

石油测井译文集

(七)

(测井分析家协会18届年会论文集)

李

石油工业部科学技术情报研究所

一九八一年八月

美国测井分析家协会是国际性的学术组织，每年举行一次年会（1960年为第一届），在年会上宣读的论文具有较高的学术水平，反映了测井发展的最新成果。这些论文由美国测井分析家协会汇编成集，进行发表。

“测井分析家协会18届年会论文集”是华东石油学院测井教研室的教师们翻译的，王曰才教授、张庚骥副教授分别对译稿进行了校对，石油工业部科学技术情报研究所审编出版。

目 录

使用多元线性回归分析从测井曲线上计算地层含水饱和度

J. G. 帕切特	王曰才译 (1)
现场测井分析和袖珍程序计算器 R. M. 贝特曼、C. E. 科恩	刘学朴译 (17)
流体识别图 R. M. 贝特曼	冯启宁译 (38)
扩大井眼电测法的探测范围 J. J. 丹尼尔斯	杨荣礼译 (50)
井下重力仪的探测范围 J. R. 赫斯特	章兆淇译 (62)
为进行详细地震解释而作的测井编辑 B. E. 奥斯伯恩	张庚骥译 (70)
气在何处? G. E. 多松-格罗沃	周坤瑞译 (96)
用与吸附水相比较的方法来确定阳离子交换能力	
D. C. 布什、R. E. 詹金斯	王曰才译 (102)
密执安盆地志留纪岩礁的测井解释 J. A. 拉布	黄一飞译 (110)
关于参数 a 和 m 可能作为地层评价手段的一些考虑	
O. 戈梅斯-里维罗	周彦译 (121)
就地处理测井资料 W. H. 思鲁普、R. F. 哈马、D. H. 廷西	雍世和译 (136)
岩性交会图在蒸发岩盆地中的应用 J. B. 克鲁斯	雍世和译 (142)
南得克萨斯白垩纪裂缝性碳酸盐岩储集层的评价 J. 贝克、	
A. 舒尔茨、D. 菲茨杰拉德	洪有密译 (159)
测井和实验室测量的纵波和横波速度的比较 R. 林格尔、	
A. H. 琼斯	陆介明译 (180)
详细烃测井增进地层评价 J. B. 麦克亚当斯、R. F. 默塞尔	叶元芳译 (188)
计算机井径仪与井的壁纹研究 H. W. 卡丁	张庚骥译 (197)
沙特阿拉伯谢巴赫油田用测井资料确定渗透率	
A. 布朗、S. 赫塞尼	洪有密译 (207)
地层因素—孔隙度关系式中的胶结指数对渗透率的影响	
J. 雷加-克莱门休	王曰才译 (224)
小直径双源距密度测井仪的井眼补偿计算方法 J. H. 斯科特	黄隆基译 (233)
深层碳酸盐岩井场测试资料的矛盾 R. F. 默塞尔、	
R. W. 豪斯格尔	黄隆基译 (244)
泥质砂层的高温电导率 J. W. 克恩、W. A. 霍耶、M. M. 斯潘	冯启宁译 (249)
双源距中子寿命测井评价套管井储集层动态	
M. R. 德弗里斯、W. 弗特尔	黄隆基译 (258)
奥斯丁白垩纪地层延伸地区的测井分析 W. D. 毕夏波、	
M. R. 德弗里斯、W. 弗特尔	李忠荣译 (271)
应用刻度的小井眼测井仪定量评价地层 R. H. 默克尔、	
D. D. 斯尼德	张庚骥译 (281)

真垂直深度、真垂直厚度和真地层厚度测井 O. R. 霍尔特、
L. G. 斯库诺弗、P. A. 威克曼.....张庚骥译 (296)

复地层电阻率——电阻率测井遗忘的另一半 D. D. 斯尼德、
R. H. 默克尔、J. T. 威廉斯尚作源译 (308)

一种新方法：根据声波和密度测井资料计算裂缝压力梯度
A. 阿尔金森.....楚泽涵译 (333)

卫星传送的测井资料 A. P. S. 豪厄尔斯、L. G. 斯库诺弗周坤瑞译 (341)

双源距中子寿命测井原理及应用 C. J. 塞帕斯、P. A. 威克曼、
W. H. 费特尔、M. R. 德弗里斯、R. R. 兰德尔黄隆基译 (351)

用于地层评价的多元数理统计方法 W. B. 亨普基恩斯黄一飞译 (383)

低电阻率砂岩的意外产能 E. A. 瓦吉纳、C. M. 基德弗尔、
R. A. 哈利丁次乾译 (402)

使用多元线性回归分析从测井曲线上 计算地层含水饱和度

J.G. 帕切特

摘 要

偶然地观察测井解释, 常常给人的印象是测井解释的过程在表面上看起来很简单, 使用的基本公式好象并不复杂。但是当把含水饱和度公式推广使用时, 为了正确计算含水饱和度, 需要的测井曲线的数目、参数、及环境常数可能有许多。其中很少是明显已知的。它们含有测量误差, 并被错误地估算, 这些误差对它们的期望值来说未必是对称的。但是测井曲线本身常常含有许多和这些必需的数据有关的信息。把观测得到的测井数据画成图形, 这种方法已经发展成为测井分析者可能利用的最有价值的解释工具之一。多元线性回归分析是制成两维以上图形方法的推广, 这就大大地扩大了图形解释法及从前的简单回归分析技术的应用。

这种解释方法在几乎没有积累解释经验的地区是很有价值的。但是它的使用并不仅限于这些地区。已经了解甚至于在测井解释已经积累很多经验的地区, 利用回归分析法计算含水饱和度也是很有益的。

本论文叙述了用于计算含水饱和度的多元线性回归分析的理论基础及实例。

和使用其他回归分析技术一样, 甚至在测井数据含有通常遇到的多种类型的误差时, 这种方法也能意外地给出精确的 S_w 值。在模拟数据中故意地引入一些误差, 对这些模拟数据进行处理, 就可说明这种情况。

也处理了一些现场的实例, 并讨论了处理的结果。

引 言

1. 多元线性回归分析可以用来作为从测井曲线上计算地层水饱和度方法的基础。这种方法有广泛的应用。使用这种技术可以把错误刻度的测井曲线的影响减至最小或把它除去。和电阻率-孔隙度交会图联合在一起, 这种解释法的优点可以扩展到从前由于地层水电阻率的变化不能使用图形解释法或简单回归分析法的地区。在将来, 增加和电阻率有关的其他适当的变数, 可以进一步改进解释。因此, 多元回归分析可能是一种有效的解释技术。

2. 利用普通的方法, 由于地层水电阻率发生变化使计算含水饱和度不可靠, 至少难以计算含水饱和度。但是使用这种方法, 在SP解释中有时能够决定地层水电阻率的变化。

3. 在美国海湾地区作出下套管或打桥塞的决定之前必须分析几千英尺的数据, 在这些地区, 这种解释方法对于测井曲线地层评价来说特别有意义。在最近的将来, 井的数量大大增加, 这些井在测井时取得数字化测井曲线。我们使用能够把计算机和用户之间的接口减小到最小的程序, 再加上这种数字化测井, 就可以减少等待时间、解题时间和取得正常数据的时间。所以这种方法很适合于初探井。现在的测井分析程序一般需要有经验的测井分析者或积累很多经验的解释方法来处理。使用回归分析技术, 计算机从统计方面来处理数据, 它将减少解题时间。

4. 当在一个地区取得了满意的结果时, 使用回归分析进行解释可以用来作为独立的质量检查。如果不能说明用普通的方法计算的含水饱和度和回归分析计算的含水饱和度的差别, 则表明在数据或解释过程中有某些误差。

5. 多元回归分析所得到的统计参数对于做出决定有重大帮助。这些参数可以指出不同模型的相对分辨力及各种测井参数的相对重要性。统计参数所能利用的程度有待于进一步的试验。

回归分析方法的讨论

在已经建成油田的地方, 虽然能够使用这样的统计方法, 但是很少需要它们, 因为可以用附近的井对测井测量值进行校验。如果获得了系统的数据, 则一般能够形成可靠的解释方法。当没有或不能形成可靠的解释方法或系统的测井曲线质量检查时, 普通的测井分析就不可靠了。在这种情况下, 应用本文所述的技术, 通常能克服一般方法所受到的许多限制。

一个座标轴代表 R_t 的对数, 另一个座标轴代表孔隙度的对数, 这种作图的人工回归分析法作为减少测井测量值的误差影响的方法^[5,6]已经使用了很长的时间, 在这些参考书中, 讨论了用这种作图法发现误差的能力。作者认为这种作图法是测井分析者所能利用的简单而最有效的解释方法。但是在两种以上的变数起重要作用时, 这种作图法可能就没有效了。从概念上来说, 多元线性回归分析法 (MLRA) 就等效于多维的作图法。如大家所看到的那样, 用现代的计算机作出的多元线性回归法能够大大地改进从测井数据计算 S_w 的精度。显然这种方法特别适合于钻穿了许多组砂泥岩沉积层序的初探井。甚至在刻度有误差而又没有识别出来、没有进行校正时, 或其他必须的数据是未知或是错误的时候, 常常能够作出可靠的解释。

丹聂尔(Daniel)和伍德(Wood)对于回归分析作了很好的讨论^[7]。他们说拟合方程的目的是:

a. 为了得到插入法的公式或刻度曲线, 把很多的数据概括起来。

b. 证实或驳斥一个理论关系式, 通过它们表达式中的这些常数来比较几组数据, 帮助选择理论模型。

在讨论拟合方程所用的最小二乘法时, 他们说: “最小二乘法就是在选择方程时找出这些常数, 使得观测值和该方程所预期的值之间的方差最小。”

“高斯-马尔可夫(Gauss-Markov)的理论给出了这个陈述的理由, 他讲到所得到的估算值是最精确的无偏差的估算值, 而且是观测值的线性函数。当然可以假设选择了这个方程的正确形式。最精确的意义是指: 在相同的环境下, 在相继的数据组中所取得的估算值以最小的方差形式分散在真值的周围。无偏差的意义是指: 最小二乘法的估算值归根结底平均成为真值。线性最小方差估算值的意义是指: 虽然有其他的估算值, 甚至于它们有较小的方差, 但他们不是观测值的线性函数。线性性质的优点在于它的简单性, 但是也可能有较小方差的非线性估算值。当无规则的散乱的误差服从正态分布时, 最小二乘法的估算值是最大可能的估算值, 并且具有可能的最小方差。”

在这个报告中, 假设该模型所有的数据点都是被水饱和的。按照这种假设得到回归方程, 能够把这个 R_o 方程式变成统计分析所能采用的线性形状。用这种方法得到的回归系数, 等于含水饱和度的基本方程中的常数及未知数的组合。此外, 许多普通测井的刻度误差和读数误差的影响, 可以用改变回归方程系数的方法得到补偿。在后面的实例中, 甚至于使用不

正确的测井曲线，回归方程仍然是线性的，并且在含水饱和度的计算中没有引入系统的误差。回归方程非线性误差的影响常常也能减小，研究利用假设的数据求得的结果，可能很好地理解这种情况。本文讨论线性和非线性误差的一些实例。回归方程是被水饱和的储集层所采用的模型，如果即使偶然地有少数油气层的点子，求得的结果也仍然是精确的。但是如果油气层的点子占很大的百分数，则将得到可疑的结果。在参考文献〔1〕及〔2〕中讨论这个问题。在本文的实例中，用第一次按普通方法计算的 S_w 值来预防这种不测事件。这些近似的 S_w 值足以使得大多数的油气层可以从回归模型中消除掉。通过回归程序所做的初步步骤也能够从最后的模型中消除油气层。

使用由水层点子所得出的方程，对所有的孔隙层段进行 R_0 值的计算。然后对所有可利用的数据，把求得的 R_0 值和测得的 R_t 值进行比较，计算 S_w 。由回归方程确定的 R_0 值可以精确地用在正常的解释中：

$$S_w = \left(\frac{R_0}{R_t} \right)^{1/n} = \left(\frac{FR_w}{R_t} \right)^{1/n}$$

假设所有的输入的数据点都是由被水饱和的水层求得的点子。这个假设的真实性可以用绘制 $1/S_w$ 值的直方图的方法来检验。如果这个假设是正确的，则 $1/S_w$ 值将是围绕在 1.0 值周围的正态分布。因此出现次数最多的 S_w 的计算值将是 100%（或 1.0）。如果在模型中输入了很多非水层的点子，则出现次数最多的 S_w 计算值将大于 100%（ $1/S_w$ 小于 1.0），若看到这种效应时，必须更有限制地选择回归模型所采用的输入点子。在讨论的野外实例的数据中有一些 $1/S_w$ 直方图的例子。

看来有两种情况应该谨慎使用回归分析法。其中一个是在油气层占总孔隙层段很大百分数的地方。在这种情况下，从数据上可以明显地看出有油气层的存在，但是计算的含水饱和度可能有严重的误差。前面所讨论的 $1/S_w$ 图将不是在 1 周围的正态分布，或不是正态分布。另外一个应该注意的地方是在油气层和非油气层中看到测井仪器的精度或读数有系统的差值的地方。现在举例如下：

1. 深侵入严重地改变了在充满水层段的电阻率测井曲线的读数，甚至于在油气层段测得了正确的 R_t 值，但是在油气层的含水饱和度的计算值中仍然引入了系统的误差。在这些条件下，最好是使用适当的惯用解释法。在非生产层中求得的 S_w 的计算值常常是错误的，但是它本身并不影响油气层段的计算。

2. 如果像有时看到的那样，油气的存在影响了孔隙率测井曲线，则在 S_w 的计算值中，常常引入系统的误差。但是当使用普通的方法时这个问题也是相同的。

3. 由于储集层中含有粘土而使 SP 减小了，通常这并不是考虑确定 R_w 需要 SP 偏转最大的含水砂层的原因。但是在含油气层中有时遇到更大的 SP 减小，因此用 SP 来确定 R_w 时可能造成严重的错误。在普通的解释法中使用自然电位也有这个问题。因为在回归模型中使用 SP，而使用者几乎不加以干预，所以可能增加了造成严重错误的可能性。

回归模型的发展

如前所述，回归分析已经用于测井分析，但是因为提出的模型更加复杂，所以要进一步发展回归方程。因为这种技术首先假设大多数层的含水饱和度为 100%，所以计算含水砂层电阻率的方程可以用来作为模型的基础：

$$R_0 = F \times R_w \quad (1)$$

但是并不直接使用 R_w 。在回归模型所采用的SP的一般函数中，不需要知道 R_{mf} 或SP方程固有的形状。这就减少了在使用SP时所固有的许多误差的来源。基本的自然电位方程(2)可以导出所使用的自然电位函数，我们可以看到，其他影响SP的因素可能有很少的误差或没有误差，这些误差中有刻度误差及恒定的过滤电位。

$$SP = -K_t \times \log \frac{R_{mf}}{R_w} \quad (2)$$

解 R_w 则得，

$$R_w = R_{mf} \times 10^{SP/K_t} \quad (3)$$

R_w 是地层温度下的值，温度变化将在SP方程内处理。 R_{mf} 及 K_t 随着温度而变化。 R_{mf} 的输入值认为是在 100°F 下的值。在地层温度下，(3)式变为：

$$R_w = R_{mf100} \times \frac{100}{FT}^{SP/K_t} \quad (4)$$

式中： FT =地层温度， $100/FT$ 把泥浆滤液校正到地层温度。

K_t =随温度而变的常数

SP=在砂层或多组砂层中记录的SP的最大值（最负的或最正的）

把 $100/FT$ 叫做温度比(TR)，并把 SP/K_t 叫做SPK。

$$R_w = R_{mf100} \times TR \times 10^{SPK} \quad (5)$$

把(5)式代入(1)式则得(6)式：

$$R_0 = F \times R_{mf100} \times TR \times 10^{SPK} \quad (6)$$

使用孔隙度的函数代替(6)式中的F：

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (7)$$

可以用传播时间或体积密度求出孔隙度。

我们没有使用压实校正，所以首先建立传播时间模型：

$$\phi = A(\Delta T - \Delta T_m) \quad (8)$$

增加深度(D)项作为压实项，上式变为：

$$\phi = A(\Delta T - \Delta T_m) \times D^Z \quad (9)$$

代入(7)式则得(10)式：

$$F = \frac{a}{[A(\Delta T - \Delta T_m)D^Z]^m} \quad (10)$$

与(6)式合并则得(11)式：

$$R_0 = \frac{a \times R_{mf100} \times TR \times 10^{SPK}}{[A(\Delta T - \Delta T_m)D^Z]^m} \quad (11)$$

对于任意一次测井来说， R_{mf100} 可认为是一个常数。考虑这个之后，对(11)式取对数，并把常数合并。则推导出(12)式，为了在使用回归程序时得到一个线性方程，这种变换是必须的。把传播时间和孔隙度之间的比例常数A、a及 R_{mf} 合并成为常数C则得：

$$\log R_0 = C + \log TR - M \log(\Delta T - \Delta T_m) - Z/\log D + SPK \quad (12)$$

如果使用约定的符号，则上式变为：

$$\log R_0 = B_0 + B_1 \log TR + B_2 \log(\Delta T - \Delta T_m) + B_3 \times SPK + B_4 \log D \quad (13)$$

在SP方程(2)不能给出正确的 R_w 值的地方，必须采用另一些方程，我们已经知道，

当进行经验校正时把SP校正为:

$$SP_e = A + B \times SP \quad (14)$$

式中:

SP_e = 等效的SP(当使用(2)式时, SP_e 将给出正确的 R_w 值)。

$A + B$ = 拟合常数

SP = 观测的SP值

这就能够得到更可靠的 R_w 值。但是在(13)式中已经具有了这种校正。如果应用(2)式, 则(13)式中的 B_3 是1, 并且SP对 B_0 项没有贡献。如果在用(14)式, 校正了测得的SP后, 能够求得 R_w , 则 B_3 变成B, 并且A被包括在(13)式的 B_0 项中。

当使用密度时, 则回归模型变为:

$$\log R_0 = B'_0 + B'_1 \log TR + B'_2 \log(\rho_g - \rho_b) + B'_3 SPK \quad (15)$$

也可以用由一种测井曲线或由几种测井曲线求得的孔隙率:

$$\log R_0 = B''_0 + B''_1 \log TR + B''_2 \log \phi + B''_3 SPK \quad (16)$$

按照所能利用的孔隙度曲线, 把(13)式、(15)式或(16)式作为回归模型。我们将要讲述使用这种模型的回归分析所得到的优点。

使用以假设数据作为输入的回归模型的实例

可以利用假设的数据来说明在理想的条件下多元线性回归分析的用途。这里所说的理想条件就是所有的数据都是完善的(无误差的)或至少误差的大小是精确知道的。这可以说明这种解释技术能够克服基本数据中的误差, 能得出满意的结果。也可以说明使用回归系数可以帮助找出错误。

试验数据是用阿莫科(Amoco)测井分析系统(Amolog)取得的, 假设胶结指数等于2, 假设 R_{mf} 在100°F时为2.08欧姆米, 然后对孔隙度、 R_w 及温度选用不同的值, 利用这些值, 计算 $R_t(R_0)$ 及SP。这样产生出来200英尺的数据。在把这些没有误差的数据处理完了之后, 再把孔隙度、SP及 R_t 系统地进行改变, 以模拟误差, 用这种方法得到了九个实例。

在Amolog系统中用多元线性回归分析法处理所有的数据。这是一个用曲线输入的一般测井分析计算机程序。当直接使用孔隙度时, 采用方程(16)作为回归模型。 $\log R_0$ 是应变量, $\log(POR)$, $\log(TR)$ 及SPK是自变量。表1是这九次回归分析的结果及已经代入系数的回归方程的一览表。也标出了模拟误差的说明。回归模型的输出中含有对于评价结果有用的统计参数。其中有一些也列在表1中。

1. $MCCS$ (多元相关系数的平方), 它是拟合优度的量度。数值1是表示完善的拟合, 数值0表示不相关。
2. “F”值, 它是相关性的量度。较高的F值, 较小的相关性, 表示是偶然事件的结果。
3. 在和每一个自变量有关的t值中有 t_{POR} , t_{TR} , 和 t_{SPK} 。该t值(绝对值)越大, 则该变量的重要性越大。
4. 估算量的标准误差。 $\log R_0$ 的计算值 $\pm$ 估算值的标准误差将等于或小于大约出现次数为68%的 $\log R_0$ 的实际值。可以用它计算大约出现次数为68%的含水层的 S_w 值的范围。这里假设 $1/S_w$ 是在1周围的正态分布。

在表1中的数据有拟合性质的量度, 有自变量的相对重要性, 和拟合性的大小以及所求得的含水饱和度的可能范围。还有计算 R_0 所用的方程。

表1 假想的回归分析数据表

例	数据描述	MCCS	F值	t_{TR}^*	t_{SPK}	t_{POR}	标准误差 估算	S_w 值
1	Perfect	1.000	3×10^{13}	24×10^5	50×10^5	-79×10^5	0	100
2	POR Shifted + 1'	0.333	32.6	4.27	8.91	0.26	.4987	56-177
3	SP=SP-50	1.000					0	100
4	SP=SP*.5	1.000					0	100
5	SP=1.3*SP-50	1.000					0	100
6	POR=POR*.9	1.000					0	100
7	Rt=Rt*.9	1.000					0	100
8	POR=POR-2.0	0.998	2.99×10^4	74.6	156	-244	.0285	97-103
9	COND=COND+20	0.995	138	16.5	37.3	-49.7	.0875	90-111

回归方程

例

- $\text{Log}(R_o) = 4.318 + \log(\text{TR}) - 2.000 \log(\text{POR}) + \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 2.047 + 1.001 \log(\text{TR}) - 0.0367 \log(\text{POR}) + 0.999 \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 5.000 + 1.348 \log(\text{TR}) - 2.000 \log(\text{POR}) + \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 4.318 + \log(\text{TR}) - 2.000 \log(\text{POR}) + 2.000 \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 4.843 + 1.268 \log(\text{TR}) - 2.000 \log(\text{POR}) + 0.769 \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 4.227 + \log(\text{TR}) - 2.000 \log(\text{POR}) + \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 4.272 + \log(\text{TR}) - 2.000 \log(\text{POR}) + \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 3.699 + \log(\text{TR}) - 1.58 \log(\text{POR}) + \text{SPK}$
- $\text{Log}(R_o) = 3.036 + 0.678 \log(\text{TR}) - 1.250 \log(\text{POR}) + 0.734 \text{SPK}$

*在这些数据的情况下，如果T值为 $3 < T < -3$ ，则重要性程度小于1%；
如果F值为4，则重要性程度小于1%。

〔译者注〕 表中所用的符号说明：

MCCS——多元相关系数的平方。

t_{TR}^* —— t_i 为数理统计中表示自变量 X_i 重要性程度的指示参数。 t_{TR}^* 就是表示自变量 TR^* 重要性程度的指示参数， t_{TR}^* 越大， TR^* 就越重要。

t_{SPK} ——表示自变量 SPK 重要性程度的指示参数。

t_{POR} ——表示自变量 POR 重要性程度的指示参数。

直接看看利用完善的（没有误差的）数据所得到的结果，就可以检验回归系数作为误差指示的效果。方程(13)、(15)及(16)中的项 B_2 或孔隙度系数等于胶结指数“ m ”。只要孔隙度、 ΔT_m 或 ρ_b 是正确的，则无论使用 ΔT 、 ρ_b 或孔隙度中的那一种，上边的讲述都是正确的。从表1的例1中可以看出， $m = 2$ ($B_2 = 2$)，这和在制造这些数据时所假设的一样，所以和预期的一样，如果可以利用精确的孔隙度及电阻率数据，则可以确定 m 。

和推导回归模型中所讲的一样， SPK 及 TR 的系数是1。如果 a 是已知的或能够假设 a 等于1，则 B_0 项是有意义的。 B_0 应该等于 $\log(R_{mf})_{100}$ 。但是 $A_m \log$ 系统通常采用以百分数表示的孔隙度而不是以小数表示的孔隙度，所以 B_0 中含有系数 $\log(100^2)$ 或4。如果从4.318的 B_0 中减去4，则还剩下0.318，0.318的反对数是2.08，它就是计算 SP 时所采用的 R_{mf100} 。所以在使用完善的（无误差的）数据时，可以得到 R_{mf} 及“ m ”，并且说明方程(2)是可以利用的($B_3=1$)。

下一个例子是用把孔隙度在下井的方向移动1英尺的方法，造成误差(表1，例2)。因为孔隙度都向下移动了1英尺，所以这可以代表一种严重的误差。MCCS降到0.333，F值降到32.6，它仍然是有意义的，但是对于孔隙度 t_{POR} 所得到的“ t ”值降到0.26，它是没有意

义的。孔隙度的回归系数现在是0.0367，或m等于-0.0367。现在在电阻率和孔隙度之间实际上是不相关的。SPK和TR的系数基本上等于1。看来和孔隙度相关不好的原因是孤立的。

下一例是从SP曲线上减去50毫伏，使SP幅度的绝对值较大（表1，例3）。这可能是有过滤电位的例子，或是 R_{mf} 比测得的值有更高的电阻率值的例子。在温度恒定时，和地层水电阻率无关， R_{mf} 的变化将使SP变化一个固定的值。SPK的系数是1，“m”仍是2。如果温度仍是恒定的，则 B_1 将是1，并且可以由 B_0 项计算真的 R_{mf100} 或等效的 R_{mf100} 。如果在试验数据中有大的温度变化， B_0 及 B_1 项的值就要改变，并且它们可能失去数学意义。但是MCCS仍是1。在表1中没有列出“t”或“F”值，但是MCCS仍是1。他们可能仍然是和完善（没有误差的）数据时的数值一样。

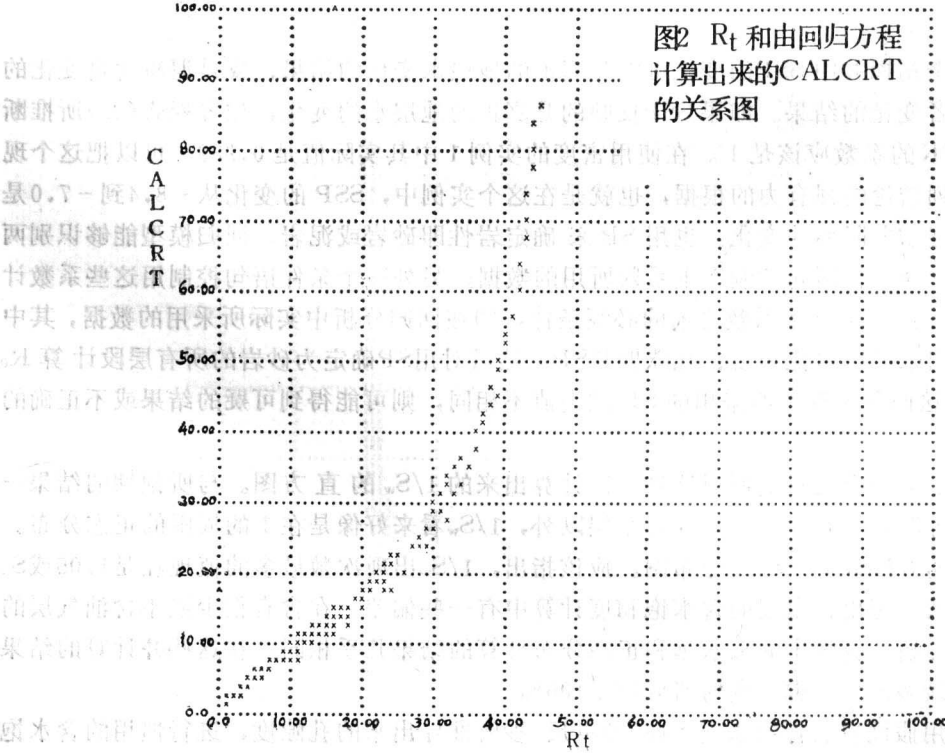
再下一例是把SP乘以0.5（表1，例4）。这可以说明刻度误差，例如200mv/道的SP，刻度错误记为100mv/道。这个例子说明回归模型能够用于自然电位的能力。SPK系数在这个例中是2，它把SP校回到它的真值，其他系数仍和例1中的值一样，MCCS仍是1。

在下一例中（表1，例5）说明在方程（14）中所讲过的那种影响SP的因素。SP的灵敏度及零线都改变了，“m”仍是2， B_2 项等于1/1.3， B_0 及 B_1 项现在难以解释。

在例6中改变孔隙度来模拟误差（ $POR = POR \times 0.9$ ）。只有 B_0 项与数据没有误差时的 B_0 项不同，这种类型的误差用回归分析的方法不能发现。但是MCCS仍是1。只有孔隙度受到影响。

在表1的例7中，当 $R_t = R_t \times 0.9$ 时求得MCCS等于1。只有 B_0 受到影响。

如在例8中，当孔隙度移动一个恒定的量，则将引入非线性误差。 B_0 和 B_2 项都发生变化，MCCS降到0.998。不正确刻度的密度测井可能给出这种类型的误差。为了得到最好的拟合，得出m等于1.58。但是对于计算的含水饱和度的影响可能是不大。不正确的 ΔT_m 或 ρ_g 值将导致类似非线性的误差。对于传播时间或密度测井来说，需要移动一个恒定的值。



当假设有一个恒定的电导率移动，则也引起非线性电阻率误差。一个不正确刻度的感应测井可能引起这种类型的误差。在例9中把20毫姆欧加到电导率上。所有的系数都受影响，并且MCCS降到0.955。在这个例子的数据中，由 R_t 对回归方程计算求得的 R_t 所做的图能够指示这种误差。图2就是这种图。这个图指出，测得的 R_t 值向50欧姆米渐近，然而由回归方程计算出的值接近100欧姆米。正确的 R_t 的最大值应该是408欧姆米。因为油和水之间的电阻率差异大大地减小了，所以这个例子的干扰比数据指示的还大。

上述例子的数据说明能够使用回归分析指示测井误差。自然电位系数(B_s)在它预期值周围的稳定性使我们增加了使用这种方法的信心。但是后面讨论的共线性可能限制了用回归系数来量度测井参数的效果。

现场实例

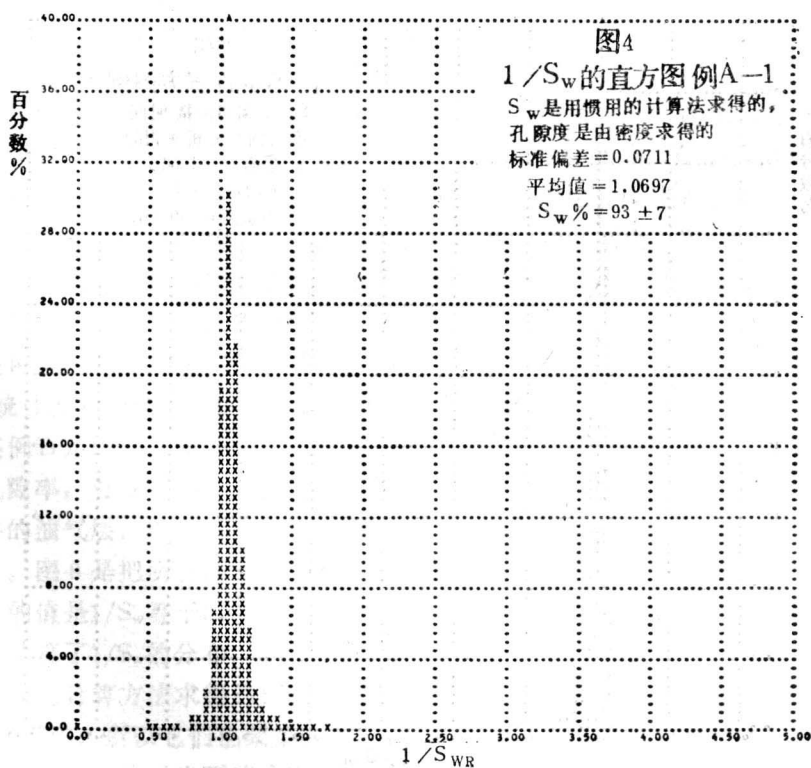
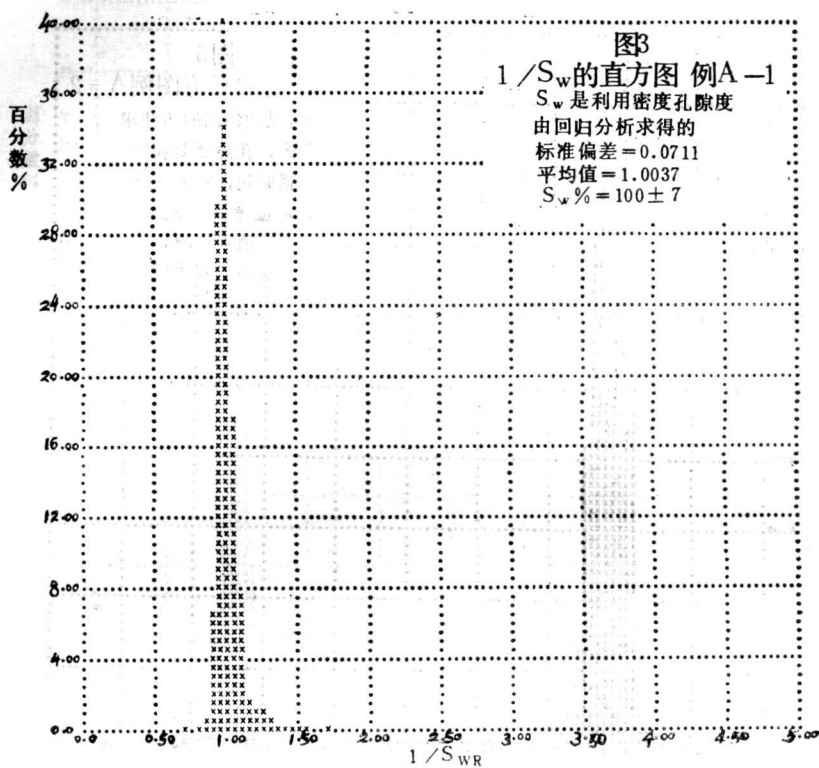
下面给出两个现场实例，一个是由地层水含盐量有变化的第三纪盆地得来的。在2050到6900英尺之间分析了2500英尺的砂层；但是只遇到了少数的油气显示。所以这个模型几乎没有困难就可以应用。这口井处理了三次：一次是用密度(例A-1)，一次是用传播时间并用深度这个参数作为压实校正(例A-2)，最后一次是用传播时间(例A-3)。在所有的各次测井中都用温度这个参数来表示 $\log(TR)$ 及SPK。

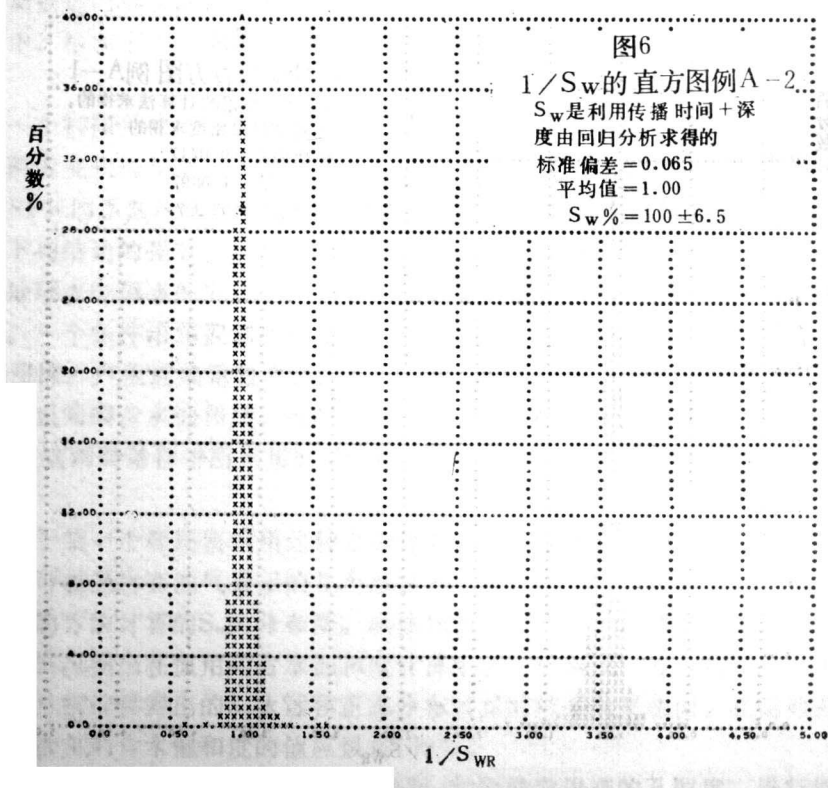
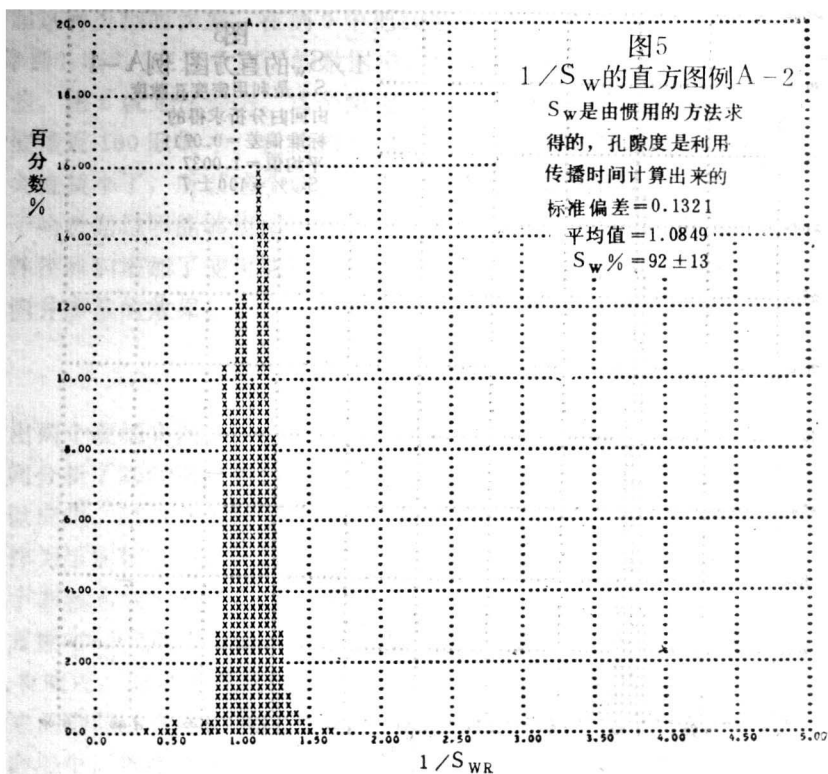
在回归方程中SPK用来作为一个自变数，它能分析 R_w 可能不是常数的井。所记录的SP不只是对 R_w 有响应，对含泥量及层厚等也有响应。所以SPK应该尽可能是从静自然电位或SSP推导出来的曲线。在这个现场实例中，采用的方法是：在含有厚度最少有30英尺的一个砂岩的一组砂层中，找出最小的SP值(即最负的SP值)，从这个SP值建立一条SSP曲线。这些砂层组必须被适当厚度的泥岩所分隔，在程序中用这种方法把砂层分开的逻辑。在第一个实例的井中，给出了十三个不同的SSP值。所以SPK是由SSP计算得来的，而不是由SP计算得来的。

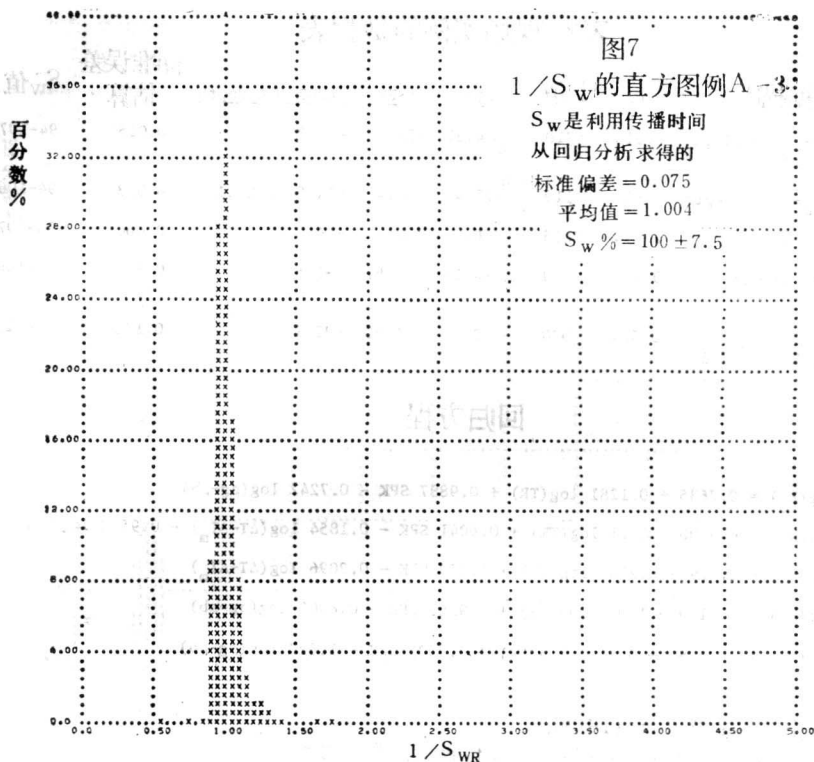
在任意一个初探井中SSP的变化可能是真正的地层水变化的结果，或是泥质含量变化的结果，或是两者变化的结果。如果SSP反映的是真正的地层水的变化，如方程式(2)所推断的那样，则SPK的系数应该是1。在使用密度的实例1中其实际值是0.989。可以把这个现象作为得出下列结论的强有力的根据，也就是在这个实例中，SSP的变化从-8.4到-7.0是反映真正的地层水电阻率的变化。也用SP来确定岩性即砂岩或泥岩。回归模型能够识别两种条件语句。一个条件语句控制产生系数所用的数据；另外一个条件语句控制用这些系数计算 R_o 及 S_w 的层段。产生这些系数之前的必须条件，即在回归分析中实际所采用的数据，其中包括从前计算出来的含水饱和度、孔隙度及SP。然后对用SP确定为砂岩的所有层段计算 R_o 及 S_w 。如果在这两种条件中所采用的SP截去值不相同，则可能得到可疑的结果或不正确的结果。

图3是对于第一个现场实例用这种方法计算出来的 $1/S_w$ 的直方图。与所预期的结果一样，除在右边可能是含有油气显示的几个层以外， $1/S_w$ 看来好像是在1的周围的正态分布。图4是用惯用的方法计算的 S_w 的分布图。应该指出， $1/S_w$ 出现次数最多的值现在是1.05或 S_w 为95%。这种情况指出在惯用的含水饱和度计算中有一些偏差。在含有很少或不含油气层的井中，用回归分析计算得出的 S_w 永远和正态分布计算的结果几乎相同。在这些井计算的结果中，出现次数最多的含水饱和度的值应该是100%。

图5是利用假设岩石骨架速度为18000英尺/秒所推导出来的孔隙度，进行惯用的含水饱







和度计算而求得的直方图。图6及图7是由例A-2及例A-3所求得的直方图。当采用传播时间作为孔隙率时，回归分析在解释中取得的改进是巨大的。但是当在回归模型(图6及图7)中使用传播时间时，其结果和使用密度所求得的结果相同。

在例A-2中得出了传播时间及深度这两个参数的相对重要性，这是很有意义的。“t”值指出，传播时间的对数(t_{POR})是意义最小的变数。这种情况是和在落基山的第三纪中取得的回归分析数据一致的。在落基山发现孔隙度和深度之间比孔隙度和传播时间之间有较好的相关关系。这个现场实例的数据一览表表示于表2。这个数据指出，对于现场实例A来说，MCCS所指示的最好的回归拟合是使用有深度压实校正的声波，其次是使用声波及密度，最次的是使用没有深度压实校正的声波。

但是使用声波及密度时“F”值是最高的。使用有深度压实校正的声波，有最低的“F”值。对表2中的统计参数作进一步的分析超出了本文的范围。

现场实例B是路易斯安那的一口气井。在5000和8668英尺之间分析了1410英尺的数据。用密度求孔隙率，可以和例1同样的方法使用SP(图11是该实例输出的原始图)。这口井含有足够多的油气层，以致于使得用全部数据产生的回归系数不能给出 R_o 的正确值。这种情况示于图8。图8是把所有的油气层都包括进去，从回归方程计算求得的 $1/S_w$ 的直方图，出现次数最多的值是 $1/S_w$ 等于0.9，($S_w=111\%$)。当把 S_w 小于75%的所有数据都从回归分析中排除时，计算了 $1/S_w$ 的分布，如图9所示。这时出现频次最多的 $1/S_w$ 是1.0。图10是为了比较而用惯用的计算方法求得的 $1/S_w$ 的直方图。这种惯用计算是利用大大改进了的 R_{wa} 技术确定 R_w 而作出的，所以它们也聚集在大约100%的地方。但是回归分析计算的含水饱和度更紧密地聚集在一起，指示出可能改进了解答的能力。

表2 现场实例的数据表

例	数据描述	MCCS	F值	tTR	tSPK	tPOR	t Depth	标准误差 估算	S _w 值
A-1	(pg-pb) used as porosity	0.910	8710	4.37	127	-30.8		0.0552	94-107
A-2	(ΔT _m -ΔT) + Depth	0.917	7119	-27.4	35.4	-14.8	27.1	0.0531	94-106
A-3	(ΔT _m -ΔT)	0.894	7215	-6.86	122	-14.7		0.0601	93-107
B	(pg-pb) pay included	0.190	110	-4.19	9.67	-7.55		0.318	69-144
B	(pg-pb) S _w < 75% excluded	0.534	500	3.55	6.53	-35.1		0.122	87-115

回归方程

例	
A-1	$\text{Log}(R_o) = 0.7635 + 0.1281 \log(\text{TR}) + 0.9887 \text{SPK} - 0.7242 \log(\text{pg-pb})$
A-2	$\text{Log}(R_o) = 0.3300 - 16.1 \log(\text{TR}) + 0.6041 \text{SPK} - 0.1854 \log(\Delta T_m - \Delta T_m) - 0.9582 \log(\text{Depth})$
A-3	$\text{Log}(R_o) = 1.379 - 0.2037 \log(\text{TR}) + 1.022 \text{SPK} - 0.2096 \log(\Delta T_m - \Delta T_m)$
B _{pay}	$\text{Log}(R_o) = 0.7149 - 1.019 \log(\text{TR}) + 0.9566 \text{SPK} - 0.8400 \log(\text{pg-pb})$
B _{expay}	$\text{Log}(R_o) = -0.6882 + 0.6646 \log(\text{TR}) + 0.2025 \text{SPK} - 1.627 \log(\text{pg-pb})$

[译者注] 表中符号的意义与表1中相同。
t Depth——表示自变量Depth（深度）重要性程度的指示参数

