油气藏井间监测新技术及其应用

目前，井间监测技术正朝着将地层测量从近井区域推向储层深处这一方向发展。油气藏管理人员可以利用根据测量结果获得的层析成像来监测地层深处流体的流动情况。

Zaki A. Al-Ali
Muhammad H. Al-Buali
Saleh AlRuwaili
Shouxiang Mark Ma
Alberto F. Marsala
沙特国家石油公司
沙特阿拉伯宰赫兰

David Alumbaugh
Luis DePavia
Cyrille Levesque
Ajay Nalonnil
Ping Zhang
美国加利福尼亚州 Richmond

Colin Hulme
法国 Clamart

Michael Wilt
阿联酋阿布扎比

《油田新技术》2009 年夏季刊：21 卷，第 2 期。
©2009 斯伦贝谢版权所有。

在编写本文过程中得到美国得克萨斯州 Sugar Land 的 Martin Isaacs 的帮助，谨表谢意。

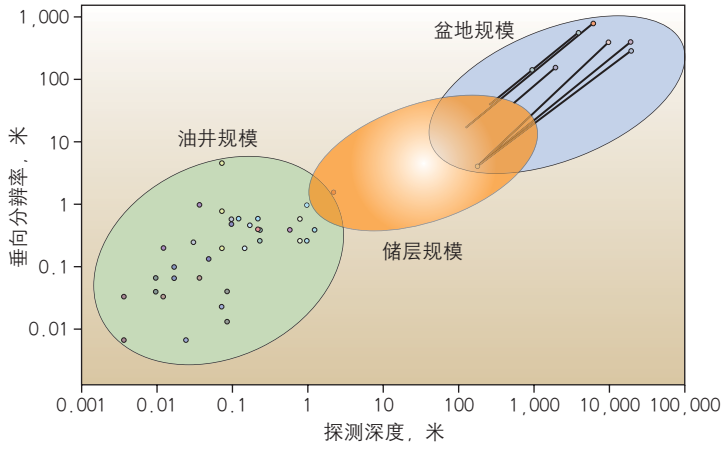
DeepLook-EM，Petrel，RST 和 ToolPlanner 等是斯伦贝谢公司的商标。

1. Luling MG，Babour K，Habashy TM，Nichols E，Wilt MJ 和 Zhang P：“Crosswell Electromagnetic Surveys for Monitoring Large-Scale Reservoir Saturation Changes”，SPE SA-55，发表在 SPE 沙特阿拉伯分会技术会议上，宰赫兰，2004 年 5 月 15-17 日。

油藏管理中一项困难但却非常重要的工作是了解和预测在产油气田中流体的流动情况。连续或重复监测储层特性是优化生产的一个重要策略，有助于作业者确定和应对那些需要修井的储层条件变化。储层监测方式多种多样，包括由智能完井装置进行日常测量、反复测量多口井的压力动态以及在油田整个开采周期中采集延时地震数据等。每种监测方式都有各自的优缺点和重点考虑因素。

作业者可根据井间压力动态监测流体流动情况，但这些压力测量数据主要来自近井区域。地震测量可以确定储层体积，但地震数据的垂向分辨率常常较差，而且测量数据对储层基岩较为敏感，不能准确反映储层内的流体类型和分布情况[1]。为了更好地了解井间油气分布情况，作业者需要一种流体饱和度测量技术，这种技术的探测深度必须优于电测井技术，而分辨率要高于地震测量。

在寻求整个储层范围内流体流动监测方法的过程中，一些油气藏管理者采纳了井间电磁感应技术。该技术综合了电磁感应和层析成像的优势，生成井间电阻率分布剖面图。电磁(EM)感应技术的探测深度大于常规测井仪的探测深度，而且对流体含量较为敏感。利用井间 EM 感应测量可以探测井间区域，其分辨率介于高分辨率测井和较低分辨率地震测量之间（下图）。



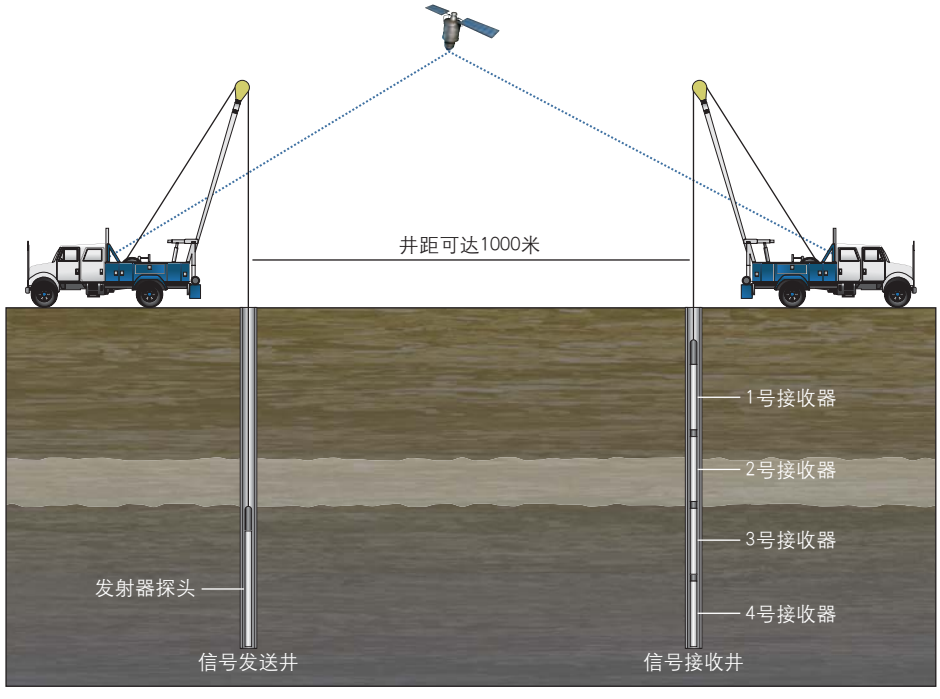
^ 填补分辨率空白。大多数油田测量数据的分辨率处于两极，即要么是近井区域测量的高分辨率数据，要么是盆地范围的低分辨率数据。在这两者之间的探测深度和分辨率条件下获得的井间测量数据可以帮助地学家更好地对井间区域的储层进行描述和成像分析。


Schlumberger
Schlumberger



^ 中东地区远距离井间监测作业。作业人员正准备将位于井口之上的接收器阵列（*中*）下入井中。发射器仪器串悬挂在位于倾斜吊臂下部的井筒中。

感应测量主要反映地层电导率。高电导率值通常表示有盐水存在。电导率的倒数是电阻率，高电阻率值（与低电导率相对应）可能意味着油气的存在。不过，测量数据通常受温度、孔隙度、孔隙流体电阻率和流体饱和度的影响。井间EM电阻率被用于区分高阻原油和低阻盐水之间的电性变化[2]。井间电阻率数据也被用于反映储层性质变化，确定非均质性和储层连通性[3]。井间EM测井并非新技术。该技术的可行性已经得到了证实，而且经过发展演变，该系统现在可以提高测井速度，并在测量准确性、分辨率、采集、建模和处理方面都取得了进展[4]。



^ 井间EM采集系统。第一口井下入磁偶极子发射器，其能量比常规感应测井发射器高5个数量级（*左*）。第二口井（*右*）中下入由四个接收器组成的接收器阵列。接收器阵列中的磁力仪可以测量到能量比地球静磁场低10个数量级的磁场。两口井之间的距离可达1000米，发射器和接收器组件之间以无线方式连接。

DeepLook-EM井间储层监测系统的作业方式与常规测井仪的作业方式相似，但DeepLook-EM技术利用布置在其中一口井中的发射器及另一口井中的接收器阵列来探测两口井之间的区域，而不是将发射器和接收器都布置在同一口井中。在两口井之间发射信号的频率介于几赫兹到数千赫兹之间，信号传播距离接近1公里（0.6英里），具体取决于井筒和地层特性（左图）。

分析人员利用油田模型和井眼轨迹数据对测量数据进行处理，生成层析图像，即井间储层的垂向切片。对这些层析成像切片进行标色，以显示地层电阻率差异。

油藏管理人员将DeepLook-EM测量结果用于各种用途，如监测波及效率、发现死油区、设计加密井井位及改善油藏模拟效果[5]。本文对DeepLook-EM测量的实施过程及数据的应用过程进行了介绍。文章首先概述测量设备和测量程序，然后通过中东和美国的一些实例对DeepLook-EM的应用进行了讨论。

采集系统

就广义而言，DeepLook-EM井间感应系统包括布置在一口井中的发射器仪器串、布置在另一口井中的接收器阵列、两口井的地面采集控制台及两口井之间的无线遥测系统。每口井利用一套标准电缆系统和一个桅式井架将仪器下入井中进行测量（左图）。

发射器仪器串长9.88米（32.4英尺），直径8.6厘米（3.375英寸），包含一个配有3.7米（12英尺）长天线的感应线圈发射器（下一页，右上表）。发射天线以可编程频率发射连续的正弦信号。位于发射器短节中的自然伽马射线探测器可以提供与原先获得的测井数据之间的深度校正[6]。

EM发射器仪器串长22.5米（73.8英尺），直径5.4厘米（2.125英寸）。该仪器由含有四个感应线圈磁场接收器的阵列组成，各接收器之间相隔4.5米

（14.75英尺）。这些探测线圈是非常敏感的磁力仪，可以准确测量发射器生成的信号。同时，接收器部分还包括一个用于深度对比的自然伽马探测器。

与其他任何感应仪器相同，DeepLook-EM系统要求获得准确的相位和振幅数据。为了获得同步相位测量数据，地面发射器控制台和接收器采集控制台的时间参照全球定位系统卫星进行校准。控制台之间通过无线遥测系统联系，使现场工程师可以在某一地点远程监测和控制采集作业。井下发射器的电流、电压和现场测量数据以无线方式发送至接收器采集控制台，对接收到的信号进行标准化处理。

规格	DeepLook-EM发射器	DeepLook-EM接收器
耐温	150°C [300°F]	150°C [300°F]
耐压	138 MPa [20,000 psi]	103 MPa [15,000 psi]
井筒尺寸－最小		
裸眼井	11.5 cm [4.5 in.]	6.5 cm [2.5 in.]
套管井	11.5 cm [4.5 in.]	6.5 cm [2.5 in.]
井筒尺寸－最大		
裸眼井	不限	不限
套管井	35 cm [13.75 in.]	不限
外径	8.6 cm [3.375 in.]	5.4 cm [2.125 in.]
长度	9.88 m [32.4 ft]	四个接收器：22.5 m [73.8 ft]
泥浆类型或比重限制	无流体限制	无流体限制
井斜	0°－20°	0°－20°
频率范围	5－1000千赫	5－1000千赫

^ 仪器规格。DeepLook-EM系统的额定温度为150°C，适用于所有类型的井筒流体。

测量原理

储层监测通常在二次或三次采油过程中实施，监测结果常常被应用于更新储层模型或调整油气田开发方案。通过测量井间地层的电阻率，DeepLook-EM探测技术为工程师和地学家绘制储层电阻率分布图提供帮助。由于电阻率测量值对孔隙度、流体饱和度和温度比较敏感，因此电阻率的分布变化就可以反映出这些性质的变化。

对油藏管理人员而言，检测这些变化是一种有价值的诊断工具。例如，孔隙度变化可能是储层内出现沉降的征兆，饱和度变化通常表明注入水推进，而静态饱和度测量数据则可指示存在死油区，温度变化有助于评估蒸汽驱的效率。在流体注入过程中，随着时间的推移，电阻率分布差异数据可以为作业人员提供流体流动信息，从而可帮助确定渗透率分布情况。

将接收器阵列下入到井筒特定深度或测量位置，可获得DeepLook-EM井间测量数据。尽管接收器阵列保持静止状态，但另一口井中的电磁发射器在选定的深度之间移动的同时仍然在不断发射信号。一旦获取某个位置的剖面信息（即来自一个完整发射器测线的信号），作业人员就将接收器移到另一个位置（通常向井口方向移动）进行相同的作业。因此，发射器和接收器在整个测井段移动的同时实现了对井间目标层的多角度探测。为了更好地控制测井过程中仪器的移动，作业人员通常在发射井处通过笔记本电脑输入指令来开展作业（下图）。

DeepLook-EM发射器产生的磁场以用户定义的5赫兹－1千赫之间的频率

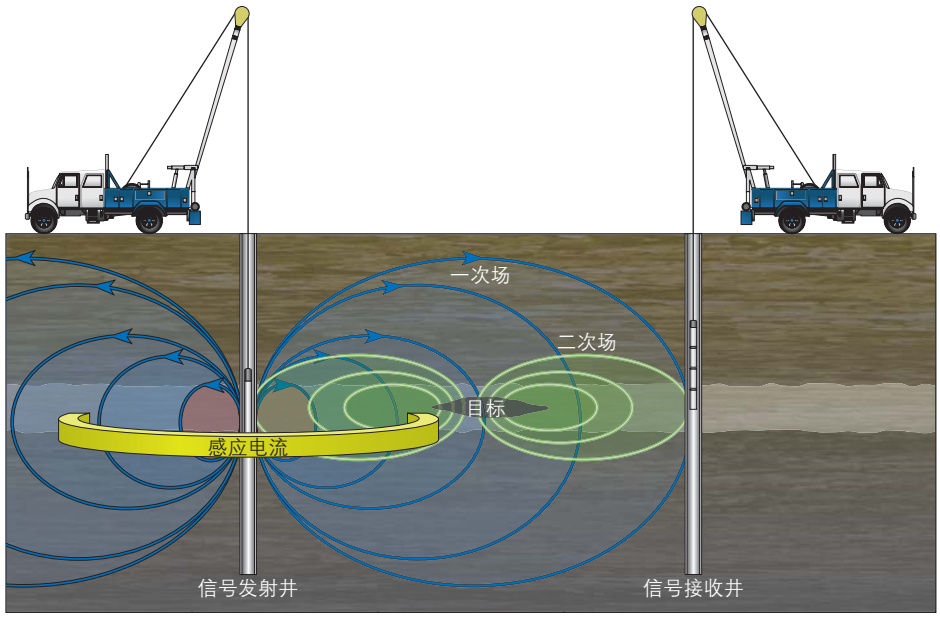


^ 测井车内部。作业人员一般通过发射井处的笔记本电脑操控测井作业，指令和数据交换在发射井和接收井之间以无线方式进行。

2. Levesque C：“Crosswell Electromagnetic Resistivity Imaging：Illuminating the Reservoir”，*Middle East and Asia Reservoirs Review*，第7期（2006年）：23-33。网上参见http://www.slb.com/media/services/resources/mewr/num7/illuminating_reservoir.pdf（2009年4月2日浏览）。
3. Wilt M，Morrison HF，Becker A，Tseng H-W，Lee K，Torres-Verdin C和Alumbaugh D：“Crosshole Electromagnetic Tomography：A New Technology for Oil Field Characterization”，*The Leading Edge*，14卷，第3期（1995年3月）：173-177。
4. DePavia L，Zhang P，Alumbaugh D，Levesque C，Zhang H and Rosthal R：“Next-Generation Crosswell EM Imaging Tool”，SPE 116344，发表在SPE技术年会暨展览会上，丹佛，2008年9月21-24日。

有关井间EM技术早期观点的更多信息，请参见：Kretzschmar JL，Kibbe KL和Witterholt EJ：“Tomographic Reconstruction Techniques for Reservoir Monitoring”，SPE 10990，发表在采矿工程师学会石油工程师协会第57届秋季技术年会暨展览会上，新奥尔良，1982年9月26-29日。

5. Sanni ML，Yeh N，Afaleg NI，Kaabi AO，Ma SM，Levesque C和Donadille JM：“Crosswell Electromagnetic Resistivity Tomography：Pushing the Limits”，SPE 105353，发表在第15届SPE中东油气展览会暨大会上，巴林，2007年3月11-14日。
6. DePavia等人，参考文献4。



^ 一次场和二次场。在交流电的激励下，磁偶极子发射线圈将电磁场传入地层。一次场引起的涡流反过来生成一个二次交变电磁场，其强度与地层电阻率成反比。在接收器阵列处可对一次场和二次电磁场进行探测。

传入地层。该磁场（即一次场）离发射器越远，信号越弱。一次场在导电地层中产生电流（上图）。从而形成一个反向的二次场，导致总场振幅随着地层电阻率的降低而下降[7]。由四个敏感线圈接收器组成的阵列被布置在接收井中，用来检测由发射器生成的一次电磁场及由感应电流生成的二次电磁场[8]。

一个数据集可能包含30－60个接收器测点信息，通常涉及到数千个测量数据。由于二次信号的强度极弱，因此，为了降低信噪比，接收到的信号需要进行叠加和平均化处理，每个测点需要数百次测量。根据平均化工作量和发射频率，发射器测井速度在600－1520米/小时（2000－5000英尺/小时）范围内变化。一般情况下，现场记录300米（1000英尺）的垂直层段数据大约需要12－30小时。对于每个位置，接收器阵列中四个均匀分布的线圈可以覆盖较长间距，从而可缩短测井时间。

关键测量参数评价

没有两次完全相同的井间EM探测，每次井间EM探测都会受诸如套管特点、发射井和接收井之间距离、地层电导率和井斜等局部条件的影响，所有这些因素都会影响接收器接收到的信号质量。测井目标层段、测井速度和发射频率都会影响信号及其对各种地层参数的响应。因此，每次探测都需考虑具体井况的限制。

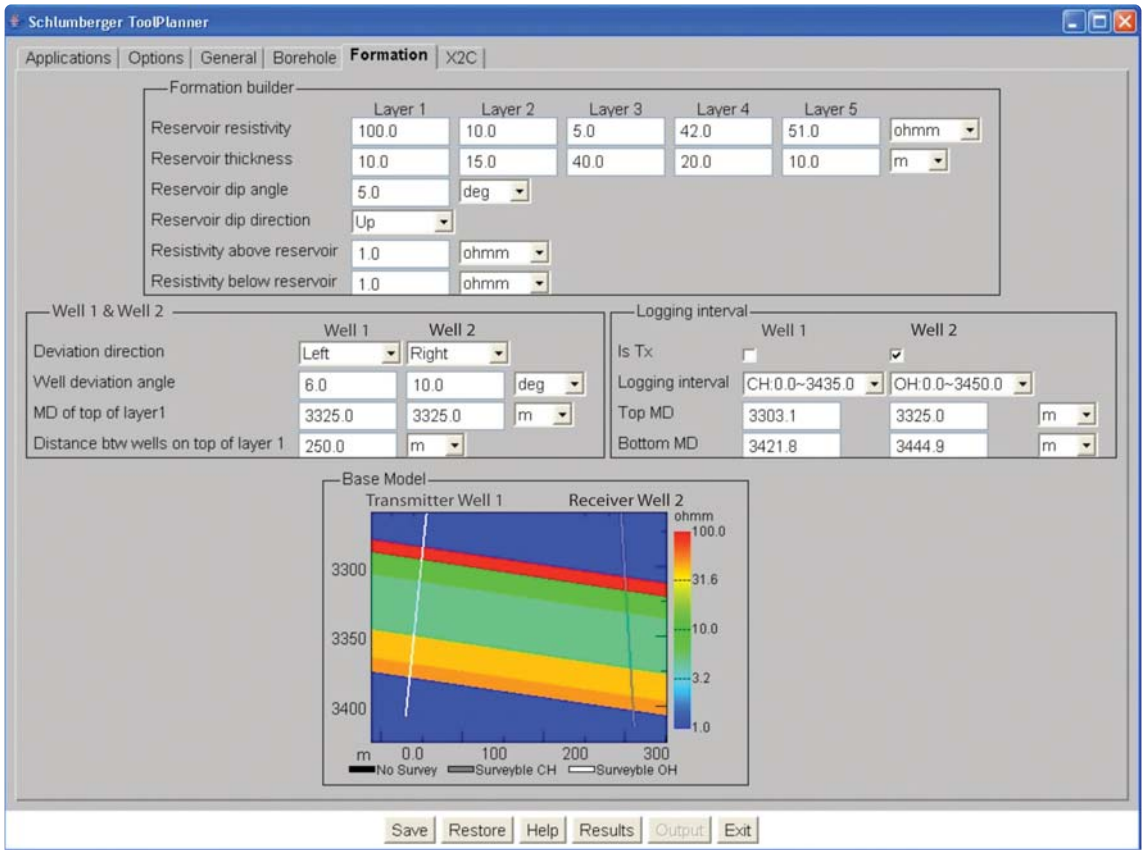
在所有地层中（最致密地层除外），一种极为常见的测量约束条件是由钢套管引起的。电磁信号在穿过钢套管的过程中衰减非常严重[9]。衰减程度随着套管传导性、套管磁导率及发射频率的增加而增大。因此，钢套管限制了适用于井间EM探测的频率范围。钢套管的传导性可能会比周围地层高8个数量级，阻碍高频信号的传输和接收，从而限制分析井间区域电导率分布的能力[10]。

其他套管柱组件也将影响井间EM数据的质量。接箍和扶正器中的金属也会进一步增加套管效应，加大测量作业的复杂性。如果在探测作业开展前或开展过程中可以确定这些组件的位置，那么就可以通过慎重确定传感器位置和监测将这些影响基本消除。幸运的是，DeepLook-EM测井仪可以检测到接箍和扶正器的位置，帮助测井人员识别并避开那些套管效应最强的区域。

由于套管效应也限制井距，从而影响到有价值的探测数据的采集，因此必须在探测作业开始前对这些效应进行模拟分析。为此，对各种套管材料进行了测试（左表）。不导电、无磁性的玻璃纤维套管基本上对发射器和接收器没影响。在这种套管中采集数据相当于进行裸眼测井作业。相反，碳钢套管既具有高导电性又具有高磁性，因此，最不利于进行测量。在无法采用玻璃纤维套管的情况下，建议在测井段中下入铬钢套管，因为铬钢套管是非磁性的，而且其传导性要低于碳钢。

信号发射井	信号接收井	最大井距
裸眼	裸眼	1,000 m [3,280 ft]
玻璃纤维套管	玻璃纤维套管	1,000 m [3,280 ft]
裸眼	铬钢套管	500 m [1,640 ft]
裸眼	碳钢套管	450 m [1,476 ft]
铬钢套管	铬钢套管	350 m [1,148 ft]

^ 井距与套管类型的关系。DeepLook-EM探测作业受套管类型和地层条件的限制。



^ ToolPlanner界面。根据该简化储层模型，DeepLook-EM测量设计人员可以建立基本情形模型，以模拟各种储层条件。

在井间EM测量设计过程中，还应考虑仪器定位问题。理想的测井井段应该延伸到储层以上及以下至少相当于储层厚度一半的距离。一般情况下，在下列条件下实施作业可以获得最佳响应：

- 异常点的电导率远远高于周围地层的电导率；
- 储层厚度等于或大于井间距离的5%；
- 套管或完井装置为非金属材料或者虽然是金属材料但没有磁性；
- 目标测井段的跨度至少等于井距的一半。

为了确定哪些井间测井参数能够更好地对储层进行描述，DeepLook-EM测量专家在将设备投入使用之前先对储层和仪器响应进行模拟。

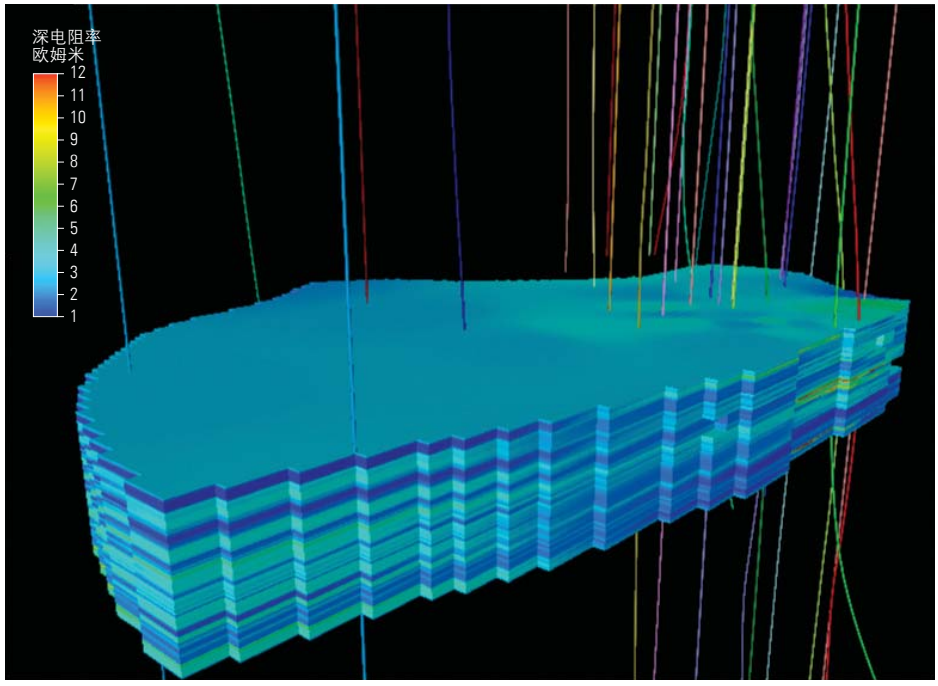
作业设计

由于井间探测结果受多种因素的影响，因此，为了优化测井参数如频率、测井速度和测线深度，作业前规划非常重要。更重要的是，为了确定能否达到探测目标，量化测量方法对地层分层、流体注入前缘的移动及裂缝和断层的影响等储层条件的敏感度，也需要进行提前规划[11]。只有在通过建模和模拟确定测量作业切实可行的条件下才可以开展数据采集和处理工作。

利用ToolPlanner软件进行快速直观的评估，以便确定井间EM测量是否适用于客户的特定目标（上图）。构建储层和邻近地层基本层状结构的参数、信号发射井和接收井的井斜及完井信息被一起输入ToolPlanner程序。分析人员指定了信号发射井和接收井与储层顶部相交处的深度和井斜，以此确定其在模型中的位置。随后为井筒周围的储层区域建立了基本的二维模型。

可以利用简化的储层模型测试各种环境，模拟客户要求描述的各种条件。可以利用该程序评估各种环境下测量作业的敏感度，推荐测量方案和测井程序或进一步的模拟要求。每种环境的敏感度都被赋予一个介于1－10之间的值，并生成一个敏感度图，以显示仪器响应变化与井间电阻率变化位置之间的关系。

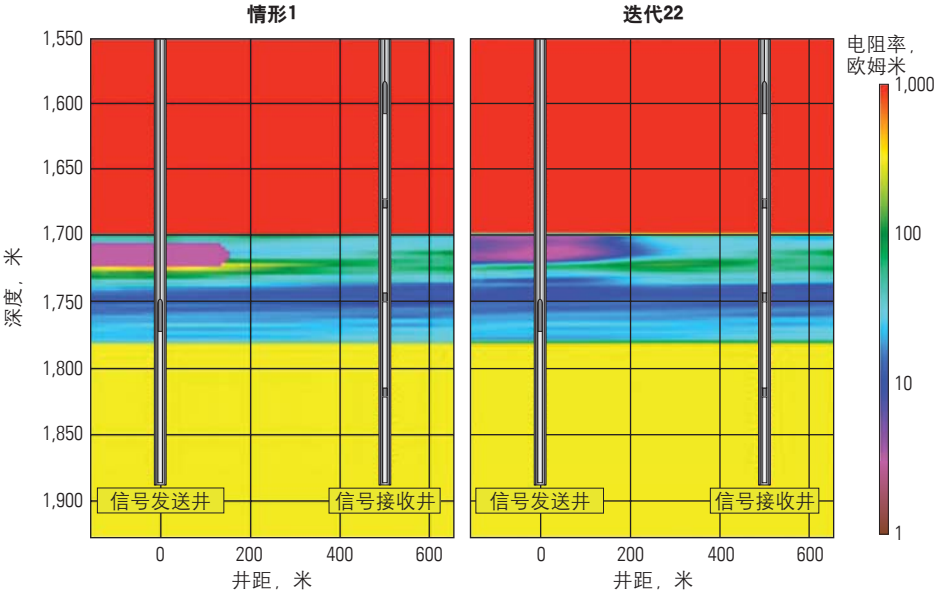
7. 有关EM采集物理原理的更多信息，请参见：Brady J，Campbell T，Fenwick A，Ganz M，Sandberg SK，Pereira Buonora MP，Rodrigues LF，Campbell C，Combee L，Ferster A，Umbach KE，Labruzzo T，Zerilli A，Nichols EA，Patmore S 和 Stilling J：“电磁法油气勘探”，《油田新技术》，21卷，第1期（2009年春季刊）：4-19。
8. Levesque，参考文献2。
9. Kim HJ 和 Lee KH：“Electromagnetic Fields in a Non-Uniform Steel-Cased Borehole”，*Geophysical Prospecting*，54卷，第4期（2006年7月）：433-439。
10. Nekut AG：“Crosswell Electromagnetic Tomography in Steel-Cased Wells”，*Geophysics*，60卷，第3期（1995年5－6月）：912-920。
11. DePavia 等人，参考文献4。



^ 用于作业前规划的电阻率数据体。地层的基准电阻率模型是几何形态校正和高频数据反演的基础。基准模型是进行DeepLook-EM探测作业前利用邻井采集到的常规电阻率测井数据构建的。分析人员利用地质统计程序对这些测井数据和地震勘探获得的地层构造信息实施一体化和平滑处理，从而生成覆盖目的层深度的三维电阻率数据体。

简化模型可以使测量设计人员迅速决定是否应该实施更进一步的模拟分析。如果初始评估结果不错，那么就将实施深入的建模和模拟，以便更准确地模拟和评估每种情形的结果。

详细建模的第一步是建立该区域的地质模型。构造模型越准确，敏感度响应也就越准确。模型中的相关现场数据包括地震测线、井斜测量数据、邻井电阻率和自然伽马记录，地质信息包括地层特征、地质分层、断层位置和断层移距数据。如果测量设计人员可以设法对半径相当于两倍井距范围内的地层建模，那么效果就更理想。



^ 情形模型。作业人员对仪器在各种情形下的响应进行模拟，以便确定探测作业在测量和最终分辨地下特征方面的能力。图中显示的是电阻率图像模拟模型对注水情形的响应（*左*）。如果响应与基准模型差别很大，就对该情形下的数据实施反演，以便评估成像程序重建井间电阻率变化的能力（*右*）。

分析人员将这些信息输入利用Petrel模拟软件建立的结构模型中。在已经确定目的层几何形态后，建模专家将测井电阻率测量数据填充至结构模型中。随后利用地质统计插入法为拟定的探测区域生成了一个作为基准的三维电阻率数据体（左图）。

分析人员将基准模型导入到一个DeepLook-EM模拟程序包内，并开展敏感度和图像重建研究（下一页，上图）。进行敏感度研究的目的是评估探测作业的如下能力，即检测地层电阻率在各种储层条件下－如流体注入前缘移动、地层分层、裂缝或断层－所产生的变化，以及评估与各种储层条件有关的具体参数。在这一过程中，模型会计算所有发射器－接收器对位置组合所产生的电磁场。本例中，作业人员对基准模型和各种情形实施了二维正演模拟[12]。

测量设计人员将各种情形下的响应与基准模型进行比较，寻找二者之间的电阻率差异，以便确定在某种情形中能否产生可利用所确定的探测参数测量到的变化（左图）。如果敏感度足够高，能够识别某个情形与基准模型之间的电磁场差异，那么就可以对该情形下的数据实施反演，以便评估成像程序重建井间电阻率分布变化的能力[13]。

这些响应模型为井间探测之后进行的最终反演和解释程序提供了一个框架。一旦采集到实际的现场数据，就可以通过一个非线性数据反演程序生成井间电阻率分布图。该程序利用迭代过程来更新和缩小实测数据与模拟响应之间的差异，所采用的方法是最小二乘法。最终的电阻率分布数据用于追踪流体的井间流动。

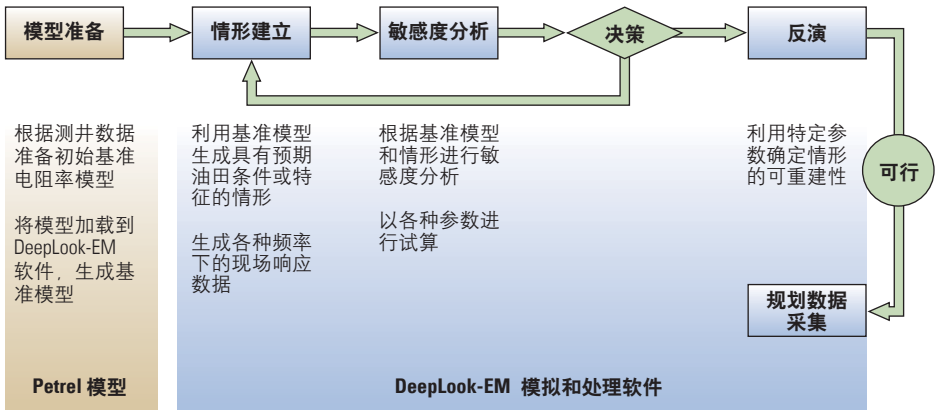
储层流体流动成像实例

阿联酋的一个高产油田出现了

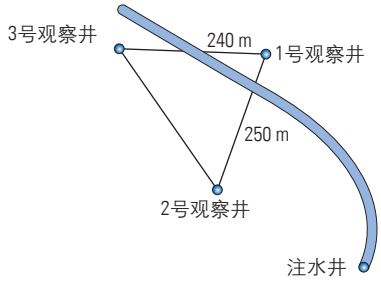
不均匀扫油及水淹现象，该油田的作业公司是阿布扎比陆上石油公司（ADCO）。为了掌握注水对生产的影响，该公司需要监测注入水在井间的移动情况。但是常规测井程序的横向覆盖率不足以监测井间流体的流动情况，而且地震勘探的垂向分辨率也不够。以上种种限制妨碍了随机流动模拟和油藏整体模拟的进行。ADCO过去曾用这些方法预测注水前缘的范围。

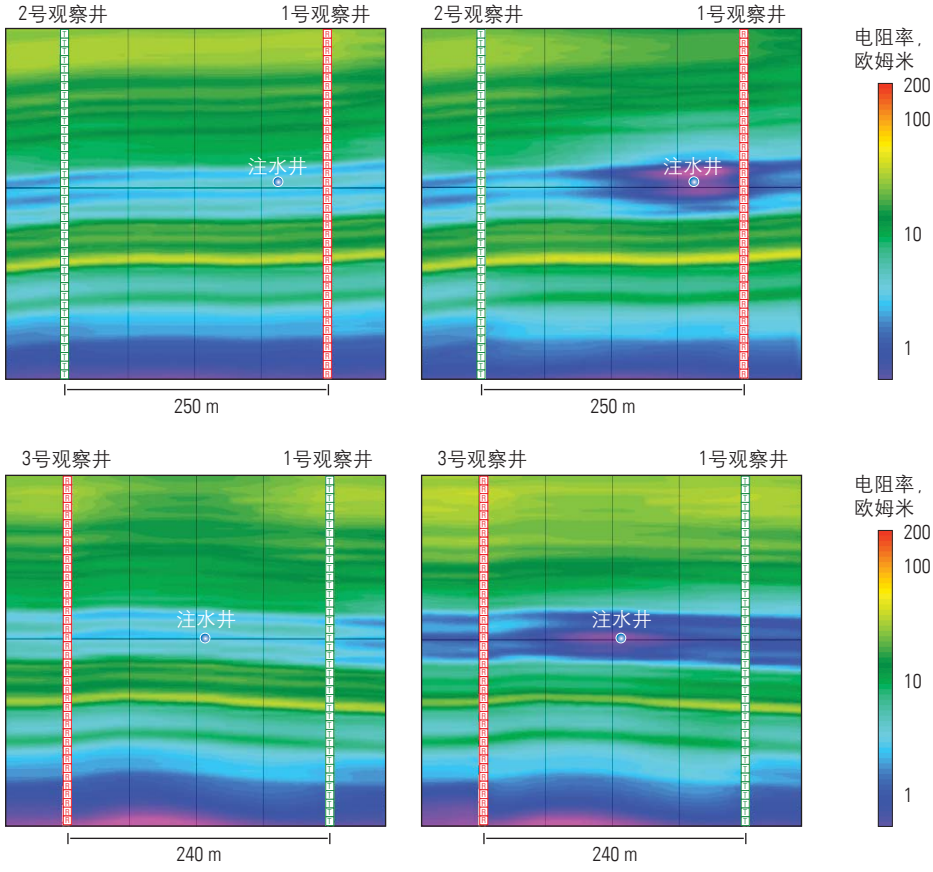
在三口铬钢套管完井的专用观测井中获得了各井对的DeepLook-EM剖面信息。注水前开展的基准探测作业为注水后的井间变化追踪建立了对比基础。进行基准作业6个月之后获得的探测图像表明由水平注水井向1号观测井和3号观测井的注水获得了成功，大量水优先沿着东-西流动方向扫油（右下图）。RST储层饱和度测井仪获得的数据也进一步证实了这一优先流动通道。

在为期6个月的探测作业中，水还没有流入2号和3号观察井。最近完成的一项后续探测作业提供了更多有关注水进展方面的细节。探测结果将被用于开发更准确的油藏工程流动模拟模型。这些信息有助于ADCO工程师和地质师进一步改善当前注水井的动态，同时也为新的注水井和加密开发井的井



^ 可行性研究工作流。在实施DeepLook-EM探测作业之前必须对各种储层条件下的响应进行测试和确认。



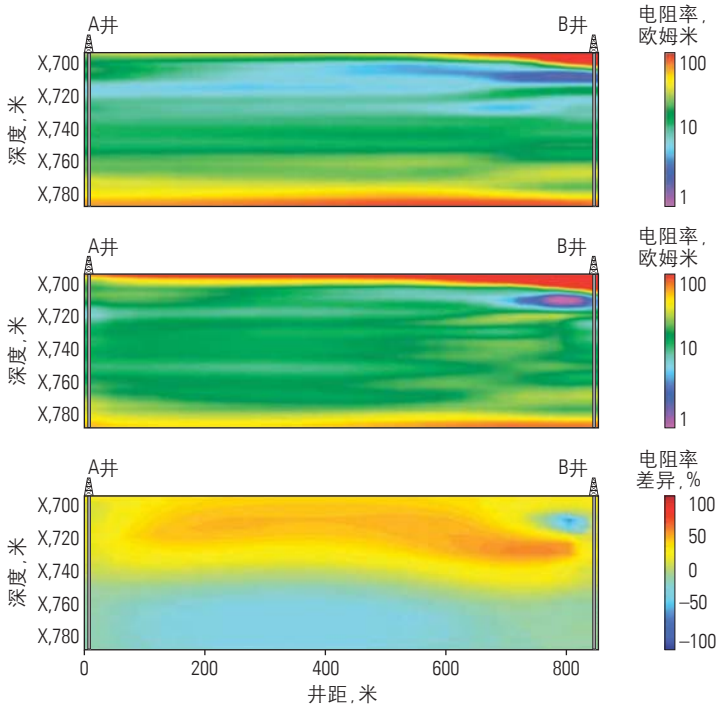


^ 延时测量成像。在基准探测作业（左）实施6个月后开展了DeepLook-EM探测（右）。结果显示1号井和3号井之间存在大量的注入水波及区域（紫色），并且优先从东向西流动。

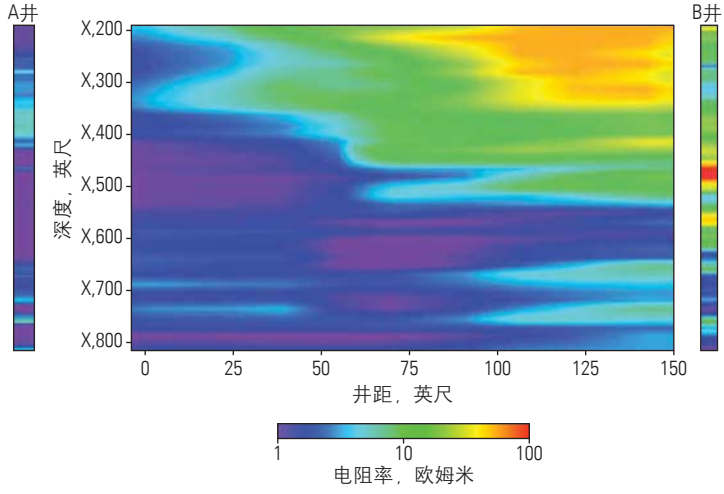
12. 正演模拟用于确定多种电磁测井测量的一般响应。该方法是为确定特定传感器在特定地层环境下的测量值而开发的，需要应用一组传感响应理论方程。同时，正演模拟也被用于解释目的，尤其是水平井和复杂环境的解释。组成正演模型的理论方程组可以是一维，也可以是二维或三维。几何形态越复杂，所需模拟的因素也就越多，因而所需的计算时间也就越长。

13. 有关 DeepLook-EM 反演程序的更多信息，请参 见：Gao G, Alumbaugh D, Zhang P, Zhang H, Levesque C, Rosthal R, Liu J, Abubakar A 和 Habashy T："Practical Implications of Nonlinear Inversion for Cross-Well Electromagnetic Data Collected in Cased-Wells"，*SEG 详细摘要*，27卷（2008年）：299-303。

有关反演的不同观点，请参见：Barclay F, Bruun A, Rasmussen KB, Camara Alfaro J, Cooke A, Cooke D, Salter D, Godfrey R, Lowden D, McHugo S, Ozdemir H, Pickering S, Gonzalez Pineda F, Herwanger J, Volterrrani S, Murineddu A, Rasmussen A 和 Roberts R："地震反演技术及其应用"，《油田新技术》，20卷，第1期（2008年春季刊）：42-63。



^ 显著差异。根据常规电阻率测井数据获得的基准模型（*上*）似乎表明井间储层已经水淹，且低阻注入流体（上图顶部，蓝色区域）正波及整个储层。相比之下，反演后的DeepLook-EM电阻率图像（*中*）则显示该剖面的电阻率变化较大（绿色到黄色），表明含油。基准数据和反演数据之间的电阻率差异（*下*）表明，在高孔隙度区域，水驱效率是变化的。



^ 井间电阻率剖面。页岩层和蒸汽波及区域的电阻率普遍较低（蓝色阴影）；而未波及含油砂岩的电阻率却相对较高（橙色到红色），中间电阻率（绿色）代表蒸汽和油之间的过渡带。DeepLook-EM探测反映出两井中间有一个突变的边界，其电阻率从枯竭层的2欧姆米变化到未波及层的50欧姆米以上。低电阻率很可能是由地层水和探区左侧一口井中注入的蒸汽驱替原油引起的。

位布置提供指导，从而提高采收率。

注水监测实例

沙特阿拉伯的一个油田多年来一直通过将海水泵入外围注水井来维持储层压力。该油田的注入水以自下而上方式驱替原油。随着时间的推移，注入水往上流动造成部分生产井水淹。由于该碳酸盐岩储层的非均质性，注入水的分布是不均匀的[14]。

作业人员已经采用生产井的含水率测量数据来追踪水驱前缘推进过程，但利用该方法并不能确定井间注入水前缘的形状。在这个大型油田中，利用常规电缆测井获得的电阻率数据表明有两口生产井几乎已经完全水淹。由于井间电阻率分布是个未知数，因此无法确定井间流体饱和度。

注入水主要来自海水或循环利用的地层采出水，这两种注入水的矿化度都在60000 ppm左右。注入水波及区域有时会呈现地层电阻率显著变化的特点，从30－50欧姆米下降到2欧姆米以下，下降幅度主要取决于饱和度与孔隙度。流体密度也产生相应变化，但地震速度变化很小。在深探测电磁剖面上，储层中注入水和原油将出现明显的电阻率差异。井间探测结果也会将地层电阻率与流体饱和度关联起来。

在进行了可行性评估之后，斯伦贝谢在油藏西侧两口相距845米（2772英尺）的生产井之间进行了DeepLook-EM井间探测作业，在100千赫频率下获得了数千个数据点。根据处理后的探测数据，电阻率分布与仅根据之前测井数据插值计算的基准剖面截然不同（左上图）。

尽管常规电阻率测井结果表明近井区域实际上已水淹，但DeepLook-EM探测结果表明井间区域的波及效率是变化的。

蒸汽前缘成像实例

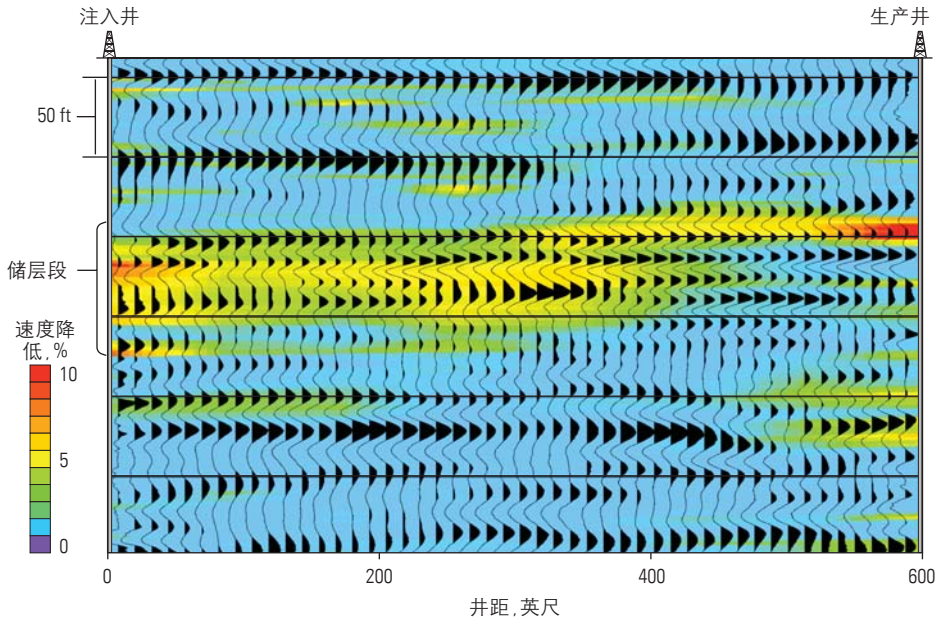
美国加利福尼亚州San Joaquin Valley某稠油油田的作业公司利用蒸汽驱技术提高多个油藏的产量。油藏工

程师应用的是蒸汽吞吐技术，需将油井停产并将蒸汽注入储层。在“浸泡期”需要将油井关闭数天，以便给蒸汽扩散及稀释原油提供时间。随后再开井，开采稀释过的原油。

该作业公司试图更好地了解蒸汽注入后热量在储层中的分布情况。但这一面积大约为20英里^2（52公里^2）的油田构造陡，地质条件复杂，因此，在这种环境下很难确定蒸汽在每口注入井周围的垂向和径向分布情况。

根据斯伦贝谢提出的解决方案，需要就储层电阻率对注蒸汽的响应进行成像。感应测井数据显示在蒸汽被注入储层后，电阻率值通常下降35%–80%。主要影响因素有两个：随着温度的升高，岩石电导率增加、电阻率下降；此外，当高电阻率原油被低电阻率盐水驱替时也会出现上述响应[15]。DeepLook-EM探测对电阻率变化的高敏感度使这种井间技术成为追踪注入蒸汽分布和确定储层波及区域的一个优先选择方案。该作业公司利用井间EM测量可以获得相关储层的构造、温度分布和残余饱和度等信息。

在规划阶段建立了一个用于数据反演的基准模型。该模型采用了该井钻井后、下套管或注蒸汽前利用常规电缆测井仪采集的电阻率测井数据。在确定探测作业可以绘制井间蒸汽波及区域图之后，随即在两口井中部署了DeepLook-EM发射器和接收器。作业人员以20英尺/分钟（6米/分钟）的速度对750英尺（229米）长的层段实施了测井作业，随后将传感器下入到剖面底部，并重新定位接收器阵列。上述程序不断重复，直到完成所有发射器和接收器测点的测量为止，整个作业大约用了12小时。



^ 延时井间地震监测。在某提高原油采收率项目中，井间地震层析成像被用于绘制注入井和生产井之间的混相二氧化碳驱图像。上图显示的是高分辨率井间地震反射资料（黑色记录道）叠加在速率差数据上，后者用不同颜色标记，有助于地质学家追踪注入前所做的基准测量与二氧化碳注入9个月后的一次监测作业之间的地震速度变化。中间区域（黄色和红色）的速度下降程度比周围地层（蓝色和绿色）更明显，表明该区域可能存在二氧化碳聚集。鉴于此，作业人员断定注入井和生产井之间的二氧化碳波及是不均匀的。

测量结果明确显示出了储层中的衰竭区域和未波及区域（前一页，下图）。井间探测数据成为该作业公司确定蒸汽驱效果图的基础，为制定油田开发方案及优化储量评价提供指导。

提高深探测能力

钻完井作业结束后，作业公司必须关注井筒以外区域，尤其是井间区域。但有关井筒数米之外地层的详细信息却非常匮乏，因为必须在探测深度和垂向分辨率之间进行取舍。对于探测深度和垂向分辨率要求，多数探测作业只能满足二者之一。在储层描述过程中作业公司已经习惯了这一问题。直到最近，作业公司还是根据不是很精确的地面地震数据，利用地质统计方法将测井获得的地层特性信息从单井外推到井间区域，来建立大多数油藏模型。

DeepLook-EM井间探测获得的深探测测量数据强化了作业公司对储层模型岩石物理属性的控制能力。井间服务专家正致力于将应用范围扩展到电阻率测量以外的领域。在最近收购Z-Seis公司之后，斯伦贝谢的深探测服务项目中又增加了井间地震测量。在井眼地震监测中，将声源和接收器阵列分别部署在两口井中，所获井间区域图像的清晰度远高于常规地面地震探测的结果（上图）。采用延时技术，这些井间地震探测可以分辨出百分之几的速度变化，从而帮助油藏工程师发现并监测蒸汽、天然气和二氧化碳的流动情况。

深探测测量可以确定储层构造，监测储层中气体的流动情况，从而补充完善了井间EM测量识别和监测流体前缘的能力。通过深探测测量获得的油藏信息可使地质学家和油藏工程师更清楚地了解各种流体的流动及其相互影响，并最终确定现场管理和生产的方向。 –MV

14. Wilt M，Donadille JM，AlRuwaili S，Ma SM 和 Marsala A：“Crosswell Electromagnetic Tomography in Saudi Arabia：From Field Surveys to Resistivity Mapping”，发表在第 70 届 EAGE 大会暨展览会上，罗马，2008 年 6 月 9-12 日。
Marsala AF，Ruwaili S，Ma SM，Ali Z，Buali M，Donadille JM，Crary S 和 Wilt M：“Crosswell Electromagnetic Tomography：From Resistivity Mapping to Interwell Fluid Distribution”，IPTC 12229，发表在国际石油技术大会上，吉隆坡，2008 年 12 月 3-5 日。

15. Wilt 等人，参考文献 3。