

A 对称复合四极测深法实验与研究

张天伦 张白林 聂 荔

(西南石油学院)

摘 要

张天伦,张白林,聂荔. A 对称复合四极测深法实验与研究. 石油地球物理勘探, 2002, 37(增刊): 215~220

本文在 A 对称复合四极剖面法^[2]的基础上通过大量水槽模拟实验,提出了一种能在地面直接测定油气藏埋藏深度的直流电阻率勘探方法——A 对称复合四极测深法。该方法与 A 对称复合四极剖面法或非无穷远三极剖面法^[1]配合应用,可以了解剖面异常场源体的埋藏深度,为判断剖面异常的性质提供依据。

水槽模拟实验和野外试验结果表明,在供电电极距(AB)相对场源体埋深足够大,场源体横向跨径相对其埋深足够大,场源体倾角不太大的情况下,能够取得较好的地质效果。

关键词 电阻率 测深 油气藏 埋藏深度

引 言

A 对称复合四极法是一种新型的直流电阻率勘探方法,该方法和非无穷远三极剖面法^[1]一样,也是以高阻油气藏与围岩之间的电阻率差异为依据,其理论基础仍是等位面与电流线处处正交。

A 对称复合四极法由 A 对称复合四极剖面法^[2]和 A 对称复合四极测深法组成。在文献[3]中,我们对利用 A 对称复合四极剖面法梯度异常(G_a)曲线采用经验切线法确定油气藏埋藏深度的方法作了比较详细的论述。这种方法虽然简单方便,不需要额外的野外施工,计算结果也能达到一定的精度,但这种方法只能适用于地质、地球物理条件比较理想、油层比较单一的情况。在我国许多油田储层多以河流、滨湖相沉积或河流—三角洲相沉积为主,地层岩性复杂多变,而且油气的聚集还要受多方面因素的制约,其分布更是千变万化,难以预测。在 A 对称复合四极剖面法有效探测深度范围内,同一油层的多个含油砂体和多个含油层系所产生的异常往往叠加在一起,表现出锯齿状特征,异常一个接一个,相互干扰。在这种情况下,就不宜采用切线法来计算油气藏的埋藏深度,可采用 A 对称复合四极测深法直接测定。

A 对称复合四极测深法的概念和测深机理分析

所谓 A 对称复合四极测深法,就是将供电电极 BB' 和测量电极 MN 分别对称地布置在供电电极 A 的两侧(A 极位置为记录点)。工作时, BAB' 三个供电电极的位置不变, MN 两测量电极分别在 A 电极两侧由近到远对称移动(如图 1 所示)。对每一个 $MN/2$ 极距,分别由 $BMAN$ 电极系测量电位差 $\Delta V_{MN}(B)$ 和由 $MANB'$ 电极系测量电位差 $\Delta V_{MN}(B')$,然后由公式

$$\Delta V_a = \frac{\Delta V_{MN}(B)}{I(B)} + \frac{\Delta V_{MN}(B')}{I(B')} \quad (1)$$

计算出电位差异常 ΔV_a ,最后以 ΔV_a 为横坐标, $MN/2$ 为纵坐标(箭头向下),绘出异常曲线,即是 A 电极所在点位的电测深曲线,它可反映出引起剖面异常的场源体在观测点下方的埋藏深度以及观测点附近是否有断层存在。

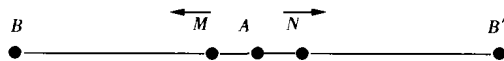


图 1 A 对称复合四极测深法电极布置示意图

A 对称复合四极测深法的测深机理如下(读者阅读本段时,请参看文献[1]):通常,测深观测(或记录)点须布置在剖面异常极大(或极小)值点附近,即

本文于 2002 年 3 月 30 日收到。

本文属“油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金项目”。

场源地质体的边界附近上方。我们可以根据点电源的原理,设想把 $\Delta V_{MN}(B)$ 和 $\Delta V_{MN}(B')$ 分解为两部分,一部分是 B 和 B' 电极在 MN 两点产生的电位差,另一部分是两次 A 电极在 MN 两点产生的电位差。由于 B 和 B' 电极分居测量电极 MN 的左右两侧,并且离 A 电极下方的大致水平延伸的油层边界较远,在油层边界处,电流大致与油层平行,油层对 B 电流和 B' 电流的排挤转向作用都很微弱,故 B 电极和 B' 电极在 MN 两点产生的电位差大小近似相等,符号相反,二者相加后基本抵消;而 A 电极处于油层边界正上方,前后两次 A 电流完全重合,并且电流的方向与油层大致垂直,故两次 A 电极在 MN 两点产生的异常电位差则是大小相等符号相同,相加后,其大小为单次供电所产生的异常电位差的二倍,为计算方便,在公式(1)中不再除以 2。在完全均匀的介质中, ΔV_a 等于零。对于均匀介质中的高阻体来说,当 $MN/2$ 极距增大到大致等于场源地质体埋藏深度时,由于在场源体(边界)深度处,从 A 电极下行的电流线受高阻体的排挤转向作用最大,通过该深度的等位面在地面位移最远, ΔV_a 达到极大值(此处,假设 AB 极距相对场源体埋深足够大,等位面近似为以 A 电极为中心的半球面),则该极大值所对应的 $MN/2$ 极距即是场源地质体的埋藏深度。

油层对电流排挤转向作用(即 ΔV_a)的大小与油层相对围岩电阻率差异的大小、油层埋藏深度、水平延伸大小等因素有直接关系,因此,在同一地区,当其他因素相近的情况下, ΔV_a 异常幅值的大小可定性地了解油层与围岩电性异常的大小,即油层的含油级别。

水槽模拟实验结果及其分析

模拟实验在容积为 $2.0\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$ 水槽中进行。实验中,用有机玻璃板模拟高阻油气层,其电阻率趋于无穷大;用自来水模拟围岩,其电阻率约为 $30\Omega \cdot \text{m}$;模拟比例尺为 $1:10000$,即图中 1cm 相当于实际的 100m 。

图 2 是厚度为 25cm 的有机玻璃板在水深 10.4cm 时的 A 对称复合四极测深法模拟实验结果。因测深点(A 电极)位于油层左边界附近,由 A 电极(假设接电源正极)下行的电流受到高阻油层的排

挤转向作用,大量电流(特别是靠近油层模型深度处的电流)向左折转(参见图 1 和文献[1]和图 2), A 电极右侧的等位面向远离 A 极方向位移, N 极电位升高, ΔV_{MN} 趋负,因此异常电位差(ΔV_a)出现负向异常(相反,如果测深点位于油层模型右边界附近,由 A 极下行的电流向右折转,右侧等位面向 A 极靠拢, N 极电位降低, ΔV_{MN} 趋正, ΔV_a 出现正向异常。由图 2 我们可以看到,测深曲线异常幅值为 -12.5mV , ΔV_a 曲线极小值所对应的 $MN/2$ 极距约 11cm ,比油层模型实际深度大 0.6cm ,相对误差为 5.7% 。

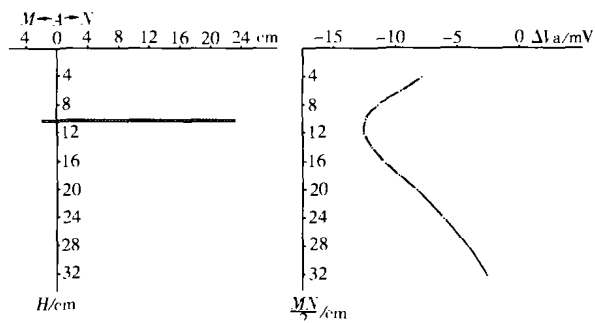


图 2 在水深 10.4cm 处的 $80\text{cm} \times 25\text{cm}$ 有机玻璃板左边界上方观测到的 A 对称复合四极测深曲线

在本次实验中, AB (或 AB') $= 82\text{cm}$,大约是油层模型水深的 8 倍,最大 $MN/2$ 的 2.5 倍。以下至图 8, AB 极距均为 82cm 。

又如如图 3 所示,厚度 10cm 的有机玻璃板水深 8cm (测深点位于油层模型左边界附近), ΔV_a 负极值点所对应的 $MN/2$ 极距约为 7.6cm ,相对误差为 5% ,异常幅值为 -5.5mV 。本实验 AB 极距大约是油层模型水深的 10 倍。

图 4 中有机玻璃板厚度与图 3 相同,但水深增大到了 15cm (相当于实际的 1500m), ΔV_a 曲线负异常极值点所对应的 $MN/2$ 极距也增大到 14cm ,相对误差为 6.6% ,异常幅值由图 3 的 -5.5mV 锐减到 -0.63mV ,大约为图 3 中 ΔV_a 异常幅值的 $1/9$ 。本实验 AB 极距大约是油层埋深的 5.5 倍。

比较图 2 和图 3 我们可以看到,尽管图 2 油层模型水深比图 3 还大 2.4cm ,但是 ΔV_a 异常幅值却远远大于后者,这是由于前者油层模型厚度远大于后者所致。我们还看到,尽管场源体埋深不同,规模不同,但是,各自的 ΔV_a 曲线极值点所对应 $MN/2$ 极距的大小均与场源体的实际埋深相当。

比较图 3 和图 4 可见,虽然异常幅值随油层模

型埋深的增大迅速减小,但异常极值点所对应的 $MN/2$ 极距均与油层模型实际埋深大致相当。

图 5 中有机玻璃板厚度为 33cm,水深为 15cm,与图 4 相当, ΔV_a 曲线负异常极值点所对应的 $MN/2$ 极距约为 15cm,与实际埋深相同,异常幅值为 -7mV,约为图 4 的 11 倍。

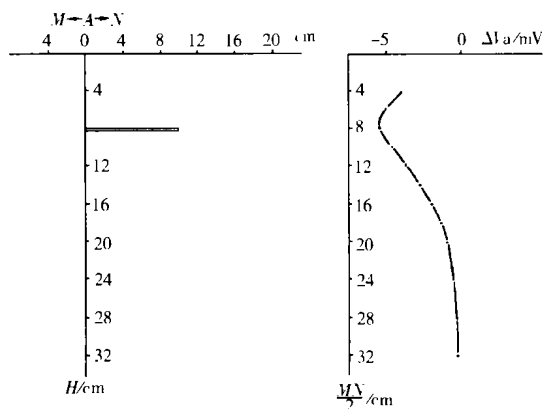


图 3 在水深 8cm 处 20cm×10 cm 的有机玻璃板左边界上方观测到的 A 对称复合四极测深曲线

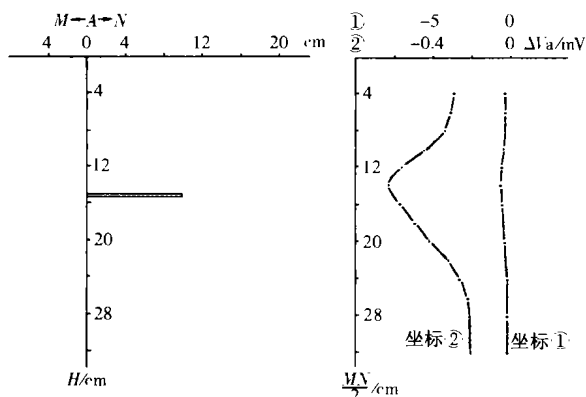


图 4 在水深 15cm 处 20cm×10 cm 的有机玻璃板左边界上方观测到的 A 对称复合四极测深曲线

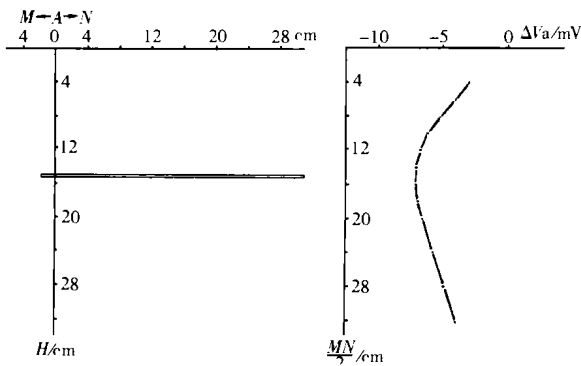


图 5 在水深 15cm 处 90cm×33cm 的有机玻璃板左边界上方观测到的 A 对称复合四极测深曲线

由此可见,场源体规模对测深曲线异常幅值的影响是相当大的。

图 6 和图 7 则示出了油层倾斜情况下的 A 对称复合四极测深法模拟实验结果。图 6 是测深点位于厚度为 33cm 的有机玻璃板下倾端附近的实验结果,测深点处油层模型埋深为 15.5cm, ΔV_a 曲线异常极值点所对应的 $MN/2$ 极距约为 15.5cm,相对误差为 0,异常幅值为 -10mV。图 7 是当测深点位于油层模型上倾端附近的实验结果,测深点处,油层模型水深为 10.4cm, ΔV_a 曲线负异常极值点所对应的 $MN/2$ 极距约为 12cm,相对误差为 13.3%。异常幅值为 11.25mV。

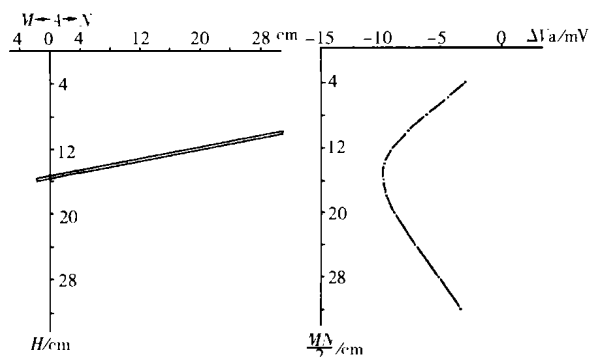


图 6 在 90cm×33 cm 的倾斜有机玻璃板下倾端(水深 15.5cm)上方观测到的 A 对称复合四极测深曲线

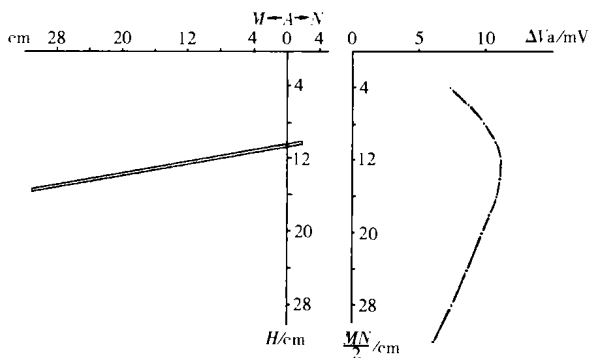


图 7 在 90cm×33 cm 的倾斜有机玻璃板上倾端(水深 10.4cm)上方观测到的 A 对称复合四极测深曲线

图 8 是均匀介质情况下的水槽模拟实验结果,由图可见,在均匀介质情况下,测深曲线近似为一条 $\Delta V_a=0$ 的直线,无任何异常显示。

以上实验结果足以证明,在油层厚度相对其埋深足够大(二者之比大于 1/2),AB 极距足够大(大于油层埋深的三倍),油层倾角不太大,地层物性各向异性不太严重的情况下,采用 A 对称复合四极测深法直接测定油层的埋藏深度是可行的。它将为 A

对称复合四极剖面法资料的解释提供十分有用的信息。在围岩均匀或近似均匀的情况下,一般测深精度可达 5%~10%。在层状介质情况下,可能存在一定的系统误差,可利用已知点井旁测深资料,求得校正系数,以便对未知点进行校正。

在油层厚度小于埋深的情况下,由于信号强度锐减,观测误差增大,可能导致解释误差增大。当油层倾斜较大时,由于电场受油层倾斜的影响,也可能导致解释误差的增大。

图9示出了在同一油层模型左边界上方采用不同 AB 极距观测到的三条测深曲线,由图可见:①随着 AB 极距的减小,由于能够到达油层模型深度的电流逐渐减少,油层模型对电流的排挤转向作用的力度逐渐下降,异常幅值随之迅速减小;②当供电电极距 (AB) 小于三倍场源体埋深后,异常极值点所对应的 $MN/2$ 极距明显小于场源体的实际埋深,并随 AB 极距的减小而向上偏移。因此,在 A 对称复合四极测深法的实际工作中, AB 供电电极的极距最好不要小于勘探地质体埋藏深度的三倍。

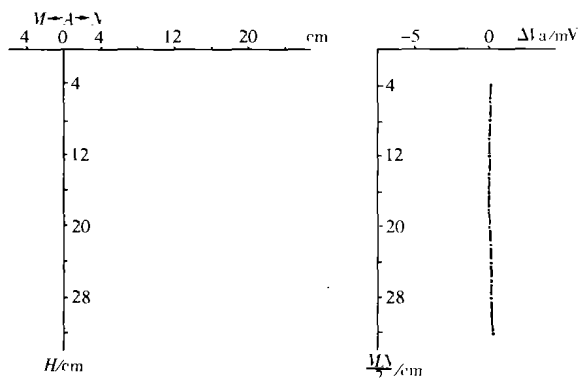


图8 在均匀介质情况下的 A 对称复合四极测深曲线

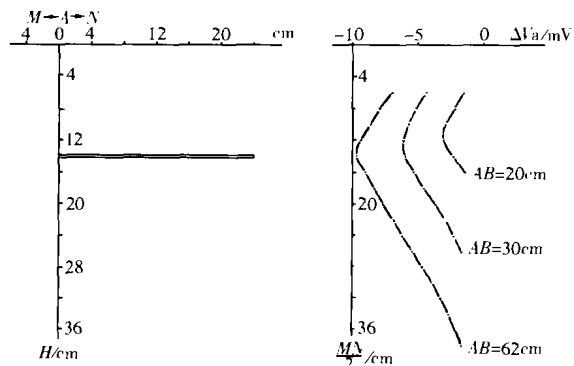


图9 在水深 14cm 处 50cm×24cm 的有机玻璃板左边界上方观测到的不同 AB 极距的 A 对称复合四极测深曲线

A 对称复合四极测深法 野外试验结果

A 对称复合四极测深法的野外试验是在我国东北地区 T 油田进行的。测区基底以上沉积了侏罗系、白垩系、第三系和第四系,受区域抬升剥蚀作用的影响,下白垩系泉头组以上地层由东向西逐层超覆,形成大面积地层超覆带。地震反射界面总体构造形态为区域东倾斜坡。本区储层是下白垩统姚家组砂岩夹泥岩地层,沉积特征为河流—三角洲相,其顶面埋深大于 200m,厚度为 20~60m。盖层是下白垩嫩江组泥岩地层,区域性稳定延伸,厚度为 80~120m,地层倾角为 1~4°。油层电阻率一般为 20~80Ω·m,高的达 200Ω·m 以上,上覆嫩江组泥岩盖层电阻率一般约为 5Ω·m,姚家组储油层之下为下白垩青山口组和泉头组砂泥岩地层,电阻率一般为 5~10Ω·m,可见油层与上、下围岩地层之间的电阻率差异高达 5~10 倍。再往下为侏罗系高阻层,电阻率可达 80~200Ω·m。嫩江组泥岩之上覆各地层电阻率一般为 10~60Ω·m。图 10 是测区沿构造线方向几个钻井的电阻率测井曲线对比示意图,由图可见,该区上述五套电性层构成了明显的高—低—高—低—高五层地电剖面。其中第一、二、四、五套地层电阻率具区域相对稳定性;第三套为本区储油层,其岩性和电阻率均变化较大。

上述地层电性组合及横向变化,为 A 对称复合四极法在该区的成功应用提供了有利的地质、地球物理条件。由图 10 可以看出,剖面中具区域稳定性的第一电性层电阻率最大约为 60Ω·m,在下部低阻泥岩层的吸引下,直流电很容易穿过,下行电流一旦遇到高阻油层必然转向,从而引起异常。

在剖面上,除了第三套姚家组储油层电阻率的横向变化能够引起异常外,第一电性层电阻率的横向变化和断层也可能引起明显异常,这就需要区分哪些是油异常,哪些是非油异常。采用 A 对称复合四极测深法实测异常场源体埋藏深度,如果所测深度与该区储层深度相当,则该异常多半是由油层或含油砂体引起,反之则多半是非油异常。

测深曲线 ΔV_a 异常的大小与油层埋藏深度、沿测线方向的水平跨度和含油丰度等因素有关,当其他因素相当时,异常幅值的大小可用来定性地估计

含油砂体的含油丰度,从而为钻探提供更多的依据。

图 11 是本区一条垂直构造和含油砂体走向的 A 对称复合四极剖面法综合剖面图。图中 G_a 曲线出现了许多正、负异常,其中一个“正、负异常对”反映了地下的一个高阻地质体。为了了解异常场源地质体的地质层位,区分油异常和非油异常,在剖面异常极大值和极小值点附近布置了某些 A 对称复合四极测深点,由于篇幅所限,本文仅以剖面上 1058 点的测深结果为例进行说明。

1058 点 A 对称复合四极测深结果如图 12 所

示。该点位于 I 号含油砂体东部边界附近,剖面上 G_a 负异常中心处。该负异常与 1050 点的正异常组成同一正、负异常对,即由同一场源体引起。在测深曲线上, ΔV_a 为正异常,产生该异常的机理如下。

由 A 电极向下的电流受高阻油层的排挤转向作用,逐渐向右偏转,根据等位面与电流线处处正交的基本原理,在地面, A 电极右侧的等位面逐渐向 A 极的方向靠拢,(当 A 电极接电源正极时) N 电极的电位将逐渐下降, MN 两点之间的电位差逐渐增大,出现正的电位异常 (ΔV_a)。由于在油层深度

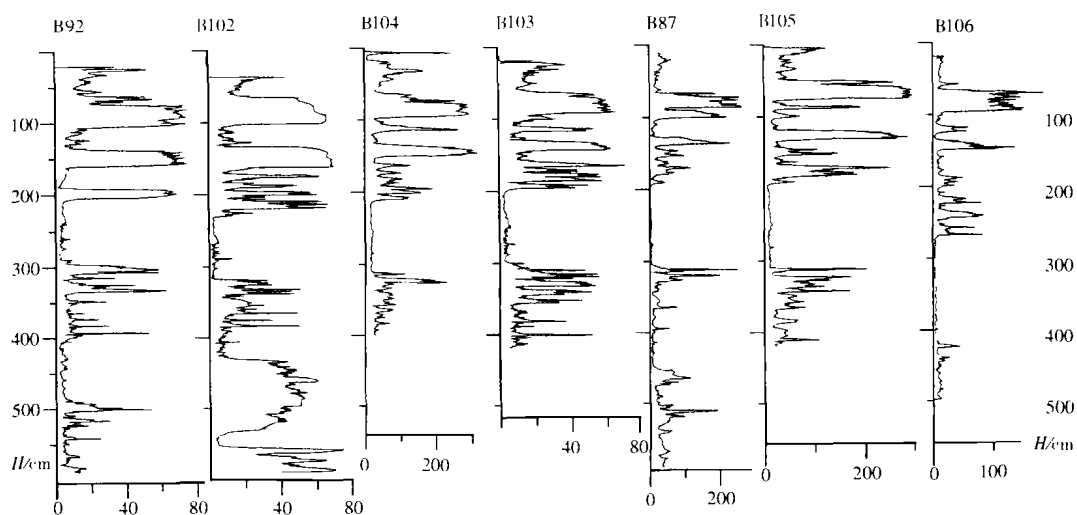


图 10 测区沿构造线方向几口钻井的电阻率测井曲线对比示意图

图中横坐标表示电阻率($\Omega \cdot m$)数值

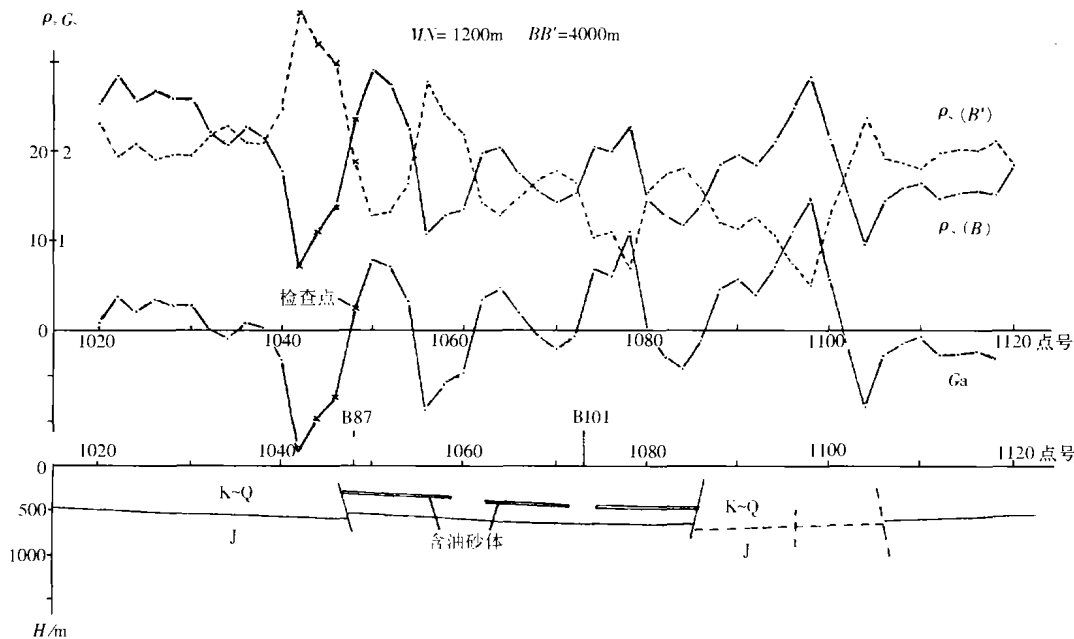


图 11 TA2 测线 A 对称复合四极剖面法解释结果综合剖面图

附近的电流线受油层排挤转向作用最大,向右偏转最厉害,因此,通过这个深度上的等位面在地面向A极的方向位移最多(在均匀介质、AB电极距足够大的情况下,等位面近似于一个以A极为中心的半球面)。这就是说,当 $MN/2$ 近似等于油层埋深时,所观测到的电位异常(ΔV_a)达到正的极大值。此后,由于向右偏转的电流在油层下方低阻介质的吸引下,又逐渐向左折转,因此,通过油层下方的等位面在地面上又逐渐向远离A极方向位移,与此对应的 $MN/2$ 极距所观测到的电位异常(ΔV_a)又逐渐趋于正常。反之,我们即可把 ΔV_a 极大值所对应的 $MN/2$ 之极距作为油层的埋藏深度。

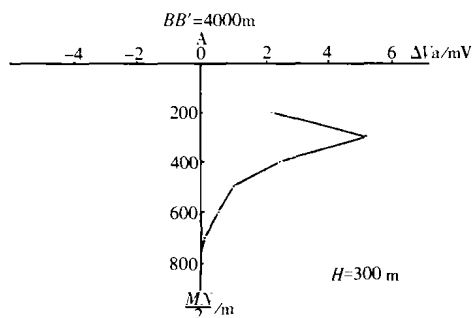


图 12 TA2 测线 1058 点 A 对称复合四极测深曲线

由图 12 可见,1058 点测深曲线简单而完整,极大值 $MN/2$ 为 300m,这表明该点场源地质体埋深为 300m。 ΔV_a 异常幅值为 5.25mV。距该点西侧 1km 的 B87 井于井深 307m 见油层,距该点东侧 1.4km 的 B101 井于井深 333m 见油气显示。根据本区地层平缓,并考虑测量和解释误差等因素,可以断定,引起剖面上 1058 点负异常的场源地质体所处层位应与该区储油层位置相当,再根据 B87 井井旁测深曲线 ΔV_a 异常幅值约为 5.5mV,与对称回报测量结果相当,故推断该点负异常与 1050 点之正异常为同一油层引起,其含油丰度与 B87 井相当。这一解释结果,已得到油田专家认可,目前,1 号砂体已正式投入开发。

结 束 语

A 对称复合四极测深法和非无穷远三极剖面法^[1]及 A 对称复合四极剖面法^[2]一样,都是以等位面与电流线处处正交的基本原理为理论基础的一种地面直流电阻率勘探方法。该方法需要与非无穷远三极剖面法或 A 对称复合四极剖面法配合应用,测深点最好布置在上述两种剖面法所发现的高阻油气层边界位置的 G_a 异常极大(或极小)值点附近,或已知油水边界处,以了解剖面异常场源体的埋藏深度,进而推测其地质层位,为判断剖面异常的性质提供依据。

水槽模拟实验和野外试验结果表明,在供电电极距(AB)相对场源体埋深足够大(一般不小于 3:1)、场源体横向跨径相对其埋深足够大(一般不小于 1:2)、场源体倾角不太大(一般为 $10^\circ \sim 20^\circ$)的情况下,能够取得较好的地质效果。在地层电阻率各向异性特别明显的地区,最好有已知井,以便根据井旁测深结果求取校正系数,再对未知点测深结果进行校正。因此,该方法特别适用于滚动勘探开发。

A 对称复合四极剖面法和 A 对称复合四极测深法的野外试验,得到了石油物探局第五地质调查处的领导和同志们的大力支持,并给予高效而愉快的合作;还得到了吉林油田有关领导的支持与合作,特此向他们表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 张天伦,张白林,聂荔,李泌,马国光.一种直接圈定油气藏边界范围的地面电法.石油地球物理勘探,1998,33(增刊 2):123~129
- [2] 张天伦,张白林,聂荔.A 对称复合四极剖面法的实验与研究.石油地球物理勘探,2000,35(6):730~740
- [3] 张天伦,张白林,聂荔.A 对称复合四极剖面法的实验与研究——经验切线法确定油气藏埋藏深度.石油地球物理勘探,2001,36(增刊):144~149

(本文编辑:任敦占)