

美国石油地质学家协会进修丛书

R. H. 麦 克 著

地层评价测井

.295
857

石油工业出版社

美国石油地质学家协会进修丛书(十四)·

地 层 评 价 测 井

〔美〕 R.H. 麦 克 著

沈志成 范伟粹 译

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书共有六部分。书中介绍了用于地层评价测井的仪器、测量原理及其影响因素。介绍了求地层温度、地层水电阻率、含水饱和度、孔隙度、泥质含量的方法及其校正方法。介绍了在岩性比较复杂情况下三种求孔隙度测井方法的显示,快速直观解释技术、计算机分析测井资料。在地质分析中,介绍了用测井资料鉴别岩性和解释沉积环境。

本书论述简明易懂,文图并茂,不涉及复杂理论公式的推导,着眼于应用。可供从事地球物理测井技术人员、技术工人、地质人员及有关院校师生参考。

Richard H. Merkel

Well Log Formation Evaluation

(AAPG Continuing Education Course Note Series*14)

First Printing, September 1979

Department of Education

•
美国石油地质学家协会进修丛书(十四)

地 层 评 价 测 井

[美] R.H. 麦克著

沈志成 范伟粹 译

•
石油工业出版社出版

(北京安定门内外外馆东后街甲36号)

交通印刷厂排版

通县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•
787×1092毫米 16开本 2³/₄印张 64千字 印 4,001—6,500

1982年7月北京第1版 1984年8月北京第2次印刷

书号: 15037·2359 定价: 0.36元

目 录

常用符号	1
岩石骨架值	2
阿尔奇法求含水饱和度	2
引 言	3
一、仪器介绍	5
(一)自然电位	5
(二)电极式电阻率测井仪	5
(三)感应测井仪	6
(四)电阻率孔隙度测井	6
(五)总孔隙度测井	6
(1)声波测井	6
(2)密度测井	8
(3)中子孔隙度测井	8
(六)自然伽玛测井	9
(七)自然伽玛能谱测井	9
(八)特殊仪器	10
(九)仪器组合	10
二、基本分析	11
(一)温度与电阻率的关系	11
(二)根据SP位曲线确定地层水电阻率	11
(三)确定含水饱和度	15
(1)电阻率求孔隙度的方法	15
(2)电阻率-孔隙度交会图	16
(3)泥质砂岩的校正	18
三、岩性比较复杂条件下三种孔隙度测井的显示	23
四、快速直观技术	29
(一)天然气效应	29
(二) R_{wa} 快速直观显示	29
(三)地层因素图	31
(四) R_{x0}/R_t 图	32
五、计算机分析	33
六、地质分析	36
(一)地质环境和自然电位曲线的形状	36
(二)自然伽玛和伽玛能谱的分析	38
参考文献	40

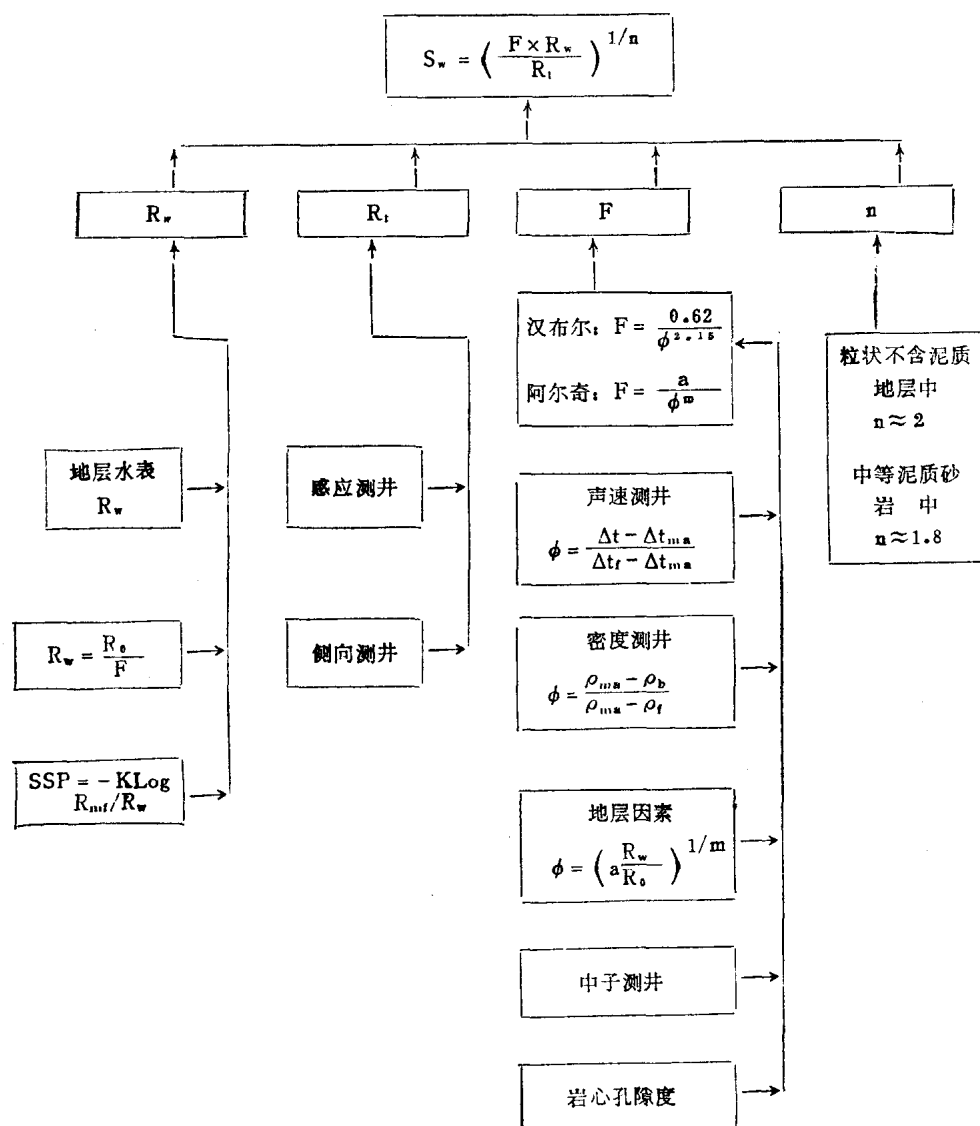
常用符号

T	温度, °F	$R_{16"}, R_{1L}$	16英寸电位和感应测井的视电阻率
BHT	井底温度, °F	$R_{1 \times 1"}, R_{2"}$	微梯度和微电位的电阻率
d_h	井径	R_{FL}	双感应-聚焦测井测出的聚焦测井电阻率
d_i	侵入带平均直径	R_{ILD}, R_{ILM}	深感应和中感应测井电阻率
e	地层厚度, 通常用于特定的高阻层	R_{LL}	侧向测井视电阻率
ppm	百万分之一	C	感应测井电导率
t_{mc}	泥饼厚度	S_w	原始地层含水饱和度, 百分比
R_m	泥浆电阻率	S_i	侵入带含水饱和度, 百分比
R_{mf}	泥浆滤液电阻率	S_{X0}	冲洗带含水饱和度, 百分比
R_{mc}	泥饼电阻率	S_{wi}	束缚水饱和度
R_w	地层水电阻率	ρ_b	地层体积密度 (克/厘米 ³)
R_{we}	等效的地层水电阻率	ρ_{ma}	地层骨架的颗粒密度 (克/厘米 ³)
SSP	静止自然电位, 给定 R_{mf}/R_w 条件下可能产生的最大偏转幅度	ρ_f	充满孔隙空间的流体的密度 (克/厘米 ³)
PSP	视自然电位, 泥质砂岩中形成的自然电位	ρ_{sh}	泥岩密度 (克/厘米 ³)
F	地层电阻率因素	Δt	声波测井测出的声波传播时间 (微秒/英尺)
F_a	视地层电阻率因素	Δt_m	岩石骨架的声波传播时间 (微秒/英尺)
ϕ	孔隙度	Δt_f	流体的声波传播时间 (微秒/英尺)
ϕ_{LMS}	中子测井测出的石灰岩孔隙度	V_{sh}	总岩石体积中泥质(或粘土)的百分比
R_t	原地层的电阻率	V_{ma}, V_f	声波通过岩石骨架或流体的速度 (英尺/秒)
R_0	100%含水地层的电阻率	K	渗透率
R_i	侵入带电阻率		
R_{X0}	冲洗带电阻率, 井眼附近冲洗最好区域的电阻率		
R_s	高阻井段的围岩电阻率		

岩石骨架值

岩石	Δt_{ms}	ρ_s	ϕ_{ms}
石灰岩	46	2.71	0
白云岩	42	2.87	2
砂石	55	2.65	-2
硬石膏	50	2.98	0
石膏	53	2.35	49
岩盐	65	2.03	0
淡水	200	1.00	100
100,000 ppm NaCl水	189	1.07	120

阿尔奇法求含水饱和度



引言

在测井仪器和技术研制成功之后，工作的主要方向是提高现场分析特定目的层的能力。在石油勘探中这意味着确定地层中所含石油和天然气的含量。为了满足这种要求，要测定岩石的物理特征，包括孔隙度和含水饱和度。遗憾的是，目前还没有一种仪器能给出这种结果。因此，为了适应各种不同的地质目的，已研究发展了各种测井仪组合，来测定地下岩石的孔隙度和含烃量。

近十年来，计算机已帮助测井分析人员发展了各种测井系统。这些测井系统将不仅能分析一口井的情况（尤其是探井），而且还能分析盆地内地质构造的各种变化。因此，测井分析人员已把他们的见识不仅仅是用来观察个别井的情况，而且已把测井分析作为一种勘探手段。例如，我们能够根据测井曲线，发现地层的泥质含量沿构造的变化。同样，砂岩沉积剖面中颗粒变粗（或变细）都有助于引导我们找到未来的油气储集层。碳酸盐岩剖面中白云岩化的程度也能用来指示未来的储量，能够快速制作上述参数的等值线图，用来指导地质人员的解释工作。

利用三种孔隙度测井仪和电阻率测井仪可以确定地下孔隙度。目前常用的孔隙度测井仪是声波、密度和中子孔隙度测井仪。下面我们会详细地讨论，如何把由这些测井曲线求得的值变为所研究的地层的孔隙度。

为了得到一点感性认识，即一个特定的地层中具有怎么样的孔隙度，可以考虑的最简单的模型是用颗粒大小相同的大理石堆积成圆柱形大理石模型。在这种状态下的大理石，其孔隙度为47.6%。如果我们把大理石的大小减小一半，孔隙度保持不变（47.6%），但渗透率降低了。如果还是这个例子，将大理石颗粒压得紧紧的，以致彼此略有偏移，则孔隙度将下降为25.9%。对一组大小相等的大理石颗粒，这是能获得的最低的孔隙度。此时，再改变大理石的大小，将不会降低其孔隙度，但能降低其渗透率。因此，由于人们关心的是储集层特性，前面提到的变细和变粗都可能是一种重要的参数。我们知道，地层不是按球状结构形成的，不规则的形状将会降低地层孔隙度。砂岩中正常孔隙度范围介于10~35%，实际的最后孔隙度范围约为3%到40%。

一般说，较老和较深的岩层由于受挤压，其孔隙度较低。胶结作用也会降低孔隙度。同样泥岩也遵循这种孔隙度深度关系的趋势。例如，近地表的泥岩，其孔隙度约40%。而深度在10000英尺以下的泥岩孔隙度降低到约5%。但孔隙度-深度关系也有些例外，例如在超压泥岩和砂岩中。此外，应当指出，对较有塑性的碳酸盐岩来说，一般不保持这种孔隙度-深度关系，压得比砂岩结实。

必须认识到，岩石中出现的孔隙度，有时与粒间孔隙度是有差别的。这就是所谓次生孔隙度，通常称为孔洞孔隙度和裂缝孔隙度。在碳酸岩中这是由于地下水在灰岩中溶解造成的孔洞，以及由于构造应力造成的裂缝。同时，白云石化作用在灰岩转变为白云石时引起固体物质缩小。次生孔隙度是重要的参数，因为次生孔隙度一般来说都有比粒间孔隙度要高的渗透率。下面我们将讨论如何利用一套测井曲线来计算次生孔隙度。

在现场分析中要确定的第二个基本参数是地层含油气饱和度和含水饱和度。实际上直接

按测井曲线所确定的是含水饱和度。根据常识，我们将百分之百减去含水饱和度就得出含油气饱和度，于是我们可间接确定含油、气饱和度。换句话说，如果 1/5 孔隙空间充满了水，则含水饱和度为 20%，油气饱和度为 80%。利用孔隙度测井和一种电阻率测井，可以通过阿尔奇的基本公式计算出含水饱和度

$$S_w = \left(\frac{F R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

式中 R_w 为地层水的电阻率， R_t 为天然的、未侵入的地层的电阻率， F 为与孔隙度有关的地层因素。

计算地层因素的方法有几种，但在现场常用的有两种基本关系式。一是

$$F = \frac{0.62}{\phi^{2.15}}$$

这个关系式称为汉布尔关系，它适用于粒状岩石，如砂岩。另一种关系式为：

$$F = \frac{1}{\phi^2}$$

适用于非粒状的碳酸岩。显然，由于存在其它类型岩石，如泥岩、粘土、硬石膏、石膏等，对上述计算有干扰影响。因此，在较复杂的岩性条件下，需要有许多测井曲线，以便对其它类型岩石的影响作校正。

自然，在阿尔奇公式的解中也存在近似值，其中之一是地层水的电阻率。大家知道电阻率是随温度而变化的。虽然我们假设地温随深度线性地变化，但事实上，地下地温梯度是受岩石导热率控制的。我们在测井过程中测量井底温度和地表温度，并假定从上到下地温梯度是线性的。

也曾指出过，解阿尔奇公式需要确定未侵入地层电阻率(R_t)和地层水的电阻率(R_w)。然而，图 1 说明，由于钻井过程的影响，引起井筒地层内圆柱形侵入，这是地层孔隙度和渗透率的函数。最终我们得到的层段有泥饼电阻率和冲洗带电阻率、侵入带电阻率和真电阻率。因此需要一些电阻率测量方法，能测到未侵入地

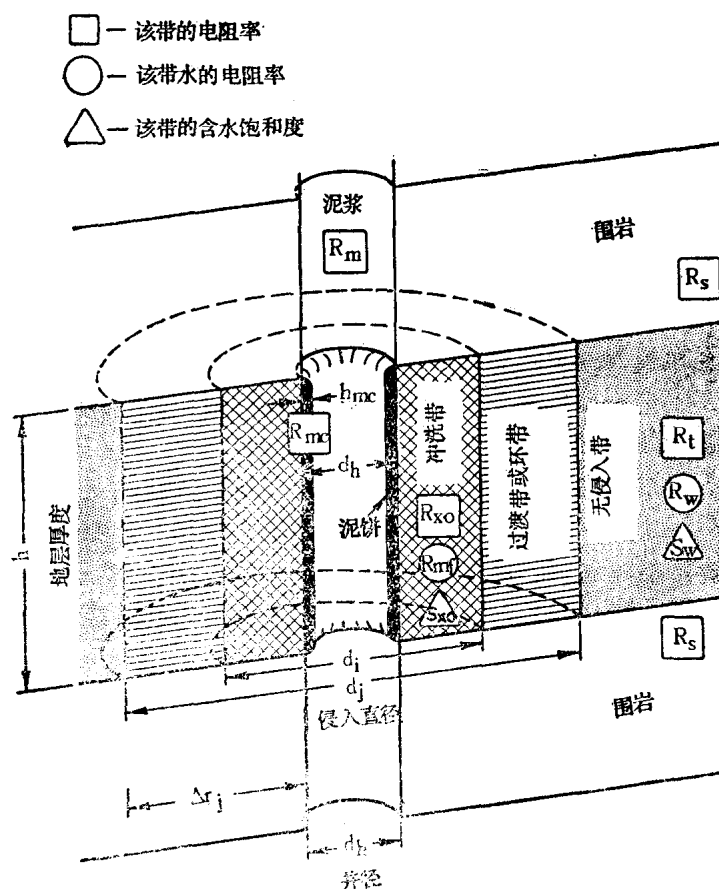


图 1 测井解释中使用的符号 (示意图)

层，以便确定真电阻率。侵入的结果是，电阻率测井仪所测量的实际上是地层视电阻率，为了确定地层真电阻率经常必须要作校正。同样，由于放射性仪器（中子孔隙度和密度测井仪）的核子的相互作用，我们所获得的孔隙度和密度也是视孔隙度和视密度。它们也必须作特定岩石类型的校正，并补偿掉这类岩石中次生矿化作用的影响。

一、仪器介绍

（一）自然电位

在井内有自然产生的电位，这种电位称为自然电位（或SP），并用一个井下电极和一个放在地面泥浆池中的电极来测量。这两个电极之间的电位差以深度的函数进行记录。这种自然电位在井内形成是由于井液和天然的地层水之间的矿化度差造成的。然而，这里也必须有泥岩和渗透层，以便产生自然电位。

SP曲线的主要用途是区分不渗透的导电层（如泥岩）和渗透层。因为SP曲线是一种离子（不是液体）渗透率的指示，SP曲线的偏转表明有渗透性，但还不足以说明有工业性产能。SP曲线偏转大小受钻井泥浆和地层水电阻率的差别程度控制。因此，如果已知钻井泥浆电阻率，则可以确定地层水电阻率。

渗透层一般使SP曲线向左偏，而非渗透层使SP曲线向右偏。向右偏转最大幅度一般表示泥岩，而向左或负的偏转是指多孔隙和渗透性砂岩和石灰岩。向右或在泥岩井段一般自然电位比较匀直。这种电位一般称为泥岩线，是度量自然电位偏转幅度的基线。同样，对着纯砂岩或灰岩，一般有恒定的负电位。泥质砂岩产生的偏转幅度介于泥岩基线和纯砂岩线之间。

人们通常观测到SP基线偏移是由于泥浆或地层水中的矿化度的变化所引起的。这种偏移一般在井上部3000或4000英尺井段中发现。岩层厚度和泥质含量影响SP曲线的大小。因此，在薄层中必须对SP曲线进行校正，才能计算地层水电阻率。

（二）电极式电阻率测井仪

早期的电阻率测井仪是四个电极的组合，二个供电，二个测量电位，以不同的间距放在井内和地面上。电极之间的间隔不同，电流的穿透深度也不同。近代的电阻率测井仪有许多电极，使电流聚焦进入地层，从而减小了地层界面影响和井眼影响。同样，根据电极距的大小可以得到不同的穿透深度。这种电极系叫侧向测井或屏蔽测井。其最主要的特点是，同时可以测几个电极系，这样就可以观察侵入影响，并进行补偿。

在泥浆电阻率小于地层水电阻率的情况下，侧向测井和屏蔽测井特别有效。因此，在你遇到盐水泥浆的地方，它们被认为是很有价值的测井方法。虽然井眼大小和地层厚度影响侧向测井的显示，但一般影响相当小，因而可以把各种测井测出的电阻率当作真电阻率。已发现这种测井在碳酸岩和淡水储集层中很成功。因为盐水泥浆使自然电位曲线变平直，为了鉴别岩性，侧向测井通常带测自然伽玛，而不测自然电位。

(三)感应测井仪

也可以用带线圈系的仪器测量电阻率,因此就没有外露的电极。这种仪器的优点是,能在干井中或油基泥浆井中测井。与侧向测井和屏蔽测井电阻率仪相同的是,感应测井仪用线圈的组合使电场聚焦进入地层。同样,不同的线圈距提供不同的有效穿透深度,因此可以观察侵入的影响,并作定量补偿。

在低电阻率地层中感应测井仪比在高阻层中更有效。实际上,有一个极限值约 200 欧姆米,高于此值时,仪器的精度急剧下降。在砂泥岩剖面中,使用感应测井仪十分成功。井眼口外侵入较深时,双感应测井仪比单感应更有效。侵入不深时,感应-电测井通常是很成功的。

与侧向测井仪一样,井眼对感应测井仪的影响一般非常小。井内有盐水泥浆时是例外。此时,为了得到真电阻率,要对感应测井读数作校正。

感应测井仪不直接测量电阻率,而测量其倒数电导率。因此,许多感应测井图也有一条电导率曲线,这是仪器的直接测量值。测井车中的地面仪器插件取电导率的倒数,来做出电阻率曲线。需要在高阻层中作定量解释时,通常从电导率曲线取数,而不用电阻率曲线,效果比较好。这是因为电导率很小的变化会造成电阻率很大的变化。图 2 和图 3 是感应-电测井和双感应测井的例图。

(四)电阻率孔隙度测井

有许多电阻率测井仪,其电极是装在极板上的,仪器从井内上提时,极板是压向井壁的。这类仪器包括微电极测井仪、微侧向测井仪和邻近侧向测井仪。这些仪器具有很好预计的穿透深度,设计用来测量冲洗带的电阻率 R_{xo} 。

把这些仪器叫做孔隙度测井仪的原因是, R_{xo} 与泥浆滤液电阻率的比值等于地层因素。如果你能假设,冲洗带是百分之百含水的,没有残余油,于是能用阿尔奇关系式把地层因素转换成孔隙度。如果在另一方面,冲洗带含一些油气,则该地层因素能与其它仪器求出的孔隙度作比较来计算出残余油饱和度。在确定岩石裂缝性和流体渗透率方面,这些仪器也是有效果的。图 4 是微电极测井和邻近侧向测井的实例。

(五)总孔隙度测井

(1)声波测井

声波测井仪利用多个发射和接收探头,测量声波脉冲在岩石中传播的最短时间。间隔距离随仪器变化,但是最常用的是沿井壁方向长两英尺。声波脉冲在岩石中传播的总时间与下列两种因素成比例: 1)孔隙空间内流体的数量乘以声波传过流体所需的时间; 2)岩石骨架的数量乘以声波传过岩石骨架所需的时间。因此能写下列方程

$$\Delta t = \phi \Delta t_f + (1 - \phi) \Delta t_{ma}$$

解此方程可直接求孔隙度:

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

当被测地层是压实和固结的地层时,这种孔隙度测井仪最有效。岩石没有胶结好,或者没有压实时,传播时间明显地受地层流体的影响,不管它是水、气或油。

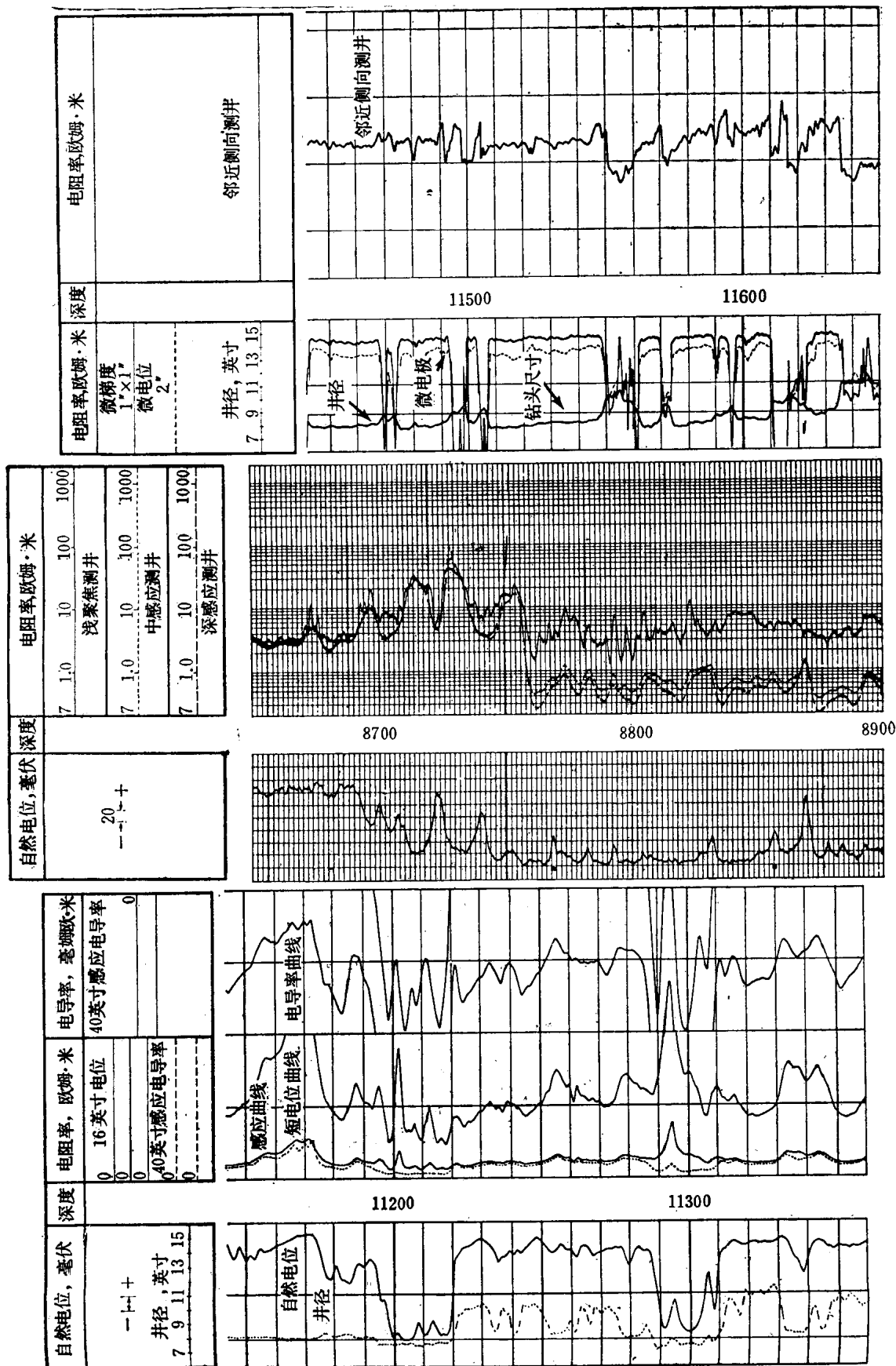


图 2 感应-电测井图

图 3 双感应-聚焦测井图

图 4 双感应-聚焦测井图

因为该仪器测量首先到达接收探头的声波脉冲，该脉冲通常绕过裂缝或孔洞孔隙，因此，声波测井仪一般不测量次生孔隙度。于是，人们用声波测井仪所作的孔隙度计算是十分典型的那个井段中最低的孔隙度。该仪器的最佳孔隙度范围介于百分之五和二十之间。低于此范围时，需要有非常出色的骨架值，高于此范围时，仪器受泥质含量和不压实性的严重影响。图5表示，不同骨架速度情况下，声波 Δt 如何随孔隙度而变化。

(2) 密度测井

密度测井仪是一种贴井壁滑板式仪器，它有一个伽玛源和二个接收探头。接收探头处的伽玛射线流是康普顿散射的函数，康普顿散射本身是岩石骨架中电子密度的函数。这里同样需要间接确定体积密度，这是目的。电子密度与元素密度有简单的关系仅仅在质子数等于中子数的时候才能成立。当实际不是如此时，必须作校正。正如我们早先指出过的，这就是为什么我们实际测量的是视密度。

在体积密度计算中叠加原理保持有效。因此，地层的体积密度等于流体密度乘该流体的百分比，加上岩石骨架密度乘以骨架的百分比。换句话说：

$$\rho_b = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_{ma}$$

正如声波测井仪一样，为了把密度测量结果转换成孔隙度，我们需要假设岩石骨架和流体的密度。流体密度通常取为1.0到1.1，其大小取决于流体的矿化度。人们可以直接看到，当测井通过一气层时，这种孔隙度测量是乐观的。下面将会详细谈到天然气的影响。

密度测井仪中的短源距探头用来补偿泥饼厚度和井壁不平的影响。密度测井的曲线图一般包括一条 ρ_b 曲线和一条 $\Delta \rho$ 曲线。 $\Delta \rho$ 曲线是通过短源距探头测出的校正量，对所记录的体积密度进行校正。这条 $\Delta \rho$ 曲线的大幅度通常伴随大的井径变化。

密度测井仪是工业中最有效和最有用的仪器之一，它被用来确定孔隙度作地层评价，测量体积密度作重力测量。很重要的是，密度测井在泥质砂岩中提供精确的有效孔隙度数值。与其它测井曲线组合时，它能提供岩性、泥质含量、流体饱和度和泥饼厚度方面的资料。当与声波测井仪组合在一起使用时，能够获得数据以为工程上确定弹性模量，为地震勘探确定声波反射系数。也能用密度资料确定由于超压系统造成的压实程度较差的情况，因此能预测深部的超高压层。

另一方面，密度测井仪有一些局限性，其中之一是，仪器是滑板式贴井壁的，似乎小于井壁的百分之二十五。在碳酸岩剖面中，孔洞和裂缝孔隙度是系统总孔隙度和渗透率的重要组成部分时，密度测井仪经常提供不真实的孔隙度。这方面的一个例子是具明盆地的埃伦堡层。孔隙分布均匀，变化范围介于百分之十和三十五之间时，密度测井仪效果最好。

(3) 中子孔隙度测井

中子测井仪有二类。第一类有一个源和一个接收探头，是贴井壁的或滑板式的。在这种情况下，接收探头测量从源来的超热中子。第二类是比较常用的，有一个源和二个探头。这

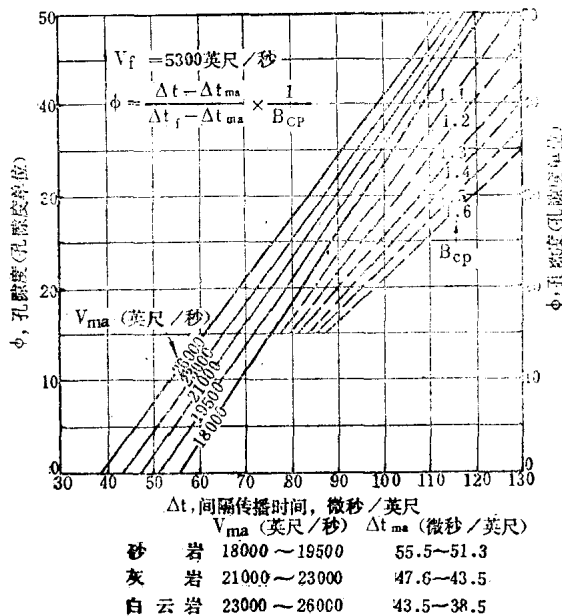


图5 根据声波测井评价孔隙度

两个探头测量热中子，并且是一种对井壁不平和井径作补偿的仪器。无论在那种情况下，原理基本上是相同的。探头所测的是特定能量级的中子流。也就是，它们测量的是地层把中子源的高能量中子减速了多少。

中子源的高能量中子，由于与地层中各种元素的核相碰撞而变慢。原子量与中子质量最接近的元素，比原子量相当大的元素，更能使中子减速。因此，原子量与中子大概相等的氢，比其它元素更易使中子减速。中子孔隙度测井仪主要测量的是地层中的氢离子含量。这种反映氢离子含量的显示，然后被刻度为含水岩石的孔隙度。因为油和水两者单位体积具有大致相同的氢离子含量，含水和含油岩石的刻度值大体是相同的。人们能够看到，如果孔隙体积充满了天然气，中子的衰减（或慢化）就比饱含水和油时慢。因此，对含气孔隙度，中子孔隙度测井仪提供的是不利的低孔隙度。

因为中子孔隙度测井仪测量地层中的含氢量，因此当氢处于化学结合状态时，中子孔隙度测井仪会提供异常高的孔隙度。在泥岩和石膏中会出现这种情况。有效孔隙度为零的、百分之百的石膏，在中子测井曲线上将显示百分之四十九的孔隙度。所以，地层中少量的石膏就能严重影响中子测井仪的真孔隙度读数。对泥岩和泥质砂岩，这也是对的。

中子孔隙度测井仪的标准刻度是在休斯敦美国石油协会刻度井的石灰岩块中进行的。因此，许多中子孔隙度测井图都用石灰岩孔隙度单位。但是对砂岩和白云岩也有校正曲线。在不含泥质的地层中，孔隙中有液体，孔隙度小于百分之二十五时，中子孔隙度测井最有效。

(六)自然伽玛测井

自然伽玛测井反映自然出现的地球矿物放射性衰变过程中产生的伽玛射线。我们所遇见的放射性几乎都是钾40和铀、钍族衰变产物所产生的伽玛射线。这三种可能的放射性来源中，钾40出现在细粒的岩石中，如泥岩和粘土。因此，自然伽玛测井通常被用来指示泥质含量，或者反过来划分纯净地层。纯地层，诸如砂岩、石灰岩、白云岩和硬石膏，含有少量的钾，因而放射性很弱。如同自然电位曲线一样，可以作出泥岩基线，用这条线可以得到纯地层线的偏转幅度。

除了用自然伽玛测井曲线确定泥质砂岩的泥质含量外，也用它来进行地层对比。如果在井内泥浆含盐量很高，不能得到自然电位曲线，用自然伽玛是有效果的。但是，泥质含量是测井要确定的非常重要的参数，因为多数测井曲线受泥质含量的影响，在作定量的地层评价之前必须作泥质校正。

(七)自然伽玛能谱测井

各种元素的放射性衰变产生伽玛射线，这些射线具有特定的能量特性。因此，如果我们用伽玛能谱仪来记录伽玛射线的能量，有可能确定地层中那种元素的百分比是多少。但因为给定元素的自然伽玛能量不是唯一属于这种元素的，所以从实际的观点出发，不能对每个元素作描述。但是，我们能够确定钾40放射性衰变过程中产生的伽玛放射性的大小，钍族造成的放射性大小和铀族造成的放射性大小。因而，伽玛能谱仪会给出代表钾含量、铀含量和钍含量的曲线。作为了解地区地质情况的助手，该仪器是特别有价值的。钾铀比、钾钍比或铀钍比往往能提供特定粘土类型（蒙脱土、伊利石等等）的特性。此外，经常发现在裂缝带中有异常高的铀峰。因而在看来总伽玛值表示泥质很高的井段中，我们能确定，那里能用射孔来利用裂缝造成的渗透性。后面我们将稍详细讨论一下自然伽玛能谱测井。

(八)特殊仪器

有许多别的仪器，它们在特定的情况下使用，我们不加讨论，仅仅提一下。这些仪器包括地层倾角测井仪、全波声波记录、声波井下电视、井下重力仪和中子衰减测井仪。每种测井仪在许多领域有其用途来解决特殊的问题。

(九)仪器组合

自然伽玛、自然电位和井径通常记录在美国石油学会标准测井图左边 2.5 英寸宽的一轨内。主要用来确定渗透层、泥质含量和井眼不规则性。另外也很值得推荐用一些仪器，从一次测井到另一次测井是重复使用的，这样做测井图之间的深度差就能补偿掉。在测井服务行业内日趋标准化的仪器组合包括：双感应测井加侧向或聚焦测井，双侧向加伽玛射线测井，感应-电测井，中子-密度测井组合。附表 1 包括了许多仪器组合及它们的用途。

表 1A 电 阻 率 测 井 仪

测井名称	七 侧 向	三 侧 向	深感应、中感应	微侧向和邻近侧向	微 电 极
用 途	R_t	R_t	R_t, R_f	R_{xo}	渗透性, R_{xo}
最佳 R_a 范围	1~10,000	1~200	0.1~100	0.5~100	0.5~100
最佳井眼条件	高阻, 层厚>3英尺	中等 R_t , 层厚>2英尺	低 R_t , 层厚>5英尺	有侵入地层 泥饼<3/8英寸	有侵入地层 泥饼<1/4英寸
最佳地质条件	碳酸岩, 裂缝性岩 石, 盐水泥浆	碳酸岩, 盐水泥浆	砂泥岩, 淡水泥浆	中等孔隙度碳酸岩	砂泥岩
局 限 性	深侵入	高 R_a , 深侵入	高 R_a , 薄层, 低 R_m	井壁不平, 泥饼	多半作定性解释, 高 ϕ

表 1B 孔 隙 度 测 井 仪

测井名称	声 波	中 子	密 度	R_t	R_{xo}
特 性	$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$	—	$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f}$	$R_t = \frac{IR_w}{\phi^m}$	$R_{xo} = \frac{I_{xo} R_{mf}}{\phi^m}$
最佳范围	5~20%	0~25%	10~35%	5~25%	5~25%
最佳条件	碳酸岩, 固结的砂岩	纯地层, 孔隙内 含液体	未固结的砂岩和泥 质砂岩, 均匀 ϕ	纯地层	纯地层
局限性	未固结, 泥质含量, 裂缝和孔洞	泥质含量, 天然气, 石膏	冲刷垮塌, 不均匀 ϕ , 黄铁矿	泥质含量	泥质含量, 高 ϕ

二、基本分析

(一)温度与电阻率的关系

因为电阻率随温度而变化,因此通常必须知道目的层深度处地层水和钻井泥浆的电阻率。办法是,假设某一平均地表温度,并利用最高温度计在井底测量的温度(井底温度BHT)。

假设这两点之间的温度是深度的函数,呈线性关系。地温梯度一般在每100英尺0.8到1.3°F之间变化。

可以用图6来确定井内任意深度的温度,此时要假设平均地表温度和井底温度。简单移动该图版上的X轴,使平均地表温度位于原点处,就可知道地温。沿Y轴向上,停在井底温度处,向上移动到井底深度处,沿此线外推到要计算温度的深度。该点X轴的温度将是所探讨的该深度上的温度。该图版的温度比例尺可以以任何方式转换或乘一个数。

当溶液中可溶盐的总量保持恒定时,一旦知道特定温度下的电阻率,就可确定任何温度下该溶液的电阻率。用图7可以做到这一点,且适用于水电阻率,泥浆电阻率和泥浆滤液的电阻率。后二者的电阻率在井场在测井时测量。如果溶液中有氯化钠以外的盐类,则ppm比例尺从绝对值角度看是不正确的。

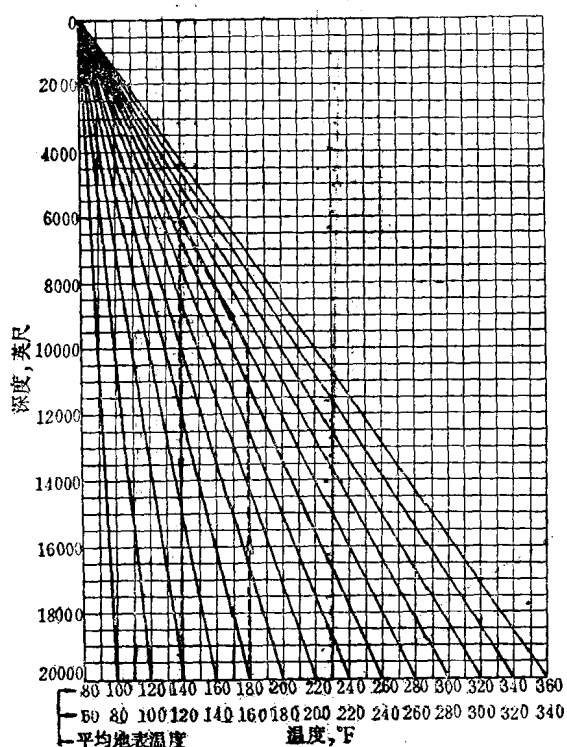


图6 估计地层温度图版

(二)根据 SP 位曲线确定地层水电阻率

为了确定特定层位的地层水电阻率,首先必须用图6和图7确定适当温度下泥浆和泥浆滤液的电阻率。在SP曲线上确定一条泥岩基线,一般是SP向右偏转的最大幅度。根据SP曲线的拐点确定层厚,这些点是井内电流最大的地方。在SP计算中必须用这种层厚,而不用其它测井曲线(如自然伽玛测井曲线)的视层厚。

有可能时,应当在含水纯砂层处取SP偏离泥岩基线的偏离幅度。这是因为,油气和泥质都有压缩SP的趋向,提供比实际存在的 R_w 要高的视地层水电阻率。图8用来作SP曲线的层厚和电阻率校正。根据短电位或浅聚焦测井获得 R_w 。SSP是静止自然电位、或者是层厚无限大时可以测到的SP,在以后的图版中被用来确定地层水的电阻率。在图9中,利用特定温度下的SSP,确定泥浆滤液电阻率与等效地层水电阻率的比值。 R_w 是氯化钠溶液地

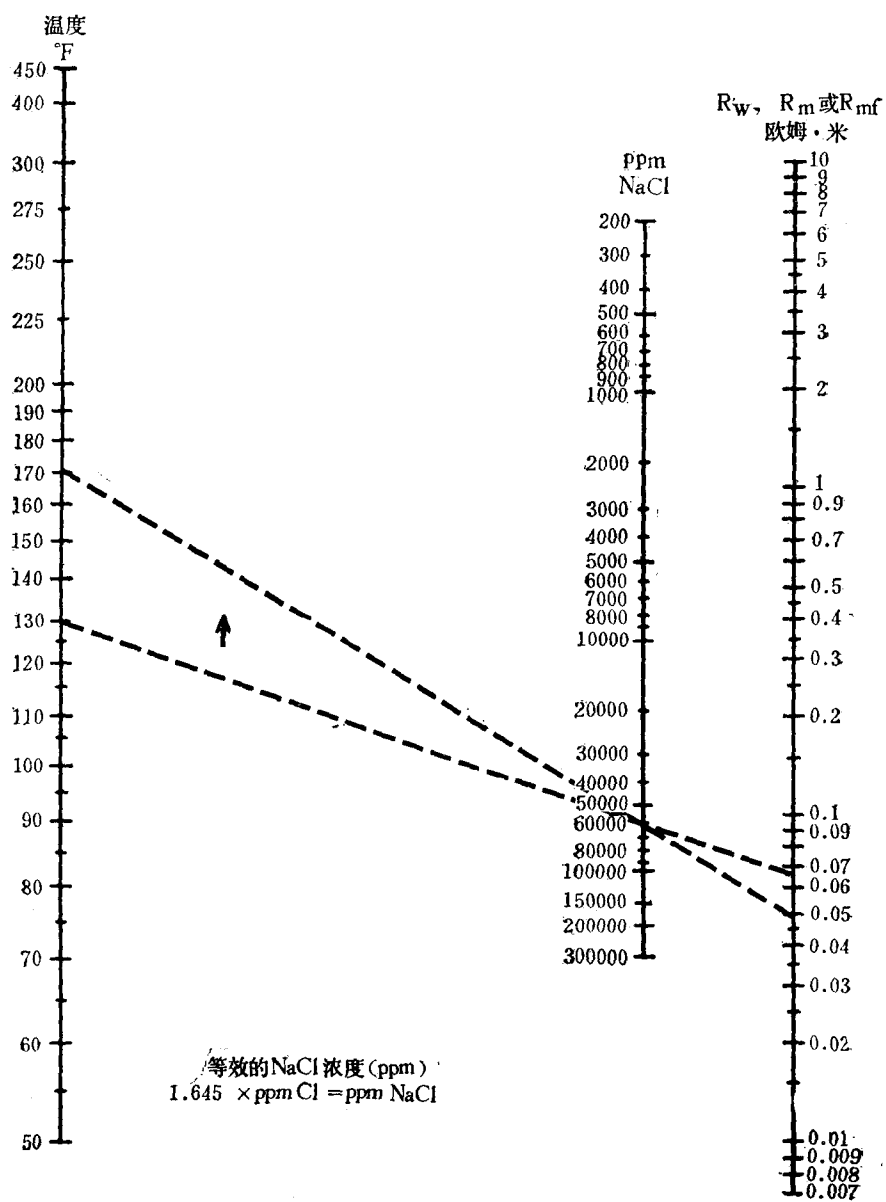


图7 盐溶液的电阻率

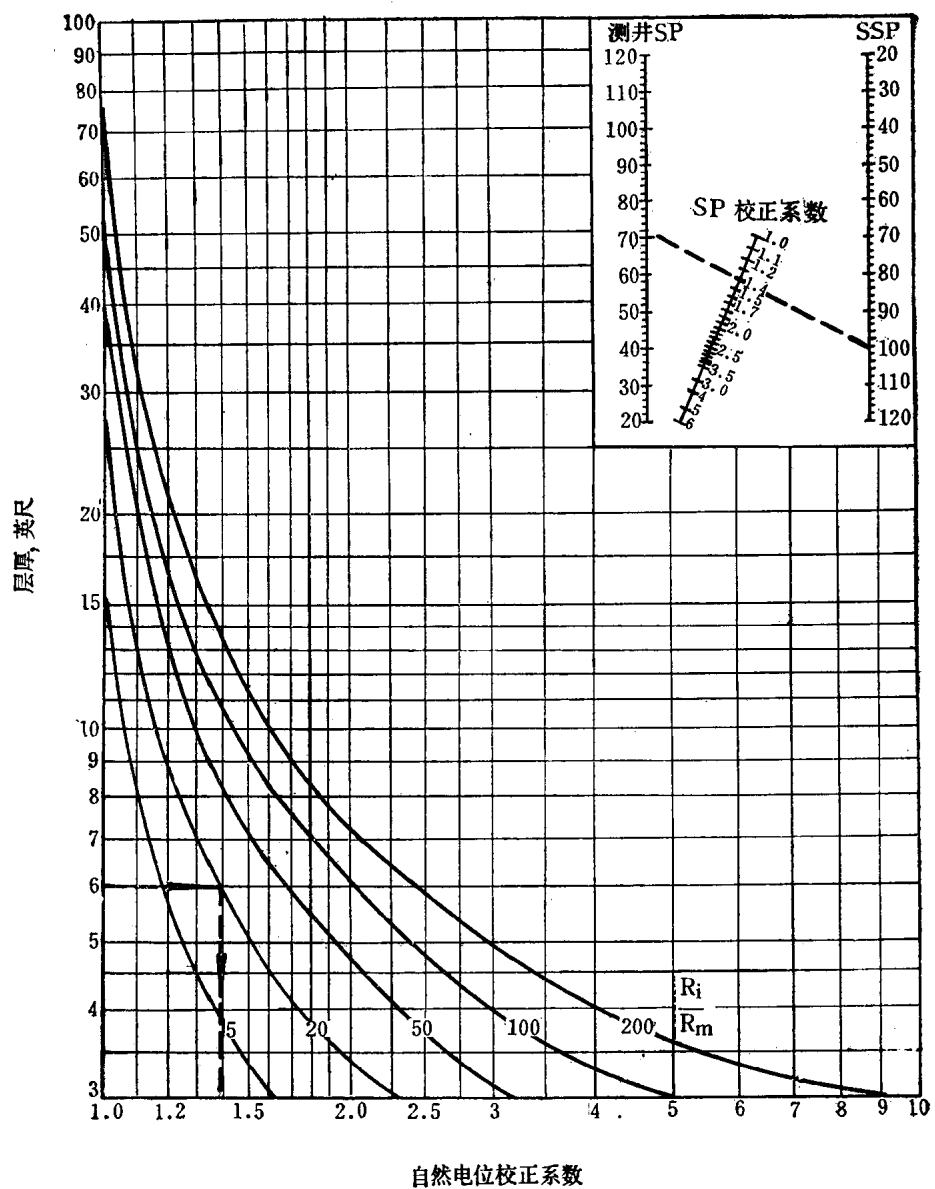


图 8 自然电位校正图版