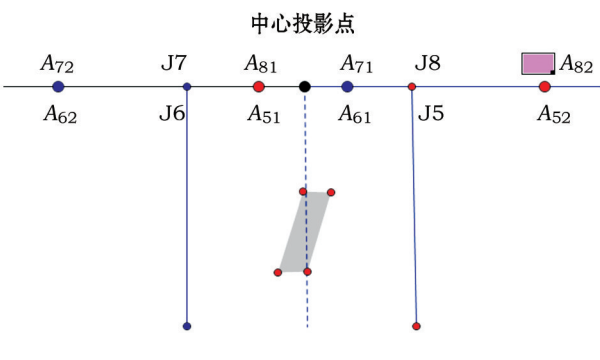


图 13 板状体在斜剖面方位的投影模型

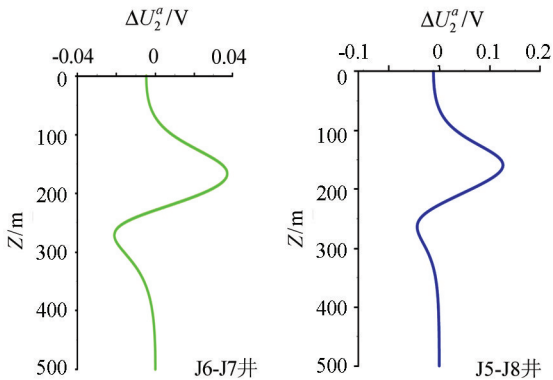


图 14 J6—J7、J5—J8 特征曲线

3.2.4 小结

1)对于中心矿体为板状体的多井问题,不能等同于球体来解决。因为板状体的各项异性,使得各个方位的井口所测得的激电曲线的影响要素与距井距离 d 、供电点空间分布和板状体的产状有关。

2)从图中的曲线可以很清楚地看出矿体的倾斜方向,曲线最大极值的绝对值表示板状体的近井端,并且应该注意特征曲线随着矿井方位的不同而产生有规律的变化。

3)如果板状体是向上或者向下无限延伸,则可以根据单井情况找出规律,无限延伸段收敛于零值。

4 不同方位激电曲线特征及适用条件

多井情况下判别矿体空间位置的首要任务是确

定矿体所在方位,最后划定主方位后可采用多种切线法确定矿体的距井距离和中心埋深^[24-27]。如何准确判定矿体的所在方位将对后续解释工作至关重要。

4.1 矿体不同方位曲线特征

矿体的激电特征曲线受矿体几何分布的影响。对于各向同性的球形矿体,可以通过最大幅度的“反 S”形曲线确定矿体主方位,而对于情况较为复杂的各向异性的板状矿体,需要重点讨论。

该板状体走向为正南北方向,倾向正西,其顶、底埋深分别为 150、250 m,矿体中心距离各个方位井为 50 m(图 15)。

从模拟图像可以看出,极大值点和极小值点分别反应矿体顶端和底部深度,受到供电电流方位影

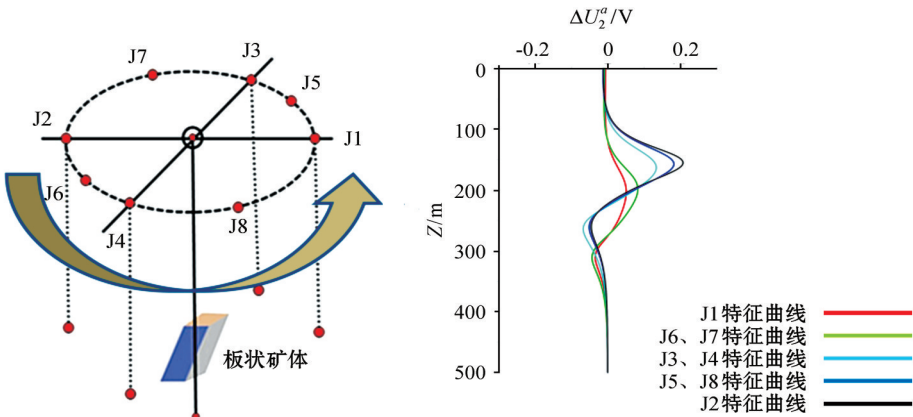


图 15 多方位井的特征曲线

响,极大值点深度即为板状体顶端深度,极小值点深度比真实值略大。特征曲线从 J2 开始,逐步过渡到 J6/J7, J3/J4, J5/J8,最后到 J1,其极小值幅值异常逐渐增大,极值点深度位置略微升高,极大值幅值异常也逐渐增大。通过这一点可以总结出判断板状体空间方位的方法,即:从特征曲线的极大值和极小值相对大小以及异常区域平缓程度来进行:

- 1) J2 井为主剖面板状体向井方位,激电特征曲线正值区域较为平缓;
- 2) J6/J7 井为斜剖面向井方位,激电特征曲线正值区域平缓,极大值点深度变浅;
- 3) J3/J4 井为板状体走向方位,激电特征曲线极小值绝对值等于极大值;
- 4) J5/J8 井为斜剖面离井方位,激电特征曲线极小值绝对值略小于极大值;
- 5) J1 井为主剖面板状体离井方位,激电特征曲线极小值绝对值明显小于极大值。

因此,在地-井方式激电施工时,应该注意找出极值点特征最大的特征曲线,即可确定主剖面方位。对于其余方位井特征曲线,可以加以修正判断出矿体空间位置。

4.2 适用条件

- 1) 确定矿体的与钻孔的相对位置,注意虚拟多钻孔的特征判别。
- 2) 注意供电电极的施工布局,其不同方位和供电距离将会直接影响激电特征曲线形态。
- 3) 确定主剖面后,先进行井口测量,若激电曲线特征满足预期再进行多方位确认观测,进而对井旁矿体的埋深、距离、见矿深度及延伸方向进行判断。此次用球体和板状体两个简单模型进行正演模拟,可作为很好的正演拟合模型,因此结合实测数据可以对相应的矿体进行反演解释。

5 结语

1) 地-井方式激电在井中物探领域有广阔的应用前景,能够很好地判断矿体所在方位、球形矿体中心埋深深度和板状体近井端埋深深度。本研究从简单的规则模型出发,模拟出了不同供电方位、不同矿井方位的激发极化特征曲线,对于辅助方位的激电特征情况,采用几何投影的方法,最后通过不同情况下的激电特征曲线对矿体的产状进行预判,再结合实际的地质、钻孔和物探资料,用多种手段联合分析矿体的赋存情况。

2) 对于井旁的未知矿体,由于其钻孔相对于矿体的方位待定,因此可以通过研究环绕矿体的多个

虚拟方位来对其特征曲线进行比较分析,从而对其空间分布进行判断,最终为实际勘探提供理论借鉴的依据。

3) 通过研究,对前人的有关成果进行了一系列验证,在地-井方式井中激电的正演模拟计算中,主剖面(正方位—井口—反方位)上所得的曲线特征符合预期情况。值得说明的是,球形矿体特征曲线形态较为明显,而无限延伸板状体的特征曲线因其一端具有收敛的趋势同样能够容易被甄别,但是本次研究表明特征曲线只能对于不同倾向的板状体敏感,而对于同一倾向情况下不同倾角的特征曲线异常形态不明显。研究还表明,在实际现场勘探中应尽可能用较多数量且分布均匀的供电点对地下矿体进行施工。

4) 对于非规则矿体的激电特征曲线情况,建议采用有限元的思想来处理,作为下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 黄智辉.井中激电地-井方式方位测量资料解释问题的探讨[J].物探与化探,1979,1(3):22-30.
- [2] 吴至善.井中激发极化法的理论与实践[J].长春地质学院学报,1976(4):86-123.
- [3] 吕玉增.地-井、井-地 IP 三维快速正反演研究[D].湖南:中南大学,2008.
- [4] 吕玉增,阮白尧,彭苏萍.地-井方位激电观测异常特征研究[J].地球物理学进展,2012,27(1):201-216.
- [5] 张国艳,吕玉增,刘正,等.地-井断面 IP 正演模拟研究[J].工程地球物理学报,2013,10(1):46-50.
- [6] 施国良,张国雄.宏观场论[M].武汉:中国地质大学出版社,1987.
- [7] 张国艳.地-井激发极化法有限元正演模拟与反演成像[D].广西:桂林理工大学,2012.
- [8] 周峰,潘和平,吴国平,等.井中激电地-井方式井旁球体正反演[J].物探与化探,2008,32(3):321-325.
- [9] 周峰,潘和平,文国军,等.基于有限差分的井中激发极化三维正演[J].电波科学学报,2010,25(4):785-792.
- [10] Pan H P, Meng Q M. Surface to borehole induced polarization measurement data inversion with optimized scale transformation BFGS method[R]. 8th International Conference on Natural Computation, 2012.
- [11] Barbara Ina Anderson. Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response[D]. Western Connection State University geboren te Danbury, Connecticut, USA, 2001.
- [12] Dey A, Morrison H F. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional strctures[J], 1977(10).
- [13] Minsley B J. Modeling and inversion of Self-Potential Data[J]. B S Applied Physics, Purdue University, 1997.
- [14] Walt J R, Gruszka T P. Resistivity and polarization response for a borehole model [J]. Transactions on geoscience and remote

sensing, GE-25, 1987(3).

[15] Everett M E, Badea E A, Shen L C. 3-D Finite element analysis of induction logging in a dipping formation[J].Transactions on geoscience and remote sensing, 2001, 39(10).

[16] Spitzer K, Chouteau M. A DC resistivity and IP borehole survey at the case berardi gold mine in northwestern [J].Geophysics, 2003 (68):453-463.

[17] Bevc D, Morrison H F. Borehole-to-surface electrical resistivity monitoring of a salt water injection experiment[J].Geophysics, 1991, 56:769-777.

[18] Slater L, Binley A M, Daily W, et al. Cross-hole electrical imaging of a controlled saline tracer, injection[J].Journal of Applied Geophysics, 2000, (44):85-102.

[19] 潘和平, 马火林, 蔡柏林, 等. 地球物理测井与井中物探[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[20] 蔡柏林, 黄智辉, 谷守民. 井中激发极化法[M]. 北京: 地质出版社, 1983.

[21] 吴冰. 地-井激电法探测盲矿体的数字模拟研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.

[22] 潘和平, 马火林, 祁明松, 等. 井中激发极化法模型实验设计[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(1):31-33.

[23] 潘和平, 马火林, 祁明松. 井中物探教学内容探讨与改革[J]. 中国地质教育, 2009, (2):83-87.

[24] 潘和平. 井中激发极化法在矿产资源勘探中的作用[J]. 物探与化探, 2013, 37(4):620-626.

[25] 宋振岭. 井中激发极化法在金属勘查中的应用[J]. 河南地质, 1992, 10(1):64-69.

[26] 王耀升, 刘斌. 井中激电法在内蒙古查干布拉根银铅锌多金属矿的应用[J]. 矿产勘查, 2013(4):453-457.

[27] 高长荣. 井中激电在西霞矿区的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(S):98-101.

The application of the surface-to-borehole induced polarization method to determining the spatial location of the orebody

GUO Bo, PAN He-Ping, YANG Huai-Jie, YAO Jing

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

Abstract: The surface-to-borehole IP method, as an actually widely used ore exploration means, has aroused a lot of interest among geologists both in China and abroad. In this paper, the authors probed into the IP effects of the surface-to-wells IP method on the regular orebody beside the well so as to solve the problem of predicting the exploration of the orebody beside the well and the blind orebody. In this paper, the authors mainly studied the spherical and the platy orebodies of different IP modes on the generated curve, and then explored multi-well cases. Finally, the authors discussed how to determine the spatial location of the orebody based on multi-wells law. The results obtained by the authors are helpful to the related research fields. In conclusion, reasonable construction method and proper quantity of observed data have positive effect on the prognosis of the orebody.

Key words: surface-to-borehole style; borehole induced polarization; deep prospecting; the rules of geometry

作者简介: 郭博(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地球物理测井与井中物探。
通讯作者: 潘和平(1953-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为地球物理测井与井中物探。