

SPWLA Logging Symposium Transactions

测井分析家协会 第二十九届年会论文集

测井分析家协会 编

石油工业出版社

测井分析家协会 第二十九届年会论文集

测井分析家协会 编

王曰才等 译

C711.0/07

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本论文集选译了 SPWLA 第二十九届年会论文共 21 篇,基本上反映了年会的中心议题“向综合地层评价发展”。对我国测井、地质及开发工作具有一定的指导性和启发性。

**Transactions Of The SPWLA
Twenty-Ninth Annual Logging Symposium
Volume I、II
SPWLA 1988**

**测井分析家协会
第二十九届年会论文集**

测井分析家协会 编

王曰才等 译

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 19 $\frac{1}{2}$ 印张 488 千字 印 1-2,000

1991 年 9 月北京第 1 版 1991 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0521-2/TE·498

定价: 5.10 元

目 录

一、随钻地层评价双深度电阻率测量 (A)	(1)
二、 岩石的电导率模型、孔隙几何形状和导电机理 (D)	(17)
三、 低阻砂岩的通用电导模型 (E)	(33)
四、部分饱和岩石电阻率特征的网络模型 (G)	(53)
五、应用计算机模拟提供漏失信息解释电阻率测井曲线 (H)	(70)
六、 应用高频电磁波衰减和传播时间确定渗透率和冲洗带饱和度 (I)	(87)
七、润湿性和压力对饱和度指数及胶结指数的影响 (K)	(108)
八、提高感应测井垂直分辨率的物理意义和限制 (O)	(124)
九、LOGIX——岩石物理评价的知识库系统 (R)	(146)
十、实用测井资料统计分析方法 (S)	(155)
十一、 用于泥质砂岩的前后一致的测井解释方法 (SLIM) (T)	(169)
十二、北海 Scapa 油田薄层评价典型实例 (V)	(189)
十三、比较薄层测井和岩心孔隙度及矿物成分含量的综合方法 (W)	(201)
十四、泥质砂岩地层中的核磁测井解释 (EE)	(213)
十五、在 ENDICOTT 油田利用测井资料识别岩相和估算渗透率 (FF)	(227)
十六、着色信息理论在用测井信息显示岩性图中的应用 (II)	(239)
十七、用反褶积曲线确定古沉积环境 (JJ)	(248)
十八、中子测井仪新的刻度和质量控制系统 (NN)	(261)
十九、应用井下刻度改进三相流的生产剖面 (WW)	(272)
二十、应用斯通利归一化微分能量评价裂缝性储集层 (XX)	(283)
二十一、井眼地震资料与测井资料的对比及所得的新储集层图像 (ZZ)	(294)

一、随钻地层评价双深度电阻率测量 (A)

Brian Clark, Martin G, Lüling
Jacques Jundt, Mike Ross, David Best

王曰才 译

摘要 补偿双电阻率测井 (CDR^①) 仪是随钻地层评价 (FEWD) 的一种新型测井装置。CDR 测井仪是和双感应相似的一种电磁波传播测井装置。把 2MHz 电磁波的相位移和幅度衰减转换为两个视电阻率, 这两个视电阻率提供了两个探测深度。CDR 测井仪能进行井眼补偿, 减小井壁凹凸不平的影响及其他误差。CDR 测井仪也可以在盐水泥浆、油基泥浆及空气钻井等各种钻井液的情况下工作。并可探测到 6in 的薄地层。但是对于薄层电阻率需要进行围岩校正。可以用监视两条视电阻率曲线的交叉点的方法估算地层厚度。

引 言

随钻地层评价 (FEWD) 是一种发展很快的事业。高质量的电阻率及核测井项目现在可适用于钻铤中的测井^[1]。使用电磁传播的电阻率测井是最成功的新测井项目之一。Gouilloud 及 Levy 的专利^[2]在 1970 年说明了这种方法, 但并未用于电缆测井中。感应测井仪之所以垄断了电缆测井市场, 是因为感应测井有比电磁波传播测井仪较深的探测深度。因此, 电磁波传播被限制在如 EPT 测井仪或 DPT 测井仪^[3]一类的介电常数测井仪中使用。但是感应测井仪要求很严格的机械允许误差, 而且感应测井仪很脆弱, 故不能经受住粗糙的钻井环境。电磁波传播测井仪可能比较结实, 可以给 FEWD 提供一种代替感应测井的仪器。

补偿双电阻率是为了给像墨西哥海湾地区、北海地区一类的服务场地而设计的电磁波传播仪器。这种仪器和双感应有许多相似之处: 它适用于低电阻层而不适用于高电阻层; 它可以在水基泥浆或油基泥浆中使用; 它有两个探测深度; 它受围岩影响。CDR 仪器和双感应仪器不同之点是: 有较好的纵向分辨力及较浅的探测深度。CDR 仪器直接测量趋肤效应, 而在感应测井测量值中受趋肤效应的影响, 需要进行校正。

CDR 仪器发射 2MHz 电磁波, 测量两个接收器之间的相位差及幅度衰减。把这些量转换为两个独立的视电阻率, R_{ps} 和 R_{ad} 。 R_{ps} 是由相位移求得的视电阻率 (探测深度浅), R_{ad} 是由幅度衰减求得的视电阻率 (探测深度深)。这些电阻率有两个探测深度。使用感应测井仪对探测深度的定义, 在高电阻率情况下, 对于 R_{ps} 来说, 探测深度是 45in,^② 对于 R_{ad} 来说, 探测深度是 65in。在低电阻率的情况下, 探测深度更小一些。对于 R_{ps} 来说, 电阻率范围是 $0.2 \sim 150 \Omega \cdot m$, 对于 R_{ad} 来说, 电阻率范围是 $0.2 \sim 40 \Omega \cdot m$ 。地层的介电常数把电阻率的上限限制到上述的这些数值。

CDR 仪器使用两个发射器 (图 1) 以补偿井眼影响。上下发射器分别单独地发射, 并把向上行和向下行的传播波的相位移和幅度衰减进行平均。井眼补偿显著地减小了由于井壁

①斯仑贝谢标志。

②非法定单位, 1in=0.0254m, 1ft=0.3048m, 1D=0.987×10⁻¹²m², 下同。

凹凸不平所引起的误差。对于非补偿的测井仪，井壁凹凸不平所引起的误差可能很显著。相反，平滑的井眼不引起错误的读数。井眼补偿也抵消了传感器及电子线路的误差，改善了仪器的精度，并给出对称的纵向响应。



图1 CDR 仪器

CDR 仪器能够探测薄至 6in 的地层，然而由邻层产生的围岩影响使得 R_{ps} 和 R_{ad} 不能读得真电阻率。 R_{ps} 受围岩的影响比 R_{ad} 小。当穿过层界面时， R_{ps} 比 R_{ad} 有比较尖锐的响应。 R_{ps} 测井曲线和 R_{ad} 测井曲线的交叉点可以精确地确定水平层界面的位置。提供的 CDR 仪器的层厚校正图板可以帮助进行薄层解释。

CDR 仪器有两种工作方式：实时测量和停钻测量。在实时测量方式中，能源由泥浆叶轮机供给，用泥浆脉冲遥测装置把数据传送到地面。在停钻测量方式中，电池供给能源，没有实时数据传输。电池及井下存储器可以使 CDR 仪器在井眼内起下钻时进行测井。甚至于可以在和实时硬件一同下入井中时进行测井。目前 CDR 测井仪器可用于 6.1/2in 的钻铤中，但是，也在研制 8in 及 9 1/2in 的仪器。钻铤是非磁性的，也适合于井斜方向和井斜角的测量。仪器中也备有闪烁伽马探测器。

电阻率转换

可以把在两个接收器之间测得的相位移和幅度衰减转换为两个独立的视电阻率 R_{ps} 和 R_{ad} 。在获得这些变换时有两个步骤。第一个步骤必须考虑地层的介电常数。这需要了解典型地层的介电常数和电阻率的关系。第二个步骤需要精确的理论模型，以地层电阻率的函数计算相位移及幅度衰减。 R_{ps} 和 R_{ad} 的转换是这些函数的逆运算。

在 2MHz 时，相位移和幅度衰减主要与电阻率有关，和介电常数的关系很弱。然而，在高电阻地层中为了不损失精度，就不能忽视介电常数。当计算这种转换时，最好用电阻率的函数来表示介电常数，而不是把介电常数设置为任意的常数。用在 300 个碳酸盐岩、砂岩及泥质砂岩（而不是泥岩）的岩心样品上测得的大量数据^[4]，找出了介电常数 (ϵ') 和电阻率 R 之间的关系。在 2MHz 时测得的介电常数及电阻率交会得出图 2。在介电常数和电阻率之间有很强的相关关系，这个相关关系可以用下式表示：

$$\epsilon' \approx A \times R^{-\alpha}$$

式中 A 、 α ——经验系数。

对于全部的数据进行格罗巴尔 (Global) 拟合，得到

$$A \approx 110$$

及

$$\alpha \approx 0.35^{①}。$$

①碳酸盐岩及砂岩分别有不同的 α 值： $\alpha_{carb} \approx 0.28$ ， $\alpha_{sand} \approx 0.40$ 而 A 对这两种岩性来说是相同的。

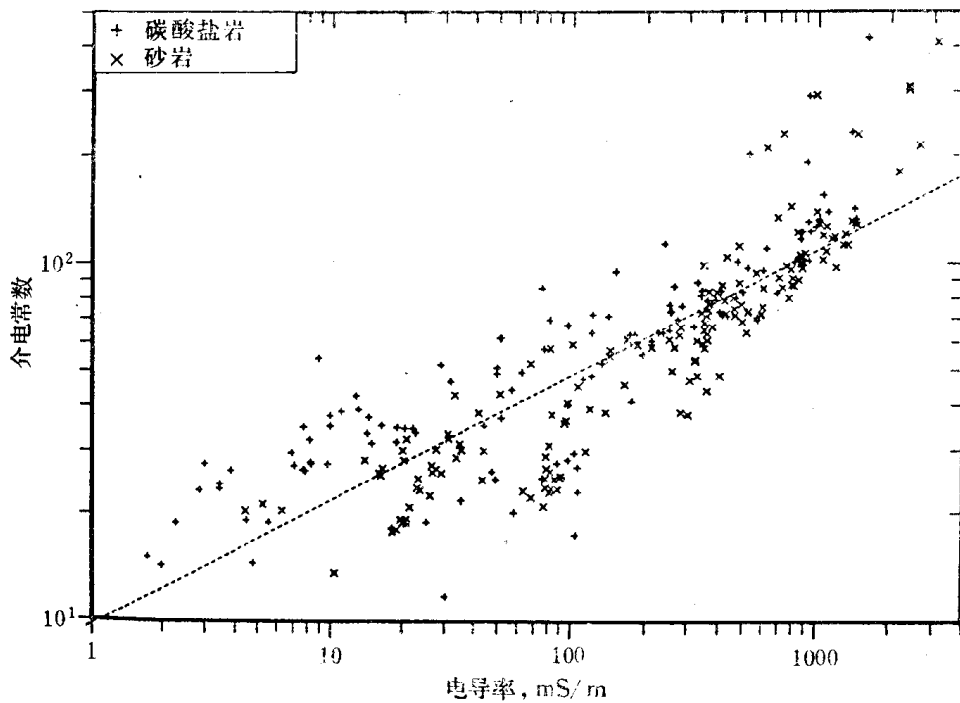


图2 2MHz 岩心数据

当我们有从两个测得的量（相位移及幅度衰减）求得的两个视电阻率（ R_{ps} 和 R_{ad} ）时，上述关系式就使我们不能把介电常数作为一个独立变量。

因此，可以用精确的理论模型计算在每一个接收器处的电磁波场的相位及幅度。把相位移定义为远接收器的相位和近接收器相位之差。把幅度衰减 AT [以 dB（分贝）为单位] 定义为 $AT = 20 \log_{10} (A_{far} / A_{near})$ 。式中 A_{far} 及 A_{near} 是在远接收器和近接收器处的幅度。对于给定电阻率的均匀介质计算这些量。这个理论模型是很完善的。人们计算了在钻铤中诱导的面电流，讨论了钻铤剖面及钻铤电阻率。把线圈嵌在钻铤上的凹槽中。这样就增加了衰减，但是对相位移几乎没有影响。相位移及幅度衰减是电阻率的单调函数。把它进行反演就成为这种变换。

R_{ps} 和 R_{ad} 的变换示于图 3。把测得的相位移变换为 R_{ps} 。把测得的幅度衰减对几何因子分布损失进行校正，变换为 R_{ad} 。几何因子分布损失与地层无关，但是由于发射器和两个接收器之间的距离不相等而引起的。几何因子分布损失近似为 5dB，可以在空气刻度中测得。相位移及幅度衰减随着电阻率的增加而减小。因为相位移及幅度衰减在高电阻率时是很小的，所以在高阻地层中精度是最低的。

不能从岩心数据和关系 $\epsilon' \approx A \times R^{-2}$ 之差估算由于介电常数所引起的误差。对于 R_{ps} 来说，这种误差在 $1\Omega \cdot m$ 时小于 5%，一直到 $100\Omega \cdot m$ 都保持为那样小。对于 R_{ad} 来说，在 $1\Omega \cdot m$ 时，这种误差小于 10%，一直到 $10\Omega \cdot m$ 都保持为很小的值。在较高的电阻率时，这种误差增大。介电常数影响使 R_{ad} 的上限大约为 $40\Omega \cdot m$ ，使 R_{ps} 的上限大约为 $150\Omega \cdot m$ 。

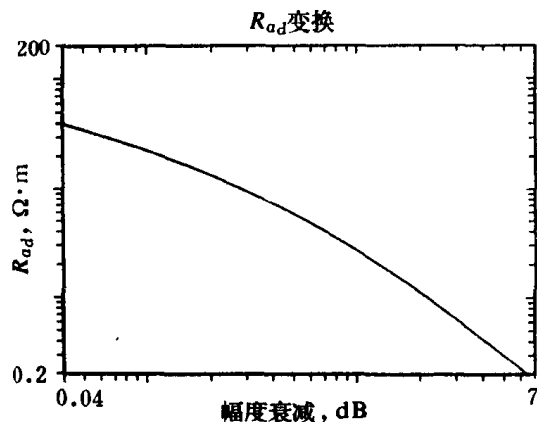
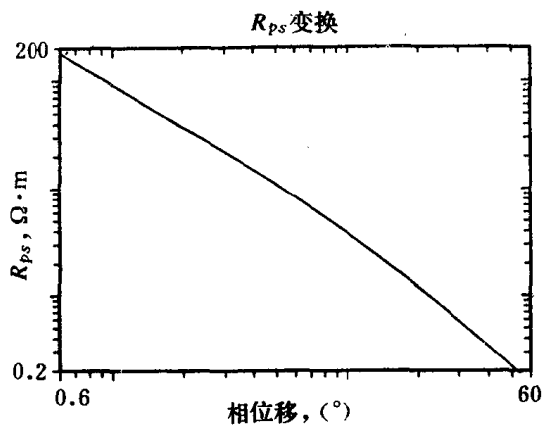


图3 R_{ps} 和 R_{ad} 变换

井眼影响

井眼影响取决于井壁是否平滑或凹凸不平。在平滑的井眼中，井眼直径和泥浆电阻率对视电阻率几乎没有影响。对于很大的 R_t 与 R_m 的比值来说，可以读得 R_t 。在凹凸不平的井眼中，在导电的泥浆中，井眼影响可能很大。如果不做井眼补偿，则井壁凹凸不平的影响是很严重的。井壁垮塌类似于薄层。用井眼补偿的方法可以使这个问题显著地减小。

图4中所示的 R_{ps} 和 R_{ad} 的井眼校正图板假设井眼是平滑的井眼。这些图板是对 6.5in

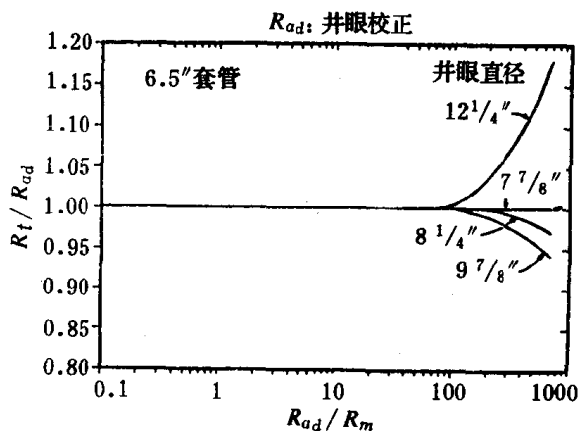
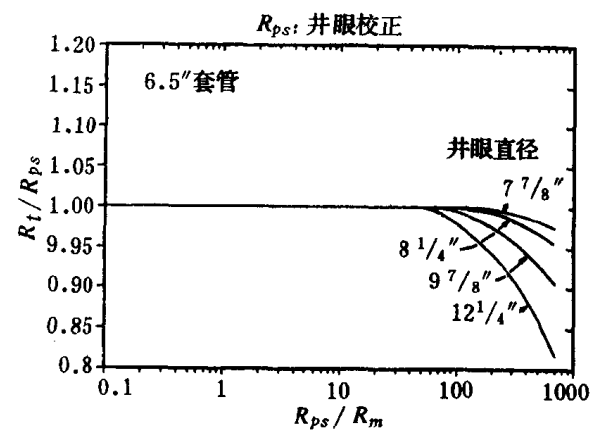


图4 R_{ps} 和 R_{ad} 井眼校正图

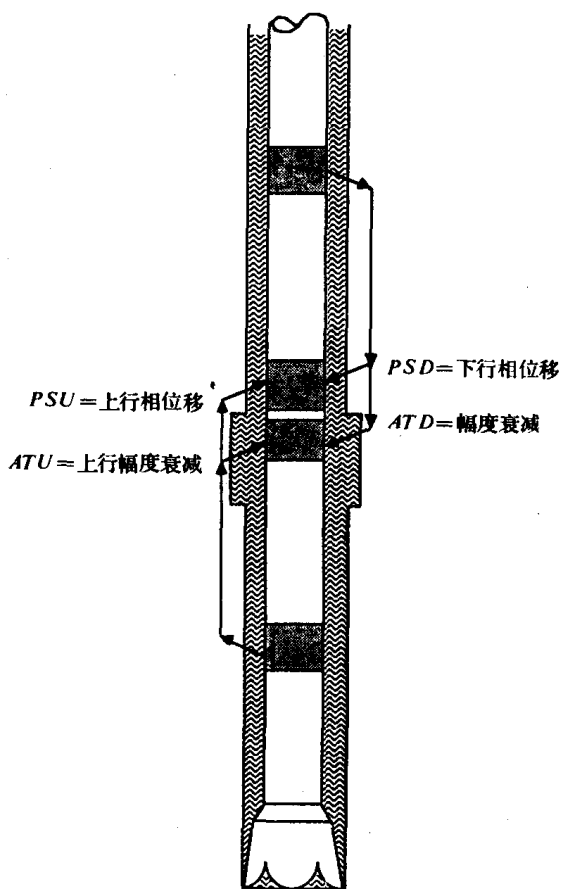


图5 仪器在井壁凹凸不平的工作情况

的钻铤在 $7\frac{7}{8}\text{in}$, $9\frac{7}{8}\text{in}$ 及 $12\frac{1}{4}\text{in}$ 井眼中计算的。对于水基泥浆采用的泥浆电阻率是从 $0.04\sim 4\Omega\cdot\text{m}$ 。对于油基泥浆, 采用的泥浆电阻率是 $1000\Omega\cdot\text{m}$ 。对于 R_{ps}/R_m 和 R_{ad}/R_m 小于 100 来说, 是不需要进行井眼校正的。除了 $12\frac{1}{4}\text{in}$ 的井眼以外, 对于 R_{ps}/R_m 和 R_{ad}/R_m 一直到 1000 来说, 井眼校正都是很小的。井壁凹凸不平是比上述图板所指出的更为严重的问题。(图 5)。假设接收器穿过一个井壁垮塌处, 下发射器正在发射。到达下接收器的波比到达上接收器的波旅行了较长的泥浆路径。因此, 当 R_m 小于 R_i 时, 上行波的相位移 (PSU) 及上行波的幅度衰减 (ATU) 是很小的。由 PSU 及 ATU 推导出的视电阻率往往是太高。现在假设上发射器在发射, 下行波的相位移及幅度衰减 (PSD 及 ATD) 太大了。然而井眼补偿的相位移和幅度衰减 $PS=(PSU+PSD)/2$ 及 $AT=(ATU+ATD)/2$, 使这种误差减小了许多。

在单一发射器测量中, 井壁凹凸不平的严重影响及井眼补偿时所进行的改进, 在图 6 中作了说明。在这个例子中, 对于北海油田的泥岩典型情况是 $R_m=0.1\Omega\cdot\text{m}$, $R_i=2\Omega\cdot\text{m}$, 钻头尺寸是 8.5in 。井眼校正图板对于 $R_i/R_m=20$ 来说, 没有指示出有任何影响。这口井有直径为 8.75in , 9in , 9.25in , 9.5in , 10in , 10.5in 及 11in 的井壁垮塌的 2ft 长井段。在没有补偿的测井曲线中 (由 PSU 及 ATU 求得的曲线中), 井壁垮塌井段类似于有大电阻率幅度的薄层。当进入井壁垮塌段时, 没有补偿的电阻率太高了。当离开井壁垮塌段时, 没有补偿的电阻率又太低了。例如, 井径 11in 的井壁垮塌井段, 很像 $7\Omega\cdot\text{m}$ 和 $0.9\Omega\cdot\text{m}$ 的电阻率薄层。如果没有附加的信息, 则不能用没有补偿的测量仪器把薄层和井壁凹凸不平的影响区分开。随着泥浆电阻率的减小, 随着地层电阻率的增加, 井壁凹凸不平的影响很快地增加。然而 R_{ad} 对井壁凹凸不平不很灵敏, 仍能提供有用的测井曲线。在井眼补偿测井曲线中, 井壁凹凸不平的影响最大只有非补偿的 $1/10$, 井壁垮塌段也不像薄层。因此, 对于 CDR 仪器来说, 井眼补偿是绝对需要的。

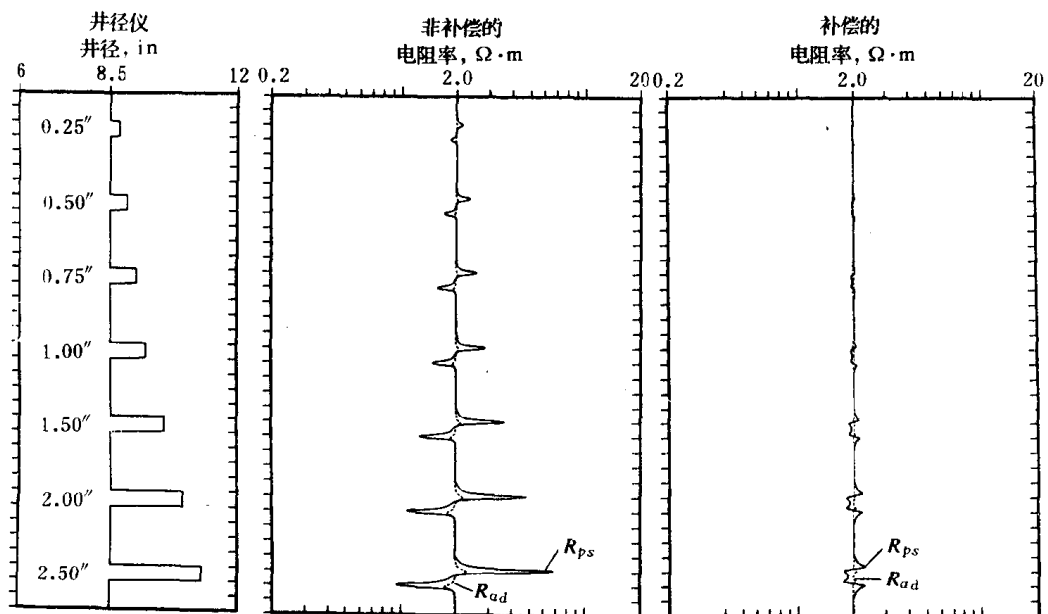
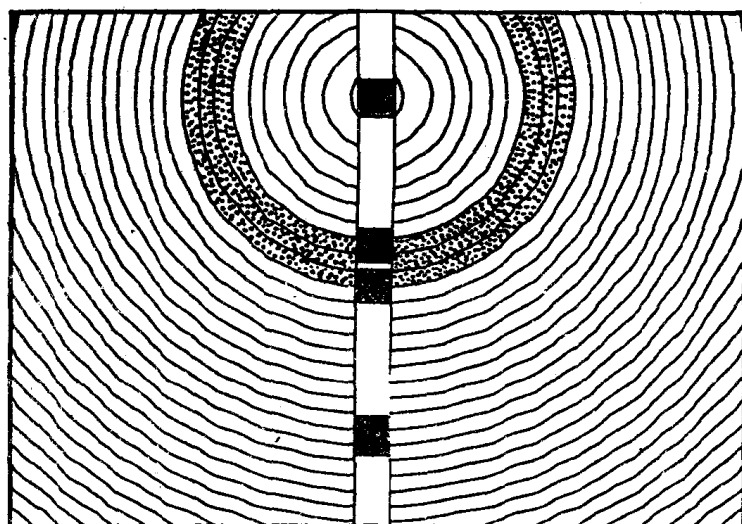


图 6 没有补偿和补偿了的电阻率对比

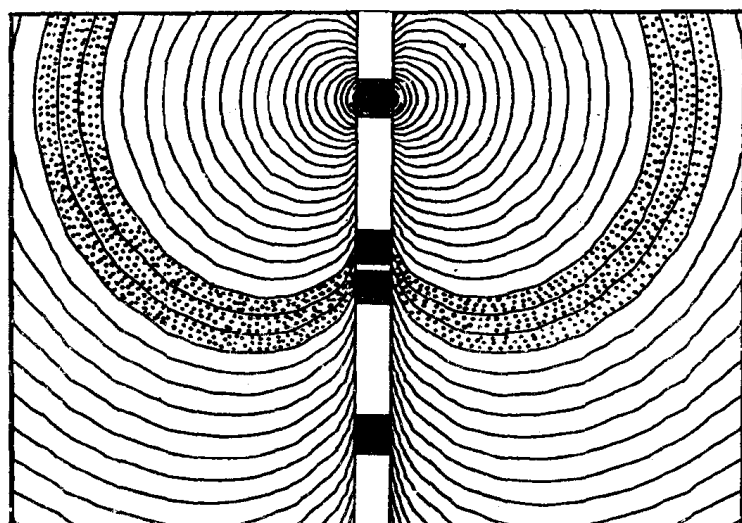
探测深度

R_{ps} 和 R_{ad} 提供浅及深的探测深度。从电磁场可以了解到这一点。 $1\Omega \cdot m$ 地层的等相位面及等幅度面示于图 7 和图 8 中。因为波在各个方向都以相同的速度传播，所以等相位面是球面。因为波在径向比在纵向强，所以等幅度面为超环面。这是磁偶极子天线的特性。发射线圈类似磁偶极子。在近接收器处和远接收器处的相位在他们所穿过的两个球面上是常数。所以在两个接收器之间的相位差相当于图 7 所示的画阴影的区域。近接收器处和远接收器处的幅度在他们所穿过的两个超环面上是常数，所以两个接收器之间的幅度衰减相当于图 8 所示的画阴影的区域。幅度衰减相当于比相位移深得多。



10°等值线

图 7 等相位面图



3dB等值线

图 8 等幅度面图

大量的理论研究证实 R_{ad} 永远比 R_{ps} 深, 这个研究假设侵入剖面为台阶型。侵入区的电阻率为 R_{xo} , 原状地层的电阻率为 R_t , 井眼的电阻率为 R_m 。从这个研究得到的两个例子说明低阻侵入和高阻侵入两种情况。低阻侵入的例子, $R_t = 4\Omega \cdot m$, $R_{xo} = 0.7\Omega \cdot m$, $R_m = 0.07\Omega \cdot m$, 井眼直径 8.5in (图 9)。这个例子代表低阻泥浆滤液侵入的油砂。一直到 36in 的侵入, R_{ad} 都能读得 R_t 。然而 R_{ps} 只能在 22in 侵入以内读得 R_t 。 R_{ad} 和 R_{ps} 两者都能在 70in 以上的侵入情况下读得 R_{xo} 。高阻侵入的例子, $R_t = 0.3\Omega \cdot m$, $R_{xo} = 2\Omega \cdot m$, $R_m = 0.1\Omega \cdot m$, 井眼直径 8.5" (图 10)。这个例子代表被淡水泥浆滤液侵入的含水砂层。 R_{ad} 一直到大约 30in 的侵入, 可以读得 R_t 。 R_{ps} 都在 96" 以上的侵入时读得 R_{xo} , R_{ad} 比 R_{ps} 深得多。

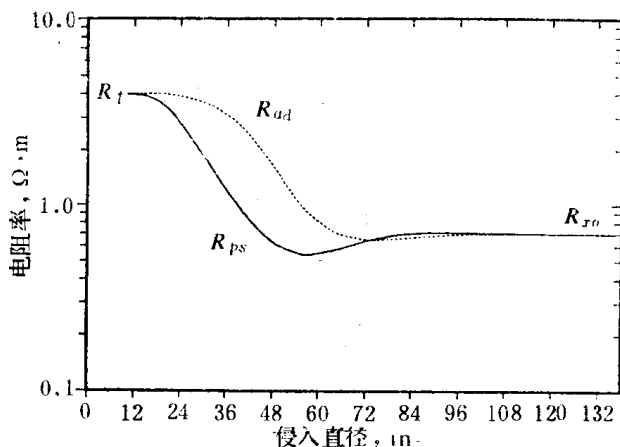


图 9 台阶型侵入剖面

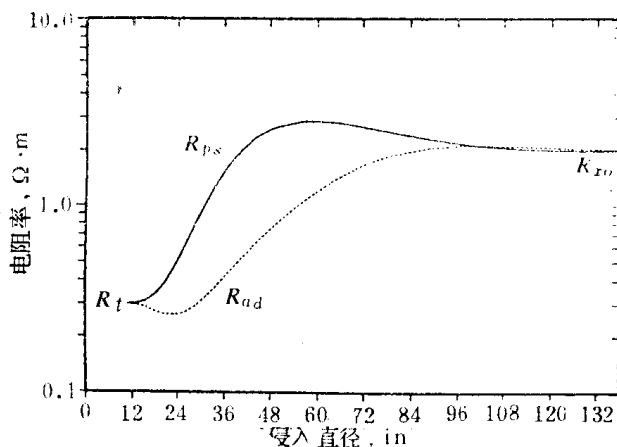


图 10 台阶型侵入剖面

用几何因子理论可以更好地了解双侵入深度。这可以提供 R_{ps} 及 R_{ad} 的探测深度与感应测井相比较的基础。用台阶型侵入剖面的结果定义 R_{ps} 及 R_{ad} 的径向几何因子。这些几何因子, $G_{ps}(d)$ 和 $G_{ad}(d)$ 满足

$$\frac{1}{R_{ps}(d)} = \frac{G_{ps}(d)}{R_{xo}} + \frac{(1 - G_{ps}(d))}{R_t}$$

和

$$\frac{1}{R_{ad}(d)} = \frac{G_{ad}(d)}{R_{xo}} + \frac{(1 - G_{ad}(d))}{R_t}$$

式中 d ——侵入直径。

$R_{ps}(d)$ 及 $R_{ad}(d)$ 是在假设侵入剖面为台阶型时计算的^①。趋肤效应比感应测井强。所以几何因子对 R_{xo} 及 R_{ad} 都比较强。这两种侵入情况的相应的径向几何因子示于图 11 及图 12。在两种情况下, 这些因子是不同的, 形状稍微有些不同, 侵入深度也有些不同。此外, 因为 R_{ps} 和 R_{ad} 并不永远在 R_{xo} 及 R_t 之间, 所以 $G_{ps}(d)$ 和 $G_{ad}(d)$ 没有被限制在 0~

①这种方法也用来计算电极电阻率仪器的假几何因子。

1 的范围内。这种影响是由在侵入前沿处的波的反射所引起的。

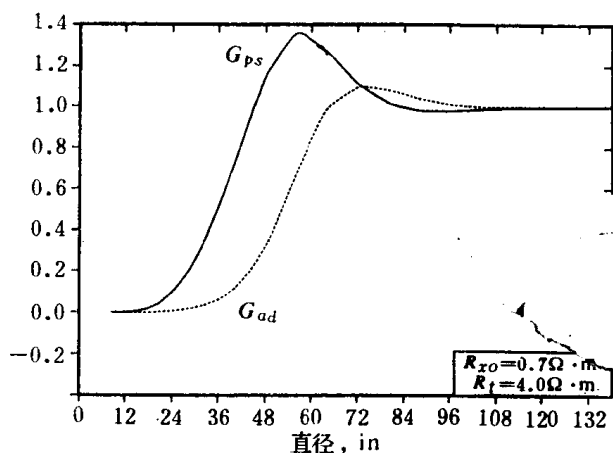


图 11 径向几何因子

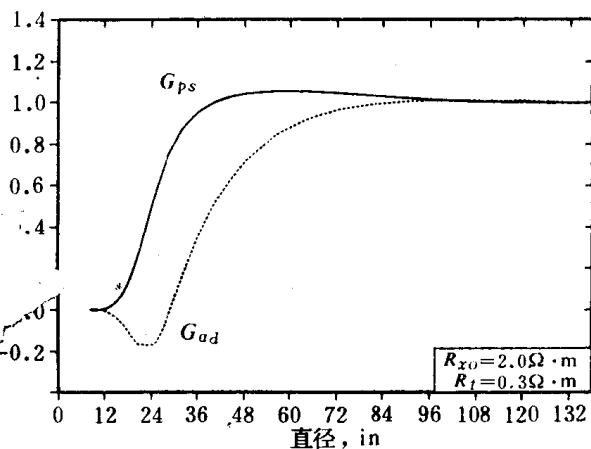


图 12 径向几何因子

探测深度定义为 $G_{ps}(d) = \frac{1}{2}$ 及 $G_{ad}(d) = \frac{1}{2}$ 处的直径。这是感应测井探测深度的标准定义。响应的一半来自探测深度以外的区域。在这两个例子中 R_{ps} 的探测深度是 36in 及 24in, R_{ad} 的探测深度是 52in 及 40in。由于趋肤效应的原因探测深度和 R_t 有很强关系, 而和 R_{xo} 的关系不是很强。低阻地层趋肤效应小。趋肤效应限制波穿入地层。地层电阻率的影响示于图 13。在图 13 中, 对 30 个台阶型侵入剖面的实例, 画出了探测深度。趋肤效应把探测深度限制在 $R_t = 0.2 \Omega \cdot m$ 和 $10 \Omega \cdot m$ 之间。 R_{ps} 和 R_{ad} 的探测深度, 由在 $R_t = 0.2 \Omega \cdot m$ 时的 20in 及 40in 变到 $R_t > 10 \Omega \cdot m$ 时的 45in 和 65in。在 $10 \Omega \cdot m$ 以上, 探测深度继续是相当的恒定, 这是因为仪器的几何形状成为限制的因子的缘故。比较起来, 中感应及深感应的探测深度对于高电阻率来说是 60in 及 130in。对于每一个 R_t 值, 都有几何 R_{xo} 值, 一般都在 $1 \sim 20 \Omega \cdot m$ 之间。探测深度也随着 R_{xo} 而变。但是 R_{xo} 影响探测深度的程度比 R_t 影响探测深度的程度小。

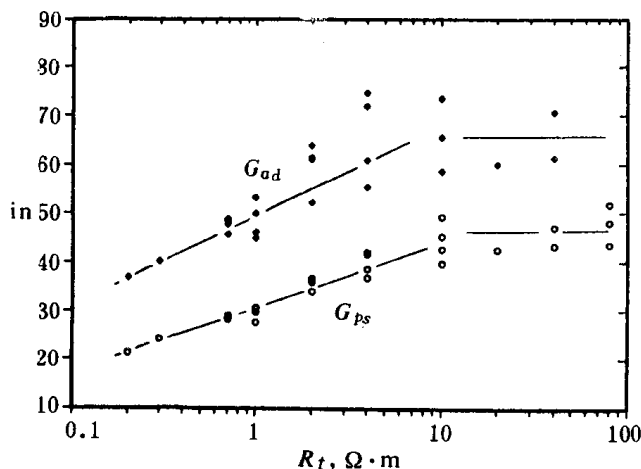


图 13 50%几何因子 DOI

在所有的实例中, R_{ad} 都近似比 R_{ps} 深 20in。因此, R_{ps} 和 R_{ad} 可以对 20in 及 70in 之间的侵入深度情况来说进行侵入的监测。如果 $R_{ps} = R_{ad}$, 因为随钻测井时, 深侵入是不大可能的, 所以两者都读得 R_t 。如果 R_{ad} 不等于 R_{ps} , 则至少发生 20in 的侵入, 指示为渗透层。当 $R_{ad} > R_{ps}$, 则 $R_t > R_{xo}$ 就指示为可能的生产层。当 $R_{ad} < R_{ps}$, 则 $R_t < R_{xo}$ 就指示为水层。在图 14 中说明了这些情况, 在台阶型侵入剖面的第一个例子中,

$R_t = 4\Omega \cdot m$, $R_{xo} = 0.7\Omega \cdot m$ 的生产层有 36in 的侵入。 R_{ad} 测量高阻层, 在有 $3\Omega \cdot m$ 的层中心读数。 R_{ps} 没有看到这个层, 如果没有 R_{ad} , 则可能完全漏失这个生产层。如果我们使用 R_{ps} 和 P_{ad} , 则我们可能得出的结论是具有可动油气的渗透层。在第二个例子中, $R_t = 0.3\Omega \cdot m$, $R_{xo} = 2\Omega \cdot m$ 的 6ft 水层有 36in 深的侵入。 R_{ad} 读数为 $0.4\Omega \cdot m$, 但是 R_{ps} 读得是侵入带数值。 R_{ps} 和 P_{ad} 一起使用可以指示出淡水泥浆滤液侵入的渗透性水层。如果没有 R_{ad} , 则可能把 R_{ps} 误解为可能的生产层。

纵向分辨力

纵向分辨力和围岩影响是电阻率测井中的两个非常重要的特性, 不应当把它们混淆。 R_{ps} 和 R_{ad} 能够识别薄到 6in 的层, 6in 是两个接收器之间的间距。因为 CDR 仪器能够探测很薄的层, 所以 CDR 仪器在定性地说有很好的纵向分辨力。然而 R_{ps} 和 R_{ad} 在薄的高阻层处不能读得 R_t 。为了读得 R_t , 对 CDR 仪器来说, 最小的层厚取决于 R_t , 以及围岩电阻率 R_s 。这种仪器的最小层厚就定量地确定了纵向分辨力。

用图 15 和图 16 所示的模拟曲线定性和定量地说明分辨力的差别, 两个例子都有厚度为 $\frac{1}{2}$ ft, 1ft, 2ft 及 4ft 厚的层, 井眼直径为 8.5in。围岩电阻率为 $1\Omega \cdot m$ 。第一个例子是低阻层 ($R_t = 0.3\Omega \cdot m$), 第二个例子是高阻层 ($R_t = 10\Omega \cdot m$)。在两个例子中 R_{ps} 和 R_{ad} 的定性分辨力是很好的, 甚至于 $\frac{1}{2}$ in 的地层也能探测出来。然而 R_{ps} 及 R_{ad} 并不是永远能读得 R_t 。在 $R_t = 0.3\Omega \cdot m$ 的地层中, R_{ps} 在 1ft 的地层中能读得 R_t , 而 R_{ad} 在 4ft 地层中能读得 R_t 。很清楚, 探查一个层和读得真电阻率不是相同的事。这种情况是和感应测井很相似的。当 $R_t > R_s$ 时很难测得 R_t 。

R_{ps} 和 R_{ad} 的层厚校正图板示于图 17 及图 18。假设无侵入的地层其围岩电阻率为 1, 2, 4 或 $10\Omega \cdot m$, 计算了这些电阻率情况下的图板。这些图板是取自斯仑贝谢公司的中感应及深感应层厚校正图板。这可以使我们把 CDR 仪器的围岩影响和感应测井去直接进行比较。在所有的情况下, R_{ps} 都有比 R_{ad} 及中感应测井较小的围岩影响。基本上, 无论 R_t 和 R_s 为何值, 对 8ft 的层都不要进行 R_{ps} 的校正。 R_{ad} 有比中感应较大的围岩影响, 但是一般来说, 比深感应有较小的围岩影响。 R_{ps} 及 R_{ad} 的校正图板比感应测井校正图板有更好的性质, 感应测井校正图板相对于层厚来说有显著的振荡现象。在某一层厚以上, R_{ps} 和 R_{ad} 的校正值

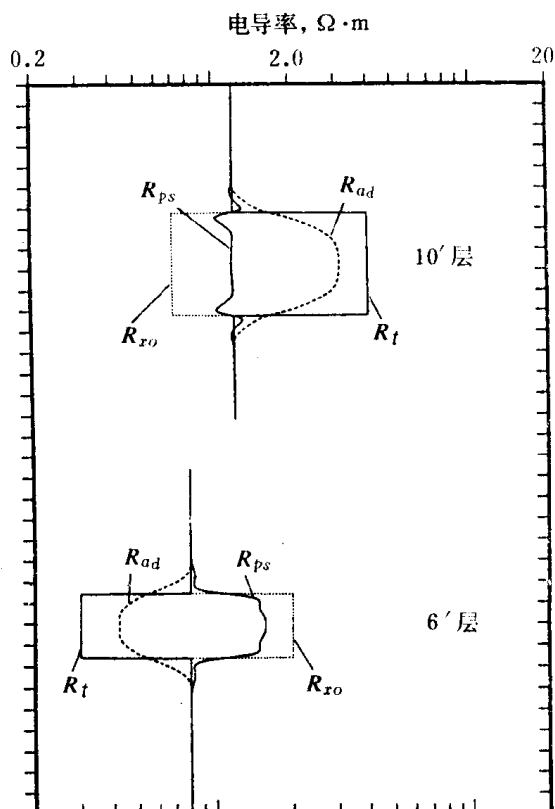


图 14 6ft 和 10ft 层的电阻率

就没有变化。当 $R_t < R_s$ 时, R_{ps} 能够在 1ft 到 2ft 的地层中读得 R_t 。在其他的极值情况下, 当 $R_t / R_s = 40$ 时, 为了读得 R_t 及 R_{ad} , 需要 16ft 的地层。一些校正曲线在大约 $2\frac{1}{2}$ ft 的层厚处, 显示了小的弯曲, $2\frac{1}{2}$ ft 接近于发射器与接收器的间距。

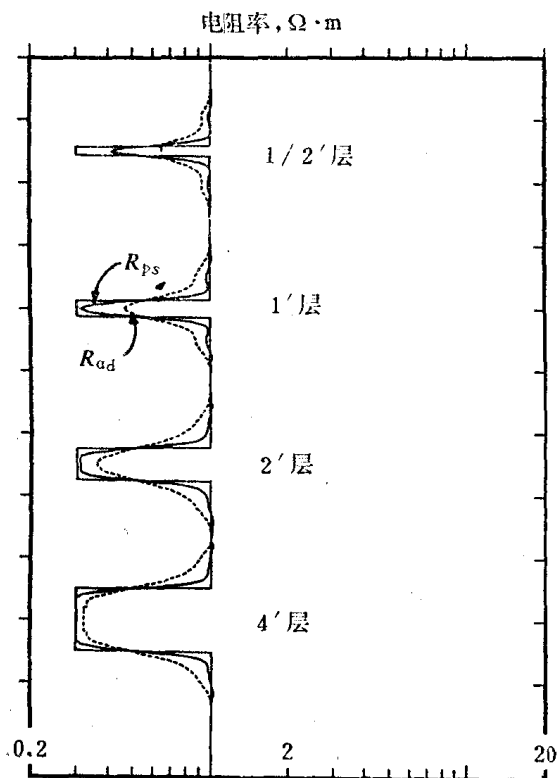


图 15 $\frac{1}{2}$ ft、1ft、2ft、4ft 层的电阻率

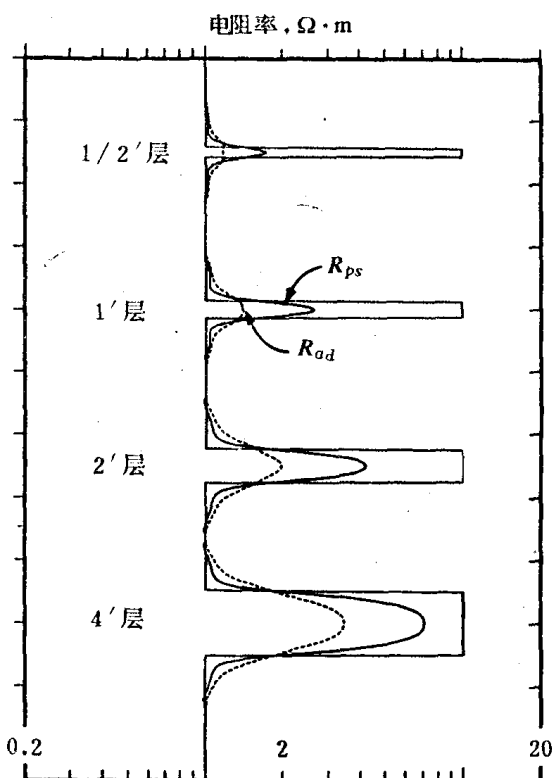


图 16 $\frac{1}{2}$ ft、1ft、2ft、4ft 层的电阻率

R_{ps} 和 R_{ad} 有不同的围岩影响, 这个事实与 R_{ps} 和 R_{ad} 具有不同的探测深度是一致的。较深的探测值有较大的层厚影响。由图 7 和图 8 也可想像到这一点。等相位面在纵向上延伸得比等幅度面小。因此相位移受围岩的影响比幅度衰减小。 R_{ps} 对层厚来说, 比 R_{ad} 响应得更迅速。

因为 R_{ps} 和 R_{ad} 是由井眼补偿测量装置得来的。他们的纵向响应是对称的, 他们的测量点正好位于接收器之间。这一点产生了一个有意义的结果: R_{ps} 和 R_{ad} 在水平层的层界面处互相交叉。在图 15 和图 16 中可看到这种结果。当侵入为 20in 或小于 20in 时, 上述现象给我们提供了一种容易确定层厚的方法。在较深的侵入时, R_{ps} 和 R_{ad} 在地层中可能读得不同的电阻率, 因此不互相交叉。(参看图 14)。一旦从交叉点确定层厚之后, 就能够用层厚校正图板估算 R_t 。例如在图 16 的 4ft 厚的层中, R_{ps} 读得 $7\Omega \cdot m$, R_{ad} 读得 $3.5\Omega \cdot m$, R_{ps} 的层厚校正图板对于 4ft 层来说, 估算出 R_t 为 $10\Omega \cdot m$ 。 R_{ad} 层厚校正图板太灵敏了, 以致于不能估算出 R_t , 但是显示出 $10\Omega \cdot m$ 是不合理的。

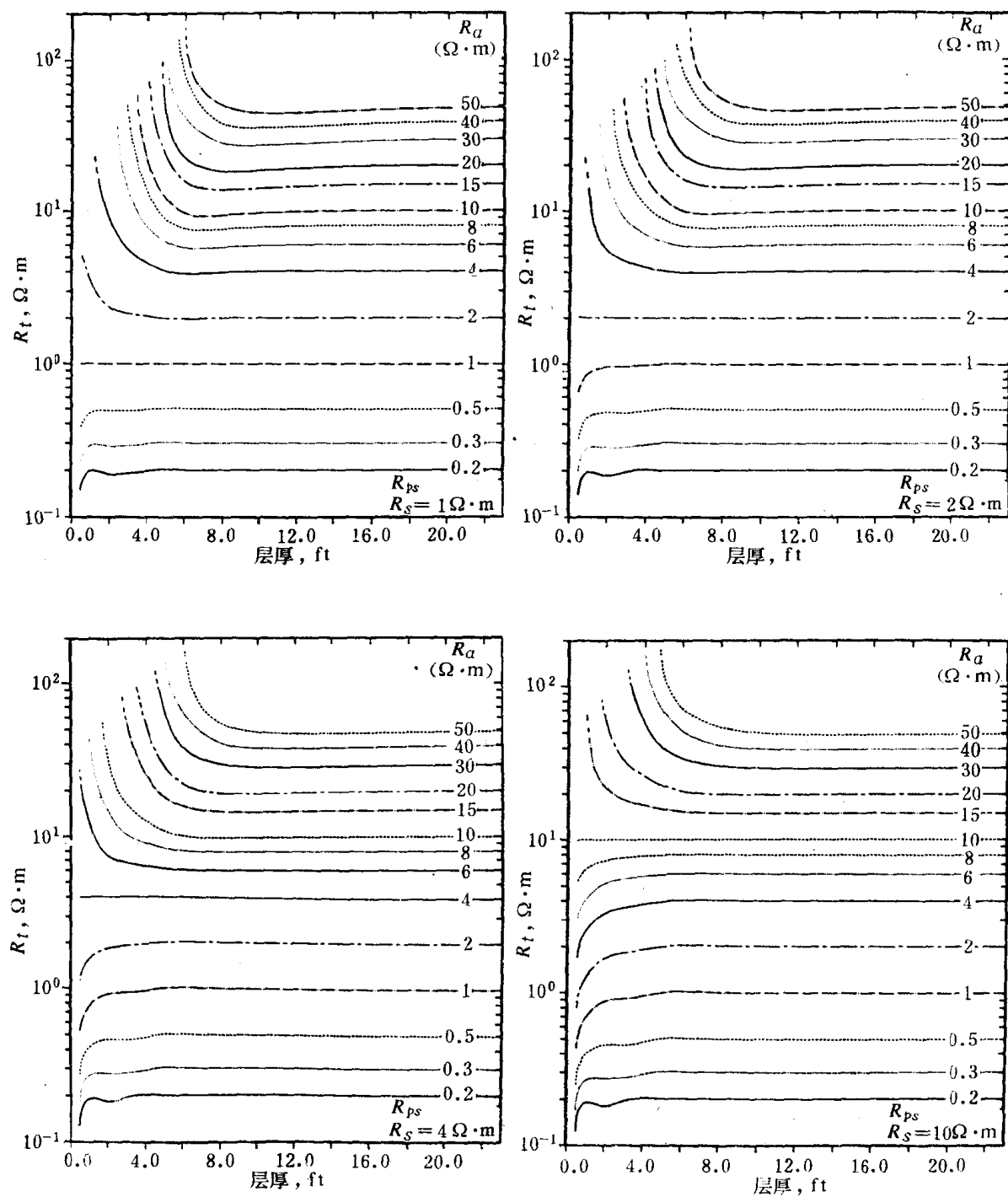


图 17 CDR 层厚校正

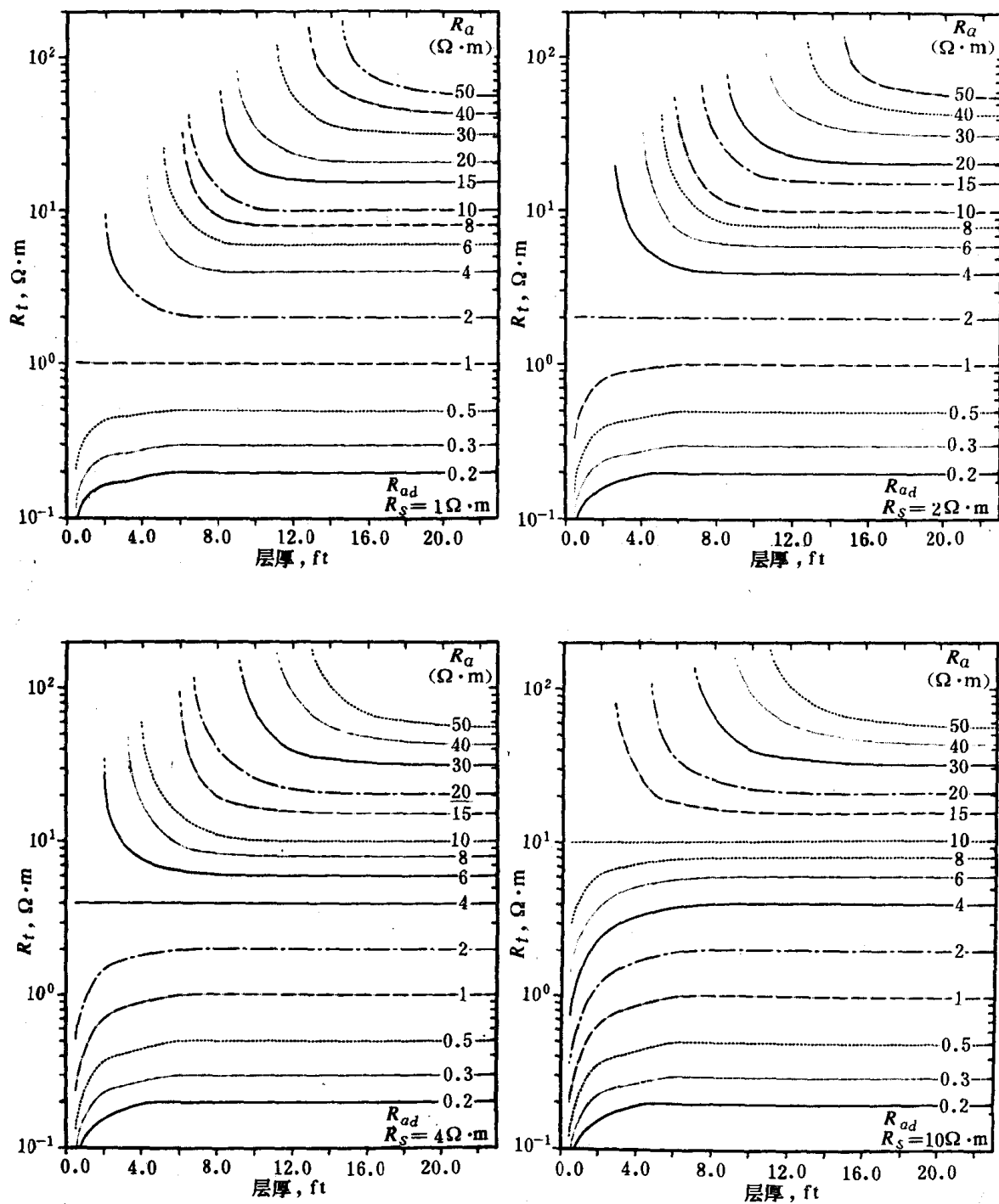


图 18 CDR 层厚校正

测井实例

为了与感应仪器进行比较，在试验井中，用 CDR 仪器进行了测井。这种试验井中的测井，由于下列原因，对 CDR 仪器提供了很好的试验：第一，因为没有侵入，所以 CDR 仪器和双感应读得的地层电阻率应该相同。第二，这些地层有很好的特性，所以这两种仪器都在同样的条件下进行测井。第三，这种试验井的试验对于 CDR 仪器来说是严格的试验，在高电阻率情况下，精度最低。地层电阻率变化范围在 $4 \sim 60 \Omega \cdot \text{m}$ 之间。这个井中装有 8in 的导电玻璃纤维套管，泥浆电阻率 $R_m = 0.5 \Omega \cdot \text{m}$ 。

从这口井测得的 CDR 测井曲线，双感应测井曲线及地层倾角测井曲线示于图 19。

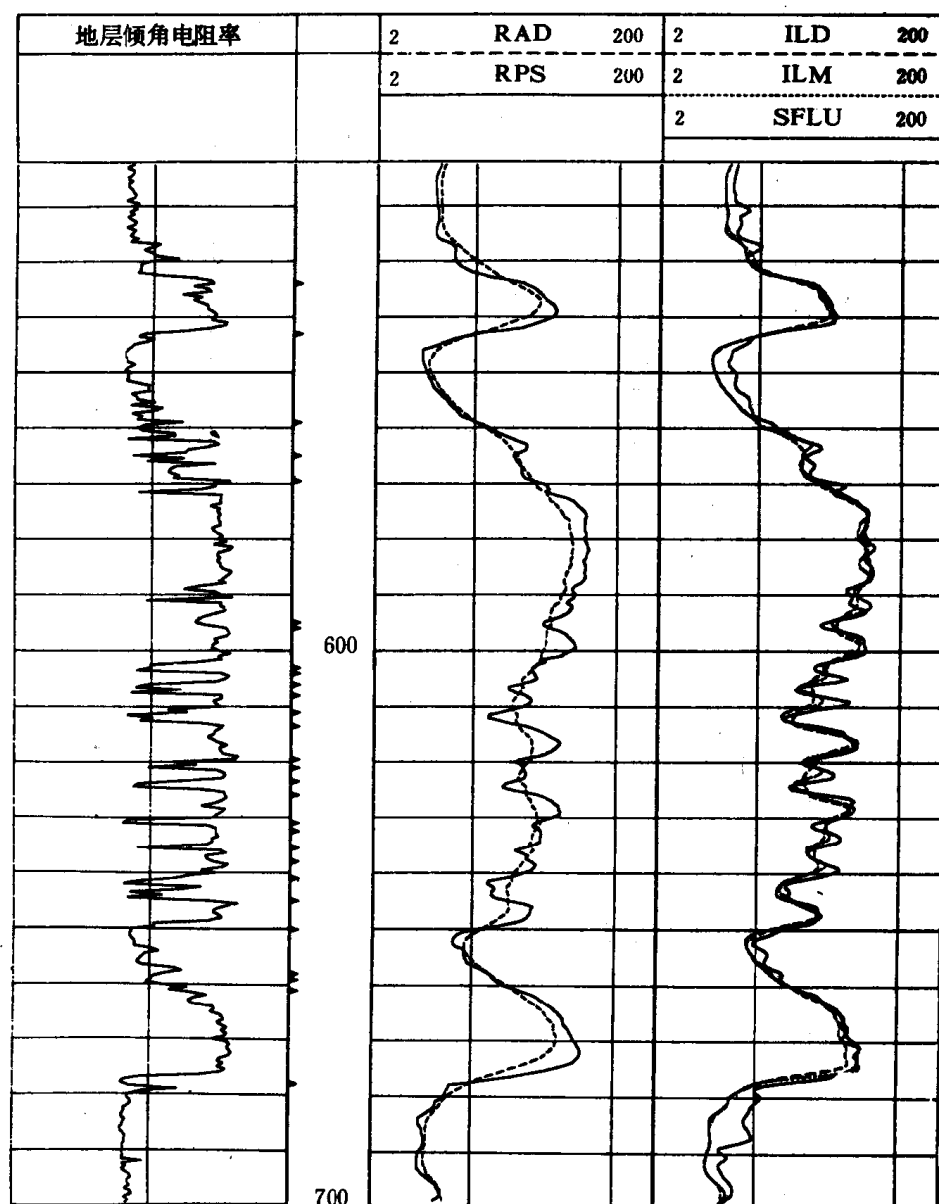


图 19

R_{ad} 及 R_{ps} 示于第二道。深感应 (ILD)、中感应 (ILM)、球形聚焦测井 (SFL) 示于第三