随钻地震测量

在协调钻头钻遇结果与地震剖面预测结果间的冲突时，作业公司不得不允许二者间存在误差。一种对司钻友好的新型解决方案可以解决这种不定性问题，并且能够明显改善作业公司计划和钻井的精度。

Pascal Breton
Stephan Crepin
Jean-Christian Perrin
TotalFinaElf 公司
法国波城

Cengiz Esmersoy
Andy Hawthorn
Richard Meehan
William Underhill
美国得克萨斯州 Sugar Land

Bernard Frignet
法国 Montrouge

Jakob Haldorsen
美国康涅狄格州 Ridgefield

Toby Harrold
Sue Raikes
BP 公司
英国 Sunbury

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：荷兰 Rijswijk 壳牌国际勘探与开采公司的 James Clippard ；美国康涅狄格州 Ridgefield 的 Richard Coates；英国剑桥的Nick Drinkwater和Wayne Pennington；得克萨斯州 Sugar Land 的 David Farmer，Marwan Moufarrej，Jim Thompson 和 David White；美国路易斯安那州新奥尔良壳牌公司的 Mohamed Hashem；得克萨斯州休斯敦马拉松石油公司的 Chuck Meeder；得克萨斯州休斯敦的 Joerg Meyer；法国巴黎 TotalFinaElf 公司的 Alan Mitchell；英国 Sunbury BP 公司的Lewis Nelson；以及日本Fuchinobe 的 Les Nutt。

ADN（方位密度中子），ARC（阵列补偿电阻率），ASI（阵列地震成像仪），Bit On Seismic，Drill-Bit Seismic，Drilling Office，IDEAL（综合钻井评价与测井），ISONIC，InterACT，Q-Borehole，SeismicMWD，SWINGS 和 WAVE 等是斯伦贝谢公司的商标。

迟到的信息毫无价值，这是在大多数行业中被证实的道理，包括从空中交通管制到紧急医疗护理，以及出版业务到股票交易等等。勘探与开采（E&P）公司依靠及时、高质量数据识别勘探远景区，优化井位，避免钻井事故，并确定油藏目标。目前，在较为困难的地质背景中发现了许多油藏，其中一些是在十分恶劣的环境中发现的。为了迎接我们行业面临的挑战，服务公司必须密切与作业公司的合作，提出及时、有效的解决方案。

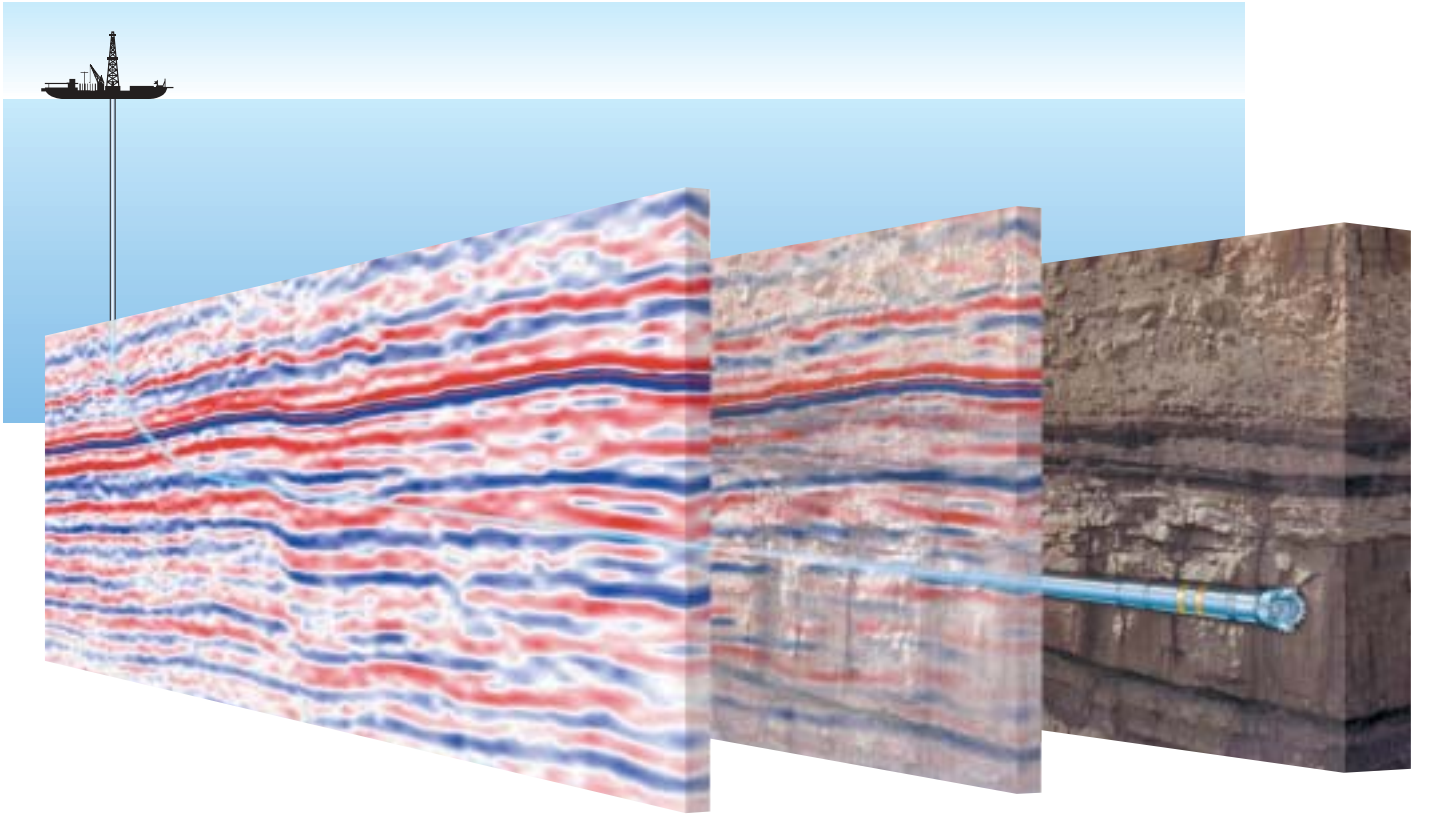
在已经过去的几十年里，地面地震图像已经成为我们行业中最有利和应用最广泛的勘探工具。传统的地震图像以地震走时数据为基础，而走时数据必须转换成深度数据，以便让图像能够适合钻井人员使用，使他们可以根据深度，观察和钻到油藏。如果时深关系简单或时深模型非常详细，那么这种转换可以是准确的。然而，在许多钻井位置上，深度转换存在着大量的不确定因素。

本文将探讨使地震图像能够有效地为钻井服务的最新技术状况，简要评述随钻地震技术及其应用，并介绍一种极具发展前景的新技术。多项研究实例表明了这项技术在世界各地现场试验期间的成功应用。最后，我们将讨论全面发挥这项技术实时特性全部优势所需要的工作流程。

挑战性的时代

如果无法获得井下数据，可以利用地震数据与处理参数导出的速度模型，将时间数据转换成深度数据。然而，在因陡倾和构造复杂等因素使地震速度难以确定的地区，这种方式会产生严重的错误。此外，平均了很大范围地质特征而建立的这种速度模型，也会产生不准确的时深转换结果。

不准确的时深转换会引导出错误的深度预测结果，人们将在这些深度上遇到地层顶面、断层和高压带等地质特征。资产评估组制定的许多建井决策都是以地质情况为基础的，因此，诸如总深度（TD）、套管深度和斜井或水平井轨迹等关键井眼计划参数，可能从一开始就是不准确的。这些不准确的结果可能远不只带来一次麻烦，可能会使人员安全和环境处于危险之中，以及损失一些井。



深度转换误差会将自身表现为指定目标的预测深度与实际深度间的差异，产生的不确定性将加大钻井和建井过程的风险。5%的微小地震速度误差，可能会在预测与实际深度之间造成很大的差异，有时达到数百米。[1]大的误差会使详细的井眼计划复杂化，并减少校正错误井眼轨迹的机会。

掌握预防超压层的时机和调整泥浆性能，可以防止井喷和保护井眼[2]。油气作业公司也需要识别和隔离未封闭的断层，因为它们会成为压力和流体运移通道，在地层周围造成伤害，以及威胁井眼的完整性。许多危害是无法避免的，因此必须在井眼计划和建设期间给予考虑。在深井中，掌握准确的钻井危险发生位置，可以使钻井人员在建井时减少套管柱使用量。增加未预料的套管深度可能会导致套管尺寸短缺，增加成本，导致完井期间出现潜在的复杂因素，以及不能钻达既定目标。

井下地震测量结果可以通过改善地面地震测量结果和生成更准确的速度模型来辅助识别钻井风险，帮助解决这些钻井问题。

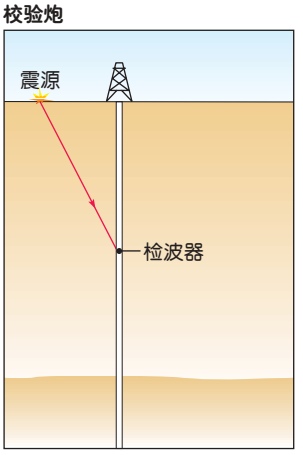
用校验炮记录改善模型

井下地震测量技术的不断发展，主要源自解释员和井眼计划人员对连接地震走时与电缆测井或钻机测定井下深度的需求。在某些情况下，被称为校验炮的一种井下地震处理方法，可以提供准确的时深转换结果。校验炮测量方法在二十世纪40年代已相当普及。

1. Borland W，Codazzi D，Hsu K，Rasmus J，Einchcomb C，Hashem M，Hewett V，Jackson M，Meehan R和Tweedy M：“实时解答钻井及其设计问题”，《油田新技术》，9卷，第2期（1997年夏季刊）：2-15。

2. Bratton T，Edwards S，Fuller J，Murphy L，Goraya S，Harrold Y，Holt J，Lechner J，Nicholson H，Standifird W和Wright B：“避免钻井过程中的问题”，《油田新技术》，13卷，第2期（2001年夏季刊）：32-51。

Aldred W，Plumb D，Bradford I，Cook J，Gholkar V，Cousins L，Minton R，Fuller J，Goraya S和Tucker D：“钻井风险的管理”，《油田新技术》，11卷，第2期（1999年夏季刊）：2-19。



^校验炮测量。利用地面震源和井下检波器，校验炮记录可以向作业者提供重要的时深信息。校验炮测量结果能够记录下单程地震走时或初至波时间，可在井下重要的地震层位使用。

在这项技术中，利用电缆在井下已知深度上部署一个地震检波器，记录第一个直达波的走时，有时称之为初至波，这种波从地面震源向下传播至检波器（*上图*）。时间与深度之间的相关性产生了一个局部速度模型，将时间域地震数据转换为深度数据。通常，需要在井下某个具体地层上方安排几个校验炮点，才能建立一个合适的速度模型[3]。如果地质现象比较简单，速度模型可以有效地覆盖很大区域。然而，由于地震速度随岩性、压力和流体含量的不同而变化，地层中的复杂因素将降低这种局部模型远离井眼时的有效性。

当需要详细的地震图像评估井眼周围的地层分布体时，可以使用电缆控制的垂直地震剖面（VSP）。一些电缆控制的 VSP 方法可以产生噪声极少的高分辨率数据，提供有助于造斜井和分支井钻井的信息（见“垂直地震剖面”，*第 36 页*）。然而，为了采集校验炮或 VSP 数据，钻机必须停钻才能下电缆作业，这样会加大作业风险和成本，并降低作业效率。在许多时候，电缆控制的井下地震方法提供的答案，因迟到而无法帮助司钻。

为司钻提供实时帮助

使用随钻测井（LWD）声波仪，如斯伦贝谢的ISONIC IDEAL随钻声波仪等技术，可以非常有效地实时采集近井声波数据。除了提供有价值的孔隙度信息外，这些技术提供的声波数据经处理后，可以生成合成地震记录，并沿底部钻具组合（BHA）追踪孔隙压力的变化。然而，这些结果并不是地震反射波测量结果，而且只能描述井眼附近的地层，它们可能与所研究的地震体类似，或根本不同。

理想的解决方案是在钻井前获得一个至少象校验炮一样准确的速度模型。这种想法还无法实现，但随钻地震方法可以实时提供高质量的速度信息，帮助制定钻井决策。这些方法利用井眼的优势，在建井过程中采集数据，无需改变或推迟钻井进程。

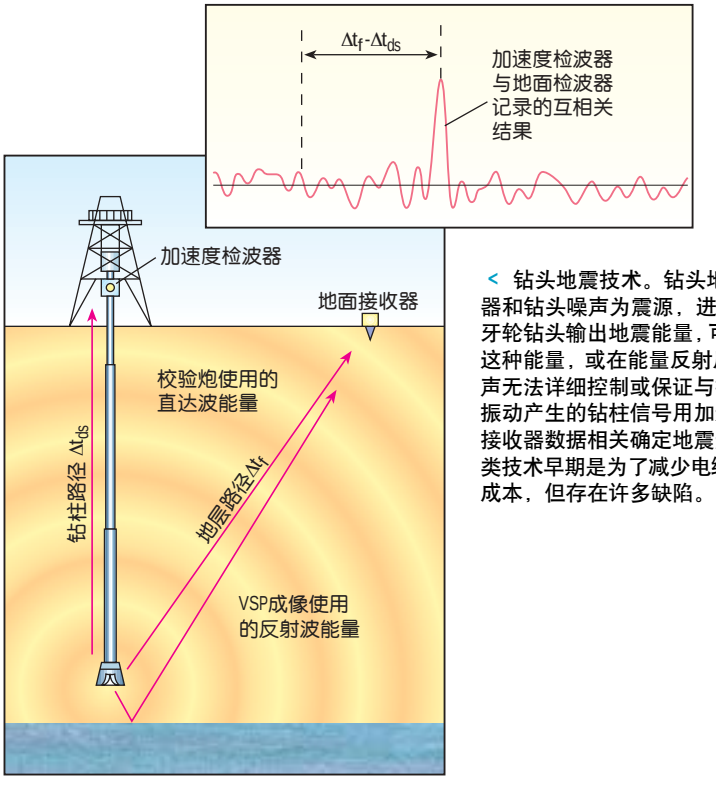
随钻地震方法提供实时时深信息，使作业公司及时修改速度模型，简化了频繁修订目标深度和钻井危险位置的程序，同时在钻头逼近目标时减少不确定性。可以根据观察的地质层位，在地面地震剖面上确定钻头位置，使下套管深度和取心深度选择更加准确。

随着时间的推移，这些随钻地震技术将成为钻井人员信赖的工具。正如其它电缆方法一样，随钻地震的数据质量会不断得到改善，其应用将会适应更广泛的作业环境。

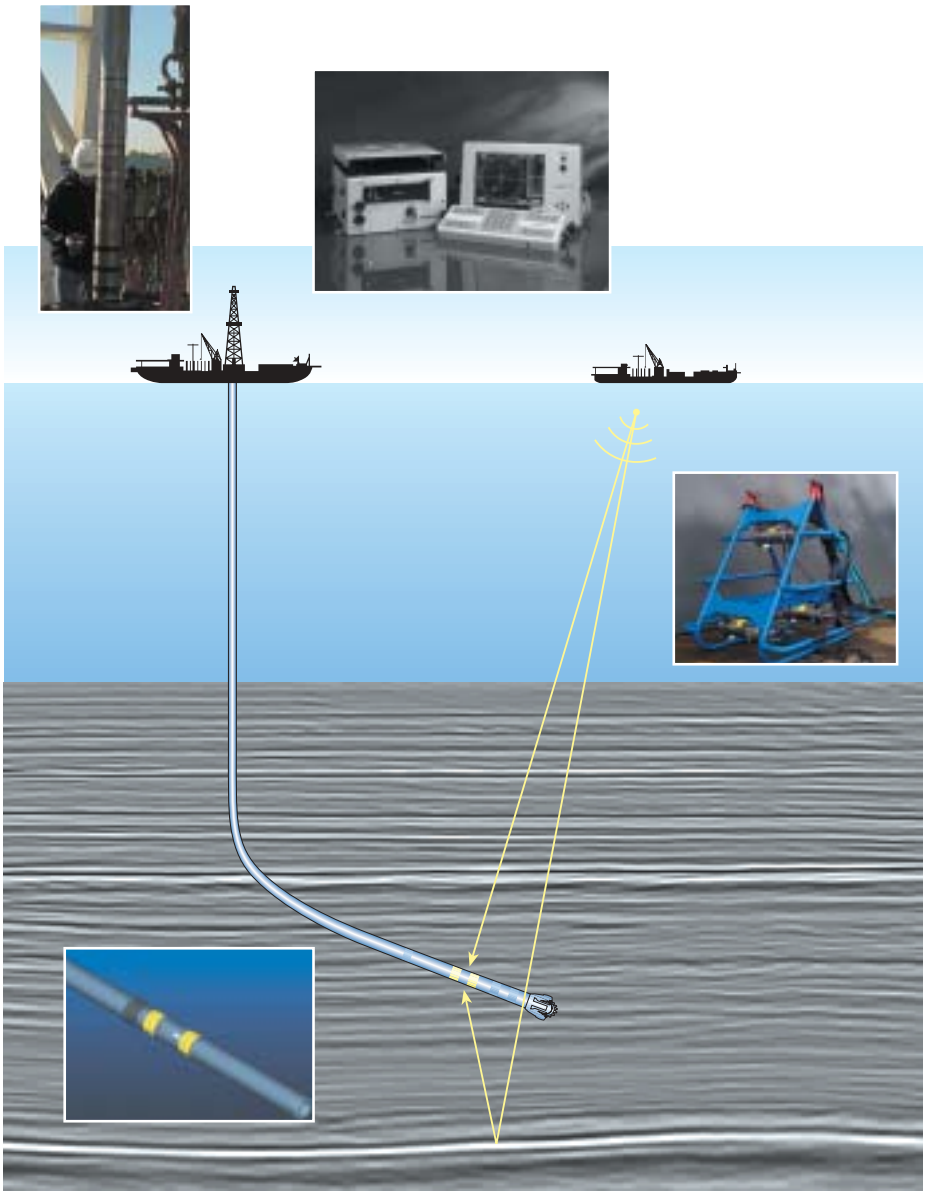
Drill-Bit Seismic（钻头地震）方法

最早的随钻地震测量采用钻头作为井下震源，与电缆控制的VSP排列方式正好相反。斯伦贝谢公司开发的这项钻头地震方法正是以该技术为基础。当牙轮钻头穿越岩层时，它会象偶极震源，将地震能量送入地层，同时安装在钻台旋转台或顶部驱动装置上的加速度检波器，检测到沿钻柱向上传播的轴向振动，这些振动将用于建立钻柱图像（即钻柱部分的地震图像）。这种图像将在以后的处理阶段，用于信号互相关处理。[4]传入地层的能量将产生直接或反射到地面接收器的地震波。地面接收器可以是检波器或是水听器。

虽然钻头是连续不断地向地面接收器输送地震波，但为了提取时深信息，处理专家必须了解钻头生成源信号的时标和特性。1985年Elf公司的一项专利技术论证了记录钻柱振动信号，以及将它们与地面接收器信号相关，以便确定它们的相对时标或钻头与接收器的时差（Δt_f）和钻柱走时（Δt_{ds}）的方式。[5]信号处理器单独确定 Δt_{ds}，并用这种信息计算 Δt_f 或校验炮走时（*下图*）。



< 钻头地震技术。钻头地震技术采用地面接收器和钻头噪声为震源，进行随钻地震数据采集。牙轮钻头输出地震能量，可以直接用接收器测量这种能量，或在能量反射后测量。然而，钻头噪声无法详细控制或保证与接收器同步，因此轴向振动产生的钻柱信号用加速度检波器测量，并与接收器数据相关确定地震走时或校验炮走时。这类技术早期是为了减少电缆测量耗费的钻井时间成本，但存在许多缺陷。



^随钻地震测量。这种新型 SeismicMWD 技术将接收器装在 BHA 上送入井下（*左上和左下插图*），使用三支 250 厘米^3（1.5 英寸^3）空气枪组成的排列作为震源放置在地表（*右插图*），通常部署在船下或钻机下。由于测量需要移动震源，所以需要使用准确的定位系统，例如 SWINGS 系统（*中央上插图*）。震源要在 SeismicMWD 仪器能够采集到直达和反射信号的安静时段激发，在井下自动检测校验炮时间，数据通过 MWD 遥测装置送到井口，波形数据也要在井下记录和储存，以备在 BHA 到达地表时再将数据取出。

钻头地震技术无法普及应用，它只有在使用牙轮钻头在地层产生轴向振动并沿钻杆向上传播时才能有效地工作。聚晶金刚石复合片（PDC）钻头无法向地层传递这么多的能量，因为 PDC 钻头采用切削岩石的工作原理。[6]如果在海上使用钻头地震技术，水深也会成为一个问题。随着水深和海流加大，准确部署接收器排列的工作难度会增加，虽然人们利用特殊设备已经在水深 1200 米（3940 英尺）的地方采集到合适的数据，但加大了作业的复杂性。此外，钻柱与井壁的摩擦对钻柱信号产生了衰减作用，阻止了钻头地震技术在斜度超过 65° 的井中可靠地使用。在非固结地层中，数据质量也会明显受到损失，尤其是在钻压低于 10000 磅（4540 公斤）时。尽管存在这些缺陷，钻头地震技术仍然能够使作业公司用最小的代价优化钻井进程。[7]

LWD 仪器的地震测量

1997 年斯伦贝谢公司开设项目广泛探索观察钻头前端情况的途径。专家们检验了用钻柱上安装的接收器和地表部署的震源方式，实施井下地震测量的可行性。通过与作业公司合作，斯伦贝谢公司的工程师和科学家确认了提供必要信息的最佳途径。1998年建造了一台试验仪器，随后在斯伦贝谢公司的试验井进行了测试，获得了有发展前景的结果。

1999 年 1 月，BP 公司与斯伦贝谢公司合作，开始进行一系列随钻地震测量技术SeismicMWD的试验，并在美国怀俄明州的落基山油田试验中心（RMOTC）成功地测试了该试验仪器。在这些结果的鼓励下，斯伦贝谢公司建造了更多的仪器，并加强了现场测试。在开发这种新仪器期间，斯伦贝谢公司的工程师和科学家通过选择正确的现有技术和开发新的技术，克服了许多技术困难。

这项新技术利用一种 LWD 仪器，这种仪器包含了地震传感器、地表震源和将信息传到地面的随钻测量（MWD）遥测系统。[8]地震能量由常规地表震源产生，如部署在船下或钻机下的空气枪。SeismicMWD仪器被安装在BHA上送入井下，接收震源发射的直达和反射地震能量（*左图*）。

3. Christie P，Dodds K，Ireson D，Johnson L，Rutherford J，Schaffner J 和 Smith N：“Borehole Seismic Data Sharpen the Reservoir Image”，《油田新技术》，7 卷，第 4 期（1995 年冬季刊）：18 – 31。

4. Borland 等，参考文献 1。

5. Staron P，Arens G 和 Gros P：“Method for Instantaneous Acoustic Logging Within a Wellbore”，专利合作协议所属的国际专利申请，编号：WO85/05695（1985 年 5 月 20 日）。

Staron P，Arens G 和 Gros P：“Method for Instantaneous Acoustic Logging Within a Wellbore”，美国专利，编号：4718048（1988 年 1 月 5 日）。

6. Meehan RJ，Nutt L，Dutta N 和 Menzies J：“Drill Bit Seismic: A Drilling Optimization Tool”，IADC/SPE 39312，发表在 IADC/SPE 钻井会议上，美国得克萨斯州达拉斯，1998 年 3 月 3 – 6 日。

7. Kamata M，Underhill W，Meehan R 和 Nutt L：“Drill-Bit Seismic, A Service for Drilling Optimization”，*第38届 SPWLA 测井年会论文集*，美国得克萨斯州休斯敦，1997 年 6 月 15 – 18 日，DD 篇。

Borland 等，参考文献 1。

Meehan 等，参考文献 6。

8. Esmersoy C，Underhill W 和 Hawthorn A：“Seismic Measurement While Drilling：Conventional Borehole Seismic on LWD”，*第 42 届 SPWLA 测井年会论文集*，美国得克萨斯州休斯敦，2001 年 6 月 17 – 20 日，RR 篇。

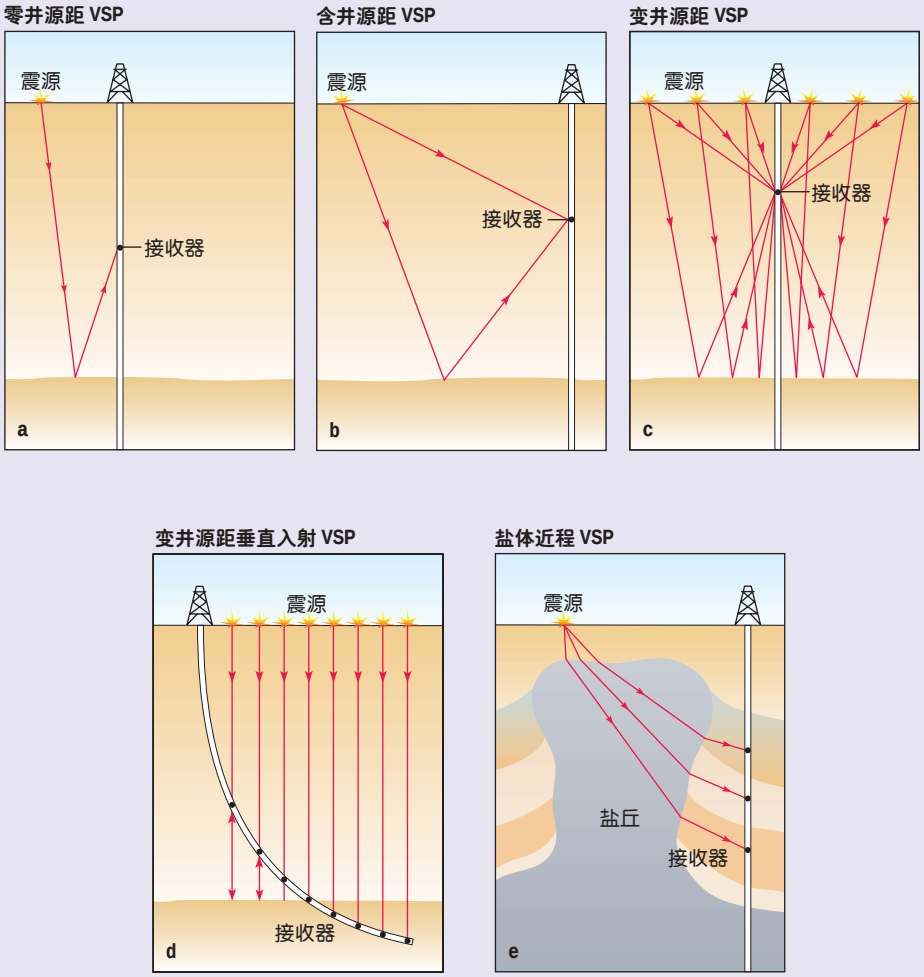
Underhill W，Esmersoy C 和 Hawthorn A：“Demonstrations of Real-time Borehole Seismic from an LWD Tool”，SPE 71365，发表在 SPE 技术年会暨展览会上，美国路易斯安那州新奥尔良，2001 年 9 月 30 日 – 10 月 3 日。

垂直地震剖面

二十世纪50年代引入的电缆垂直地震剖面（VSP），采用与校验炮测量相同的炮检排列，但能够提供更好的地震测量结果，包括地层成像。这种成像方式需要部署更多的接收器位置，并延长信号记录时间，以便获得续至反射波数据。零井源距VSP是第一个引进的电缆VSP技术，采用在直井接收器上方部署震源的方式。虽然只能产生井眼周围区域的成像结果，但VSP图像的分辨率要高于地面地震图像（*右图*）。

此后陆续开发出其它VSP排列方式。电缆含井源距 VSP 需要将震源从井口移开一段距离，因此能够成像更大的地层分布范围。在地面地震图像上，一些重要的地质特征可能会漏失或模糊不清，而VSP的高分辨能力能够让解释员发现断层、精选构造和检测远离井眼的地层边界。离开井眼的成像距离与许多因素有关（包括井眼倾斜和地层倾角），通常横向覆盖范围延伸到或超过井深的 20%。作业公司也采用含井源距 VSP 评估造斜井进入更大油藏区域的可行性，或当原井眼失去它们计划中的目标时，使用含井源距 VSP。

其它电缆 VSP 测量方法包括变井源距 VSP 和变井源距垂直入射 VSP。变井源距 VSP使用一个接收器组合，接收器位置不同但深度固定，而震源位置基本上沿一条直线向远离井眼的方向“等距移动”。这项技术通常能够产生横向覆盖范围约为井深20% – 25% 的地震图像。[1]综合这些多井源距或变井源距VSP结果，可以将这些高分辨率地震图像组成三维结构。



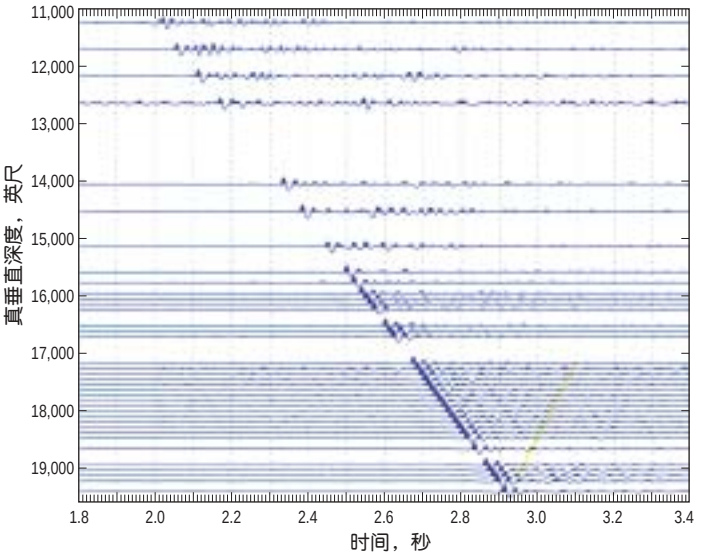
^ 5种垂直地震剖面（VSP）排列方式。零井源距VSP测量（a）可以在井下规定的记录道分布空间内和较长的时间范围内记录地震信号。延长记录时间可以捕捉反射波地震信号，经处理后产生地震剖面图。VSP可以对井眼总深度以下地层进行成像。为了扩大研究的地层分布区域，含井源距VSP测量（b）采用井下接收器和在远离井眼的位置上部署地表震源方式，研究远离井眼的反射界面，可以向作业公司提供附近断层和地层尖灭的高分辨率地震图像。这项技术通常用于造斜井设计。多井源距VSP测量可以从井眼沿不同方向进行，使这项技术能够产生三维空间的结果。变井源距VSP技术（c）使用线性排列的多个地表震源位置，通常达到数百个，以及5-7个位置固定的井下接收器，本图仅显示一个接收器。这些增加的震源位置，可以进一步扩大地下VSP成像的区域。使用这项技术获得的图像横向覆盖距离可以达到井深的50%。在变井源距垂直入射VSP方法（d）中，地表震源直接部署在斜井中井下接收器的垂直上方，这项技术不同于其它技术，当成像井眼下方地震反射层时，震源和接收器要一起移动。盐体近程测量（e）使用部署在盐丘正上方的震源和靠近盐丘的井眼内不同位置上的接收器采集数据，数据处理时需要了解测量中震源和接收器的确切位置、盐体与周围地层的速度和地表至盐丘顶面的距离。这种测量方式可以产生盐丘剖面，向作业者提供井眼到盐丘的距离和盐丘形状特征。

为了获得斜井或水平井周围的井下地震图像，人们使用了一种变井源距垂直入射VSP，亦称垂直入射VSP（VIVSP）。在这种电缆测量技术中，震源垂直部署在井下接收器正上方，并随接收器一起移动到每个新的位置上。利用这种变井源距垂直入射VSP，作业者可以测量横向速度变化，对井眼下方进行成像，以便确定和更准确地描述断层与构造。使用变井源距垂直入射VSP技术，要求在测量过程中一直掌握井眼和震源位置的具体情况，为此可以采用详细的井眼定向数据和类似斯伦贝谢SWINGS地震导航与定位系统一样的震源导航设备。

更为特殊的VSP测量是盐体近程测量，这种测量将震源部署在盐丘的正上方，接收器部署在靠近盐丘的井眼内不同的位置上，记录地震走时，并与其它需要的信息综合在一起，如震源与接收器的确切位置、盐体与周围地层的速度和地表至盐丘顶面的距离等。经数据处理后，获得盐丘剖面结构，可以使作业者确定井眼到盐体的横向距离，也可以提供关于盐丘形状方面的信息，帮助沿盐体侧翼寻找油气圈闭。[2]

1. Meehan R，Miller D，Haldorsen J，Kamata M和Underhill B：“Rekindling Interest in Seismic While Drilling”，《油田新技术》，5卷，第1期（1993年1月）：4－13。

2. Christie等，正文中参考文献3。



^在墨西哥湾第二口现场试验井获得的SeismicMWD叠加数据。波形显示结果显示出清晰的初至波，并表明随着井深加大它们滞后到达的方式。这些数据是在一口近似垂直井中成功采集的，而且还在套管井段使用了水听器。这些数据还在18500英尺（5640米）深度显示出上行的反射波至，发现它们随着井深加大而减弱。

在钻柱上进行这种测量存在着各种各样的复杂因素。钻井在井下和周围岩石中产生噪声，会降低数据质量，导致数据不能有效使用。因此，震源激发和地震信号测量必须安排在钻井暂停以进行其它作业等相对安静的时间内进行。安排数据采集比较理想的时间是钻杆连接期间，同时要停止泥浆循环且稳定钻杆。由斯伦贝谢公司几项专利技术构成的工艺确认，震源可以在10－15秒间隔内激发，通常2.5分钟可以激发10炮。这样的时间段比钻机正常的钻杆连接时间要短，所以SeismicMWD方法不会干扰钻井作业。钻井过程中失去的各种信息，可以在两次钻头工作间的下管柱或起管柱时采集。作业者可以借助时间上的便利，采集额外的SeismicMWD数据，以便加强测量的质量，但在起下管柱期间采集的数据不能在制定实时钻井决策中使用。

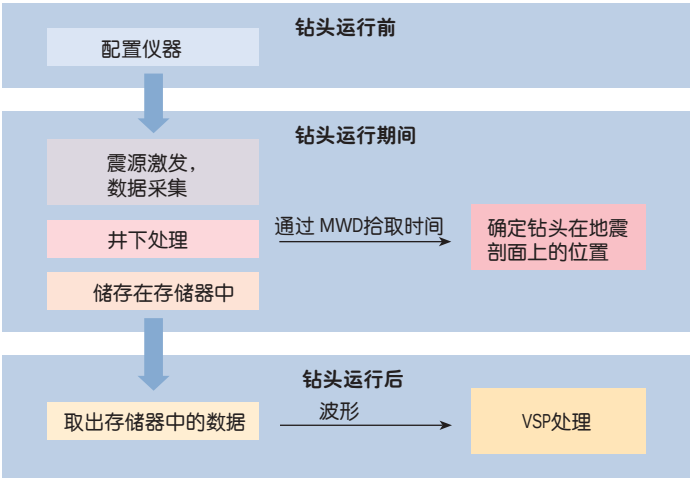
与使用机械或磁力方式将检波器推靠在井壁或套管上加强数据质量的井下地震方法不同，SeismicMWD仪中使用的接收器是钻柱的组成部分，所以与地层的耦合取决于井斜程度，而且不太容易预定。在斜井中，由于管子沿井筒底面放置，所以安装在钻铤上的小型加固式检波器可以保证良好的数据质量，但在直井和套管井中与地层的耦合就相当困难了。因此，在这种仪器中还测试了不需与井筒耦合的水听器，帮助确保测量的顺利进行，它们不会影响耦合地层检波器的质量。

在墨西哥湾外陆架为马拉松石油公司进行的一次早期现场试验中，水听器在一口近似垂直井眼的裸眼和套管井段上给出了一致的结果（*上图*）。这些数据的大部分是在该井起管柱时获得的，震源激发安排在钻杆连接期间，因此没有干扰钻井作业。在这次早期的测试期间，记录的数据没有传递到井口，在仪器到达地面后，从仪器储存器中下载数据，因此在没有象电缆VSP或校验炮那样占用钻机时间的情况下，提供了有价值的时深信息。

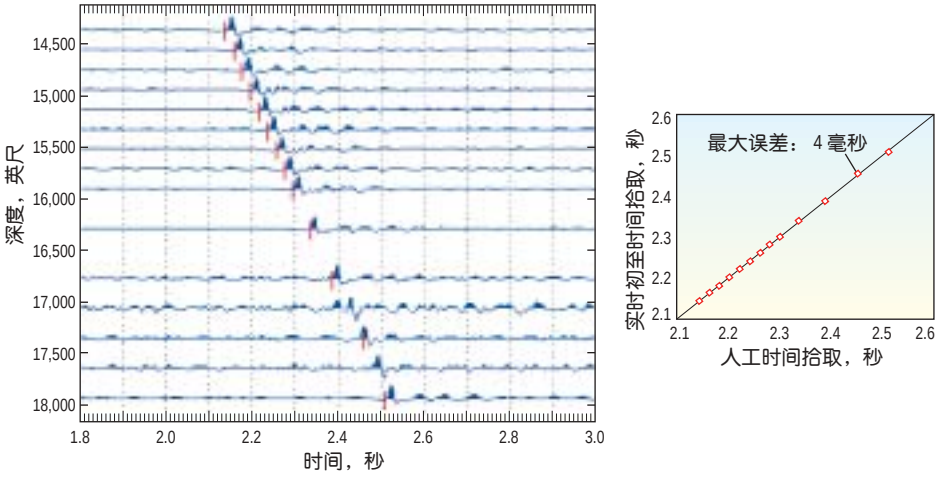
在一次计划周密的同步采集过程中，利用SeismicMWD仪在井下接收了地震信号，这些信号在井下进行了处理，以便确定重要的初至时间或校验炮时间，随后通过泥浆脉冲遥测系统，将这种信息实时传递到IDEAL综合钻井评价与测井系统。[9] 现有的泥浆脉冲遥测系统不具备将波形数据传递到井口所需要的数据传输速率，但最新的技术进步将在不久的近来使基本波形数据能够在数据采集后不久传递到井口。

2000年下半年集中对SeismicMWD服务中的实时部分进行了现场测试。将实时信息成功地传递给钻井人员，取决于良好的数据采集、储存、处理和传递设计（下图）。

为了准备数据采集，安装在BHA上的SeismicMWD仪要在运行前，用有关记录计划和采集参数的信息进行配置。将对包括下管柱或静止状态、时间和炮点数量允许偏差在内的数据记录计划进行处理。在寂静的时段里，将记录下直接来自震源和成像地层反射的地震信号，这些信号将储存在仪器的存储器里以备后期处理。数据采集后马上通过井下处理确定校验炮时间，仪器将信息在泥浆脉冲遥测系统恢复工作时传递到井口。在地面，将利用这种实时时深关系信息，确定钻头在地面地震图像上的位置，以便制定钻井决策。当钻柱起出井筒后，从仪器储存器内下载波形数据，并送到处理中心进行VSP图像处理。



^ SeismicMWD 测量的常规操作流程。该流程可以分为三个部分：钻头运行前、运行期间和运行后。安装在BHA上的仪器在下井工作前进行配置，记录计划等信息将作为时间和采集参数的函数输入仪器。在钻头运行期间以及钻井过程中，进行波形采集与存储、井下处理和校验炮数据的上井传输。这种时深信息可以用于在地面地震图像上实时确定钻头位置，而钻井作业不会受到影响。当钻柱从井筒起出后，下载仪器存储器中的数据进行 VSP 处理。



^ 校验炮时间的井下拾取结果。初至波至上的垂直标记（红色）表明，利用斯伦贝谢公司开发的新型算法进行井下处理取得初步成功（左）。这些走时数据被传输到地面，与波形数据人工拾取结果的比较令人满意，其中波形数据是仪器到达地面后从存储器中下载的（右）。

2000年9月，一台样机仪器在墨西哥湾为壳牌勘探与开采公司的几口井进行了作业。在井下采集了检波器和水听器两种数据。地表震源通过吊索部署在钻机上，包括三支150英寸^3（2.5升）、填充压力达到2000 psi（13.8 MPa）的空气枪。震源激发和数据采集在相对寂静的时间里进行，以便使钻井作业能够不受干扰地继续进行。这些数据将结合其它LWD测量结果，通过泥浆脉冲遥测系统，一起传递到地面，这是首次在LWD仪器上记录和恢复实时校验炮数据。

现场试验的另一部分是帮助测试在井下自动、准确地拾取单程地震走时的算法。到样机试验阶段结束时，这种自动时间拾取算法获得有效实时校验炮拾取结果的成功率达到90%。自动校验炮分析结果与人工时间拾取结果比较，两者差距很小，在井位决策要求的精度范围内（左下图）。

必须解决地表震源与SeismicMWD仪之间的通讯问题，才能获得正确的波至时标或保证同步。与其它电缆作业不同，在这种井下仪器与地表震源设备之间没有直接的电子通讯，斯伦贝谢公司的科学家通过开发新技术解决了这一难题，使SeismicMWD仪作业期间井上与井下波至的同步精度达到几个毫秒。墨西哥湾试验操作和技术上的成功证实了这项技术的能力，同时由于能够在不影响高成本作业的情况下提供所需数据，也说明了这项技术在深水环境作业中的价值。2000年在SeismicMWD现场试验期间，共对8口墨西哥湾井进行了测量。2001年现场试验扩展到其它区域，在不同的作业环境中对另外6口井进行了测量。在陆续进行的现场试验期间，使用了三种不同规格（$6^3/_4$英寸、$8^1/_4$英寸和9英寸）的SeismicMWD仪。

里海地区的钻井危险

在里海南部，复杂的地质构造给BP公司钻井队带来了很大的困难。在一个实例中，目标是安全钻出一口探井，以便评价上新统Fasila组地层。这个陡倾构造周围大量的断层及构造顶部的高孔隙压力带，促使BP公司考虑使用新技术。该公司决定在构造外位置钻井，定向钻进Fasila油藏，以便避开危险的超压带和绕过分布复杂的断层（*右图*）。

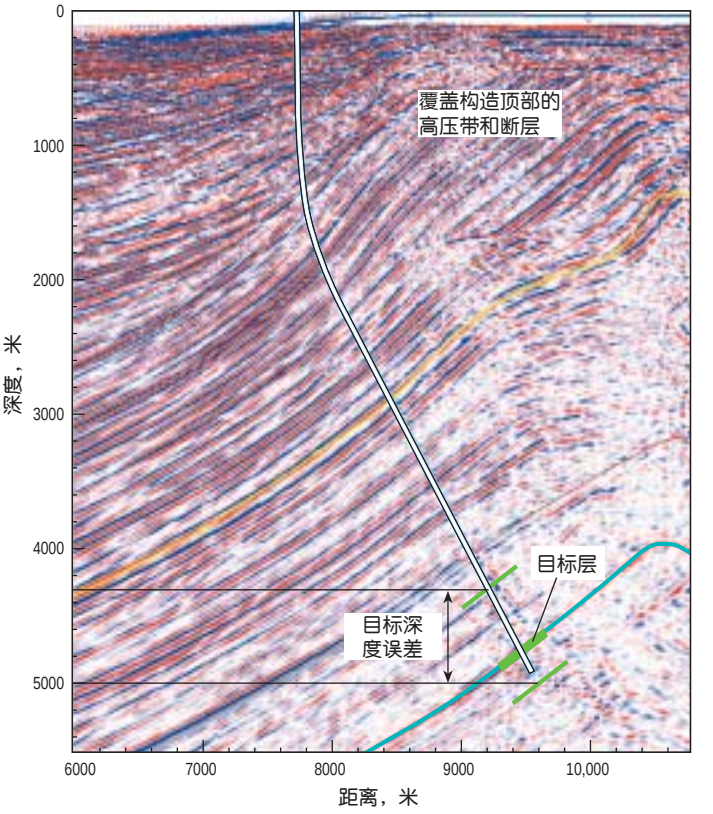
这套钻井措施需要详细了解地质情况。由于构造的复杂性，地面地震图像显示的钻井危险大部分模糊不清，实际上，在多数关键位置上几乎没有可以识别的反射层。更糟的是，储层顶面地震拾取结果的垂直深度误差达到700米（2300英尺）。该地区的地层过于松软，不适合使用钻头地震方法。为此，BP公司和斯伦贝谢公司决定部署SeismicMWD测量解决这些问题，作为优化钻井（NDS）措施的部分内容。[10]

在没有基础井眼轨迹校正情况下，避开钻井危险取决于在地震剖面上准确确定实时钻头位置。BP公司和斯伦贝谢公司通过实施变井源距垂直入射SeismicMWD测量实现了这一设想，这是首次尝试。

安装在船上的震源，利用SWINGS地震导航和定位系统，垂直定位在井下LWD接收器正上方（*右图*）。数据采集在钻杆连接期间和井筒起、放钻柱时进行。实时校验炮信息用泥浆脉冲遥测系统送到井口，由斯伦贝谢公司的工程师检查质量，然后传给作业地球物理家和陆上信号处理器。全波形数据和时深数据在钻头起出后从SeismicMWD仪上下载，用于变井源距垂直入射VSP图像处理，以及确认实时结果。

9. Bonner S，Clark B，Holenka J，Voisin B，Dusang J，Hansen R，White J和Walsgrove T：“Logging While Drilling：A Three-Year Perspective”，《油田新技术》，4卷，第3期(1992年7月)：4-21。

10. Bratton等，参考文献2。



^ 存在危险和不确定因素的钻井作业。BP公司在里海南部测试Fasila组地层的一口井中，必须避开复杂构造顶部分布的危险。这里存在着十分明显的深度不确定因素，由于周围地层地震速度场复杂，在目标层有700米（2300英尺）的误差。钻井计划以通过速度模型进行时深转换的地面地震信息为基础制定，不可能考虑到这些复杂因素。

^ 在里海南部SeismicMWD测量期间，从震源船上拍摄的图片，前边的吊车在工作船上部署空气枪震源，背景上可以看到钻机。

实时校验炮数据产生的时深转换结果与早期地震时深关系预测结果相吻合，这种关系保留至3500米（11500英尺）真垂直深度（TVD），但在该深度之下，预测与观察钻头位置间出现明显的差异，并在目标深度上出现很大的深度误差。SeismicMWD技术使BP公司能够在继续钻井的同时，在地震图像上确定钻头位置，而且能够明显减小在复杂构造地区钻井时出现的误差。

在不影响钻井进程的情况下，采集全部65级轴向分量数据（平行井眼轨迹移动），这一过程以每天400米（1310英尺）的有效速度无障碍连续进行。[11]更为关键的是，钻井作业以日钻机成本8.4万美元平稳进行，SeismicMWD作业排除了需要运行电缆测量的时间，节省了约12小时钻机时间。

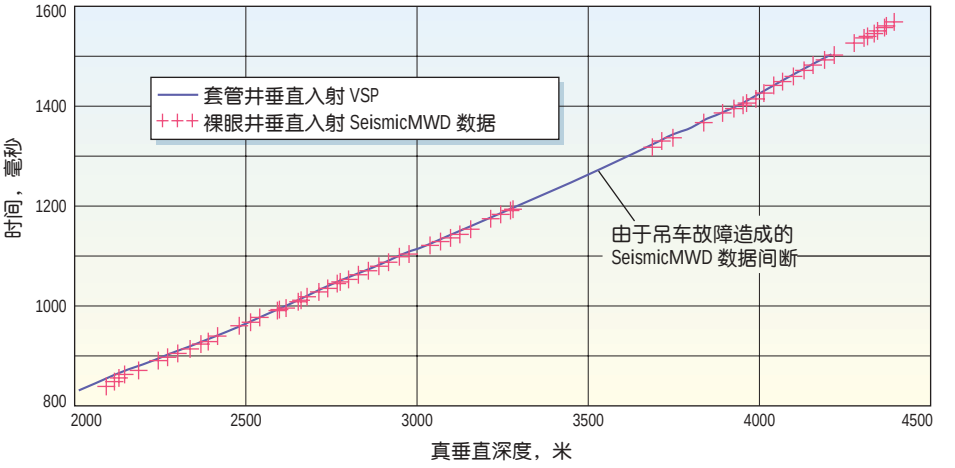
自动井下初至波检测系统运行良好，实时校验炮走时与仪器储存器下载数据的人工拾取结果仅1毫秒的偏差。可惜，震源船上吊车的一次临时故障妨碍了中间几级的数据采集。尽管如此，实时校验炮信息还是使深度误差从700米降至10米（33英尺），实现了复杂钻井情况的有效管理，并确保钻井顺利进行。

使用相同震源进行的一次电缆VSP测量与该井下套管后用斯伦贝谢公司的ASI阵列地震成像仪的层段重叠。高质量的三分量电缆VSP数据为验证SeismicMWD数据质量提供了良好的标准。[12]这种LWD实时校验炮结果与ASI仪结果相吻合（*右上图*）。[13]

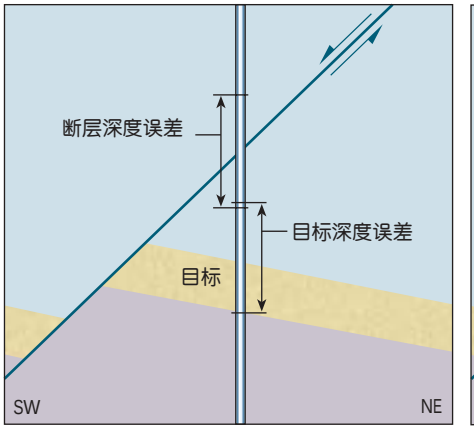
斯伦贝谢公司、BP公司和美国剑桥麻省理工学院（MIT）的专家，利用电缆测井数据评估LWD数据集的质量，并确定了将SeismicMWD应用从单纯的校验炮扩大到成像钻头前及周围地层的潜力。在现场试验的这个阶段，试验仪器装备了低通滤波器，尽管产生的图像分辨率低于多分量ASI仪产生的图像，但SeismicMWD图像的质量高于地面地震图像。[14]此外，这个专家组确认，使用SeismicMWD仪进行多分量记录，具有改善图像质量的潜力，而且还允许利用转换横波数据减少各种假象。关于多分量数据改善图像质量和分辨率的计划，已经在最新的一项研究实例中得以实现。（参见“多分量与多道—西非海上实例”，*第41页*）。

减少巴西作业的风险

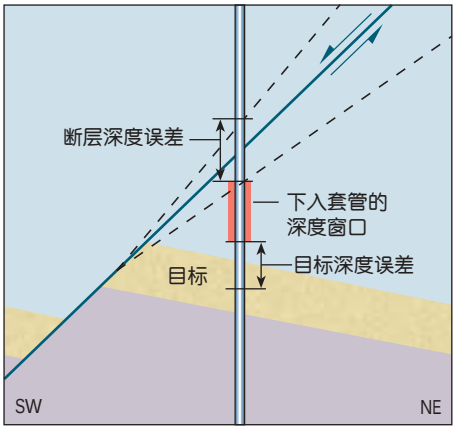
BP公司在巴西海岸钻B-2垂直探井的计划，也需要一次大范围的作业复杂因素检测。首先，地震速度场分布情况不清，该速度模型用附近B-1井—相距50公里（30英里）—校验炮数据建立，产生的深度误差为10%。其次，为了确保B-2探井垂直，该井将在一条未封闭的主断层下方穿过最上面的主要储层目标，钻井人员计划在断层至储层间下入$13^5/_8$英寸套管，防止储层漏失和钻井液进入断层。



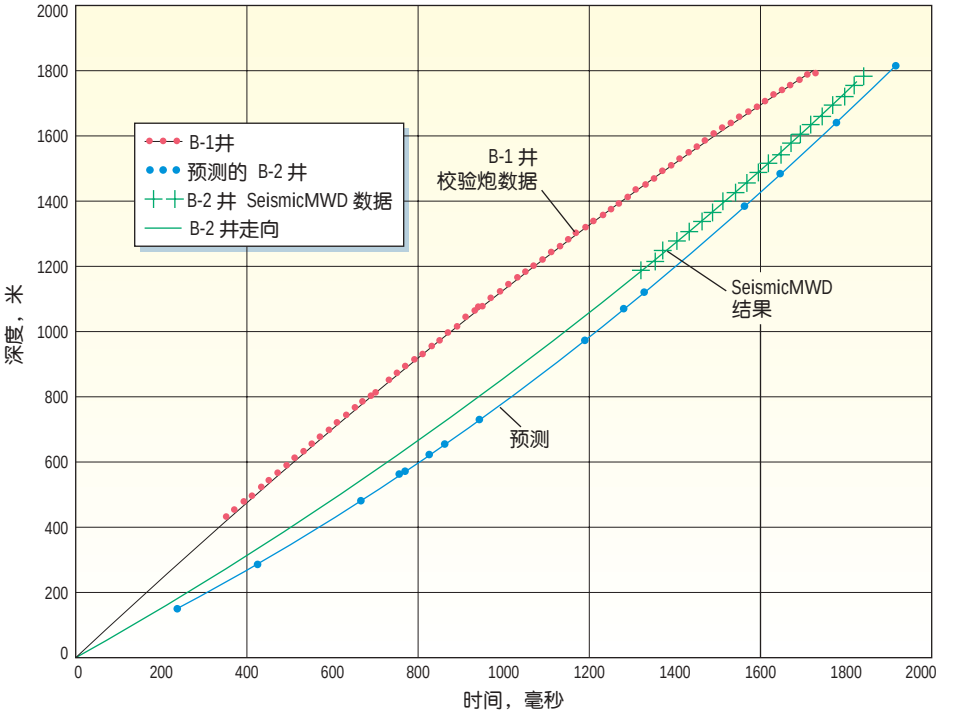
^比较SeismicMWD和电缆VSP数据的时间与深度交会图。SeismicMWD校验炮数据与电缆数据相吻合，两者间平均3毫秒的误差换算成10米的深度差异。使用SeismicMWD仪，在Fasila目标上的误差为10米，而使用地面地震图像产生的误差达到700米。



^由于深度误差导致在巴西井下关键的下套管点选择混乱。未封闭断层和储层目标顶面存在10%的误差，因断层接近储层而导致表示两个误差标志重叠。根据获得的这些信息，很难确定在何处下入$13^5/_8$英寸套管。



^用SeismicMWD信息可以将误差降低到可以控制的程度。随着SeismicMWD数据的采集，关于断层和储层顶面深度的误差明显降至1%，结果清楚地表明，在该深度窗口内可以下入$13^5/_8$英寸套管，从而使巴西这口井的钻井获得成功。



^比较不同数据建立的时深模型。早期的 B-1 井拥有校验炮信息，是最靠近 B-2 井的井眼，它的校验炮数据显示出与预测结果完全不同的时深关系。SeismicMWD信息产生的时深信息证实了预测的趋势，但显示出相当于 80 米（260 英尺）深度误差的偏差。这似乎表明，在未封闭断层上方安置 $13^5/_8$ 英寸套管，将对以后 B-2 井的钻井作业产生不利影响。

解决这个断层问题的关键，是准确下入 $13^5/_8$ 英寸套管。由于断层接近目标，这一位置受到限制。目标和断层深度上10%的深度误差范围相互重叠，所以准确下入套管的要求(即位于断层与上部目标之间)可能无法保证（*前一页，左下图*）。在钻前计划期间，BP 公司曾考虑中断钻井，在浅层进行一次电缆 VSP 测量，但即使获得了额外的数据，深度误差仍不能令人接受。因此，需要实施实时解决方案，以便在地面地震图像上更准确地追踪井眼进程，所以 BP 公司选择了 SeismicMWD 技术。

SeismicMWD仪产生的实时校验炮数据将深度误差降至1%（*前一页，右下图*）。结果 $13^5/_8$ 英寸套管被准确地下入在断层与储层目标之间。

B-1 井校验炮数据导出的时深关系明显不同于地面地震预测结果推导的钻前估算结果，以及该探井遇到的结果（*上图*），遇到的目标比用原始时深关系预测的结果深了80米（260英尺），这似乎表明，如果建井遵循原计划，$13^5/_8$ 英寸套管应该下入在断层上方。

最初 BP 公司选择 SeismicMWD 技术，是为了减少这种复杂勘探情况中出现的作业风险，后来这项技术还提供了其它好处。由于至少避免了两次电缆 VSP 测量，所以明显削减了作业成本，以及减少了到达总深度需要的总钻机时间。这项新技术还向地学组专家提供了有价值的速度信息，以便在该地区计划未来的作业前改善他们的速度模型。

多分量与多道—西非海上实例

上述实例说明了实时地震信息如何给因复杂构造产生疑问导致地面地震图像模糊地区的钻井过程带来效益。也有一些地层复杂的油田使用这种新型 SeismicMWD 技术可以产生相同的效益，但要建立随钻钻头前图像，还需要多分量地震数据。

11. Harrold T，Poole A，Nelson L，Hawthorn A 和 Underhill W：“Seismic Measurement While Drilling in Azerbaijan and Brazil”，SPE/IADC 74539，发表在SPE/IADC钻井会议上，美国得克萨斯州达拉斯，2002 年 2 月 26 – 28 日。
12. 记录三分量地震信号给出了关于来自井眼和震源位置定义的平面以外地震波的信息，并帮助确认纵、横波来加强成像效果。水听器记录井下液体中的压力变化，通常不用于电缆井下地震仪。
13. 在比较电缆VSP数据与SeismicMWD数据时，注意到失去的记录道在数据中产生了间隙。
14. Haldorsen J，Krasovec M，Raikes S，Harrold T，Day DN 和 Clippard JD：“Comparison of Full Waveform SeismicMWD and Conventional VSP Data from the South Caspian”，论文编号：Z-99，准备发表在第 64 届 EAGE 年会暨展览会上，意大利佛罗伦萨，2002 年 5 月 27 – 30 日。

非洲西海岸的深海钻井活动集中在第三纪时代的浊积砂岩储层，当大量沉积从非洲克拉通进入安哥拉边界时，这些砂岩沉积在一系列蜿蜒的深水河道中。[15] 现代三维地面地震技术通常可以帮助确定简单的第三纪河道（下图）。[16]

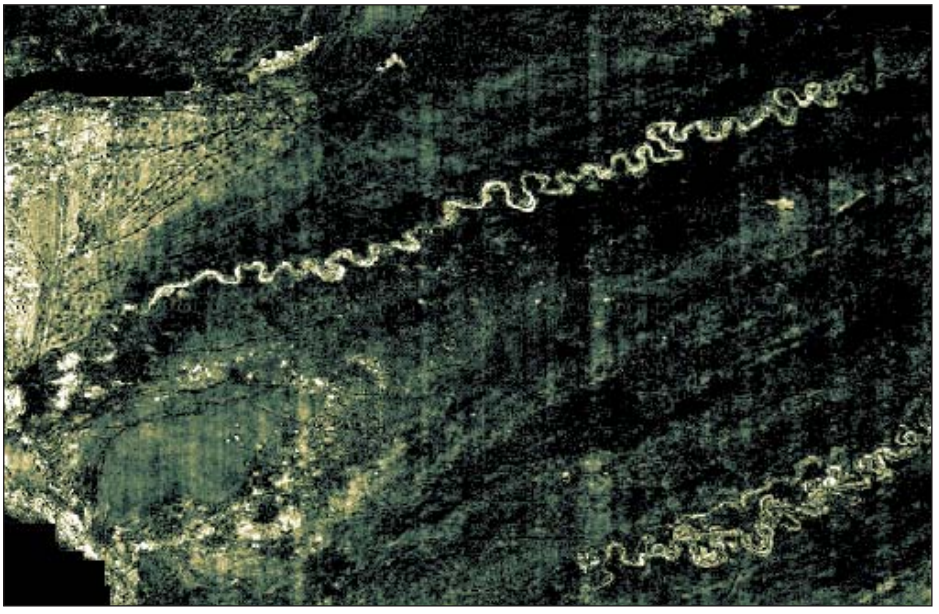
然而，在河道系统变得复杂时，地学专家用地震成像方法确定储层的能力下降。例如，厚度达到 60 – 80 米（200 – 260英尺）的堆积河道通常非常复杂，大部分地震成像技术难以分辨（下中图）。

了解地层能力的下降妨碍了钻井人员的工作，他们需要准确确定钻头在储层中的位置。瞄准堆积河道储层的井通常需要大斜度轨迹，以便尽可能多地连接单个砂岩体。包括变井源距垂直入射和变井源距 VSP 等在内的电缆井下地震技术，经常用于描述这些复杂储层和改善造斜井设计。通常，电缆测量是在中途测试工作期间或钻井结束时进行，因此它们无法提供用于随钻地质导向的实时信息。

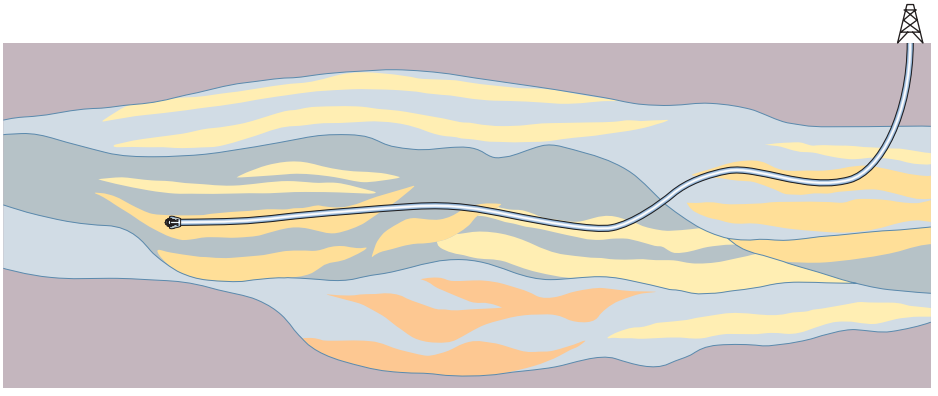
在非洲西海岸，深水建井成本超过 2000 万美元 / 井，而使生产井达到经济有效的最低产量现在为 10000 桶 / 日（1590 米^3/ 日）。TotalFinaElf（TFE）公司正在探索通过连接大量生产油藏方式降低成本、减少风险和提高产量的替代方法。在这种区域内，速度场的横向变化可以导致钻井从确认的油藏目标上方或下方越过，加大水平生产井钻井的风险。通过对时深关系的实时了解，调整这些变化，可以减少风险。为此，TFE 公司决定检验SeismicMWD仪在这些复杂浊积河道层序中加强水平生产井定位精度的潜力。

2001 年 TFE 公司根据地质试验井计划了一口造斜井。在试验井中进行的电缆VSP测量，帮助确定了在造斜井设计中使用的目标的确切位置。由于造斜井接近地质试验井，为 TFE 公司检验 SeismicMWD 仪提供了理想的机会。

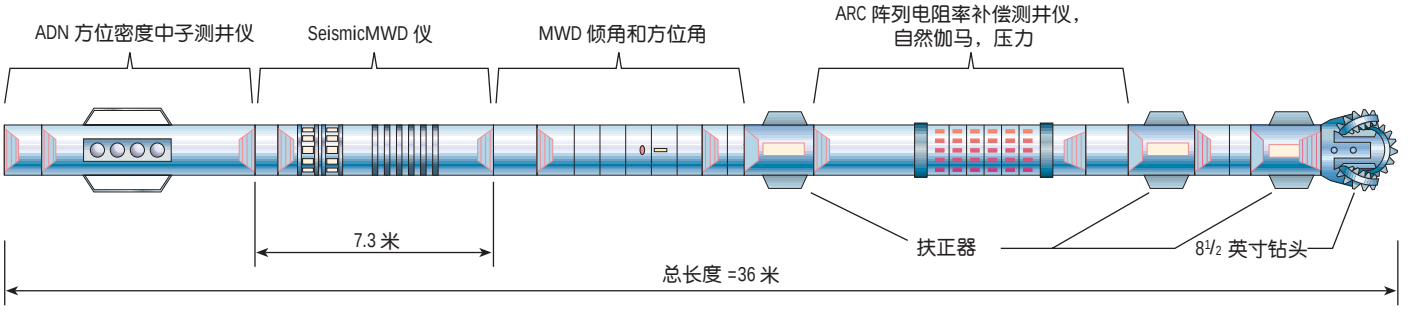
TFE 公司和斯伦贝谢公司联合在安哥拉深水环境—1350 米（4430 英尺）水深中进行了SeismicMWD技术的现场试验。试验性多分量 SeismicMWD 仪与



^非洲西海岸深海第三纪河道在现代地震属性成图技术产生的平面图上的显示。今天的高分辨率三维地面地震数据可以追踪单个浊积岩河道，但复杂的堆积河道系统仍然是风险较大的钻井目标。



^显示复杂的堆积河道层序的截面示意图。为了能够用水平生产井接触到更长的储层并减少造斜的次数，需要清楚地了解这些复杂层序。



^底部钻具组合。包括ADN方位密度中子测井仪和ARC阵列电阻率补偿测井仪等其它LWD仪器与SeismicMWD仪组装在一起。

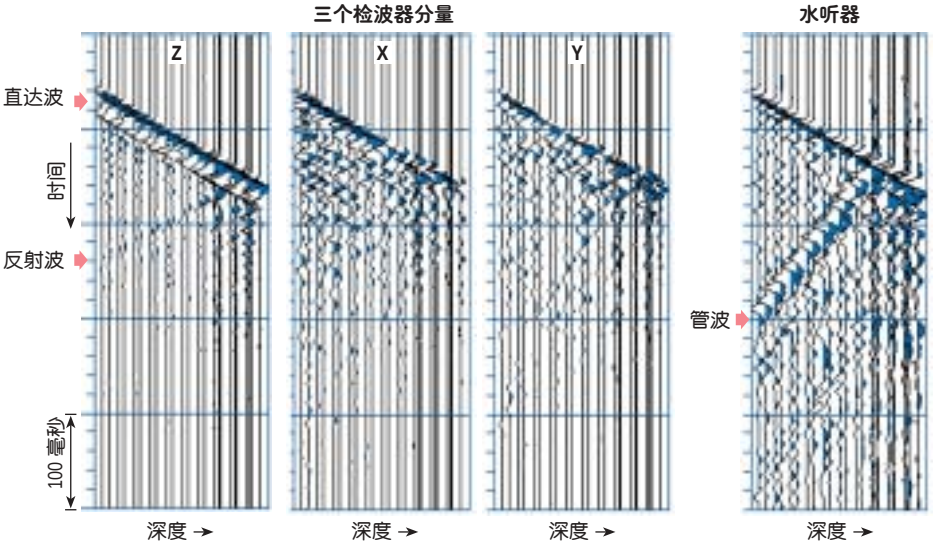
ADN方位密度中子测井仪、ARC阵列电阻率补偿测井仪和MWD传感器一起安装在BHA上进行试验（*前一页，下图*）。这种试验性仪器的主要特点是强调四分量（4C）技术，它由三个正交的检波器和一个水听器组成。由于这项工作是首次用SeismicMWD仪采集4C数据，所以试验中增加了一些评估这项技术实用性的目标（*右图*）。

为了评估数据质量，用造斜井的SeismicMWD数据与早期在试验井采集的电缆VSP数据进行了比较。SeismicMWD测量期间还进行了减小采集道间距的测试，而且SeismicMWD测量不仅在钻杆连接时形成的安静时间内记录，而且每半站间隔—14米（45英尺）都进行了记录。增加记录道密度可以改善SeismicMWD图像的质量和分辨率。在钻杆连接时进行记录不会对钻井作业产生影响，而半站间隔进行的记录每道仅耗时8分钟。认为电缆与SeismicMWD测量结果有可比性的因素有：造斜井接近原始井、两次测量研究相同的地层分布体和两个数据集由相同的震源采用相同的方式采集—变井源距垂直入射方式。不过，电缆VSP测量采用10米高道密度激发，因而提高了电缆VSP图像的分辨率。

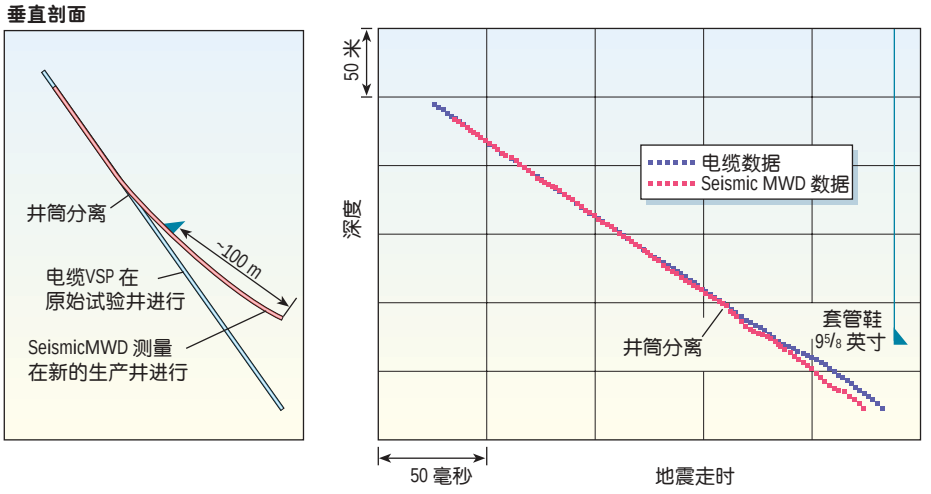
随后从SeismicMWD仪上下载的记录地震走时数据与电缆数据吻合良好，唯一明显的偏差与两井眼位置的差异有关—造斜井的位置高于原始井位置—突出了这项技术在提供时深关系数据与钻头在地震剖面上的位置等应用中的作用（*右中图*）。此外，SeismicMWD仪产生的检波器与水听器数据，提供了有效的时深关系（*右图*），而在该仪器下井使用前，因初始误差没有获得实时走时数据。

15. Kolla V，Bourges P，Urruty J-M和Safa P：“Evolution of Deep-Water Tertiary Sinuous Channels Offshore Angola（West Africa）and Implications for Reservoir Architecture”，*AAPG Bulletin*，85卷，第8期（2001年8月）：1373 – 1405。

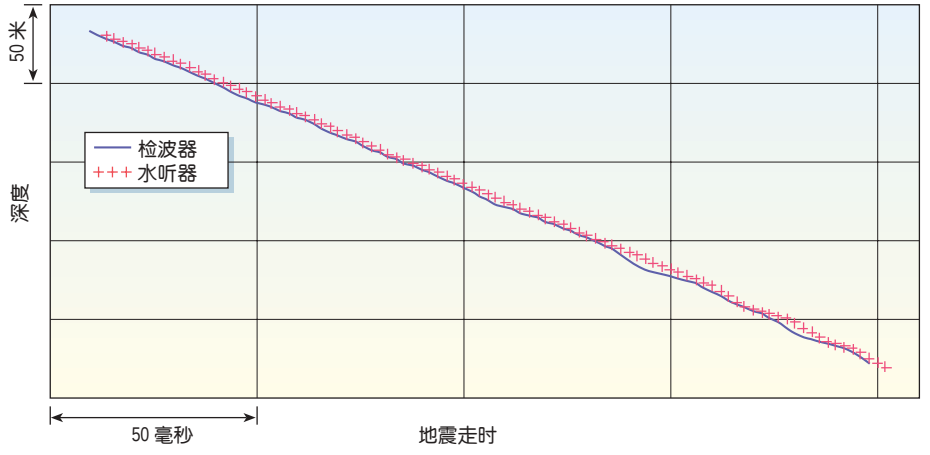
16. Beydoun W，Biteau J-J和Cardoso S：“Geophysical Challenges and Opportunities of the Deep Water Angolan Offshore”，*The Leading Edge*，18卷，第5期（1999年5月）：604 – 607。



^四分量（4C）井下地震叠加数据。从TFE公司现场试验井获得的4C地震数据显示出便于拾取的初至波，并在检波器轴向数据或Z分量（*左*）上显示出良好质量的上行反射波。Z分量沿BHA轴取向，与X分量和Y分量一起构成三个正交方向。在所有四个分量上都能够清楚地看到直达波。水听器数据中续至的上行波至是直达波在$9^5/_8$英寸管鞋上产生的管波（*右*）。



^SeismicMWD仪和电缆VSP仪间时深数据的比较。SeismicMWD仪在造斜井获得的时深数据和电缆VSP仪在原始井获得的时深数据相互重叠，直至两井预计的不同点，在那里原始井与造斜井分开。该比较再次证实SeismicMWD仪采集准确时深信息的能力。

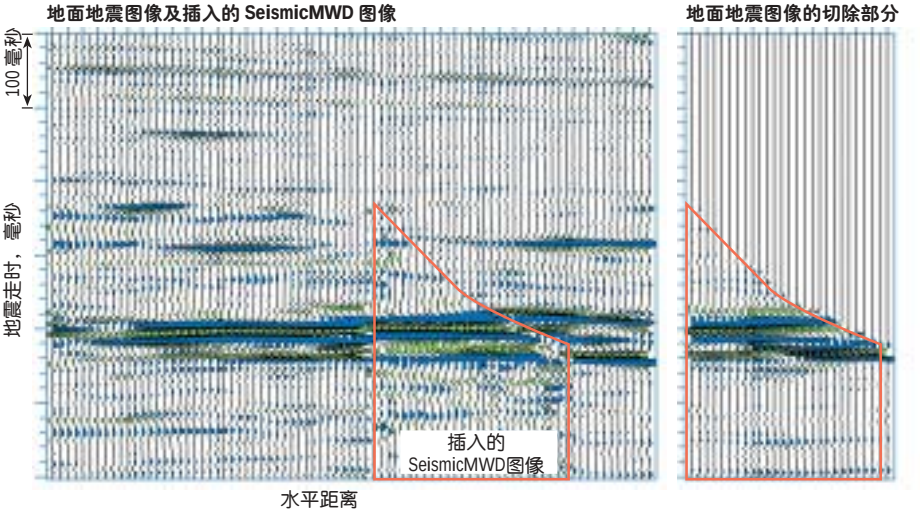


^用于拾取校验炮时间的水听器动态特性。在垂直和套管井中，与底部钻具组合连接的检波器通常不与地层耦合。现场试验表明，虽然水听器在记录时间的后期受到管波的影响，但仍然产生了有效的校验炮数据，而且在检波器失效的情况下，还能提供冗余信息。

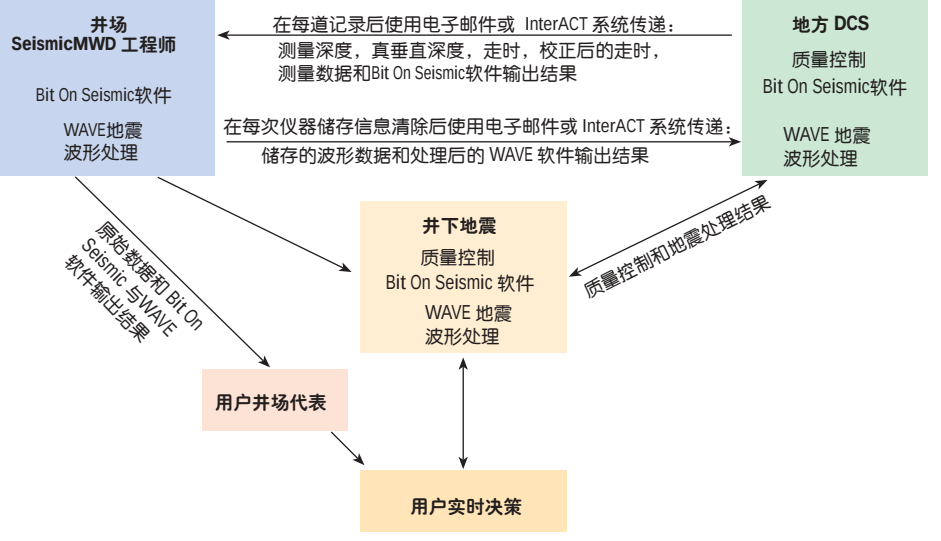
SeismicMWD仪产生的多分量检波器数据，使TFE公司和斯伦贝谢公司的地球物理家能够确定地震波的传播方向，这对VSP处理非常重要。在产生用于钻头前成像的地震数据方面，检波器要好于水听器，因为前者的上行波场不受转换管波的干扰，而这恰恰是用水听器时普遍存在的问题。[17]这次试验证实，安装在BHA上的检波器提供了高质量的数据，能够支持在大斜度井中进行这种测量。SeismicMWD图像的质量至少能够达到三维高分辨率地面地震图像的质量（*右图*）。虽然这台试验仪器安装了频带宽度滤波器，特意从数据中消除最高频率，使图像的有效分辨率有所下降，但还是达到可以接收的分辨率水平。新型SeismicMWD仪没有安装这种滤波器，因而与以前的仪器相比，改善了整体图像的质量。

四分量数据可以通过许多方式改善产品质量和用于新用途。例如，水听器数据可以作为检波器耦合效果无法预测的直井和套管井中的校验炮记录使用。在水平井中，水听器不能提供定向信息，但所提供的一致性数据对地震处理器有所帮助，而同时检波器对垂直传播的波形不灵敏。三分量检波器数据可以旋转到最大能量方向上，以便有更好的信噪比进行初至波检测。此外，同时使用所有分量可以确定相对源点的波至方向，帮助消除某些成像的不定性。三分量数据还可以帮助发展横波处理及其各种应用。[18]利用四分量数据，还可以在靠近盐丘的位置上进行盐体近程测量，以便确定钻头相对盐体翼部的位置。

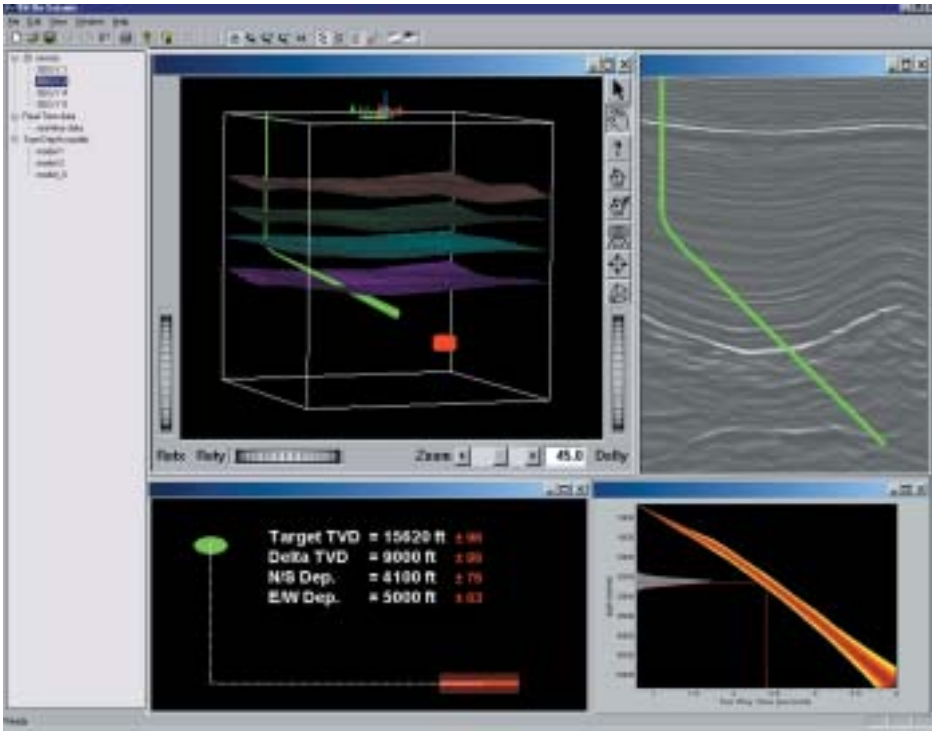
在SeismicMWD测量期间，对钻井作业的干扰很小，TFE公司认为，这一点远比这项技术产生的效益更为重要。TFE公司的钻井、地质和地球物理专家希望，这项技术通过多项应用方法，进一步加强在该地区作业的经济效益。如果与地面地震图像和其它数据综合使用，SeismicMWD数据能够帮助校正和精细划分钻井目标深度，并在不久的将来提供实时钻头前图像，这将帮助TFE公司随着钻井进程优化井眼轨迹，减少为完成生产目标所需要的侧钻数量。实时地震成像将帮助确定复杂的河道砂岩，以便帮助钻井人员用钻头接触到更大的油藏范围，用最少的试验井和生产井改善生产和整体开采效果。



^ 地面地震与SeismicMWD VSP图像之间的比较。作为西非现场试验的一个组成部分，需要评估SeismicMWD仪的图像质量，并与高分辨率三维地面地震图像进行比较。在地震剖面内（*左*），切除了部分有代表性的地面地震图像，并移至右侧。为了进行比较，将SeismicMWD图像覆盖在地面地震图像的上面（*左侧插图*）。这些SeismicMWD图像清楚地显示出各地层增厚与变薄的情况。考虑到这台现场试验仪器限制了频带宽度以便于处理，所以产生的图像质量是好的。新型仪器将不使用这种滤波器限制频带宽度。



^ SeismicMWD技术工作流程。设计良好的工作流程是实时解决方案取得成功的关键。至少在施工前两周，进行数据与咨询服务（DCS）中心和井场SeismicMWD工程师间的适当交流，开始向现场提供相应的数据和信息。在施工前，最终确定采集计划和仪器组合方式。在采集期间，现场工程师检查数据质量，以及用实时数据和施工信息修改DCS日报或续至的各道记录。在利用Bit On Seismic和WAVE软件进行实时处理前，这些数据经过了质量控制和校正。实时解决方案的各种结果将送给开采公司的专家用于决策，而后返回井场。在将仪器提出井口并取出存储数据后，用WAVE软件对波形文件进行质量检查，并送往DCS，在那里实施质量控制和必要的地震处理步骤。



^确定钻头位置。Bit On Seismic 软件便于实时了解钻头在地面地震剖面上所处的位置（*右上图*），以及在钻头接近目标时评估深度误差（*右下图*）。

计划与工作流程

在应用SeismicMWD方法前，必须阐明施工计划和实施的任务和责任。应该十分明确测量目标，这一点对非常复杂的施工来说尤为重要。例如：

- 这次施工仅仅是在地面地震图像上完成实时钻头定位吗？
- 钻达储层目标过程中存在什么不确定因素和钻井危险？
- 层速度是否用于孔隙压力估算？[19]
- 是否需要钻头前图像？
- 现场是否需要地球物理家提供实时处理和解释？
- 此外，为确保施工顺利，需动用哪些设备与人员（震源、船只、吊车和作业人员）？

这些问题和其它问题的答案将决定测量的建立、执行和处理方式。在设计VSP施工时，深入细致的施工前模拟将帮助确定需要的记录道数量和正确的测量几何排列方式，包括震源—接收器位置和最佳的接收器间距。虽然典型的SeismicMWD 作业对钻井进程影响很小，但加大记录道密度需要与钻井人员更多的协作。

当所需的实时决策影响安全和成本时，正确的工作流程就变得更为关键。斯伦贝谢公司已经建立起基础设施，并开发出各种仪器和应用软件，帮助运作这一过程。例如。斯伦贝谢公司的WAVE Q-Borehole 现场处理软件，将使SeismicMWD数据处理和质量控制能够用个人计算机在世界任何地方进行（*前一页，下图*）。这种软件能够统一斯伦贝谢公司电缆与SeismicMWD应用方法的现场井下地震处理功能，它们与计算中心的处理功能相同，建立在斯伦贝谢公司多年来在该地区积累的经验基础上。

通过InterACT用Web方式的数据传递系统，可以将数据传输到合适的处理中心。Drilling Office 系统中的 Bit On Seismic 软件与钻井软件平台结合，使工程师能够在地震剖面上标绘钻头进展的位置，并在每个目标深度上评估误差级别（*左图*）。这种处理的基本作用是实现这些重要目标：确保钻机朝着既定目标安全钻进，并连续、准确地修改钻井队关于储层目标和潜在的钻井危险的位置。

新层次的地震测量服务

SeismicMWD技术和其它地震应用方法的进一步持续发展，将为钻井作业界带来效益。斯伦贝谢公司已经利用SeismicMWD仪产生出高质量的VSP图像，随着传输实时波形的MWD遥测系统和包括WAVE和Bit On Seismic软件等现场处理技术本身的进步，将使实时地震图像在新的层次上服务于钻井人员。这些实时钻头前成像功能因它们对世界各地E&P作业的财政影响，已经引起钻井界的关注。用更确切的时深信息和钻头前地震图像，准确确定穿越多个储层的井眼位置；用钻头前孔隙压力预测结果，避开钻井危险，以及进行实时盐体近程测量，将成为最简捷、最经济的作业方式。

斯伦贝谢公司能够提供一系列符合要求的井下地震技术，包括电缆传送仪器、Drill-Bit Seismic 方法和现在的SeismicMWD 技术。这项新技术对那些在浪费一小时工作时间等于损失上万美元地方作业的钻井队有着特殊的意义，此时迟到的信息将毫无价值，只有及时获得所需信息才能保证钻井取得成功。

—MG

17. 管波是在井下液体中上下传播的多次波，可以左右井下地震波形数据中的续至成分。水听器对这些波的影响特别敏感，因为水听器测量的是井下压力变化，而检波器要与地层耦合，因此对这些波不敏感。

关于检波器和水听器对管波敏感问题的深入讨论，请参见：Zimmerman LJ 和 Chen ST：“Comparison of Vertical Seismic Profiling Techniques”，*Geophysics*，58 卷，第 1 期（1993 年 1 月）：134 – 140。

18. Engelmark F：“Using 4-C to Characterize Lithologies and Fluids in Clastic Reservoirs”，*The Leading Edge*，20 卷，第 9 期（2001 年 9 月）：1053 – 1055。

Sayers CM，Woodward MJ 和 Bartman RC：“Predrill Pore-Pressure Prediction Using 4-C Seismic Data”，*The Leading Edge*，20 卷，第 9 期（2001 年 9 月）：1056 – 1059。

19. Badri MA，Sayers C，Hussein RA 和 Graziano A：“Pore Pressure Prediction Data Using Seismic Velocities and Log Data in the Offshore Nile Delta, Egypt”，SPE 68195，发表在 SPE 中东石油展览会上，巴林，2001 年 3 月 17 – 20 日。