

计算视电阻率梯度异常的旁井参照法

张天伦* 张伯林

(西南石油学院)

摘 要

张天伦,张伯林. 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

本文在文献 3 的基础上,提出了一种计算视电阻率梯度异常的旁井参照法。该方法是三极梯度法的重要组成部分,它不仅弥补了本井参照法不能对油气藏作垂向预测的缺陷,而且只有采用旁井参照法才有可能计算时间校正系数,消除因地下介质电阻率随时间的变化对三极梯度法观测值的干扰,进而对油气藏进行开发监测。

主题词 电法勘探 三极梯度装置 旁井参照法 油气藏 模拟实验

ABSTRACT

Zhang Tianlun and Zhang Bolin. Side-hole reference method for estimating the gradient anomaly of apparent resistivity. OGP, 1995, 30(3): 392~399

Side-hole reference for estimating the gradient anomaly of apparent resistivity is put forward on the basis of literature 3. It is the major part of trielectrode gradient measurement technique. The side-hole reference remedies the defect that self-hole reference fails to vertically predict hydrocarbon reservoir. What is more, only by side-hole reference, can we obtain time correction coefficient and eliminate the influence on trielectrode-gradient observation values that is caused because subsurface resistivity varies with time, thus successfully monitoring reservoir development.

Subject heading: electric survey, trielectrode gradient equipment, side-hole reference, hydrocarbon reservoir, modeling experiment

本文是文献 3 的续篇,部分实验数据来源于文献 3 的实验。文中各图的曲线编号与“探井”中相应井下供电电极下端点深度值(单位 cm)相同;井下供电电极 A 采用 2H 铅笔芯制作,长 2 cm;测线至“探井”距离均为 10 cm,测线上零号点位于油气藏模型正上方;各图中模拟剖面只反映测线正下方的情况。模型材料及有关数据见表 1。

旁井参照法的提出

文献 3 采用公式

* Zhang Tianlun, Southwest Petroleum College, Nanchong City, Sichuan Province, Postcode: 637001

本文于 1994 年 4 月 28 日收到。

$$G_{si'}^k = \frac{\rho_{si}^k - \rho_{si'}^k}{\rho_{si'}^k} \quad (1)$$

计算梯度异常。式中: i 和 i' 为曲线编号,且 $i \neq i'$; k 为测点号; ρ_{si}^k 为在油气藏上方某一深度(i cm)供电时在测线上 k 点测得的视电阻率值; $\rho_{si'}^k$ 为在同一探井油气藏下方供电时在地面同一测线上 k 点测得的视电阻率值(本文图中 i' 固定不变)。这就是说,文献3中所计算的 G_a 异常都是以本探井中油气藏下方某一深度供电时所测得的 ρ_s 曲线为参照曲线(以下简称本井参照 G_a 异常),因此最终结果只能等到该探井终孔后才能计算出来,实际上谈不上垂向预测。为了达到垂向预测的目的,本文提出了一种计算 G_a 异常的旁井参照法。

表1 模型材料数据表

模型材料	尺寸 cm	电阻率 $\Omega \cdot m$	备 注
供电电极	直径:0.2;长:2		如供电电极 A_{10} ,脚标为电极下端点深度,cm
参照井中供电电极	同上		电极下端深度为4 cm
自来水		30	模拟低阻层,其表面与横坐标轴重合
浸水河沙		74	模拟低阻围岩
浸水木板	厚:3.2	540	模拟高阻基底
含水砂石块		330	模拟浅层非均匀体
石蜡加沙子	长轴:60;短轴:28	8 000	模拟构造型高阻油气藏,浸于水中
有机玻璃	$80 \times 29 \times 0.4$	$\rightarrow \infty$	模拟产状平缓的高阻薄油层
浸水三层板	$60 \times 28 \times 0.3$	275	模拟较低阻薄油层

文献3详细论述了用式(1)压制诸如地形起伏、浅表层非均匀体等强大干扰,突出油气藏异常的明显效果。但是,在实际工作中可能还存在另外一种不可忽视的干扰,即地下介质电阻率随时间变化引起的干扰(以下简称时间干扰)。我们知道,一口探井可能需要几个月甚至上年的时间才能完成,而地表及地下介质的电阻率是随时间而变化的,在同一测线的不同测点处其变化大小可能有很大差异。由于同一幅图上不同深度供电的曲线可能观测于不同的季节,再加上人为因素(如地下管道和电缆的敷设、土建工程等),使得不同深度的 G_a 曲线之间、同一曲线的不同测点之间,因受时间干扰的程度不同,造成 G_a 曲线难以预料的畸变而影响解释精度,甚至使 G_a 曲线面貌全非。可见,这项时间校正是必不可少的。为了消除时间干扰、计算时间校正系数,也需要借助于旁井参照法来实现。

利用 G_a 异常对油气藏进行开发监测时,由于油(气)井在生产过程中已无法用电缆将供电电极送到井中,且全井下满了套管,即使能把供电电极下到井中,也无法测出不同深度的 ρ_s 曲线,从而无法计算出 G_a 异常。为了利用 G_a 异常对油气藏进行开发监测,也需采用旁井参照法。

计算 G_a 异常的旁井参照法很简单,只需把式(1)中的参照曲线 $\rho_{si'}$ 改为位于油气藏范围以外的另一浅井(即参照井,井深为潜水面以下20~30 m)供电所测得的 ρ_s 曲线代入上式计算即可(以下简称旁井参照 G_a 异常)。这时的计算公式为

$$G_a^k = \frac{\rho_{si}^k - \rho_{sj}^k}{\rho_{sj}^k} \quad (2)$$

式中 i 、 j 分别为探井和参照井的供电深度(即曲线编号,本文中 j 恒为4)。

实验结果

对油气藏进行垂向及横向预测的实验结果

图 1 是与图 2、图 3 对应的视电阻率曲线,可见地形起伏、构造起伏及浅表面非均匀体的干扰十分严重。图 2 是对图 1 采用式(1)计算的本井参照 G_a 异常曲线,可见式(1)压制各种干扰和突出油气藏异常的功能是十分显著的(详见文献 3)。图 3 是将图 1 采用式(2)计算的旁井参照 G_a 异常曲线。比较以上各图可知,采用旁井参照法计算的 G_a 异常,干扰同样得到了有效的压制,在“油气藏”下方供电的曲线⑬和⑭的极值点仍较准确地指示了“油气藏”的边界位置,而且可用作垂向预测标志的特点也十分明显。

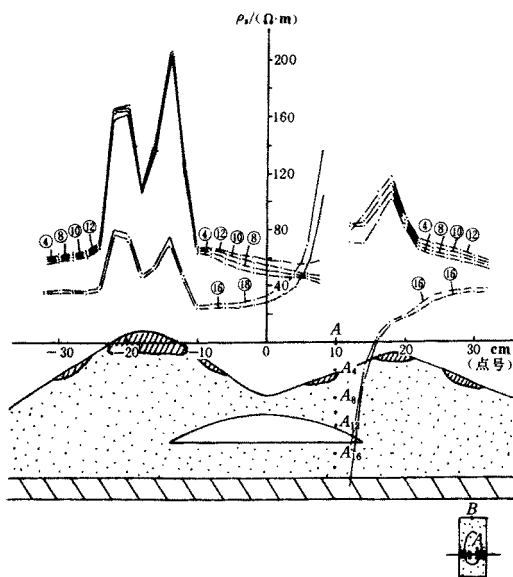


图 1 上下构造不一致,钻井位于“油气藏”翼部时,不同深度供电的 ρ_a 曲线

图 3 和图 4 的参照井均位于 22 号点处,只是探井位置不同,一个在 10 号点(“油气藏”上方),一个在 16 号点(“油气藏”范围之外 2 cm 处)。前者在“油气藏”顶界以上不同深度供电所得 G_a 曲线,无论左支还是右支都是有规律地随供电深度的增加而大幅度地向上抬升;后者则随供电深度的增加而下陷,或者相互靠拢交叉(图 9 更明显)。根据 G_a 曲线的上述变化特征即可对油气藏进行垂向预测,只需通过浅部几个深度的测量,即可对该井是否可能见油作出判断。如果发现 G_a 曲线随供电深度的增加而大幅度地向上抬升,则表明该井有希望见油(图 3 和图 8);当发现某一深度供电的 G_a 曲线远支(此处为左支)已由浅部的低头状(由远到近下降)变为扬头状(由远到近上升)或平卧状,如图 3 和图 4 中的曲线⑫,则预示着该钻井下端已接近油气藏(图 3)或已低于油气藏顶界埋藏深度(图 4);如果 G_a 曲线呈图中曲线⑬和⑭的形状,则表明该钻井已穿过油气藏进入下部低阻介质(图 3)或钻井下端已低于油气藏底界深度(图 4),并可根据曲线极值点位置定出油气藏远边界位置。就图 3 而言,若此时探井仍无油气显示,则应查明原因,以便采取补救措施。

比较图 3(参照井位于 22 号点)和图 5(参照井位于 16 号点)可知,在一定范围内,参照井位置对 G_a 异常曲线的形态特征并无明显的影响,因此在实际工作中,只需根据其它资料大致估计将参照井布置在油气藏范围以外较远的地方即可。

如果探井从油气藏旁侧擦过(图 4 和图 9),可根据资料对探井附近有否油气藏存在作出预测。若附近有油气藏存在,则相应于油气藏底界深度以下供电的 G_a 曲线将有明显的异常显示(图 4 中曲线⑬和⑭),并指示出油气藏赋存的方位、埋藏深度和远边界位置。曲线⑬和⑭的幅值大小颠倒是探井位于油气藏范围之外的又一标志。

如果探井从油气藏旁侧擦过(图 4 和图 9),可根据资料对探井附近有否油气藏存在作出预测。若附近有油气藏存在,则相应于油气藏底界深度以下供电的 G_a 曲线将有明显的异常显示(图 4 中曲线⑬和⑭),并指示出油气藏赋存的方位、埋藏深度和远边界位置。曲线⑬和⑭的幅值大小颠倒是探井位于油气藏范围之外的又一标志。

图 6 是当盖层构造与储层构造一致时的实验结果,油气藏模型的跨径较小,其旁井参照

G_a 异常曲线的变化规律基本上与图3相同,曲线⑬的极值点也准确地对应着“油气藏”的边界位置(11.5cm)。图中浅部供电的右支曲线变化规律稍有反常,这是由“钻井”附近的高阻砂石

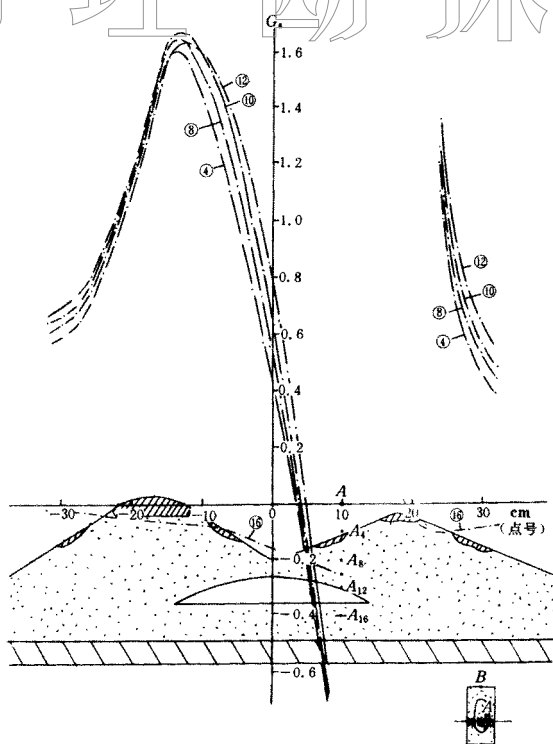


图2 上下构造不一致,钻井位于“油气藏”翼部时,不同深度供电的本井参照 G_a 曲线

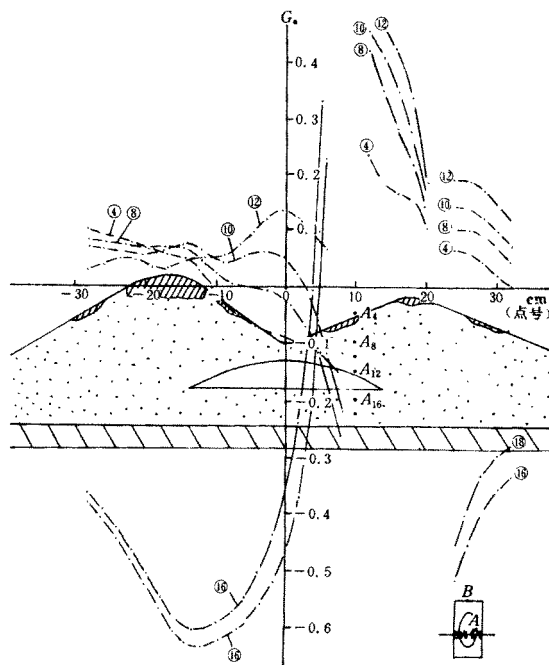


图3 上下构造不一致,钻井位于“油气藏”翼部时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于22号点

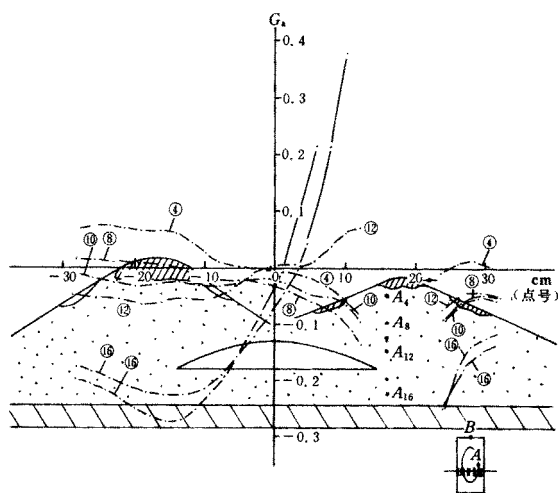


图4 上下构造不一致,钻井位于“油气藏”旁侧时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于22号点

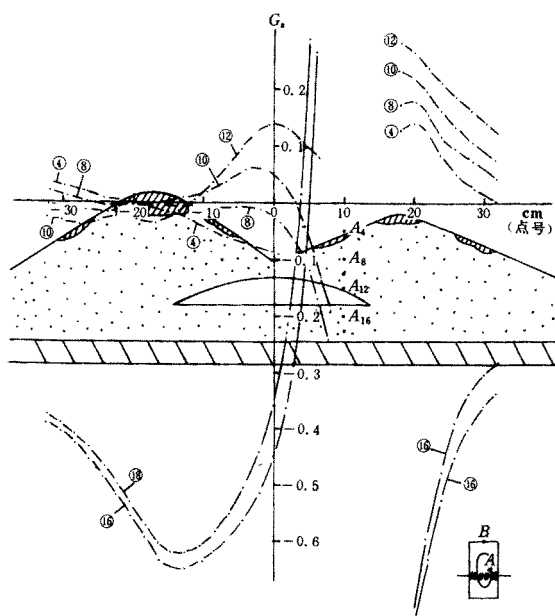


图5 上下构造不一致,钻井位于“油气藏”翼部时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于16号点

块屏蔽作用引起。这时,只能以主要的左支为解释依据。

如果探井周围无油气藏存在, G_a 曲线将无异常显示(图7)。

图8和图9是在理想条件下的实验结果,示出了地面水、浅表层介质(自来水)电阻率均匀的情况。用80 cm×29 cm×0.4 cm的有机玻璃模拟高阻薄油层,顶界埋深19.5 cm,探井分别位于“油气藏”中部距中轴10 cm和16 cm(边界外侧1.5 cm)处。由图可见,其旁井参照 G_a 异常曲线的变化规律与上述基本相同,而且更加规范,这也是对上文的一个验证。

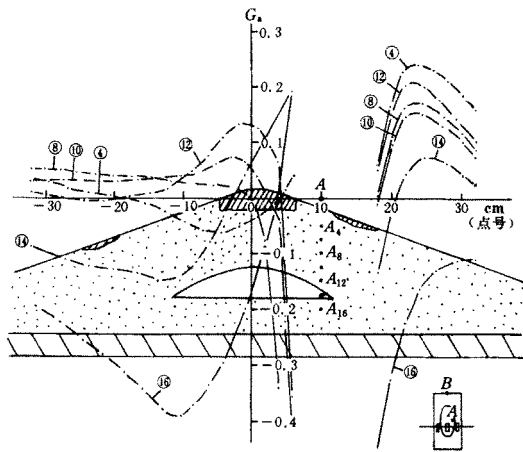


图6 上下构造一致,钻井位于“油气藏”翼部时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于16号点

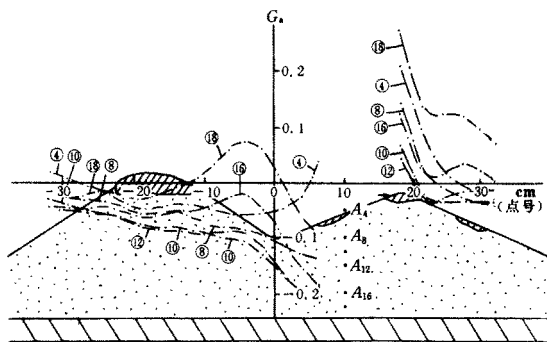


图7 地下无“油气藏”时不同深度供电的 G_a 曲线

应该指出,等到探井终孔后,仍须计算和绘制本井参照 G_a 曲线,以便两种资料及其解释结果互为补充、相互验证。

消除地下介质电阻率随时间变化所至干扰的设想

采用式(2)计算 G_a 异常曲线,使得我们有可能对介质电阻率随时间的变化进行校正,从而有效地消除由此而引起的干扰。

进行时间校正的方法为:凡是在探井中(任一深度)供电测量一次 ρ_{sj}^k 数据,都同时在参照井中供电测量一次 ρ_{s4}^k 数据,并以观测探井第一个供电深度(如400 m)时的测量数据为准。设当日在探井和参照井供电所测数据分别为 ρ_{s4}^k 和 ρ_{sj-1}^k ,则此供电深度的旁井参照 G_a 异常为

$$G_{a4}^k = \frac{G_{s4}^k - \rho_{sj-1}^k}{\rho_{sj-1}^k}$$

测量探井第二个供电深度(如800 m)时,参照井供电深度不变(仍为潜水面以下20~30 m),此时参照井和探井供电在同一测线各测点上经时间校正后的视电阻率分别为

$$\rho_{sj-2}^{k'} = \rho_{sj-2}^k \frac{\rho_{sj-1}^k}{\rho_{sj-2}^k} \quad \rho_{s8}^{k'} = \rho_{s8}^k \frac{\rho_{sj-1}^k}{\rho_{sj-2}^k}$$

式中的 $\rho_{sj-1}^k / \rho_{sj-2}^k$ 为时间校正系数。该供电深度的旁井参照 G_a 异常为

$$G_{a8}^k = \frac{\rho_{s8}^{k'} - \rho_{sj-2}^{k'}}{\rho_{sj-2}^{k'}} = \frac{\rho_{s8}^k - \rho_{sj-2}^k}{\rho_{sj-2}^k}$$

式中 ρ_{s8}^k 和 ρ_{sj-2}^k 分别为在探井800 m深度供电观测之日在 k 测点测得的探井和参照井供电的视电阻率值。由上式可以看出,我们只需把当日同时测得的 ρ_{si}^k 和 ρ_{sj}^k 代入式(2)计算,即可实现时间校正的目的。

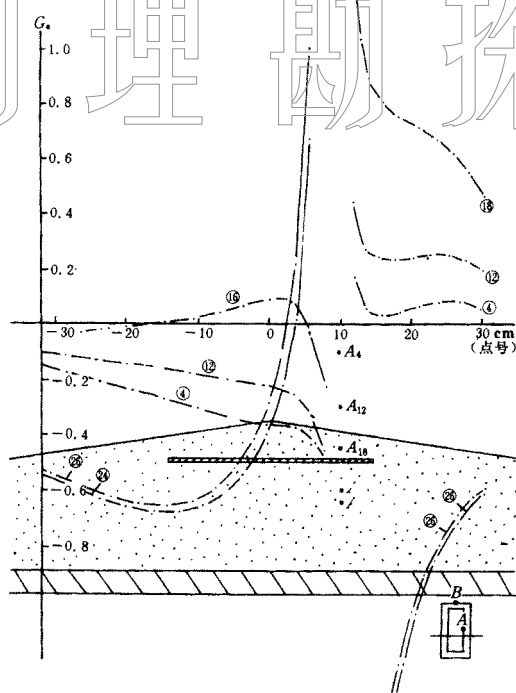


图8 在较理想条件下,“钻井”位于“油气藏”翼部时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于32号点

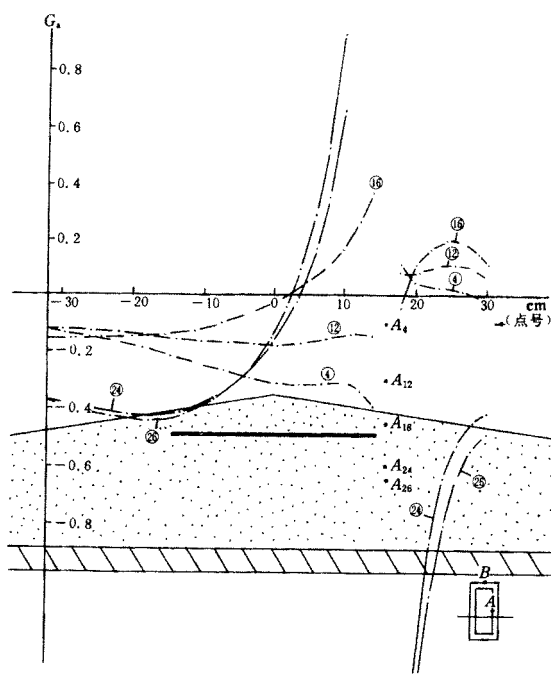


图9 在较理想条件下,“钻井”位于“油气藏”旁侧时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于32号点

用三极梯度法对油气藏进行开发监测

前面已述及油(气)井在生产过程中无法用电缆将电极下到井中,这时,可在众多开发井中根据需求选择少量开发井作为油气田开发过程中的监测井。事先将监测井套管外表面涂满高强度、耐高温的绝缘物质,只裸露最下端(已知油层以下)20~30 m 长的套管作为监测时的供电电极。电测时,可直接将套管作为井下输电导线,只需将电源的一个极连接到露出地面的套管上即可。这样,实际上只能有一个固定的供电点,已无法计算出本井参照 G_a 曲线,因此只能利用旁井参照资料对油气藏进行监测。

图10的模拟剖面与图8和图9完全相同,只是“探井”更靠近“油气藏”中轴。比较图8、图9和图10可见,在“油气藏”下方供电的 G_a 异常曲线②④和②⑥的幅值随着“探井”向“油气藏”边界靠近而依次减小,整条曲线依次向上抬升;实验结果还表明, G_a 异常幅值也随“油气藏”跨径的减小而减小。我们知道,油气藏在开发过程中,边界范围逐渐向内收缩,跨径逐渐减小,边界也逐渐向监测井靠近。因此,我们可对油气藏进行定期观测,利用上述 G_a 曲线的变化特点来了解油气藏的开发情况。

图11和图12示出了用低阻的三层板来模拟油气藏的实验结果。三层板尺寸为 $60\text{ cm} \times 28\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$,形状如图中右下角模型所示;电阻率为 $275\ \Omega \cdot \text{m}$,约为“围岩”的3~4倍;模型埋深20.5 cm。

图11是当钻井还处在“油气藏”边界内侧时所测得的旁井参照 G_a 异常曲线,图12是当钻井位于“油气藏”边界外侧时所测得的旁井参照 G_a 曲线。比较两图可见,其差异十分明显:第一,前者曲线②④和②⑥的左支还稍有异常极值显示,后者已无极值可言;第二,前者各曲线之间还

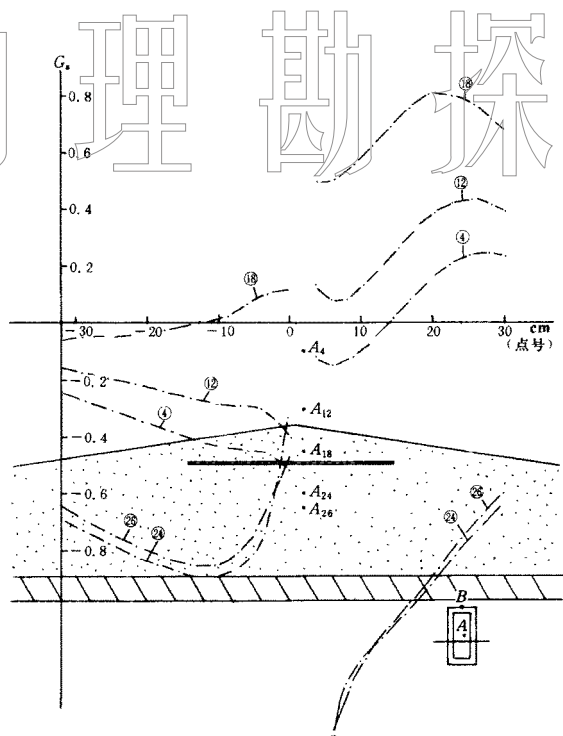


图 10 在较理想条件下,当“钻井”位于“油气藏”中轴附近时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于 32 号点

油井附近的油已采尽,油井已处在油气藏边界以外,这时无论采取何种增产措施都是徒劳的。

如果油井是在长轴状油气藏中部边界附近,可将测线沿长轴方向布置,这样,边界两侧的

比较分散,特别是曲线②④和⑥基本上还在“油气藏”上方供电的 G_a 曲线之下,后者已挤在一起呈相互交叉状,并已抬升至浅部曲线之上;第三,前者在油层顶、底供电的曲线②④和⑥在零线以上相交,而后者在零线以下相交。根据这些差异可更准确地确定油气藏边界和对油气藏进行更有效的开发监测。

如果油井产量大幅度下降,而 G_a 异常并无明显减小,即使已有明显减小,但在油气藏下方供电的 G_a 曲线基本上还在原来的曲线④之下(图 11),表明该油井并非无油,而应采取措施增加产量。若位于油气藏端头边界附近的油井产量已接近于零,且近期观测的在油气藏下方供电的旁井参照 G_a 曲线已无异常极值显示,整条曲线已抬升至原来的曲线④以上,并与原来在油气藏顶部供电的 G_a 曲线相交在零线以下(图 12),则表明该

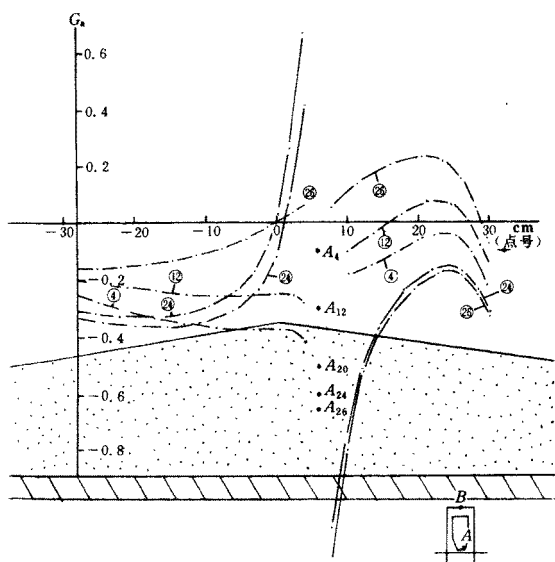


图 11 “钻井”位于低阻“油气藏”(ρ 约为围岩的 3~4 倍)尖灭端边界内侧时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于 32 号点

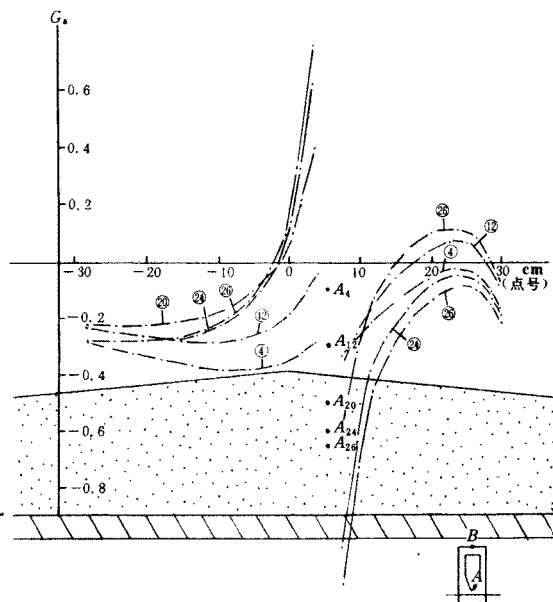


图 12 “钻井”位于低阻“油气藏”(ρ 约为围岩的 3~4 倍)尖灭端边界外侧时的旁井参照 G_a 曲线,参照井位于 32 号点

旁井参照 G_a 曲线的变化特征与端头情况基本相同。

对于产状十分平缓的油层在开采过程中,边界范围可能没有多大变化,或许主要表现为油水比的减小。油水比减小,油层电阻率必然降低,从而导致旁井参照 G_a 异常幅值的减小。因此,可根据 G_a 异常幅值的变化来了解油层油水比的变化情况。如果生产井含水量大幅度增加,而 G_a 异常并无明显减小,则须查明原因,采取措施降低含水量。如果生产井油水比大幅度降低, G_a 异常也大幅度减小,则属正常情况。如果油气藏下方供电的旁井参照 G_a

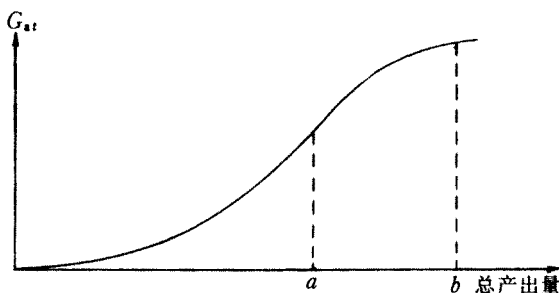


图 13 G_{at} 与油田总产出量关系曲线

曲线已接近浅部曲线形状(图 7),则表明矿区的油已基本采尽。

也可以像文献 1 那样,将整个套管作为供电电极,并采用上述方法进行观测,将同井原始观测值 ρ_s 和定期监测值 $\rho_{st_1}, \rho_{st_2}, \dots$ 代入公式

$$G_{at}^k = \frac{\rho_s^k - \rho_{st}}{\rho_{st}^k}$$

算得 G_{at} 曲线。式中各视电阻率值是经过时间校正后的值。如果油气藏还没有明显变化, G_{at} 曲线将无明显异常显示;开发过程中,随着油气藏范围的收缩或油水比的下降,油气藏对电场的畸变作用将逐渐减小, G_{at} 异常则将逐渐增大;当该油井附近的油已被采空(即处于油水边界以外)时, G_{at} 异常将有一次较大的增长;当整个油气藏接近于采空时, G_{at} 异常达最大值。这时的 G_{at} 异常就相当于文献 1 中的 ρ_{sc} 异常,可以该油气藏总产出量为横坐标、 G_{at} 曲线极大值为纵坐标,绘制出如图 13 所示的曲线。当 G_{at} —总产出量曲线出现拐点(a 点)之时,就是该油井接近采空之日;曲线达极大值(b 点)之时,则是该油藏接近采空之日。

结 束 语

实验结果及以上论述表明,本文提出的旁井参照法,显然已成为三极梯度法中不可缺少的一个组成部分。它不仅能对油气藏进行横向预测,而且还弥补了本井参照法不能作垂向预测的缺陷;更重要的是采用旁井参照法可计算时间校正系数,消除因地下介质电阻率随时间变化而对三极梯度法观测值引起的干扰,使三极梯度法有可能投入实际应用;也只有采用旁井参照法才有可能对油气藏进行开发监测。旁井参照法的采用,使得三极梯度法更加成熟和完善。

参 考 文 献

- 1 张天伦. 井中有套管情况下用直流电阻率法确定油气藏边界的实验与研究. 石油地球物理勘探, 1993, 28(3): 314~324
- 2 张天伦. 使用线电极供电的直流电阻率法预测砂岩构造型油气藏的实验与研究. 石油地球物理勘探, 1994, 28(3): 337~347
- 3 张天伦, 张伯林. 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, (1): 100~110