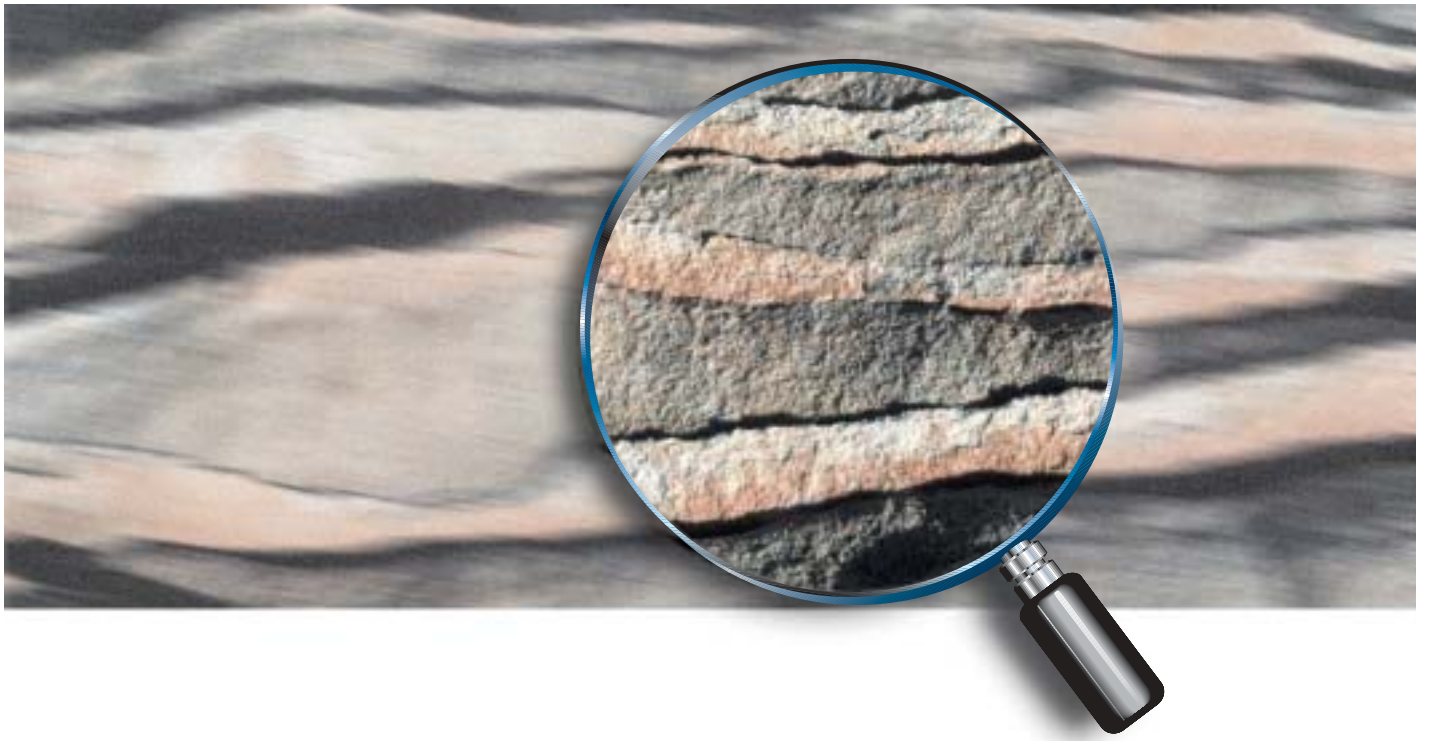


提高地震数据质量的标准

地震数据质量变好了，这要感谢那些工程师和地球物理学家，是他们开发了世界上最先进的海上地震采集系统。新图像的清晰度是有目共睹的。

Phil Christie
David Nichols
英格兰剑桥

Tony Curtis
Leif Larsen
Alan Strudley
英格兰 Gatwick

Randall Davis
美国得克萨斯州休斯敦

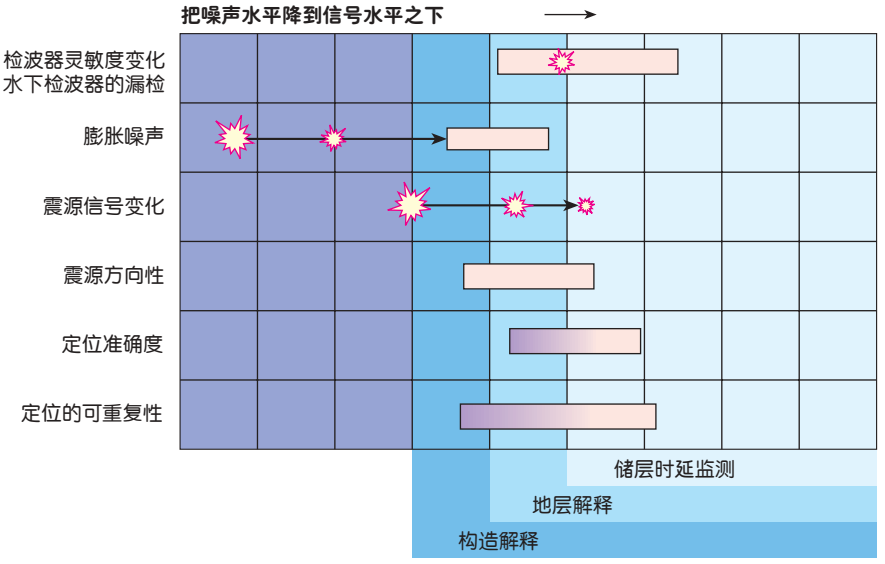
Morten Svendsen
挪威 Asker

在过去的20年里，石油和天然气工业从地震技术的巨大进步中受益匪浅。以前进行二维勘探的地方，如今都改为三维勘探。海上采集最初只拖一根安装有检波器的电缆，现在使用了足以覆盖高尔夫球场大小面积的组合拖缆。海上和陆上勘探在船上或野外进行预处理，将数据周转期从几年缩减为几周。多分量海底电缆可以记录用于分析储层的岩性和流体成分的压缩波和剪切波。先进的数据处理和不断提高的计算能力，使得地球物理学家能够从比较复杂的构造，比如位于岩盐和浅层气藏之下的复杂断层区提取图像。四维记录帮助科学家理解和追踪储层中流体的变化，以及伴随油气的产出压力和应力的变化，促进了对油气藏的优化勘探。

目前，许多石油公司正在强调从现有油气田中提高产量，这些革新正在使地震数据成为勘探和开采中任何一个阶

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：英格兰 Gatwick 的 Mark Egan，Olav Lindtjorn 和 Steve Morice；挪威Asker的Peter Canter，James Martin 和Nils Lunde。特别要感谢挪威奥斯陆技术中心的检波器、定位和中心采集部门的所有成员，他们为本文中所描述的世界水平的科研成果做出了巨大的贡献。

Monowing，Q，Q-Fin，Q-Marine 和 TRINAV 是 WesternGeco 的商标。



> 海上地震数据中检测到的主要噪声来源。横条表示在标准处理中的噪声水平。膨胀噪声和震源信号变化的影响通过处理可以得到减小，减小的水平由箭头标出。纵向色带表示在用途不同的地震解释数据中所允许的噪声水平。对于构造解释可以允许比地层解释较高的噪声水平，而储层的时间延迟监测则要求最低的噪声水平。

段的重要工具。对于井资料比较少的新区块进行优化和评价则需要更多的地球物理信息，并以此建立具有真正预测能力的地下模型。

因为新发明的应用，比如井位成像、孔隙压力预测和监测流体前缘，很多都要求极其精确的数据，所以对高质量数据的需求也提高了。地震数据的高质量指高信噪比、宽频带或信号中包含较宽的频率范围。多年以来，大量的努力倾注于勘探设计方案和有效率的数据处理方案的研究，以便通过提高信号的带宽、振幅和降低噪声来提高数据质量，从数据中获得最多的信息。但是，我们不禁要问：地震数据可以变得更好吗？答案是肯定的。但是，要回答如何才能让它变得更好，我们就得先研究一下噪声的问题。

什么会引起噪声？

大约10年前，现今名为Western Geco公司的科学家和工程师开始深入探讨噪声的核心问题。他们提出了一个在概念上非常简单，分为两步走的方法来提高海上数据的质量。首先识别地震数据中的噪声源，然后再压制噪声源或将其最小化。

他们通过对当时的采集系统和辅助模型中的数据进行整体分析，来确定每一个与信号有关的噪声类型的水平（*上图*）。他们分析了数十种潜在的原因，包括震源和检波器的定位、震源变化、检波器灵敏度、记录的电子仪器以及水和船只的运动引起的失真。最主要的噪声源是海面的浪涌和波动、震源特性变化和与检波器组有关的定位误差。在一些情况下，噪声水平很高以致最后生成的图像难以解释。只有将噪声降低到最低水平，地震数据才可以用于可靠的地层和四维解释。

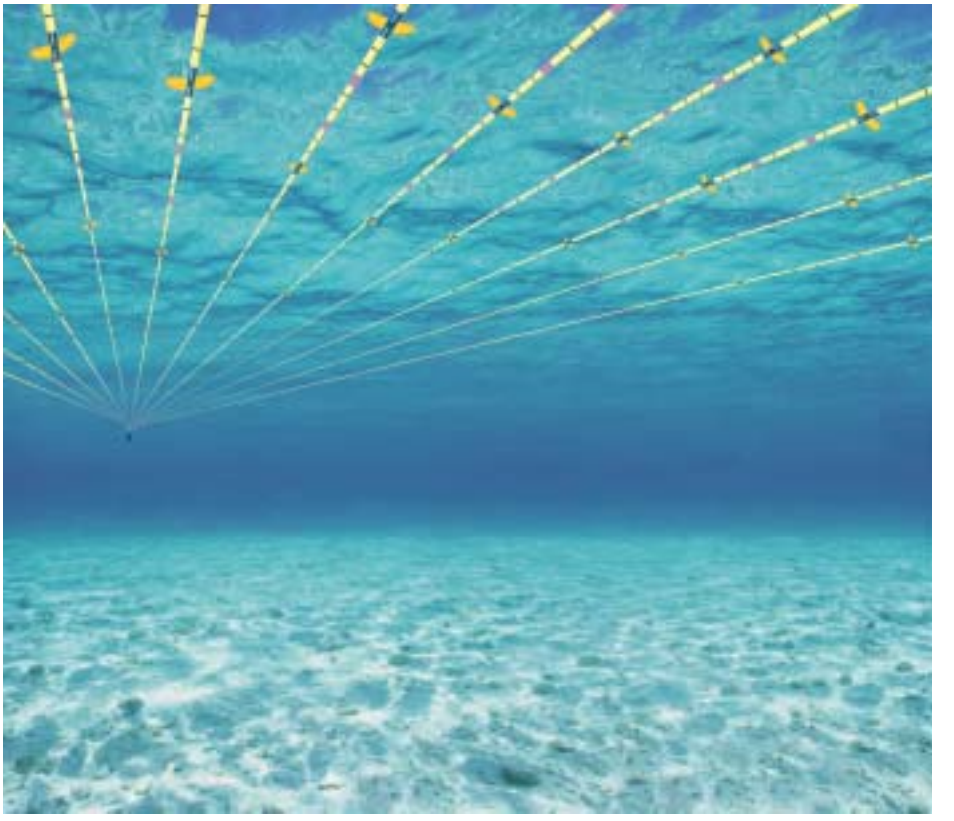
这篇文章记载了地球物理学家、工程师和信号处理专家为最小化噪声源、提高信号质量和生成适合于详细解释的图像所做出的努力。阐述了常规的数据采集和噪声压制办法的不足之处，采集系统的新进展，尤其是新的点检波器方法是如何使地震数据质量取得巨大飞跃的。

常规海上采集

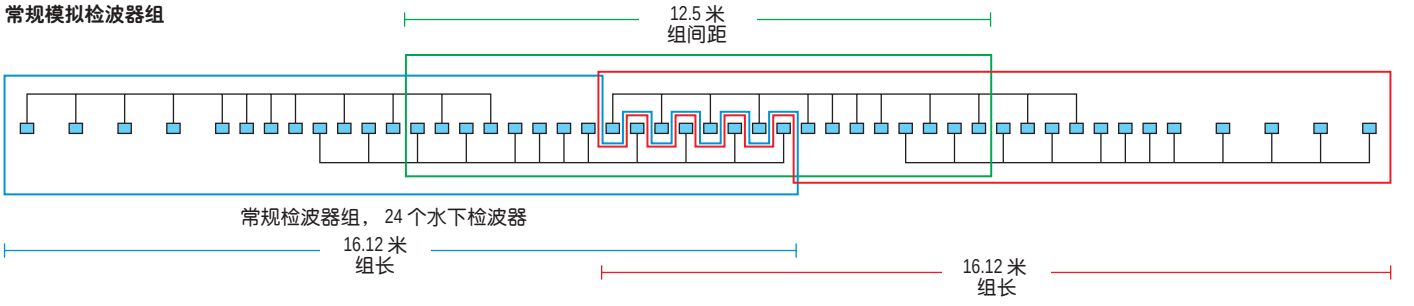
海上地震勘探是由船只拖着海上拖缆来完成的。在船只经过目标区时放炮，由拖缆或仪器记录信号（*右图*）。标准的拖缆是3000到8000米[9800到26200英尺]长，在常规采集中，它要携带数百个检波器组。每个检波器组有12到24个检波器，构成了一个记录道（*下图*）。原则上讲，在记录前要将检测到的信号叠加—这一步称为组合—这样可以提高信噪比。然而，组合也会破坏信号的保真度并降低后续的旨在衰减噪声处理的有效性。为了使海面波噪声达到最小，拖缆在施工方案设计时都设定好保持一个特定的深度，通常是6到10米[20到33英尺]。若设定的深度较浅会记录到信号的高频成分，但一般也会增加噪声水平。

高效的采集船可以拖动12到16条间距50到100米[160到330英尺]的拖缆。在拖缆前端使用了Monowing(单翼)复合拖缆拖动技术的偏斜板，用它来帮助保持拖缆间距。[1]然而，Monowing装置只是在前端控制了拖缆的间距，后面的情况如何无法控制。水流、海潮和其他的作用都可以使拖缆发生羽状波动或横向漂离原定的位置。严重的情况下，甚至会发生拖缆之间的缠绕。对被缠在一起的拖缆，就不得不铰回船上，用人工将其分开，这就势必造成时间浪费。

在应用地震数据时还要求精确的位置信息。而某些应用，例如四维地震监测，还要求可重复的定位。为了确保采集系统得到精确记录，使用定位器来测定在船只移动时每一炮的震源位置和检波器位置。全球定位系统（GPS）方法利用卫星确定船只的位置，精度在3米之内。在常规系统中，震源和检波器相对于船只的位置是用水声学和安装在拖缆上的头部传感器中的信息来计算的。这些传感器在拖缆首、尾两端形成网状（*下一页，右图*）。拖缆首尾的位置是精确知道的。在拖缆上以一定的间距还装有这种航向传感器，利用它们来计算拖缆形状。拖缆上检波器的位置就是根据拖缆的形状估计出来的，所以实际上可能存在较大的误差。



> 地震勘探船横穿勘探目标上方，海上拖缆记录信号。



> 多个水下检波器组交错组合形成一个记录道。检波器组中每个水下检波器接收到的信号被加起来生成了该组的一个记录道。

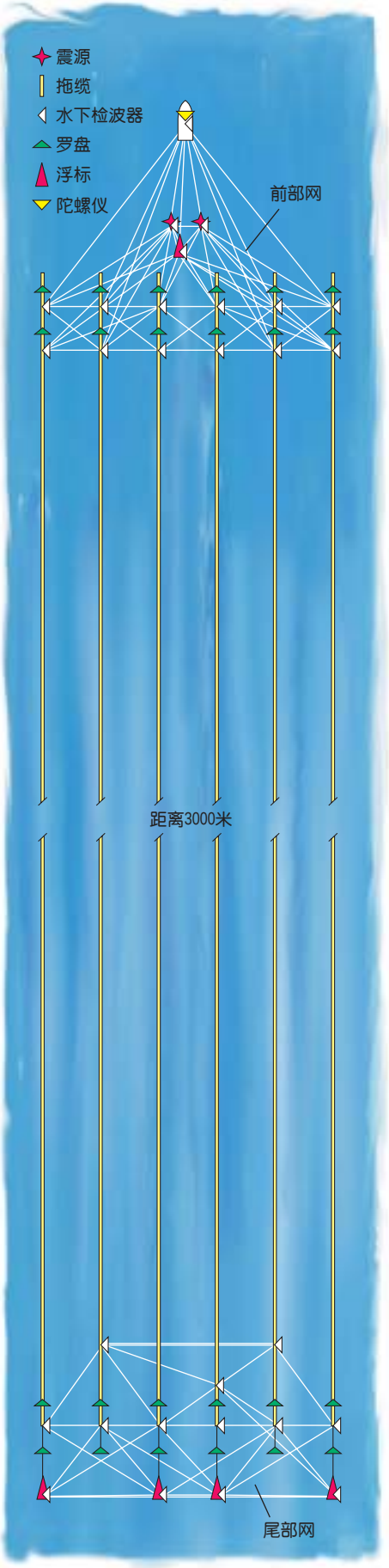
标准的震源是由至多包含6个空气枪的小组合构成的一个大组合。空气枪间距约3米[10英尺](下图)。像拖缆一样，空气枪组合也是在水下6到10米的深度拖动。深度太浅则空气枪不能产出足够的能量。在较浅处，因为海面的静水压力不足以形成向下传播的波，所以气枪的爆破不会向下传播，而是在海面产生气泡。直达波和鬼波虚反射之间的相消干涉改变了震源发出的信号。直达波是向下传播的波，鬼波是先向上传播，在几毫秒之后在海面反射后又向下传播。类似地，检波器也受向上传播的波和在海面反射后又向下传播的鬼波之间干涉的影响。震源或拖缆越浅，记录中信号的高频成分越多，而能够穿透很深的低频成分越少，噪声越高。震源或拖缆越深，低频成分越多，噪声越低，但是也失去较多的高频信号。震源组合的信号特征基础也不相同，这取决许多变化因素，每一个空气枪的点火时间的不同、腔膛压力不同，以及组合的几何特性和漏炮（空气枪没有被点着）的变化。这些炮与炮之间的变化会降低地震勘探的精确度和可重复性。

1. Beckett C，Brooks T，Parker G，Bjoroy R，Pajot D，Taylor P，Deitz D，Flatten T，Jaarvik LJ，Jack I，Nunn K，Strudley A和Walker R："Reducing 3D Seismic Turnaround"，Oilfield Review，7卷，第1期(1995年1月)：23–37。
2. Svendsen M和Larsen L："True 4D-Ready-Seismic Utilizing Q-Marine"，OTC 13163，发表于海上石油技术大会，美国得克萨斯州休斯敦，2001年4月30日–5月3日。

海上采集的改进

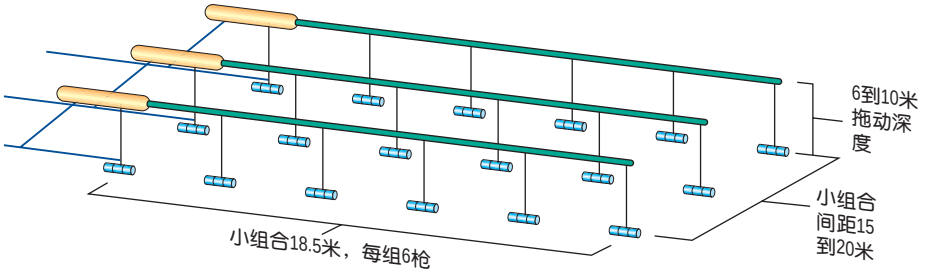
WesternGeco的地球物理学家和工程师们设计了一些方法来压制与拖缆、定位和与震源有关而困扰常规方法的噪声。在挪威奥斯陆的技术中心，几个小组进行合作来克服在完善Q点检波器技术中遇到的巨大技术难题。他们的研究成果(Q-Marine海上采集系统)提供了质量无可比拟的海上地震数据。这种新系统包含在检波器灵敏度和定位准确度、可调整拖缆、强化的震源控制和点检波器采集几个方面中取得的改进，能连续提供高质量的可重复数据。

为了解决检波器灵敏度变化的问题，制造工程师规定新的高保真管水下检波器应具有的防水和稳定的灵敏度指标。水下检波器尤其要承受静水压力，因而随时间推移可能会影响灵敏度，甚至会破坏检波器。新检波器在制造过程中已经进行了予老化处理，因此可以达到更深的无损允许深度和更稳定的灵敏度，以后工作就很稳定。每个检波器都有自己的标定证书，而且所有的灵敏度值都存储在拖缆首、尾处的电子仪器中，以便进行自动数据标定。[2]



> 拖缆首（顶部）尾（底部）的定位网。全球定位系统（GPS）传感器，航向传感器（罗盘）和声学传感器的测量结果有助于计算拖缆组合中震源和检波器的位置。

典型的组合

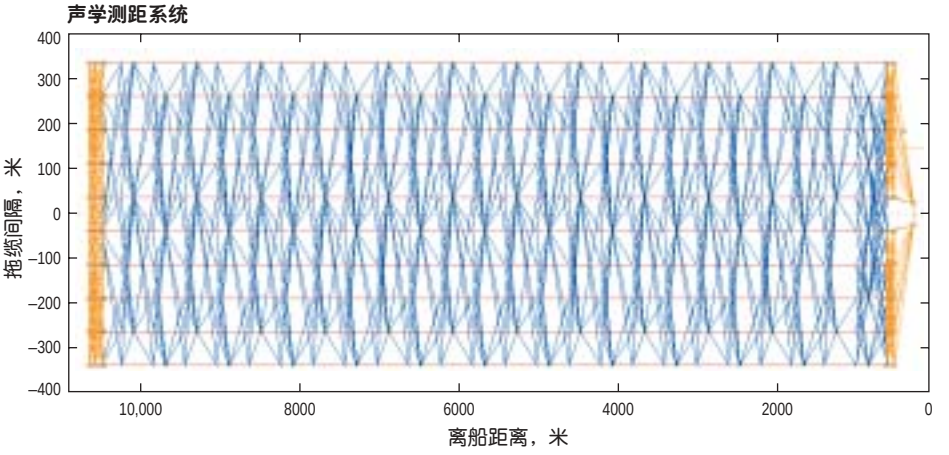


> 空气枪小组合，每个小组合有6个空气枪。每次地震放炮的质量取决于组合中每个枪的大小、位置和点火时间。

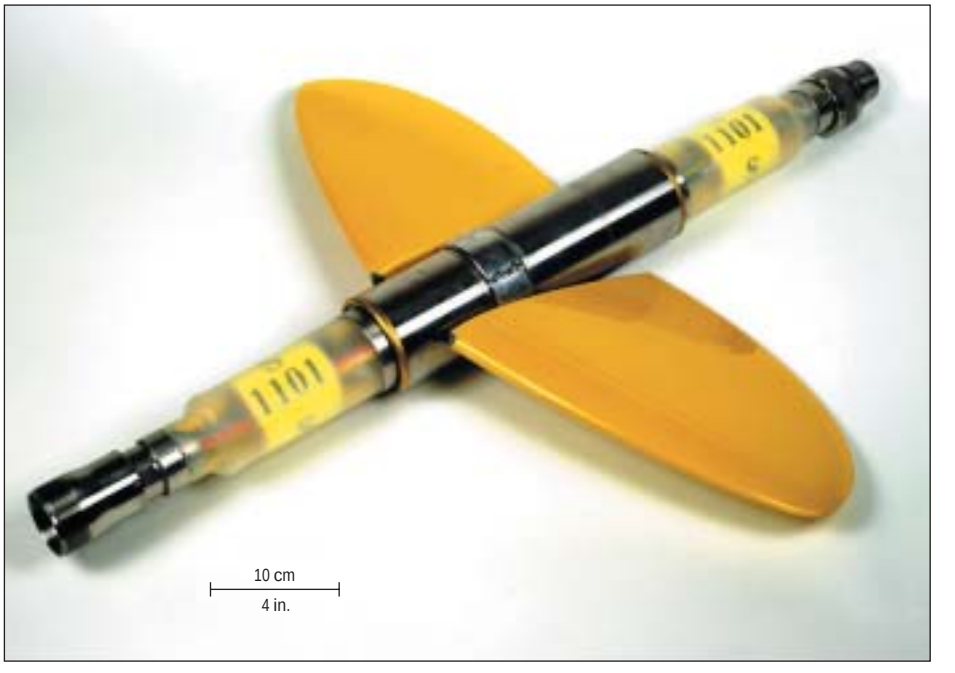
随着近来电子技术和光纤网络的发展，这种系统最多可以记录8万道，拖缆可多达20根，每根缆长12千米[8英里]带有4000多个水下检波器。与常规方法相比，新系统的带宽增加了4倍，这使得原始数据可以直接拿到船上进行现场处理，在处理中利用了数字化的组合算法，该方法会在下文中进行讨论。

新采集系统沿拖缆全长都携带着声学测距系统。良好的声波震源沿拖缆以800米[2600英尺]的间隔排列，发射出的信号可以被任何一个水下检波器接收。每一个到达波的相关旅行时，或者说炮检距，通过整个网络得以计算出来（*左下图*）。声学测距被用作测距网校正的输入，用来校正GPS读数。结果是对于拖缆上的每一处都有4米[13英尺]范围的绝对定位精度。解决海上采集网络校正所需要的计算能力比常规方法所需要的计算能力高出许多倍。

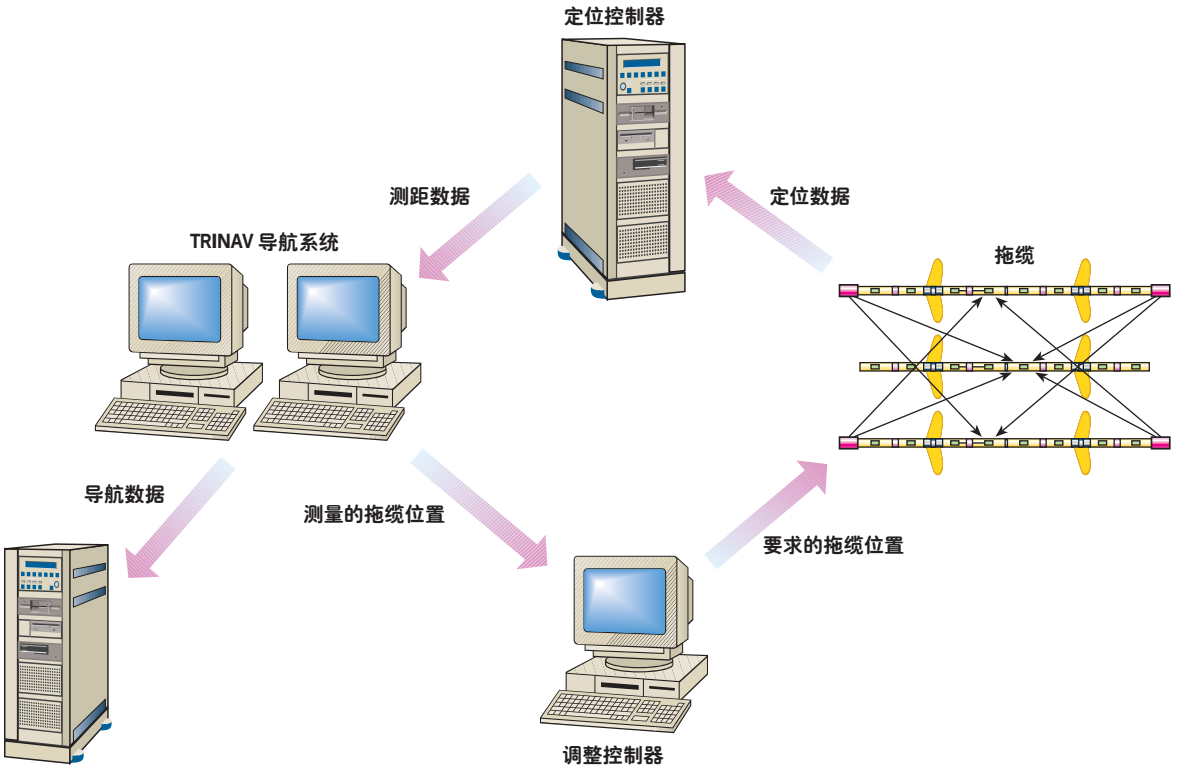
虽然所有的常规采集系统都可以控制拖缆的深度，但是只有Q-Marine海上方法可以既有灵活的水平控制，又有深度控制。横向调整拖缆的方向能够得到



> 新的Q-Marine海上定位系统沿拖缆全长应用了声学网络。用它可以在4米[13英尺]的精度范围内计算检波器位置。除了可以计算网络尾部（*左*）和首部（*右*）的距离信息（橙色）外，还可以计算这种10拖缆结构的全拖缆网络中的数百个中间点的距离（蓝色）。



> Q-Fin控制设备，通过垂直调整或水平调整拖缆来控制拖缆间距和位置。



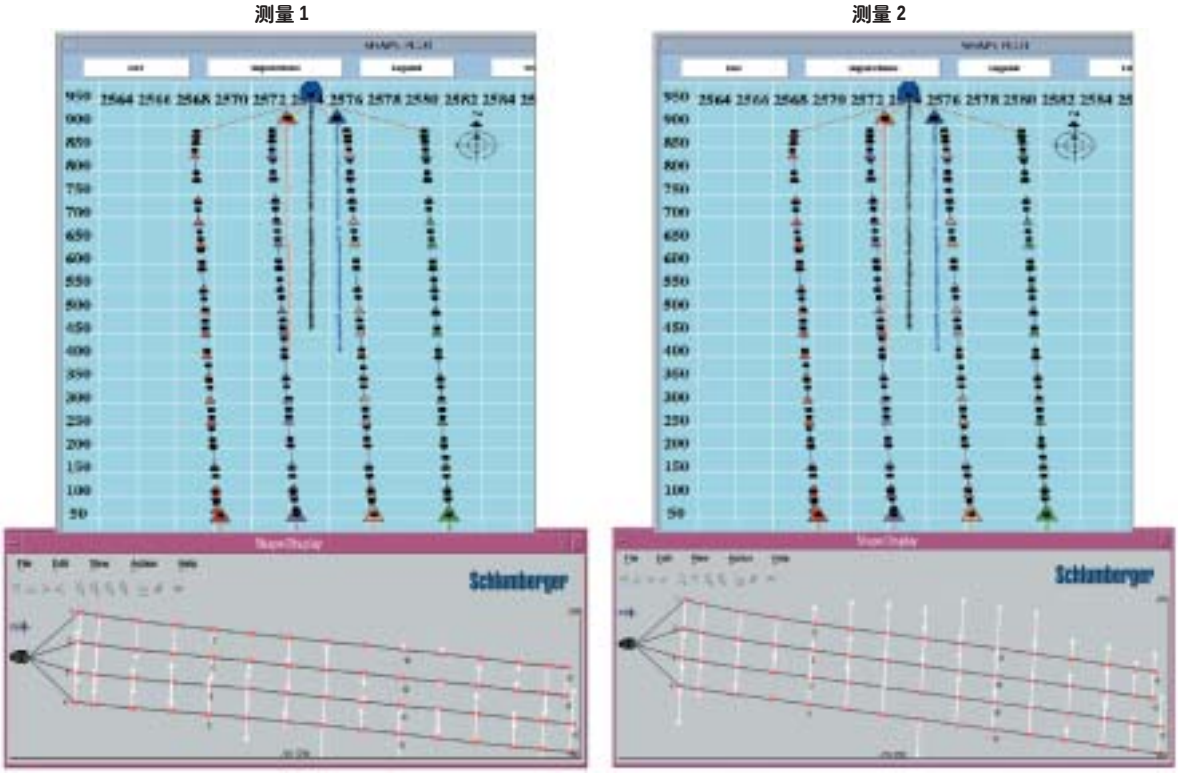
> 拖缆调整数据流程。从拖缆中来的定位数据被输入定位控制器中，该控制器将以水下检波器间距离的形式计算拖缆的位置。TRINAV导航系统利用这些距离计算实际的位置。计算出的位置被记录为导航数据，如果需要的话，也会将位置数据传输给调整控制器来反馈其变化。

最优覆盖，使得拖缆间距可以小到25米[82英尺]，而且大大降低了拖缆缠绕到一起的危险。窄的拖缆间距使得可以进行高分辨率采样，从而能够提高成像质量，而且海中的设备在接近潜在的障碍，例如海面设施时可以安全地躲开。可调整的拖缆对于油藏勘探是十分理想的，因为它们允许船只做快速转向，这在面积较小的勘探中是节约时间的主要方法。可调整控制改善了拖缆放收的后勤工作，使后甲板更加安全。由于在后甲板花费的时间减少，从而使采集工作变得更加安全。[3]

调整设备沿拖缆以400到800米[1300到2600英尺]的间隔组合。Western Geco Q-Fin调整系统有可单独控制的翼来调整拖缆的上升、下降或左右移动（*前一页，下图*）。常规设备是夹在拖缆上并悬挂在拖缆下面，与此不同，Q-Fin的装置已成拖缆一个组成部分。这些革新的结构将水动力提升到最大，而且使电缆调整的声学噪声达到最小。

Q-Fin机制受调整控制器的控制。控制器将计算出的导航系统中的电缆位置与设计的拖缆位置进行比较，并按照要求调整拖缆的方向（*上图*）。控制器计算每个调整翼将所有拖缆恢复到应

3. Swinsted N：“营造一种更佳的工作环境”，《油田新技术》，11卷，第3期（1999年秋季刊）：46-60。



> 在四条拖缆的测试中，两次测量*(左和右)*的拖缆位置是重复的。每次测量都计算了4个拖缆的位置*(上部)*，结果显示拖缆的间隔是固定不变的。保持既定位置所需要的力由白色箭头表示*(下部)*。

有位置所需要的力(*上图*)。

Q-Marine 拖缆系统的调整能力减少了对补充测线的需求。补充测线是指在大部分的采集完成之后又补充施工的测线，用于弥补漏测。这样就可以缩短测量周期，减少非生产时间。更好的调整还可以采集到质量更好的数据，这是因为固定的地震测线间隔能够带来更加一致的面积覆盖。

海上震源既能产生地震能量也能产生噪声，为了进一步降低噪声，震源专家对海上空气枪组合进行了改进。一个空气枪组合的输出在炮与炮之间的变化导致了信号记录中出现噪声。空气枪组合控制系统就是为了防止出现这种状况而设计的。但是超出控制系统允许范围的同相轴仍旧会使组合的输出出现很大的变化。不同空气枪的空气压力和海面波运动的很小变化就可以产生无法预测的震源信号特征。为了弥补这些情况，必须对由其它空气枪的压力变化和其它静水压力变化而引起的每个空气枪周围的压力场变化进行计算和标定。

在进一步的处理之前，必须从记录的数据中去掉震源信号或将其进行反褶积处理，因没有一个完全可预测的信号特征，这就迫使地球物理学家依赖于基于统计性的反褶积技术。然而，这样仅仅能提供近似的结果，而且可能无法解释震源所造成的变化。

先进的震源控制系统和信号特征估计技术可以解决这一问题。空气枪小组合上的震源控制电子设备进行同步处理并按其声学输出特性进行爆破。采用光纤线路与船只通信，代替了常规的双向系统，这种常规系统会在向船只传送或接收船只信号时产生时延，从而导致空气枪点火时间出错。每个小组合上的全球定位系统天线提供空气枪的精确位置。

每个气枪附近测量到的压力信号特征作为信号估计技术的输入。[4] 在每一个空气枪附近的水下检波器组合已经取得专利，它们记录了声波压力并为每一个空气枪确定了一个标志性的信号特征，这个标志信号特征不包含其他空气枪压力场的影响。通过将所有空气枪的标志信号特征和自由表面的鬼波反射叠加在一起，就可以计算出远场信号特征或拖缆水下检波器的实际震源输出。

墨西哥湾深水区 Orca 盆地的例子显示了海上震源标定（CMS）技术的强大作用。在这个盆地中，一个盐体在海底出露，增加了最深处海水的矿化度。

海水矿化度差异在双程旅行时的第3.0秒处(即在波从海底反射上的200毫秒)产生了一个很强的水平反射(*下图*)。如果没有海洋震源标定，在3.15秒左右由未经处理的震源产生的气泡所造成的变化就非常明显。尽管这些变化很小，它们也会影响以后的信号并导致错误的解释。在CMS反褶积之后，气泡振幅和其变化减小到最小，而来自深部的反射信号变得更加清晰。

标定的检波器灵敏度更好，增强了记录能力，改善了拖缆定位系统，更好的震源控制和信号特征估计，以上特点的综合就达到了新的突破，即检波器点采集技术，使Q-Marine系统有别于其他海上地震勘探技术。检波器点采集的记录道来自单个检波器，而常规采集的道是模拟组合中的各检波器记录的叠加(见“检波器组合地震记录中存在的问题”，*24页*)。

从每个单独的检波器而不是一组检波器采集数据并不是新想法，早在20世纪80年代末，壳牌公司的地球物理学家就提出了一个类似的方法，并且讨论了该方法潜在的益处。[5]他们认识到常规集系统利用由接线构成的组合并不能产生最好的数据，而且他们显示了信号处理或数字检波组合是如何产生出模拟组合所期望的理想滤波效果的。然而他们也认识到最终的解决方法(每检波器一道的方法)会要求硬件和处理能力上的变化，而且不会立即得到工业界的利用，而WesternGeco的Q-Marine系统是第一个实现了这种点检波方法的系统。

质量与众不同

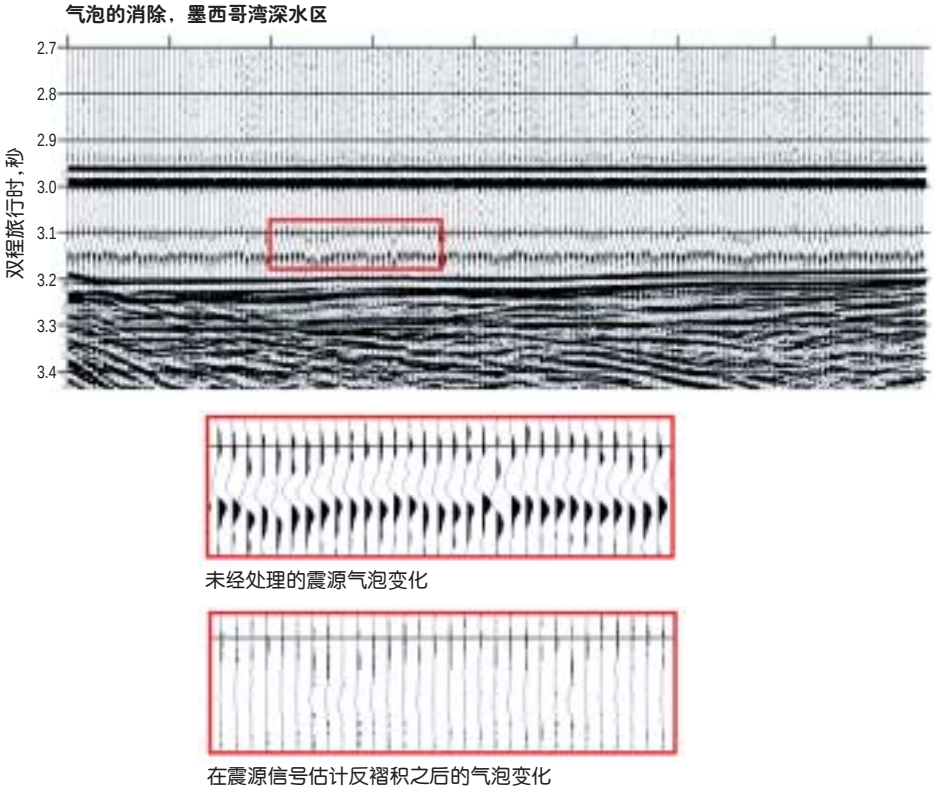
Q-Marine系统的许多改进为最终的地震图像带来了无可比拟的清晰度。墨西哥湾Garden Banks区域的例子显示了信号质量和分辨率的提高。这些提

(*接26页*)

4. Ziolkowski A，Parkes G，Hatton L和Haughland T：“The Signature of an Air Gun Array：Computation from Near-Field Measurements Including Interactions- Part 1”，Geophysics，47卷(1982年)：1413-1421。

5. Ongkiehong L和Huizer W：“Dynamic Range of the Seismic System”，First Break，5卷，第12期(1987年12月)：435-439。

Ongkiehong L：“A Changing Philosophy in Seismic Data Acquisition”，First Break，6卷，第9期(1998年)：281–284。



> 墨西哥湾海上震源标定。在该地震剖面中，主要的反射特征是在3.0秒处成像的高矿化度层(*上*)。放大部分显示了在3.1到3.15秒有先后到达的具有不同振幅的气泡信号(*中*)。海上震源标定有助于去除气泡引起的变化，这样深部反射解释的可信度就更大(*下*)。

检波器组合地震记录中存在的问题

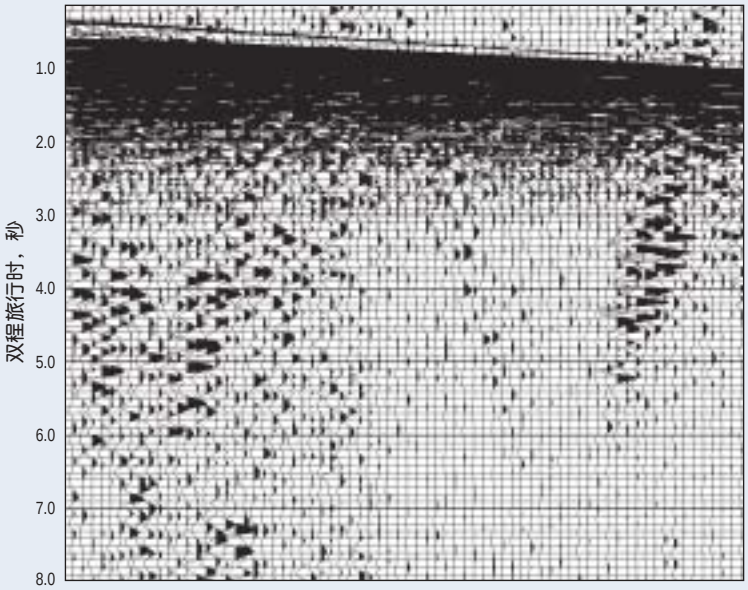
从20世纪30年代地震反射波被第一次用于陆上石油勘探，一直使用检波器组合来采集信号。这种陆上采集技术后来也被用于海上采集。对于这种采集原理的简单回顾可以看到该技术的优点和不足之处。

地震勘探震源的能量以几种模式向外辐射传播。在陆上，被称为体波的压缩波和剪切波可以穿过地层，在地下界面反射并回到地表检波器，它们是地震成像中最有用的波。在海上只能产生压缩波。不是所有被检波器接收到的能量都对成像有用。不经反射而直接到达检波器的波被视为噪声，因为它们不能增加成像反射的能量。除了这些直达波，还有其他几种形式的能量也被认为是噪声。在陆上，被称为地滚波的面波沿地面传播，增加了高振幅噪声。在海上采集时，在拖缆内产生并沿其传播的波也构成噪声。

当深部反射界面是水平界面时，压缩波和剪切波沿近乎垂直的路径到达检波器，而大部分的噪声几乎是水平到达的。早期，地球物理学家就发现可以利用到达方向的不同来压制接收到的噪声的振幅。他们建立了一个检波器组—称连线组合—记录的

1. Özbek A："Adaptive Beamforming with Generalized Linear Constraints"，*Expanded Abstracts*，SEG国际博览会和第70届年会，加拿大艾伯塔省卡尔加里市，2000年8月6-11日：2081-2084。

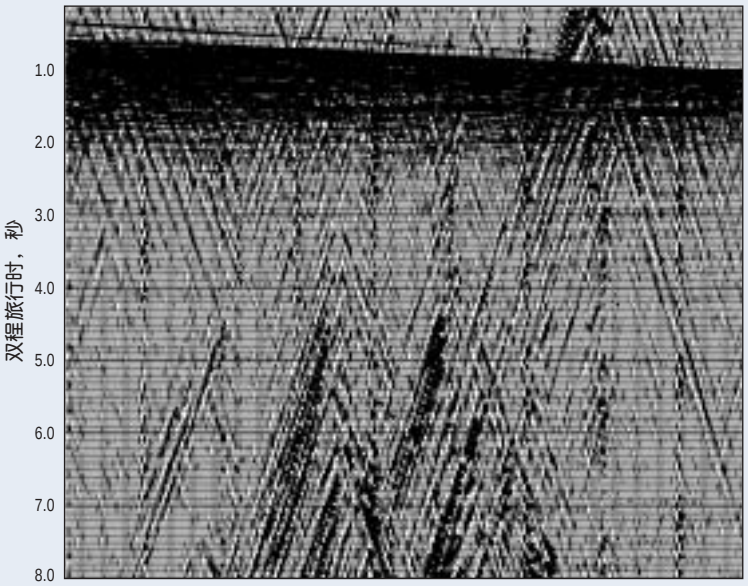
常规水下检波器组，组间距12.5米



> 恶劣天气时用常规水下检波器组获取的一炮记录。在很多道上几乎所有的到达时间都出现了不相干的大振幅噪声。

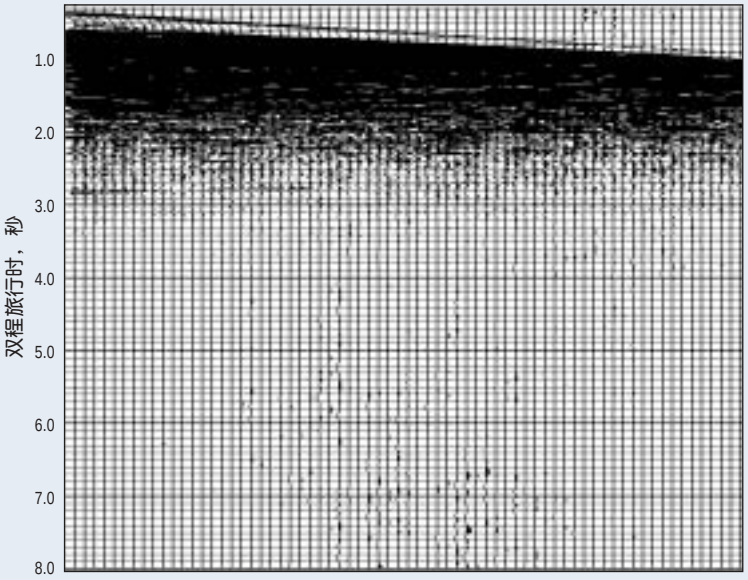
通过每一个检波器的位置用数字记录信号，对含有信号和噪音的波场的合适的采样，就可以利用复杂的算法进行处理。这种信号处理过程被称为数字化组合，它含有压制检波器连线组合的噪声的能力。与简单的线性叠加相比，数字化组合可以更好地利用信号处理技术。

Q-Marine 点检波器数据，小道间距



> 与前一页剖面中的数据同时采集的一炮记录，但应用的是小间距的Q-Marine点检波器。存在强振幅的噪声，但是表现出相干性，这可以通过处理而滤除。

Q-Marine 数字化组合技术

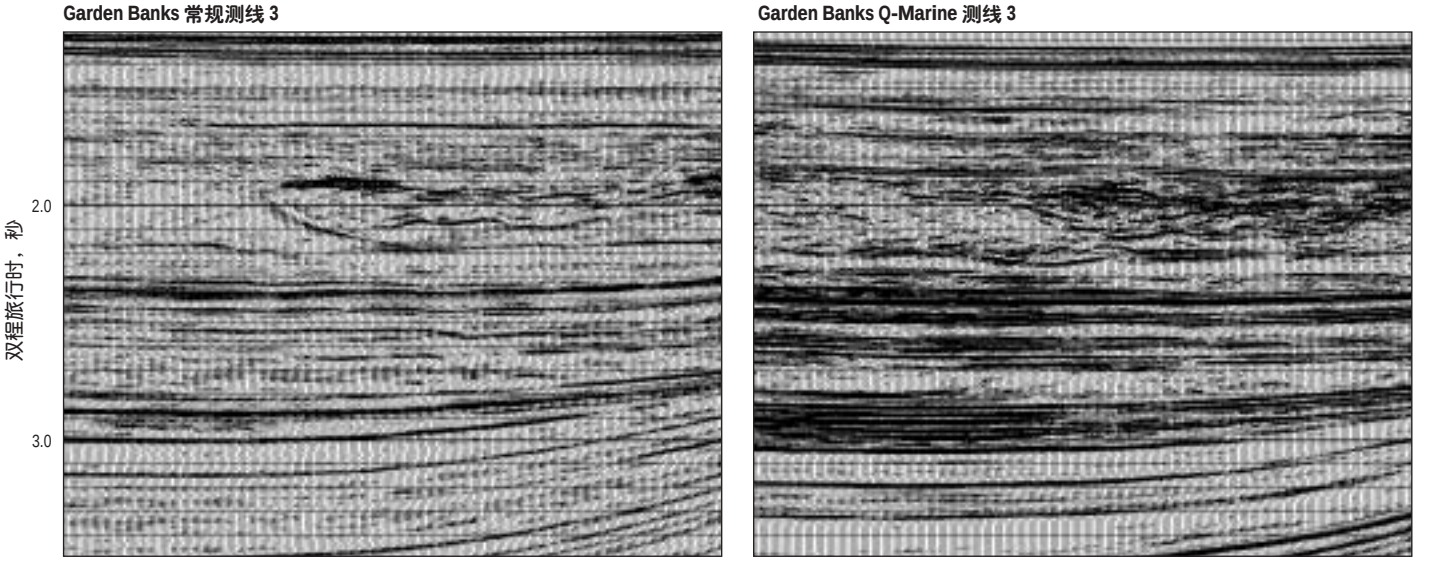


> Q-Marine技术取得的数据。数字化组合处理的点检波器数据的一炮记录，其道间距较大。与连线组合的炮记录相比，几乎没有出现常规炮记录中的强振幅噪声。

不是一个检波器的信号。组合中的检波器的间距不超过预期噪声主要波长的一半。对到达组合中每个检波器的信号进行简单的模拟叠加就能够消减大部分到达的水平向噪声，然而，也可能消减一些非垂直到达的信号中的高频成分，比如从倾斜反射界面上传来的反射。

通过数字化记录到达每一个检波器的信号，接收到的波场（采样也很合适）既含有信号又含有噪声，这可以用复杂的算法进行处理。这一步信号处理被称为数字化组合，它提高了连线组合压制噪声的能力。数字化组合比简单的线性叠加更好地利用了处理技术。[1]

用数字化方法建立的组合与连线组合之间的对比显示了新技术的效果是很好的。用常规标准的12.5米[41英尺]组间距记录的一炮数据，显示了与天气有关的高水平的残余噪声。这些噪声是不相干的，所以很难被滤除（*前一页*）。与此同时，利用小间距数字化道间距的Q-Marine拖缆技术在同样的天气条件下记录了同样的几炮（*左上图*）。这些噪声在采样恰当时表现出相干性，而且可以通过处理将其滤掉而不影响信号。用数字化组合获取的数据，每12.5米一道的输出已经明显地减少了那些控制着常规炮记录的残余噪声（*左图*）。

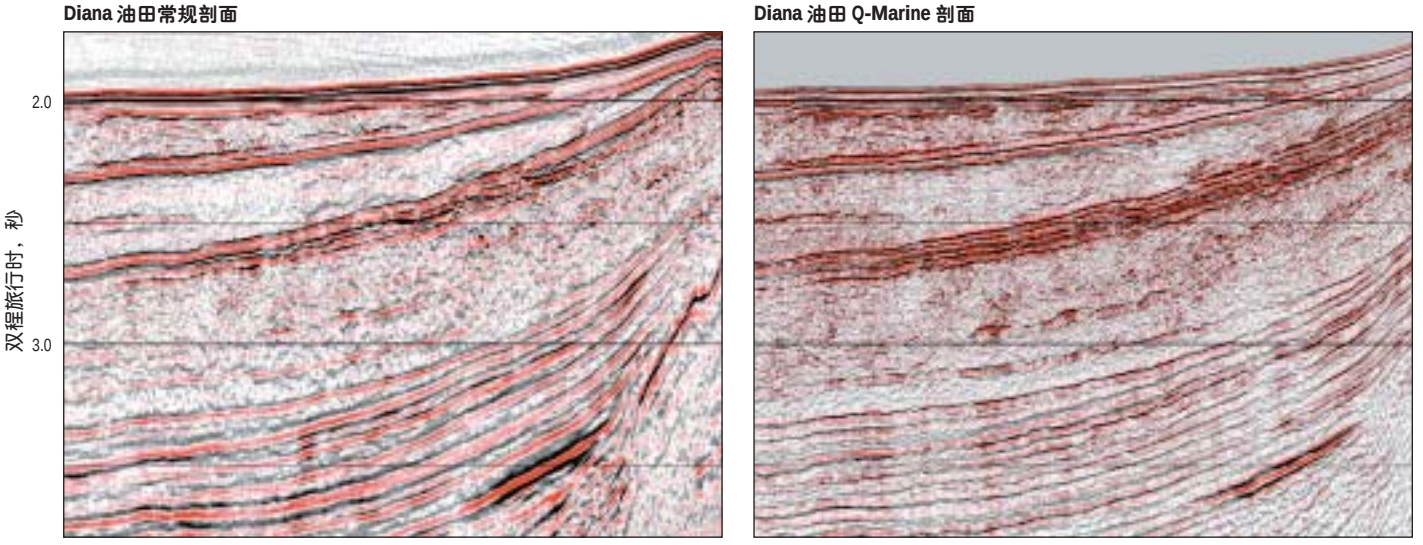


> 常规地震剖面与用 Q-Marine 技术得到的地震剖面的对比。一个取自三维（3D）勘探的二维（2D）剖面显示了几个地下反射界面。这个剖面是 1997 年在墨西哥湾 Garden Banks 地区用常规拖缆（*左*）采集的。用三维勘探的结果应该比用二维测线得到的效果好，然而在这个例子中，在 2000 年用 Q-Marine 技术（*右*）采集的二维测线却显示了更多的地下信息。

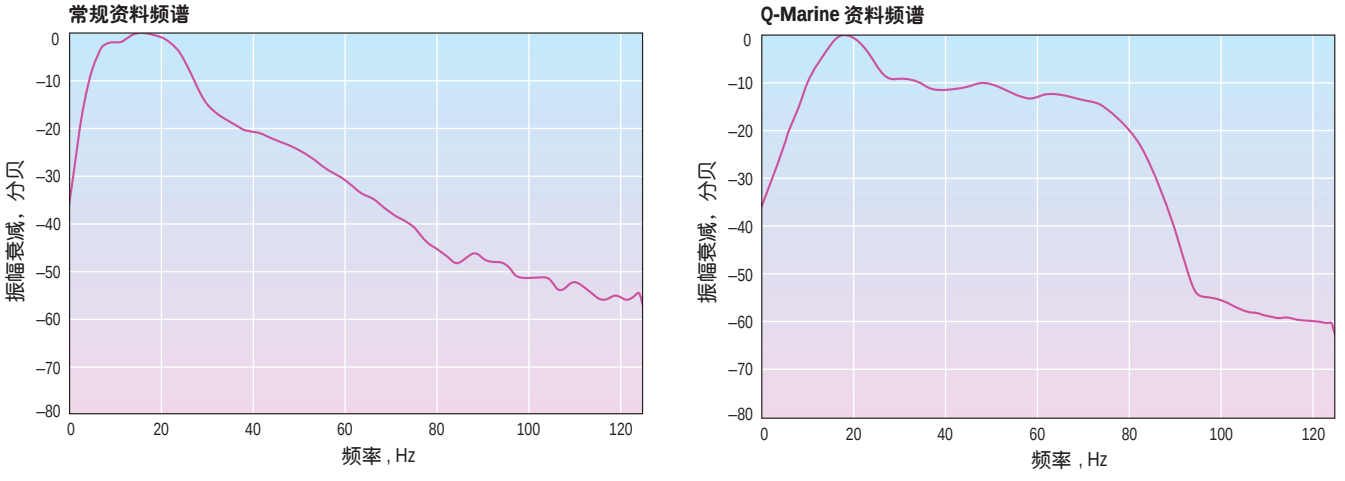
高只有在所有的噪声得到降低和信号增强技术得到应用之后才能实现（*上图*）。1997年年中用常规三维（3D）勘探为多家客户提供的图像显然是令人满意的。而2000年应用海上Q采集方法及处理技术，只用二维测线就使图像质量明显提高。应用海上Q技术的地震剖面比用常规技术的地震剖面显示出更多的地层和小构造。那些在以往的勘探中无法看到的反射在新的成像剖面中变得很清晰。

另一个比较实例取自 Diana 油田，再一次显示出Q系统在获得高分辨率和清晰成像方面的优势（*下一页，上图*）。1999年用常规勘探技术得到的图像是盐丘侧翼处具有一个强振幅特征。在同一测线上使用了Q-Marine勘探，对该油田和上覆岩层进行了成像，结果具有更高的分辨率。

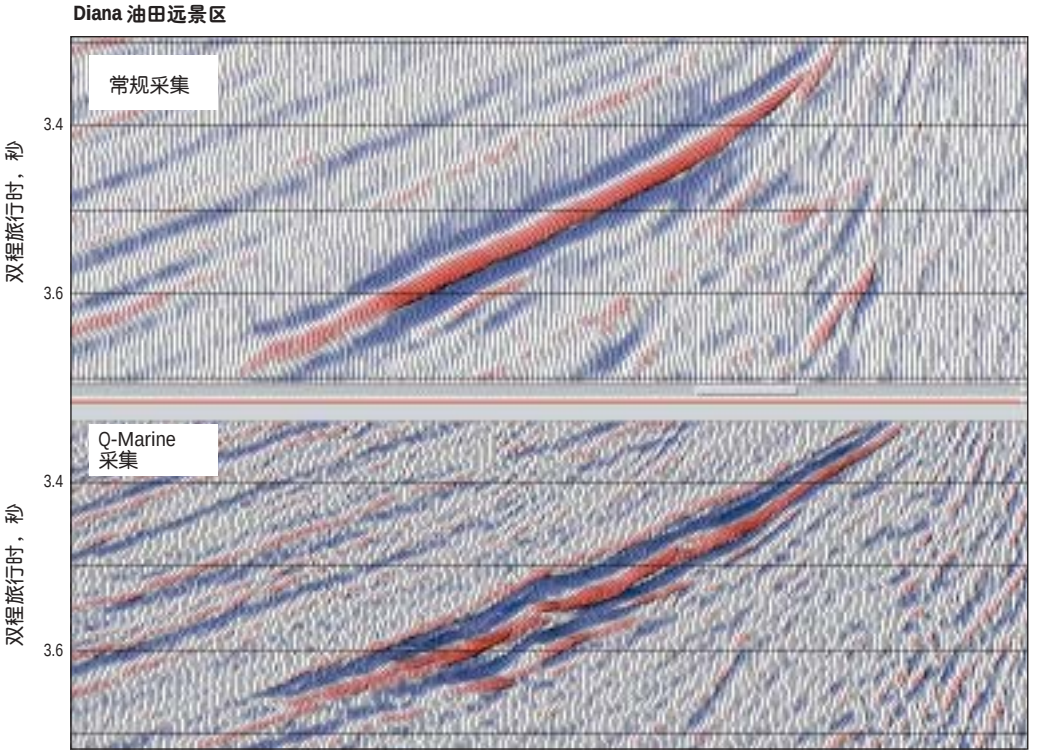
利用Q-Marine技术，在所有深度都保留了更多的高频信号（*下一页，下图*）。常规勘探在目标深度可能包含60Hz的有用信号，在同样的深度Q系统却可以将频率提高到85Hz。这种分辨率的提高使对小构造（例如横向地层变化和油藏随时间变化）的解释成为可能。



> 墨西哥湾Diana油田的常规地震资料*(左)*和Q-Marine地震资料*(右)*。Diana油田在剖面右下方表现为倾斜的强振幅反射层。Q-Marine勘探对油田和周围岩层的成像比常规数据成像得到的分辨率要高。



> 用常规方法和Q技术采集的Diana油田资料的平均振幅谱。常规数据*(左)*包含的可用信号(至少30分贝)在目标深度达到60Hz。Q-Marine采集和处理*(右)*的有用信号达到85Hz。频谱与3.3秒到3.7秒记录到的信号很吻合。



> Diana油田远景区的地震剖面的放大。常规勘探(上)显示出储层比较连续的强振幅反射，而从Q勘探的成像结果(下)表现出反射层的连续性稍差。

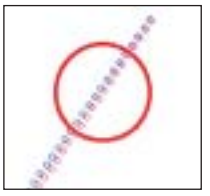
对Diana油田部分图像进行放大可以看到，在目标深度上Q-Marine勘探提高了分辨率，这有助于追踪那些影响地层连续性的构造特征(上图)。常规方法获得的地震剖面显示出非常连续的反射体，而Q方法成像后反映了储层中可能存在的非连续体。Q勘探在成像质量上的提高使许多作业者怀疑以前在其他地区的常规勘探中可能失去了一些机会。

油藏监测的可重复性

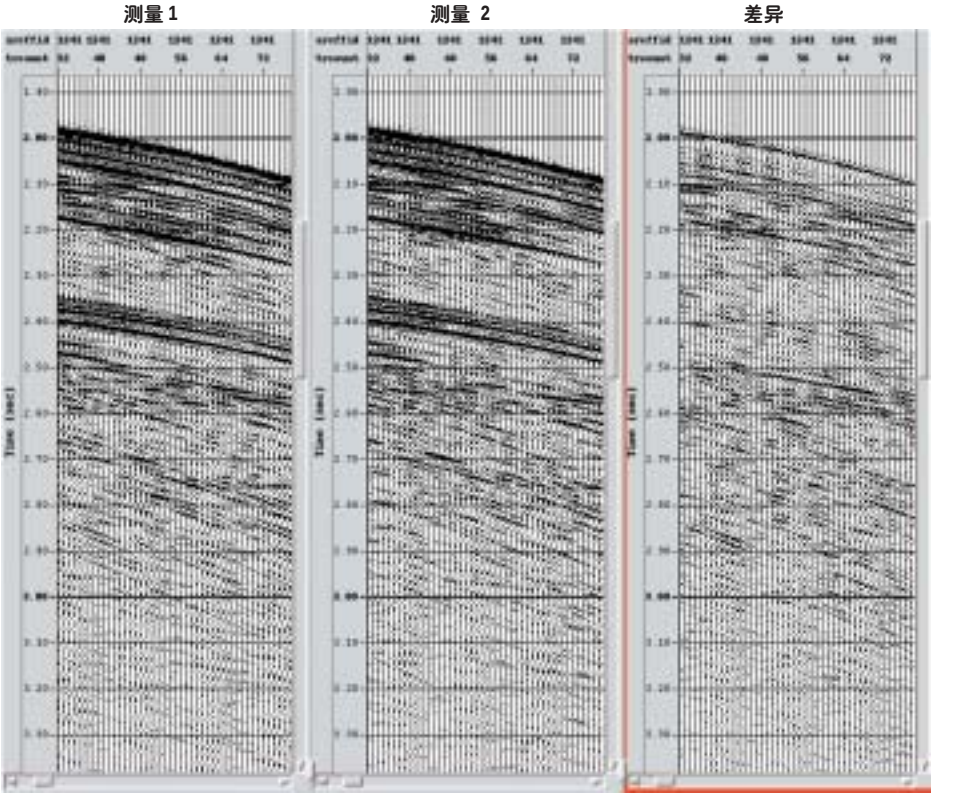
Q-Marine系统提高了成像质量，这有助于构造解释和地层解释。除此之外，它还可以用于油藏时延监测。利用地震数据监测油藏的变化是建立在对两个不同时间的地震勘探之间差异评价的基础之上的。这两次地震勘探是在不同时间采集的，在这段时间间隔中，油藏的某些方面，比如流体饱和度、压力和岩石应力已经发生了变化。时延监测有助于把观测到的变化与储层的变化联系起来。这种技术所基于的假设是在相隔一段时间后，油藏一定会发生变化，不会还是一样的。

可重复拖缆定位是取得可靠的时延勘探的关键。即使拖缆只是轻微偏离应有位置，仅仅相隔几天得到的地震测线也可以显示出与地下变化无关的差异(下一页，上图)。拖缆定位重复得很好可以使相隔极短的两次勘探之间的差异达到最小(下一页，下图)。

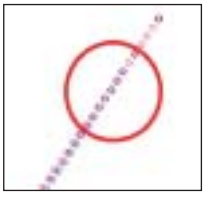
拖缆位置



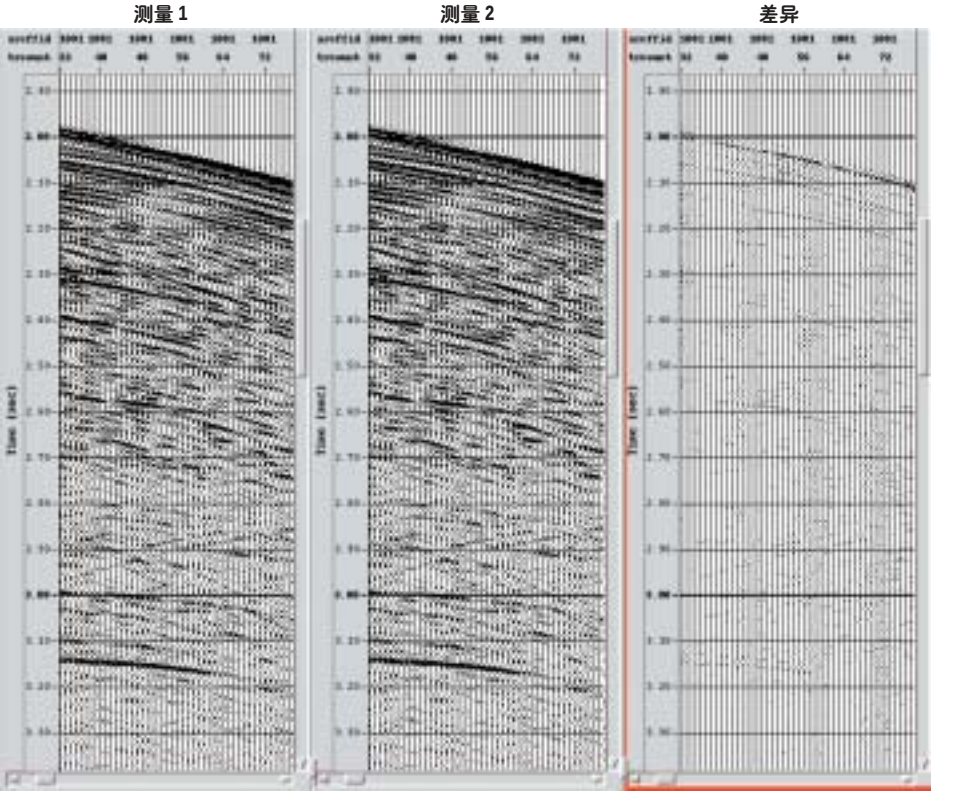
> 拖缆位置没能重复。在重复测量中，若拖缆轻微偏离原来的位置就无法产生真实的重复数据。插图*(上)*显示了两天内一天一炮采集中拖缆的位置*(左和中间)*。由于两天之内地下情况不会发生变化，所以从一个采集记录中减去另一个*(右)*表示的是仅与采集变化有关的差异。

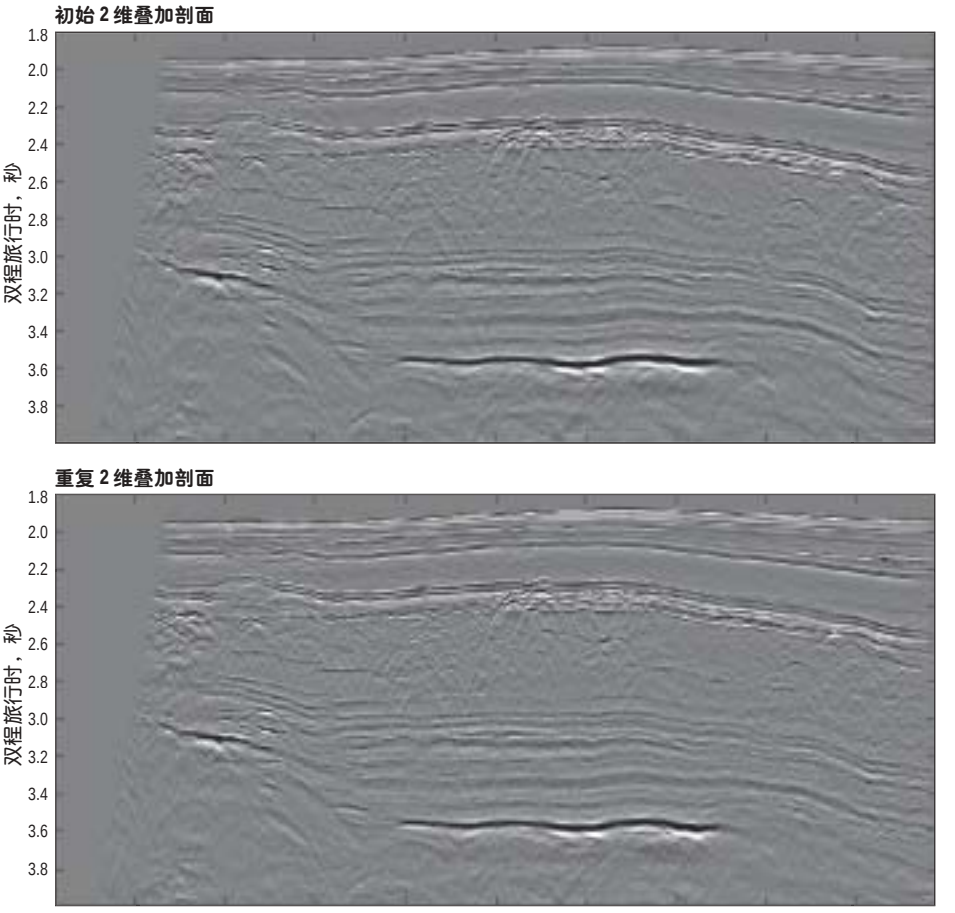


拖缆位置



> 可重复定位的重复数据。当拖缆位置重复得很好时，时延勘探可显示地下情况真实的变化。测量1*(左)*和测量2*(中)*的数据是用重复得很好的拖缆定位获得的。它们之间的差别*(右)*正确地显示出地下情况没有变化。





> 初始叠加剖面（上）是在平静的海域采集的，准备用于重复测试。重复测量（下）是在2天后在同样的天气下进行的，目的是定量检查可重复性。

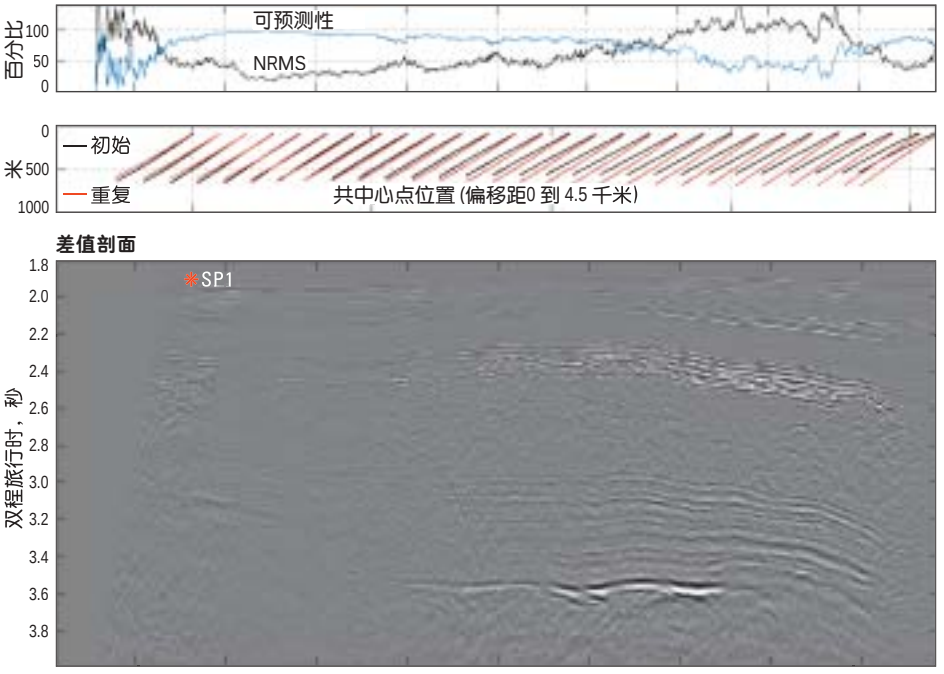
在墨西哥湾的另外一个实例中，先采集了一条2维测线来作为勘探的基础测线（上图）。两天后，在与第一条测线一样的天气条件下采集了另一条测线。数据都是用点检波器获取的，而且使用震源反褶积和数字化组合进行了处理。从一个测线中的数据减去另一个测线的数据得到两者之间的差值剖面（下一页）。

可重复性的测量是为对两道相似性的量化。[6] 一种采用的度量方法是在给定的时窗之内的两道的归一化平方根(NRMS)差值。NRMS越低，两道越相似。另一种度量方法是可预测性，它是两道之间的能量相关函数。可预测性越高，两道越相似。差值剖面显示剖面左半部可重复性高，右半部低。[7]

这种测量中没有控制拖缆位置，强水流使拖缆发生羽状波动，或偏离最佳位置，使得勘探船第二次难于重复拖缆的位置。两次勘探的拖缆位置不同，重复性就会受到影响。道间的强相似性对应那些数据的共中心点道集的位置是相同的。当两次勘探的共中心点位置不同时，道间相似性就会变低。

6. Morice S，Ronen S，Canter P，Welker K 和 Clark D：“The Impact of Positioning Differences on 4D Repeatability”，*Expanded Abstracts*，SEG 国际博览会和第 70 届年会，加拿大艾伯塔省卡尔加里市，2000 年 8 月 6-11 日：1161-1164。

7. Kragh E 和 Christie P：“Seismic Repeatability, Normalized RMS and Predictability”，发表于SEG国际博览会和第71届年会，美国得克萨斯州圣安东尼奥，2001 年 9 月 9-14 日。



> 可重复性度量*(上)*，共中心点位置*(中)*，差值剖面*(下)*。从初始测线的数据减去第二次重复测量的数据就得到了两次勘探之间的差值。在差值剖面的左边，振幅很小，这是因为这些叠加数据的共中心点的位置是相似的。SP1是第一炮的位置。在测线右侧，差异较大，因为这里两次勘探的共中心点位置差异太大。可预测性和NRMS曲线分别指示了这两条测线的相似性及差异。

从地震资料中获取更多信息

人们对Q-Marine系统的兴趣不断增加。*Geco Topaz*是第一艘提供商业服务的船只，于2001年1月开始在墨西哥湾进行3维海上数据采集。在北海有一个全夏季的工作计划，要采集几个时延Q-Marine勘探和高分辨率三维数据组。第二艘船(*Western Pride*)，装备了Q-Marine系统，将在2001年8月投入使用。第三艘船也将在2001年底之前装备上Q-Marine技术设备。

早期的结果在数据质量和可重复性方面达到甚至超过了预期的效果。Q-Marine勘探数据显示出的成像能力和分辨率已经成为数据质量的新标准。随着更多的Q勘探的进行，地球物理勘探的解释人员将逐渐要依靠由新的可调拖缆、点检波器、震源标定技术所带来的高清晰度。将要开发或正在开发的陆用、井孔和海底采集系统，使用的原理与Q-Marine技术相同。最终，所有油藏，甚至包括那些在最难勘探环境中的油藏，都可能从增强的勘探能力中受益。这种勘探能力的增强是由对来自地下信号进行恰当采样带来的。 —LS

(翻译：李志华)