

用地—井工作方式的三极 梯度法寻找小块油气藏

张天伦* 张伯林 聂 荔

(西南石油学院)

摘 要

张天伦,张伯林,聂荔.用地—井工作方式的三极梯度法寻找小块油气藏.石油地球物理勘探,1997,32(4):520~531,574

本文通过水槽模型模拟实验,提出了基于直流电阻率测试原理的地—井工作方式的三极(A极、M极和N极)梯度装置的测量方法。所谓地—井工作方式的三极梯度法,就是把一个供电电极A置于探井附近的地面上,而将另一供电电极B布置在“无穷远”处(约为井深的5~10倍),两个测量电极M、N保持固定距离在探井中逐点移动,测量出视电阻率值。该方法可根据油气藏的高阻特性,采用梯度异常分析,探测油气藏方位及边界。

实验结果证明:它不仅能够有效地消除来自井筒及地层中的各种干扰,而且较井—地工作方式的三极梯度法更有利于突出小块油气异常,可用于寻找分布面积仅为零点几到几个平方千米的小型高阻油气藏。在开发阶段可用来确定采空区附近的残余油及其赋存方位。

关键词 直流电阻率法 梯度 电阻率 水槽模型 模拟实验 油气藏

ABSTRACT

Zhang Tianlun, Zhang Bolin and Nie Li. Small reservoir discovery using ground-borehole trielectrode gradient method. OGP, 1997, 32(4): 520~531, 574

Ground-borehole trielectrode gradient method based on DC resistivity detection principle was put forward after simulation experiments in water trough. In this method, power supply electrode A is placed on the ground nearby a borehole; power supply electrode B is planted at "infinitely far" point (the distance is about 5~10 times borehole depth); and two observation electrodes M and N, whose distance keeps constant, move point by point in the borehole to detect apparent resistivity. People can make gradient anomaly analysis from the high resistivity of reservoir to locate a hydrocarbon reservoir.

Experimental results show that the new method avoids various noises from borehole and formations, and highlights small reservoir anomaly better than usual borehole-ground trielectrode gradient method. The new method can be used to find even the high-resistivity hydrocarbon reservoir that is much smaller than 1km²; and in the development phase of an oil field, it can be adopted to locate the residual

* Zhang Tianlun, Exploration Department, Southwest Petroleum College, Nanchong City, Sichuan Province, 637001
本文于1996年8月7日收到。

reservoir nearby the interval where oil or gas has been exhausted already.

Subject heading: DC resistivity method, gradient, resistivity, water trough model, simulation experiment, hydrocarbon reservoir

引言

作为直流电阻率法中的一种新型勘探方法——井—地工作方式的三极梯度法的原理及工作方法已在文献 1、2、3 中有过系统的论述,这里就不再重复了。大量水槽模拟实验结果表明,该方法及其配套措施能够有效地消除各种天然及人为因素的干扰,最大限度地突出具有一定规模的高阻油气藏异常。但由于该方法是将测量电极置于远离油气层的地面进行测量,对于那些埋藏较深、面积只有零点几个平方千米的小块油气藏,梯度异常 G_e 将会变得十分微弱, G_e 曲线的极值点将不再与油气藏的边界保持良好的对应关系。在这种情况下,需要改变电极的布置方式,即采用地—井工作方式(或井—井工作方式)的三极梯度法。

如图 1 所示,所谓地—井工作方式的三极梯度法,就是把一个供电电极 A 置于探井附近的地面上,而将另一供电电极 B 布置在“无穷远”处(约为井深的 5~10 倍),两个测量电极 M 和 N 保持固定距离在探井中逐点移动,测量视电阻率,这就构成了地—井工作方式的三极(包括 A 极、 M 极和 N 极)梯度装置测量法,简称地—井工作方式的三极梯度法。

由于地—井工作方式的三极梯度法是把测量电极放入探井中,更靠近油气层,有利于最充分地显示小块高阻油气层对电场的畸变作用(见图 1),达到突出油气异常的目的。

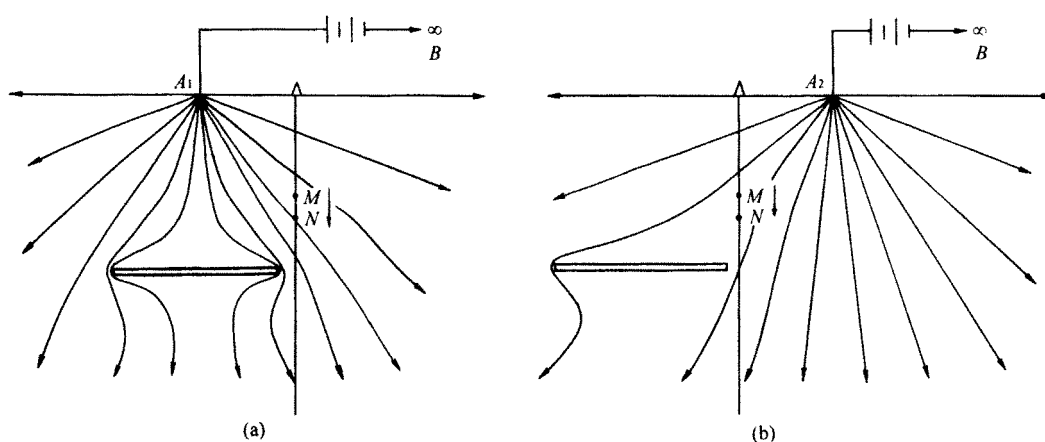


图 1 地—井工作方式的三极梯度法原理示意图

原理

与井—地工作方式的三极梯度法一样,地—井工作方式的三极梯度法同样面临两大问题:一是如何有效地消除干扰(包括井筒干扰和来自地层中的干扰);二是如何有效地突出油气异常。本文解决这两大问题的基本思路和原理与井—地工作方式类同^{[1]、[2]、[3]}。

如图 2 所示,在“探井”两侧布置供电电极 A_1 和 A_2 ,由 A_1 供电(测量电极 MN 沿探井移动),测得 ρ_s^1 ; A_2 供电,测得 ρ_s^2 。图中,由于 A_1 比 A_2 更靠近“油气藏”,高阻“油气藏”对 A_1 电场的畸变影响必然大于它对 A_2 电场的畸变影响,而且这种影响的差异还将在“油气层”深度上达到一个极大值,如图 1 所示。

电阻率法的基本公式为

$$\rho_s = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为测量电极 MN 所在测点处的视电阻率; ΔV_{MN} 为该点 MN 两电极之间的电位差; I 为 AB 供电线路的电流强度。

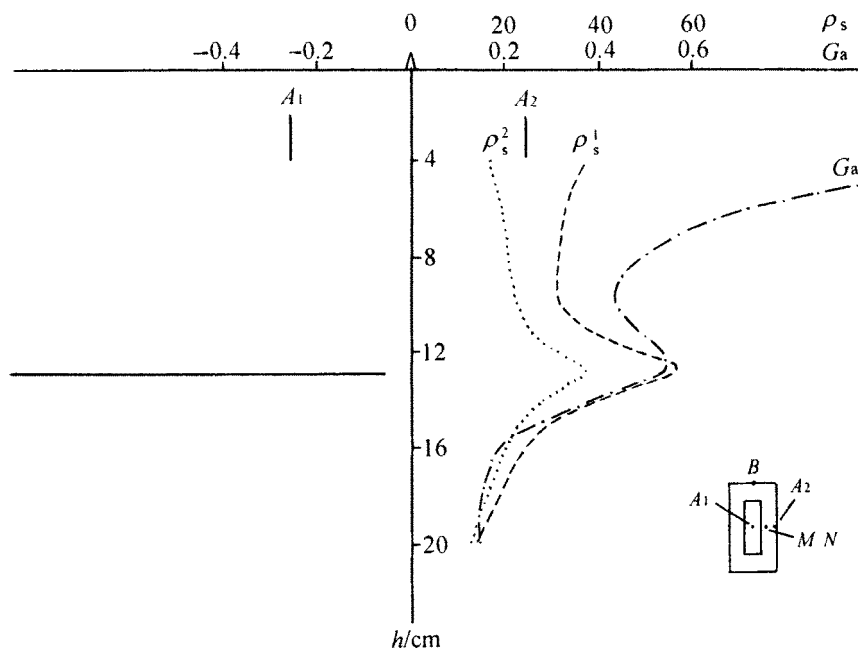


图 2 当“探井”位于具中等面积的“油层”中部外侧 1cm,供电电极 A_1 和 A_2 对称地位于“探井”两侧时的地—井方式垂向综合剖面图

根据微分形式的欧姆定律将上式改写为

$$\rho_s = K \cdot \frac{j_{MN}}{I} \cdot \rho_{MN} \cdot \overline{MN} \quad (2)$$

式中: j_{MN}/I 为单位供电电流在测量电极 MN 处产生的电流密度; ρ_{MN} 为测量电极 MN 处的介质综合电阻率; \overline{MN} 为两测量电极之间的距离。

如果设 A_1 供电时,式(2)中相应各量分别为 K_1 、 $(j_{MN}/I)_1$ 、 ρ_{MN}^1 、 \overline{MN}_1 和 ρ_s^1 , A_2 供电时为 K_2 、 $(j_{MN}/I)_2$ 、 ρ_{MN}^2 、 \overline{MN}_2 和 ρ_s^2 ,并假设 A_1 、 A_2 至探井的距离相等,则有 $K_1 = K_2$ 、 $\rho_{MN}^1 = \rho_{MN}^2$ 、 $\overline{MN}_1 = \overline{MN}_2$ 。如果下半空间介质完全均匀或成层均匀,显然应有 $(j_{MN}/I)_1 = (j_{MN}/I)_2$,这时在不同方位供电所测得的视电阻率(ρ_s)曲线应完全重合。

如果在下半空间存在一有限延伸高阻体,且相对探井结果呈不对称形态(如图 2 所示),则有 $(j_{MN}/I)_1 \neq (j_{MN}/I)_2$ 。两者之差异将随着测量电极 MN 向有限延伸高阻体的靠近而逐渐增

大,并在该高阻体深度上达到极大值,以后随着测量电极 MN 远离该高阻体,两者之差异又逐渐减小。由式(2)可知 ρ_s^1 和 ρ_s^2 之差异随井深的变化具有上述同样的规律。利用这种变化规律将 ρ_s^1 和 ρ_s^2 代入,得如下公式

$$G_a = \frac{\rho_s^1 - \rho_s^2}{\rho_s^2} \quad (3)$$

式中 G_a 称梯度异常。显然梯度异常曲线(图2中点划线)也必然在油气层深度上出现一极大值,从而使油气异常得以突出。

与井一地工作方式一样,式(3)不仅能有效地突出油气异常,而且还会使各种井筒干扰(如井径、井液及其渗透程度的变化引起的干扰,以及岩层电阻率的正常变化所引起的非油干扰)自动消失,并能有效地消除由局部裂隙及孔隙水矿化度的变化所引起的介质电阻率变化而产生的干扰,以及其它局部不均匀体的干扰。这一点可以结合式(2)和式(3)来加以说明。

如上所述,对 ρ_s^1 和 ρ_s^2 来说,它们所包含的 ρ_{MN} (它是井径、井液及井筒附近岩层电阻率的综合反映)和 \overline{MN} 是相同的,从而将在式(3)中作为公因子被消掉。另外,引起式(2)中 j_{MN}/I 变化的因素可分为两类:一类是油气层之类的有限延伸高阻体;另一类是上述各种干扰因素。后者除岩层电阻率的正常变化外,多属局部非均匀体。当这些局部非均匀体离井筒较远时,它们对电场的影响在井筒中的反映已很微弱,不会使 G_a 曲线产生明显变化。当它们离井筒较近时,对 A_1 和 A_2 电场的影响大致相同,或使 j_{MN}/I 变化的倍数大致相等。因此,在式(3)中,这些干扰因素也可以作为公因子被消掉。这样,剩下来的只有由油气藏之类的有限延伸高阻体引起的变化不能被消掉,这正是发现油气层存在的依据和出发点。

实验结果及其分析

本文以下所列各图均是水槽模拟实验结果。文中各图右下方之小图为水槽、油层模型及电极布置平面示意图。图中外框表示水槽边界;内框表示用有机玻璃板模拟的油气层;“ $\cdot MN$ ”表示测量电极 MN 所在的“探井”位置;“ $\cdot A_1$ ”和“ $\cdot A_2$ ”分别表示前后两次供电电极 A 的位置;“ $\cdot B$ ”为“无穷远”极 B 的位置。

下列各图均为过 A_1 、 A_2 和 MN 所在探井的垂直剖面图。图中,介质为自来水,横坐标即水面, O 点即探井位置;模拟比例尺为 $1:10000$,纵横比例尺相同, MN 极间距为 1cm , A_1 和 A_2 为 2cm 长铅笔芯作成的供电电极,水平粗黑线表示有机玻璃板。在各个剖面图的三条曲线中,虚线和点线分别是 A_1 供电和 A_2 供电所测得的视电阻率 ρ_s 曲线,点划线为梯度异常 G_a 曲线。

勘探小块油气藏的实验与分析

图2是当“探井”位于具有中等面积(约相当于实际的 10km^2)的“油层”中部外侧 1cm (相当于实际的 100m),供电电极 A_1 和 A_2 对称地位于“探井”左右两侧时的垂向综合剖面曲线图。由图可见,两条 ρ_s 曲线大致同步升降,但有差异,不仅两条 ρ_s 曲线均在“油层”深度上达到极大值,而且两者之差也在该深度上达到一个极大值。将 ρ_s^1 和 ρ_s^2 代入式(3)计算后得 G_a 曲线。 G_a 曲线亦在“油层”深度上出现明显极值。

虽然 ρ_s 和 G_a 曲线都在油层深度上出现极值,但是 ρ_s 曲线的极值由于可能受到来自井筒和地层中多种因素产生的若干非油极值的干扰,使我们无法辨认出哪些极值是油层产生的,因

而也就无法利用 ρ_s 曲线来预测油气层。而通过式(3)处理后的 G_a 曲线,已把上述各种干扰基本消除干净。在一般情况下, G_a 曲线极值的出现,只与高阻油气层之类的有限延伸地质体的存在有关。利用 G_a 曲线,我们便可有效地对油气层进行横向预测。

图 2 中, G_a 曲线在“油层”深度上表现为—正向异常,根据正向异常,我们可以断定油气层应在 A_1 所在方位。反之,如果 G_a 曲线出现负向极值,则表示油气层主要位于 A_2 方位。

图 3 是当“探井”位于具小面积(约相当于实际的 1km^2)“油层”外侧 1cm ,供电电极 A_1 和 A_2 对称地位于“探井”两侧时的垂向综合剖面图。由图可见,虽然“油层”面积仅为图 2 油层的十分之一,但反映“油层”埋藏深度和赋存方位的梯度异常(G_a)的相对幅值却与图 2 大致相同。这是因为两图中,“探井”至“油层”的距离相等和 A_1 至“探井”间“油层”跨度相等,造成“油层”对 A_1 和 A_2 电场畸变作用的差异大致相等的缘故。

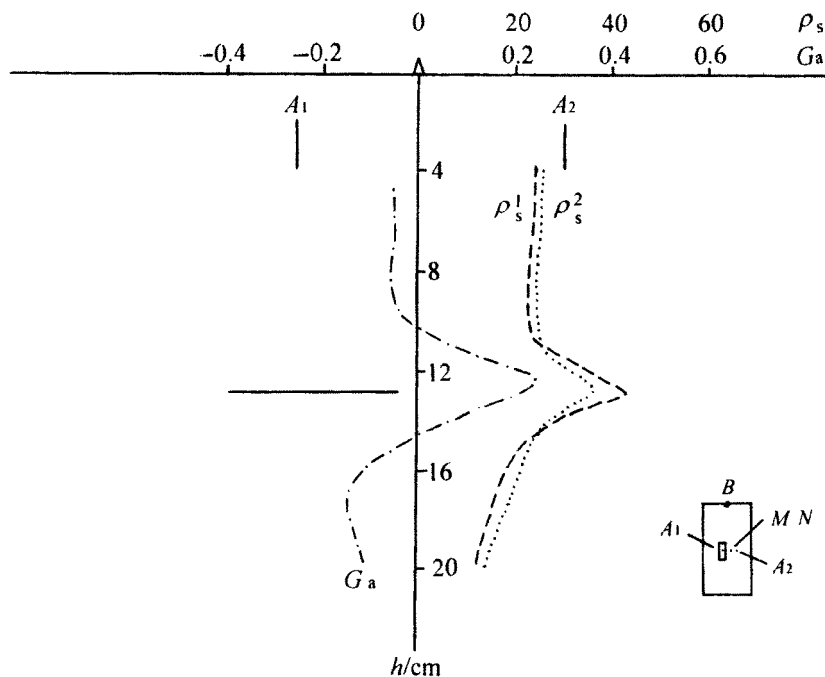


图 3 当“探井”位于具小面积的“油层”外侧 1cm ,供电电极 A_1 和 A_2 分别位于“探井”两侧时的地—井方式垂向综合剖面图

上述两个实验结果说明,用地—井工作方式的三极梯度法探测探井周围的小块油气藏是可行的。

确定了油气层的深度和赋存方位之后,可进一步探测油气层的大小及边界范围。

如图 4、图 5 所示,将 A_1 和 A_2 布置在“探井”同侧“油气藏”上方,如果供电电极下方的油气层跨径远大于 A_1A_2 之距离(图 4),则整条 G_a 曲线均为正值,且反映油层存在的 G_a 异常表现为明显的正向异常,其幅值将随着 A_1 向左移动而增大。这是因为随着 A_1 至探井之间油层跨径的增大,被油层排斥流向探井的电流就越多,于是 ρ_s^1 和 ρ_s^2 的差异随之逐渐增大。当 A_1 移至油气藏左侧边界时, G_a 异常幅值达到最大值。此后,随着 A_1 远离油气藏边界(图 5), G_a 异常幅值将随着油层对 A_1 张角的减小而减小。因此,我们有可能利用 G_a 异常幅值与 A_1 位置关系曲线的极大值位置来确定油气藏的边界位置。

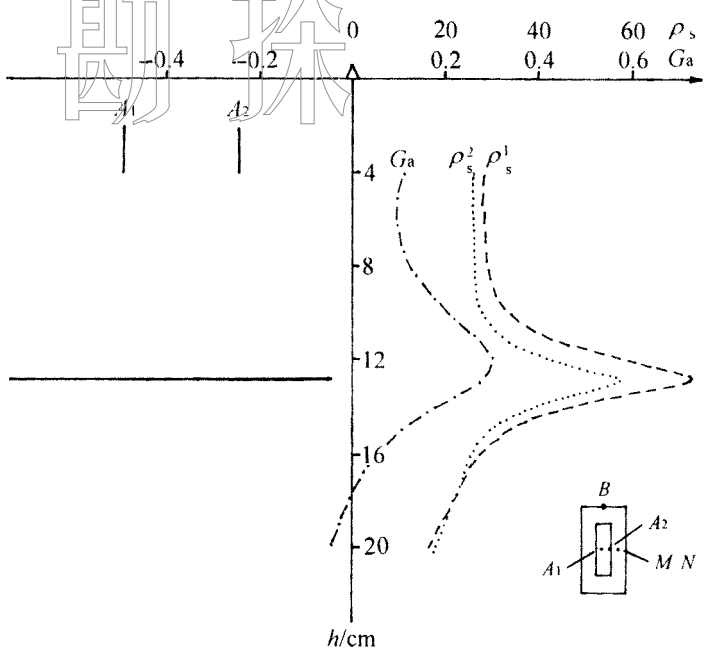


图 4 当“探井”位于具中等面积的“油层”中部外侧 1cm, 供电电极 A_1 和 A_2 位于“探井”同侧“油层”上方时的地—井方式垂向综合剖面图

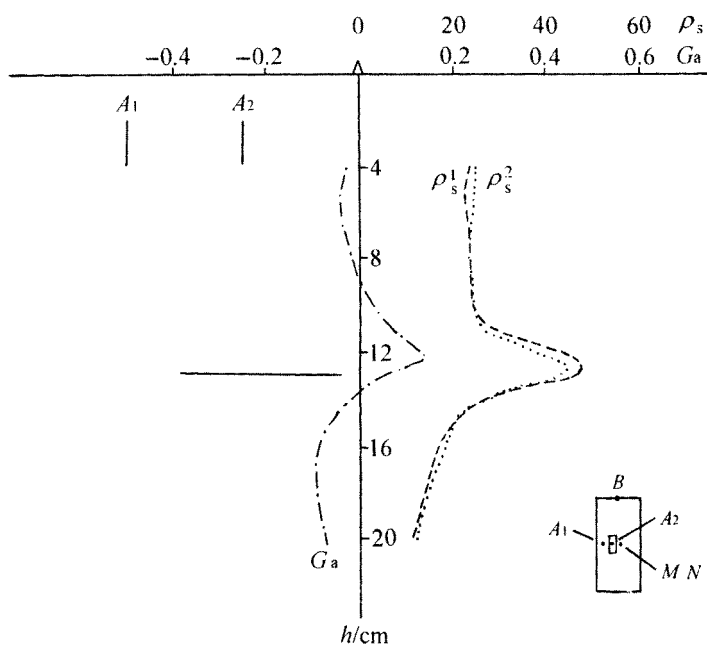


图 5 当“探井”位于具小面积“油层”外侧 1cm, 供电电极 A_1 和 A_2 位于“探井”同侧“油层”上方时的地—井方式垂向综合剖面图

比较图 2 和图 3, 两图中不仅 A_1 至“探井”的距离相同, 而且和 A_2 至“探井”的距离大致相同, 并且 A_1 至“探井”间“油层”对 A_1 的张角也相同, 虽然“油层”面积相差 10 倍, 仍然得到相对

幅值大致相等的 G_a 异常。

再比较图 4 与图 5,除了“油层”的面积不同外,其它条件均相同(包括 A_2 至“探井”间“油层”对 A_2 的张角也相同),只是由于图 5 中“油层”对 A_1 的张角明显小于图 4 中 A_1 至“探井”间“油层”对 A_1 的张角,导致“探井”中 j_{MN}/I 的减小,故图 5 中 G_a 异常幅值明显小于图 4 的 G_a 异常幅值。

当探井周围无油气层之类的高阻有限延伸地质体存在时 G_a 曲线无异常反映,如图 6 和图 7 所示。

图 8 是当“探井”位于“油气藏”翼部, A_1 、 A_2 分别位于“探井”两侧时的垂向综合剖面曲线图。将其与图 2 比较,除视电阻率异常远远大于图 2 外, G_a 异常曲线大体与图 2 相似。根据与 G_a 异常对应的强大的 ρ_s 异常,可以断定该“探井”已穿过“油气层”或与“油气层”已十分靠近。根据明显的 G_a 正向异常,可以断定该“油气层”主要位于 A_1 一侧。然后再采用移动 A_1 的办法确定油气藏边界。

图 9 示出了探井穿过水平延伸很大的高阻岩层时的情况。一般来说,只要 A_1 和 A_2 相对探井大致对称,尽管在高阻岩层部位视电阻率异常很大,但 G_a 异常并无明显异常显示。如果探井正好打在油气层的中心部位,也可能出现这种情况,这是需要注意的。

图 10 示出了复合型油气藏的实验结果。图中,“探井”从在垂向上有一定间距的三个“油层”的翼部穿过, A_1 和 A_2 分别位于“探井”左右两侧。同样,根据与 G_a 异常极值相对应的三个强大的视电阻率异常可以断定该“探井”已分别在相应的井段上穿过“油层”;与“油层”保持良好对应关系的 G_a 曲线的三个极值均表现为正向异常,这标志着三个“油层”的主要部分在 A_1 一侧。由此可见,我们也可以用地一井工作方式的三极梯度法来研究复合型油气藏。

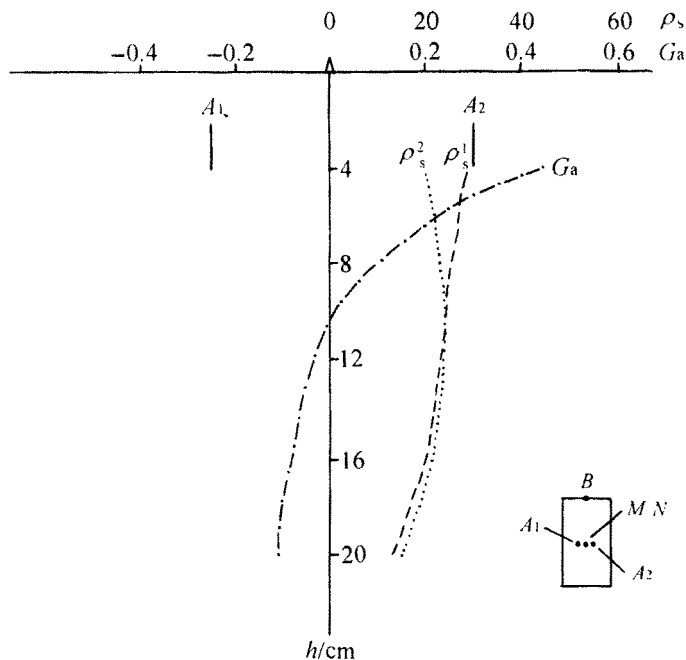


图 6 当“探井”周围无“油气层”,供电电极 A_1 和 A_2 分别位于“探井”两侧时的地—井方式垂向综合剖面图

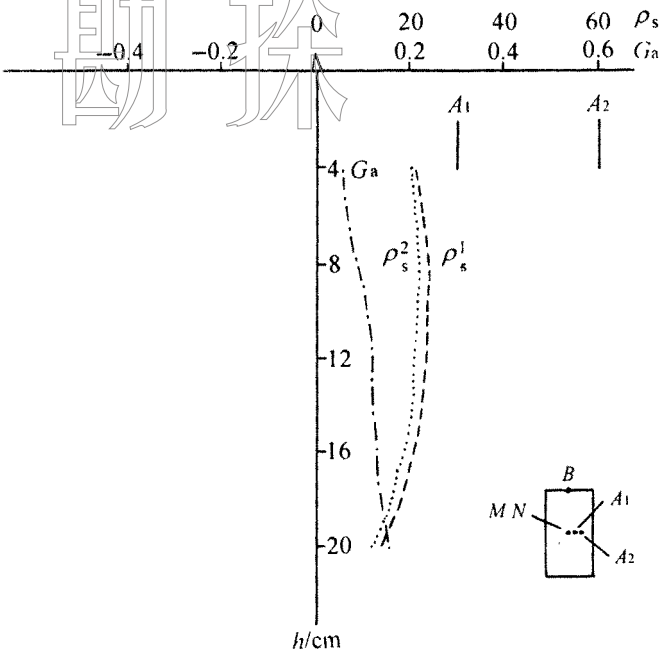


图 7 当“探井”周围无“油气层”，供电电极 A_1 和 A_2 位于“探井”同侧时的地—井方式垂向综合剖面图

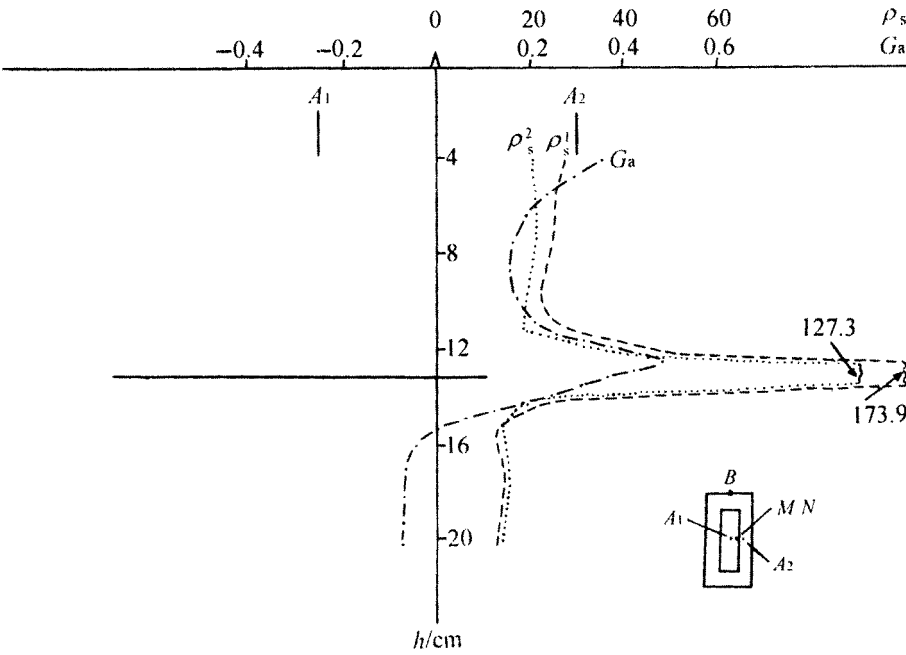


图 8 当“探井”位于“油气藏”翼部，供电电极 A_1 和 A_2 对称地分别位于“探井”两侧时的地—井方式垂向综合剖面图

图 10 中, G_a 异常曲线呈现逐渐下降的趋势, 在对应下伏“油层”的部位, 异常幅值依次减小。这是由上覆“油层”对电场的屏蔽作用引起的。

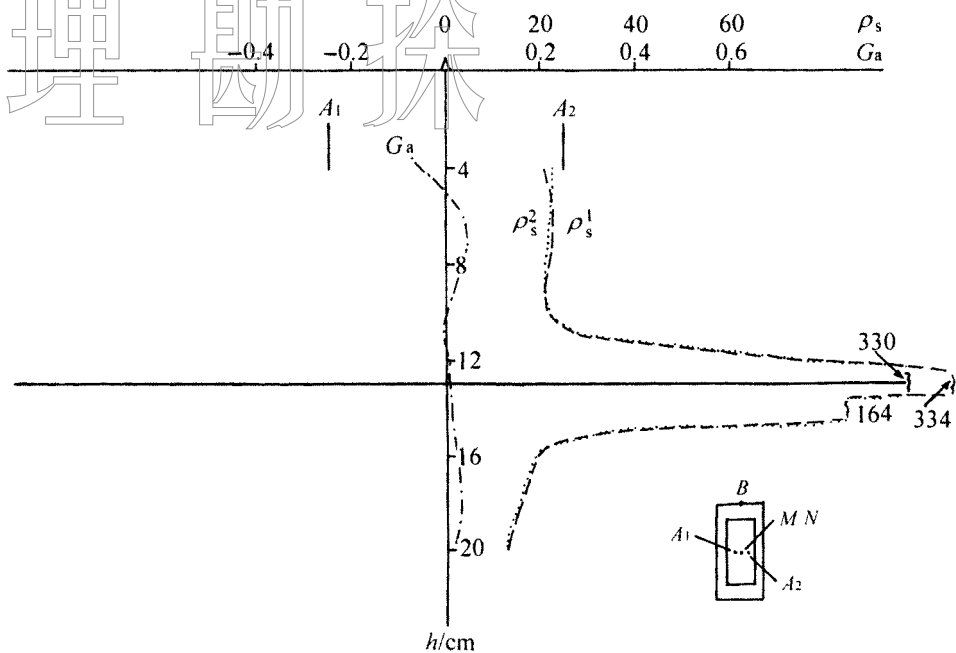


图 9 当“探井”穿过水平延伸很大的高阻“岩层”，供电电极 A_1 和 A_2 对称地位于“探井”两侧时的地—井方式垂向综合剖面图

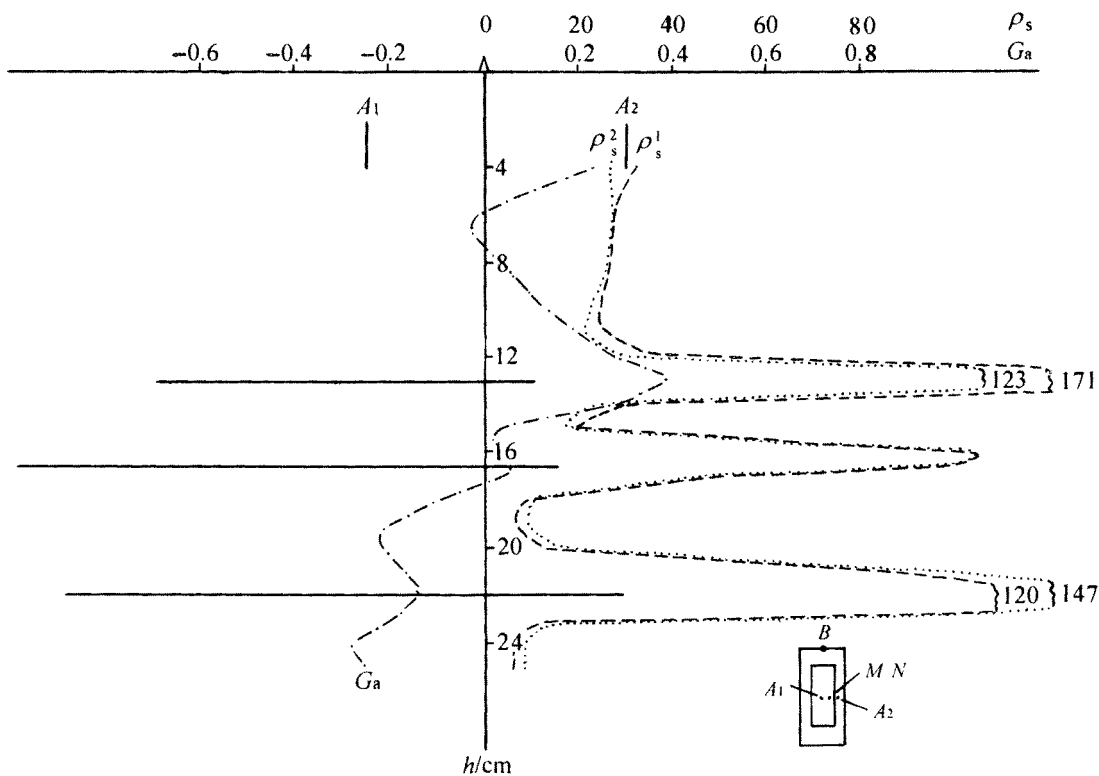


图 10 当“探井”穿过复合型“油气藏”翼部，供电电极 A_1 和 A_2 分别位于“探井”两侧时的地—井方式垂向综合剖面图

残余油位置的确定

一般来说,老油田的残余油的分布是狭小而零乱的,在这种情况下,更需要与地一井工作方式的三极梯度法配合应用。

图 11 和图 12 即是模拟在老油田上采用井一地工作方式的三极梯度法测得的 G_a 异常曲线簇综合剖面图。图中用三条 6cm 宽的窄条状三层板模拟残余油。图中各曲线上的数字表示相应曲线的编号。如 20-22,表示该条 G_a 曲线是用供电电极下端水深分别为 20cm 和 22cm 的两条 ρ_s 曲线代入式(3)得到的。由图可知,前者供电电极正好在“油层”上方;后者供电电极正好在“油层”下方。

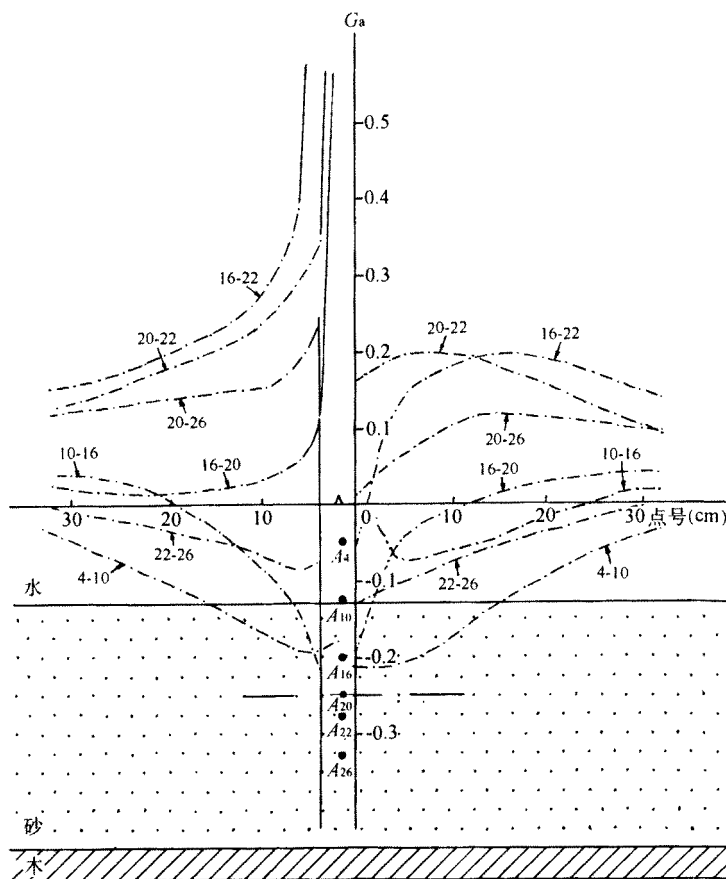


图 11 当“钻井”从“老油田”中部“残余油层”穿过时的井一地方式 G_a 异常曲线簇剖面图

图 11 是“钻井”穿过“油层”的情况描述。由参考文献可知,如果图中“油层”是整装的,则 20-22 号 G_a 曲线的极值应与该“油层”的边界位置相对应;但这里却由于采空区漏电影响,使得 20-22 号曲线(右支)极值模糊,且不再与“油层”边界对应。根据该图各曲线的变化规律仍然可以断定,该区的“残余油”主要分布在“钻井”右侧,而且可以看出,至少在 16cm 以上是无“油”的,“油”主要分布在 20~22cm 的深度上。对油气藏的进一步研究就需要配合地一井工作方式或井一井工作方式的资料来解释。

图 12 是“钻井”从采空区(或天窗)穿过时的井一地方式 G_a 曲线簇综合剖面图。由图可见,

各条曲线均无明显极值,表示该井周围的“油”已确实采空。但根据曲线总体变化规律可以断定,该区至少在16cm以下尚有较多“残余油”分布,而且主要分布在“钻井”左侧。对残余油的进一步研究也要与地—井方式或井—井方式配合。

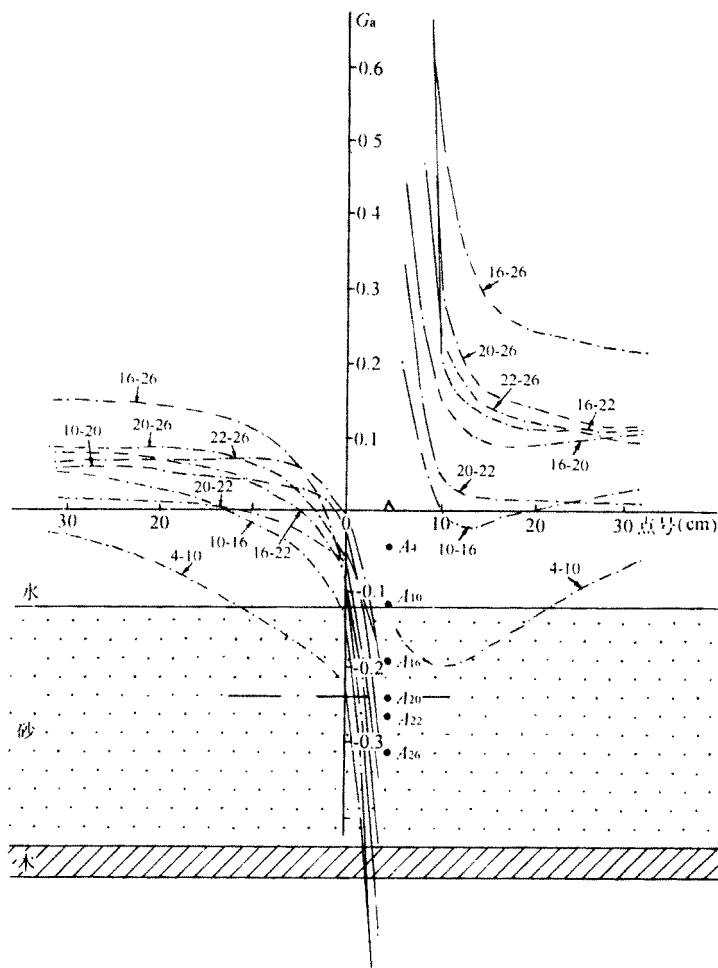


图 12 当“钻井”从“老油田”翼部“采空区”穿过时的井—地方式 G_a 异常曲线簇剖面图

如前所述,由于地—井方式测量电极更靠近油气层,使我们有可能采用相应措施把小块油气异常突出出来。在油田开发过程中,如果能为电测提供裸眼井或裸眼井段,则可采用与上文相似的工作方法来寻找残余油。

如图 13 所示,用一中间挖空的有机玻璃大三角板模拟残余油。先假设在“残余油”右侧采空区打一新井仍未见“油”,则根据地—井方式的电测结果可作如下解释:与 G_a 异常对应的 ρ_s 低幅异常标志着该“钻井”部位确实无“油”,但根据明显的 G_a 正向异常可以断定,该“井”左侧有“油”。如前所述,用逐点改变 A_1 位置的办法可大致确定“残余油”的左边界。

现在假设在“油层”中部采空区又打一“井”也未见“油”(如图 14 所示),则根据地—井方式的 G_a 曲线表现在明显正背景中的负向异常断定,“残余油”主要分布在该“钻井”的左侧,但右侧“残余油”更靠近钻井。

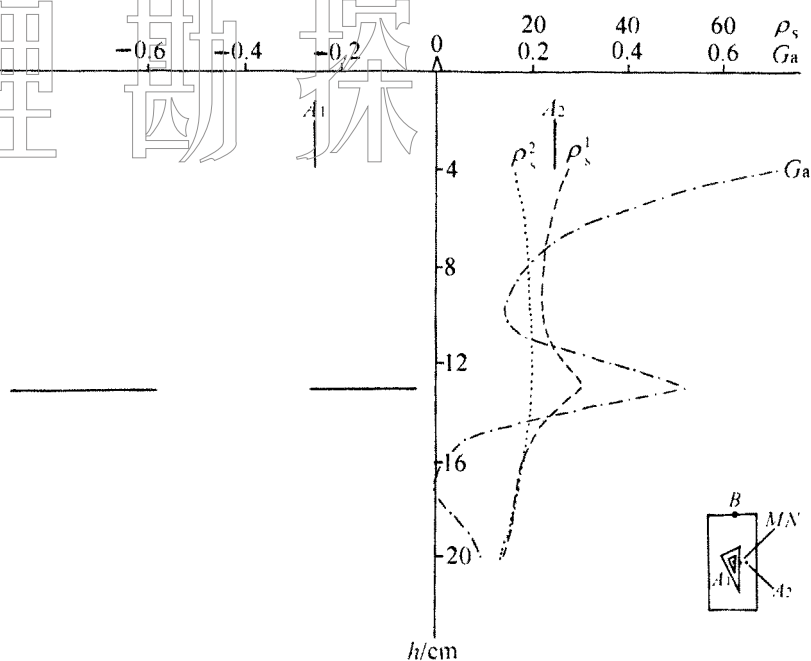


图 13 当“钻井”从“残余油”右侧“采空区”穿过，供电电极 A_1 和 A_2 分别位于“钻井”两侧时的地一井方式垂向综合剖面图

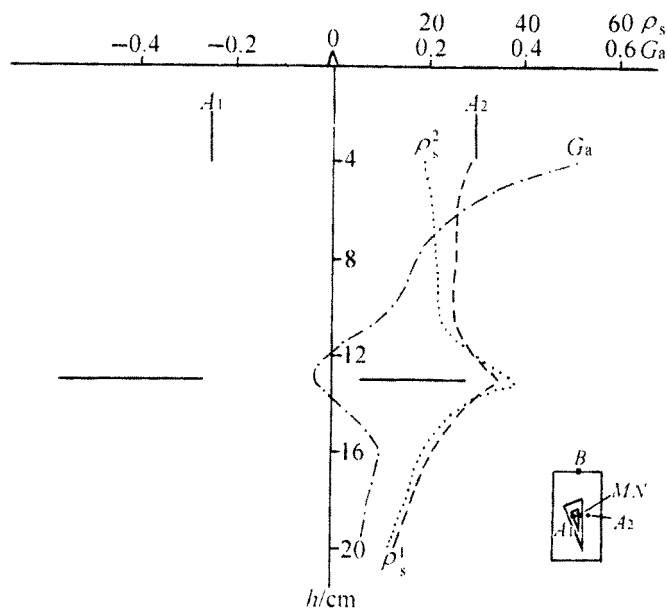


图 14 当“钻井”从“残余油”中部“采空区”穿过，供电电极 A_1 和 A_2 分别位于“钻井”两侧时的地一井方式垂向综合剖面图

结 束 语

水槽模拟实验结果表明，本文提出的地一井工作方式的三极梯度法，不仅能够有效地消除
(下转第 574 页)

就是将二者连接在一起,这是地质和地球物理方法的全面结合,为勘探家提供了一种有效的研究地震资料的手段。

通过对吐哈、辽河等探区二维地震资料的处理表明,该技术能更客观地根据地震剖面研究地下构造的准确位置及形态,有助于解决高陡构造成像问题。无疑,此法对研究复杂构造特征方面也将会起到重要的作用。

参 考 文 献

- 1 SEG64 届年会论文摘要简介,中国石油学会物探委员会,1995
- 2 刘全新.地震资料成像技术的改进.油气勘探技术信息,1996,(1)
- 3 李庆忠.走向精确勘探的道路,石油工业出版社,1993
- 4 李少英,王有新.叠前深度偏移.石油地球物理勘探,1995,30(增刊 1):13~16
- 5 马秀兰译.基于模型叠前深度偏移.油气勘探技术信息,1995,(2)
- 6 鲁烈琴,马海珍.GeoDepth 深度偏移处理系统原理方法及应用效果,西北地质研究所,1995
- 7 傅长生译.分层深度偏移简介,西北地质研究所,1995
- 8 钱荣钧.复杂地表区偏移基准面问题.石油地球物理勘探,1996,31(1):41~54

(上接第 531 页)

来自井筒及地层中的各种干扰,而且较井一地工作方式的三极梯度法更有利于突出小块油气异常,清楚地展示出钻井附近分布面积在 1km^2 以下的小规模油气层。将其与井一地方式配合使用,在勘探阶段可以提高三极梯度法的勘探能力,扩大地质效果;在开发阶段可以寻找采空区附近的残余油。

目前对地—井工作方式三极梯度法的研究和实验工作还有待深入。不管是井—地方式还是地—井方式的三极梯度法,都还未用于生产实践。愿此文能引起有关专家的注意,共同开发这项新技术。

参 考 文 献

- 1 张天伦.消除直流电阻率三极梯度法中各种干扰的实验与研究.石油地球物理勘探,1995,30(1):100~110
- 2 张天伦.计算视电阻率梯度异常的旁井参照法.石油地球物理勘探,1995,30(3):392~399
- 3 张天伦,张伯林,聂荔.用三极梯度法确定复合型油气藏各单层的边界位置.西南石油学院学报,1997,19(1):14~19