

# 旋转导向钻井新技术的应用

旋转导向钻井技术自上世纪九十年代末期戏剧性地投入现场应用以来，已有了很大的发展。最新的系统所具有的独特性能使其能在恶劣环境中更灵活、可靠地钻进复杂的井眼轨迹。

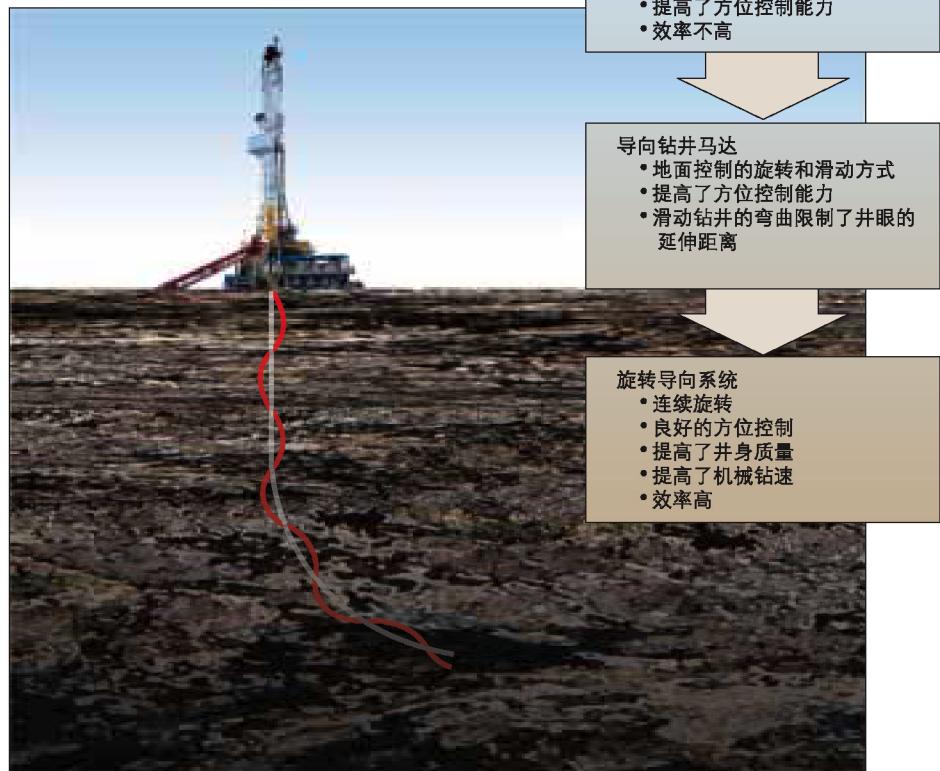
上世纪 90 年代末，旋转导向系统进入钻井行业，并立刻受到了人们的青睐。1997 年英国 Wytch Farm 油田一口延伸距离超过 10 公里（6.2 英里）的大移位井是第一口采用这一项新技术的井<sup>[1]</sup>。在此之前，工程师尽可能地通

过在旋转钻井方式中采用导向马达来近似进行旋转导向系统作业。钻井工程师清楚地看到采用一个连续旋转定向钻井工具在消除滑动钻井、改善井眼净化程度、提高机械钻速、降低压差卡钻风险等诸多方面的潜在益处<sup>[2]</sup>。

**Mike Williams**  
美国得克萨斯州 Sugar Land

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：巴西 Macae 的 Glaucio Alves Barbosa, Chris Lenamond, Roger Pinard 和 Ulisses Sperandio; 美国得克萨斯州 Sugar Land 的 Emma Bloor, Liz Hutton 和 Curtis Robinson; 英国 Stonehouse 的 Tim Curington 和 Paul Wilkie; 挪威斯塔万格 Norsk Hydro 公司的 Bjorn Engedal; 巴西 Macae 巴西国家石油公司的 Ricardo Juinitti Bernardo; 安哥拉罗安达的 Hilaire Tchetenga; 以及英国伦敦的 Paul Wand。

adnVISION (方位密度中子), PERFORM (通过风险管理流程提高效率), PowerDrive, PowerDrive Xceed, PowerDrive Xtra 和 PowerPulse 等是斯伦贝谢公司的商标。



▲ 定向钻井技术的发展。容积式马达和导向钻井马达取代了原始的用造斜器使钻头偏斜的方法。上世纪 90 年代后期引入的旋转导向系统是第一种能提高三维轨迹控制并连续旋转的装置。

今天,钻井工程师们认识到了新一代旋转导向系统的上述以及其它许多优点,新一代旋转导向系统虽然没有被大肆宣扬,但却在先前的技术上有了巨大的改进。例如,使用旋转导向系统可以用双中心钻头在钻进时扩眼,节约了钻进和扩眼分别作业的钻井时间<sup>[3]</sup>。目前最新的旋转导向系统与井眼的相互影响很小,这些系统采用内置工具而不用外置工具来确定仪器在井眼中的位置和方位,因此保证了井身质量。事实上,最先进的系统只是施加一个与常规稳定器作用相似的稳定的侧向力,稳定器随钻柱一起旋转或者以与钻柱相同的转速连续旋转,同时使钻头处于正确的方位。在后一种情况下,在最软地层中的狗腿度可超过8°/30米(8°/100英尺)。在这种地层中,无法与井眼保持恒定的相互作用<sup>[4]</sup>。

先进的旋转导向系统不仅要满足复杂的井眼轨迹要求,现在,这些系统还要能在最恶劣的环境下运转,利用封闭组件,可以保护工具在井筒温度达302°F(150°C)、高研磨性地层、各种流体条件及高振动环境下正常运转。这些硬件与可靠耐用的电子仪器一起提高了系统的可靠性,降低了风险。

- 有关Wytch Farm钻井的更多信息,请参见:Modi S, Mason CJ, Tooms PJ和Conran G:“Meeting the 10 km Drilling Challenge”, SPE 38583,发表在SPE技术年会暨展览会上,美国得克萨斯州圣安东尼奥,1997年10月5日-8日。
- Allen F, Tooms P, Conran G, Lesso B和Vande Slique P:“大位移水平井钻井:突破10公里大关”,《油田新技术》,9卷,第4期(1997年冬季刊):32-47。
- 滑动钻井指用井底泥浆马达驱动钻头旋转而不需在地面旋转钻柱。当井底钻具组合接有弯接头或弯壳体泥浆马达或既有弯接头又有弯壳体泥浆马达时,就可以进行定向钻井作业。不需要旋转钻柱,钻头由泥浆马达驱动旋转,沿其所指方向钻进。通过限制滑动与旋转方式所钻井段的长度可以控制井眼轨迹。
- 双中心钻头是一个整体式钻头和偏心扩眼器,用于同时钻进和套管下扩眼或扩大井眼。有关钻头的更多信息,请参见:Besson A, Burr B, Dillard S, Drake E, Ivie B, Ivie C, Smith R和Watson G:“切削齿技术的发展”,《油田新技术》,12卷,第3期(2000年秋季刊):36-57。

《油田新技术》几年前介绍过专业化的旋转导向钻井作业的早期进展<sup>[5]</sup>。本文将简要回顾一下定向钻井技术,然后重点介绍最先进的旋转导向系统在巴西和挪威的成功应用情况。

## 定向钻井新技术

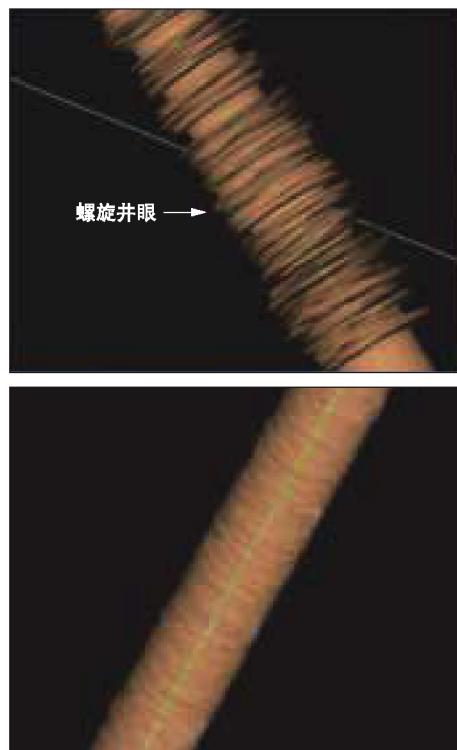
定向钻井技术始于上世纪七十年代早期,用于钻达采用其它方法无法钻到的油气藏,特别是那些从海上平台所钻的井(前一页)。最早的定向钻井技术包括使钻头偏斜的造斜器,该技术不能有效控制方位,从而常常偏离目标<sup>[6]</sup>。容积式马达的引入提供了导向能力从而可以控制方位,但马达不能满足钻工们要求的效率。最后,导向马达可以从地面控制钻柱的旋转和滑动,进一步提高了方位控制能力,但该技术效率低且风险大,因为极大的扭矩和拉力限制了滑动和旋转钻进方式的钻井能力,使一些目的层无法钻达。此外,导向马达在滑动方式下产生的井眼弯曲是不合格的,因为弯曲使进一步的滑动更困难,弯曲还会妨碍地层评价和下套管等一些关键作业,在弯曲井眼中的测井质量也受到影响。

旋转导向技术的引入消除了以前

- 造斜率也指狗腿严重度。狗腿是指井眼突然转向,弯曲或改变方位,可以用度或单位距离的角度变化来定量表示。
- Downton G, Hendricks A, Klausen TS和Pafitis D:“旋转导向钻井的新方向”,《油田新技术》,12卷,第1期(2000年春季刊):18-29。
- 造斜器是指安放在井眼中的一倾斜的楔形物,用于使钻头向偏离井眼轴线的方向钻进。造斜器必需有坚硬的金属表面,这样才能使钻头钻穿套管或岩石而不是造斜器本身。造斜器可以朝向所需的特定方位,也可以不考虑方位随意安放在井眼中。多数造斜器都安放在井底或者高强度水泥塞的顶部,但也有的会安放在裸眼井中。使用造斜器会有在套管鞋和窗口处发生机械卡钻的风险。
- 阻塞指钻柱周围的井眼被堵塞。有多种原因会造成这种情况,最常见的原因是钻井液未有效地将钻屑和井壁坍塌物携带出井眼环空,或者钻柱周围的井壁发生垮塌。当发生井眼堵塞时,循环就会突然降低或中断,接着泵压升高。如果补救措施不成功,就会发生卡钻事故。

定向钻井方法的一些缺点。因为旋转导向系统从地面连续旋转定向钻井,从而不必象导向马达钻进那样滑动工具。连续旋转能更有效地将钻压传到钻头,从而提高了机械钻速。旋转还能搅动钻井液和钻屑,使钻屑被携带出井眼,而不沉淀形成钻屑床,从而改善了井眼净化效果。先进的旋转导向系统能提高钻井液循环和钻屑的清除。有效清除钻屑降低了井底钻具组合的卡钻或形成阻塞的风险<sup>[7]</sup>。

连续旋转和良好的井眼净化降低了机械和压差卡钻的可能性。没有固定组件接触套管或井壁。另外,旋转导向技术提高了三维定向控制,其最终结果是能钻出更光滑、更干净、更长的井眼,并且钻得更快,卡钻和井眼净化问题更少(下图)。井眼质量好可降低地层评价和下套管的复杂性,并可降低卡钻的可能性。



▲ 使用泥浆马达与使用PowerDrive Xceed旋转导向系统所钻井眼质量的对比。泥浆马达所钻井眼不规则、井径扩大或成螺旋形(上)。PowerDrive Xceed所钻井眼则比较光滑,井径比较规则(下)。

旋转导向系统的这些优点使其成为许多钻井作业中的基本部分。勘探与生产 (E&P) 公司通常设计出复杂的井眼轨迹来钻穿远距离目标或多个目标，使油气生产最大化。旋转导向钻井可解决的其它挑战包括小块独立油藏、深水油藏、在受到限制的环境中进行开发、远距离钻井平台，甚至一些边际油田（在这些油田中，只有准确定位高质量的井眼才能产生经济效益）<sup>[9]</sup>。在钻井作业中，实用的随钻测井技术能够帮助作业者调整井眼轨迹，充分利用

旋转导向系统的油井定位能力<sup>[10]</sup>。成功钻进需要井下工具在造斜和钻进延伸井段时能承受大的冲击、高温和较强的地层研磨性。

### 软地层中的定向钻井

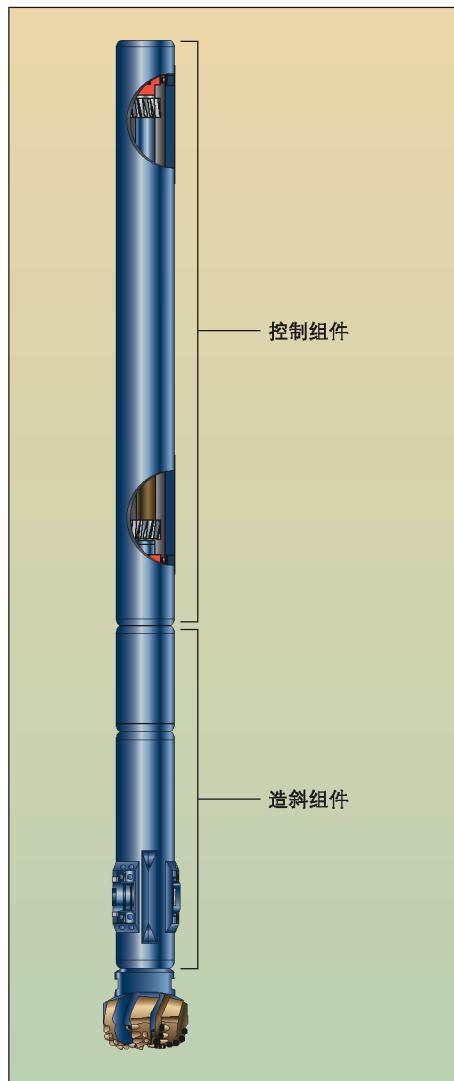
PowerDrive 旋转导向系统能有效可靠地优化各种井眼尺寸下的定向钻井作业。PowerDrive 技术，包括 PowerDrive Xtra 仪器的一个关键方面是整个导向系统以与钻头相同的转速连续旋转（[下图](#)）。仪器对地面命令的即时反应提高

了导向特定目标的能力。近钻头井斜和方位测量使钻工能了解导向命令的效果，从而进一步提高了方位控制能力。最后，同其它 PowerDrive 系统一样，PowerDrive Xtra 装置能处理各种钻井难题，包括利用其方位控制功能精确钻进直井，造斜及钻进大位移井的稳斜段。

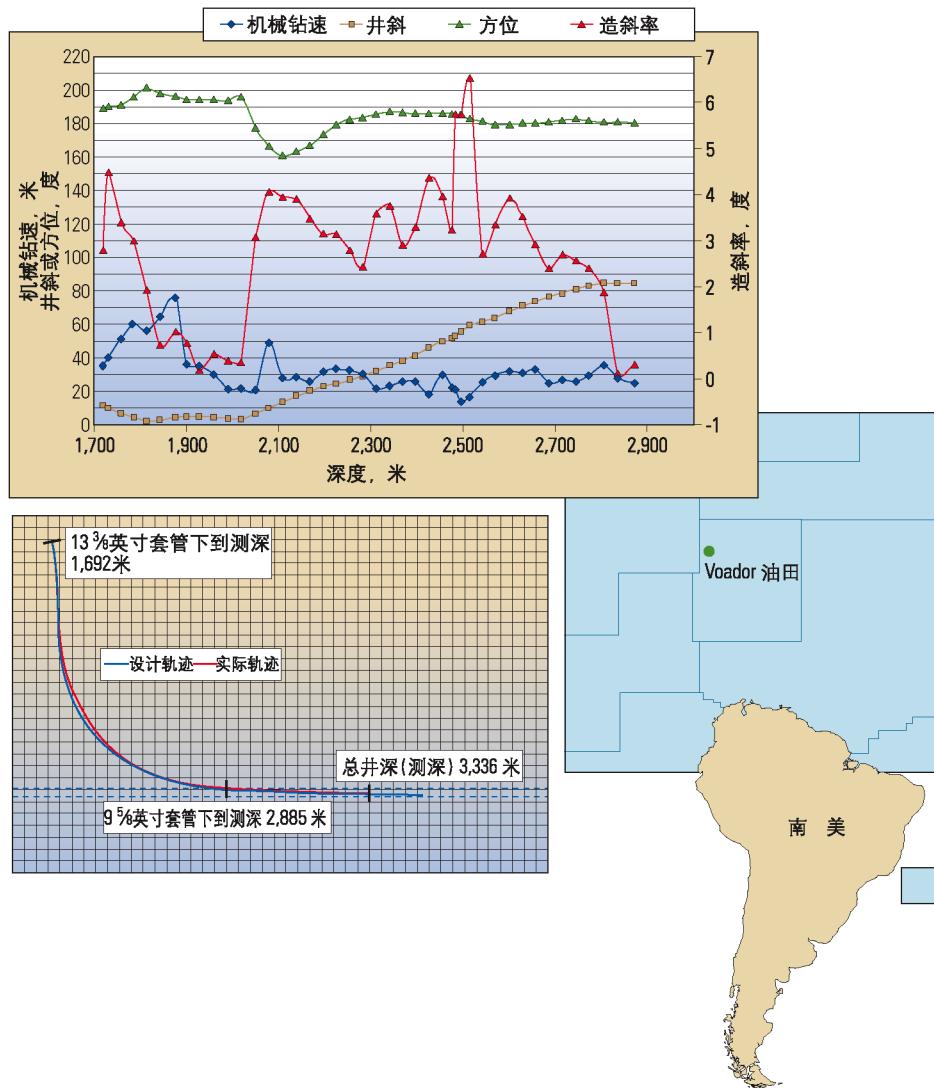
当在巴西海上深水中钻进几乎水平的长井眼时，PowerDrive Xtra 仪器的这些特点显得特别重要。在该地区，很难钻出相对简单的井身剖面，因为地层为软页岩和泥灰岩。钻机费用很高。将 PowerDrive 技术用于巴西深水开发井后， $12\frac{1}{4}$  英寸井段的平均钻机时间减少两天， $8\frac{1}{2}$  英寸井段的平均钻机时间减少一天。在巴西进行的 95 趟入井作业中，没有发生 PowerDrive 仪器落井事故。

在 Voador 油田，巴西国家石油公司钻了一口试验井来确定油藏边界、一口侧钻井来优化稠油的开采（[下一页](#)）。采用 PowerDrive Xtra 仪器钻进最大造斜率为  $6.5^\circ/30$  米 ( $6.5^\circ/100$  英尺)、井斜角达  $84^\circ$  的 7-VD-10HP-RJS 侧钻井眼，按设计钻入目的层，瞬时机械钻速达 75 米/小时 (248 英尺/小时)。采用 PowerDrive Xtra 技术的平均机械钻速为 35 – 40 米/小时 (115 – 131 英尺/小时)，是邻井中导向马达钻速的两倍。另外，旋转导向系统比马达能运转更长的时间，方位控制能力更强，因为马达的摩擦限制了机械钻速。用马达钻进时，随着摩擦的增加，方位控制能力下降。

在软地层中的成功钻进需要的不仅仅是井下仪器。在钻进软地层时，井场工程师可利用 PERFORM 来密切监测钻进参数、钻屑形态、实时阻力和扭矩以及当量循环密度，来确保良好的井眼净化，监测井眼稳定性问题<sup>[10]</sup>。



▲ PowerDrive Xtra 旋转导向系统。控制组件包括电子仪器和传感器，用于控制井眼轨迹。造斜组件对钻头施加力。有几种 PowerDrive Xtra 系统可用于钻进  $5\frac{1}{4}$  英寸到  $18\frac{1}{4}$  英寸的井眼。



▲ 巴西海上 Campos 盆地 Voador 油田（右下）。巴西国家石油公司采用 PowerDrive Xtra 系统钻一口试验井以确定油藏边界、一口侧钻井以优化稠油开采（左下）。最大造斜率为  $6.5^\circ / 30 \text{ 米}$  ( $6.5^\circ / 100 \text{ 英尺}$ )、井斜角达  $84^\circ$  的侧钻井眼按设计钻入目的层（上），平均机械钻速为  $35 - 40 \text{ 米} / \text{小时}$  ( $115 - 131 \text{ 英尺} / \text{小时}$ )，是部署在邻井中的导向马达钻速的两倍。

在地面下载起钻时测得的随钻测井图像。与在不同时间（如钻进过程中）采集的图像对比，这些时移图像证实了页岩井壁存在不稳定问题。其实，钻屑形态及阻力增加已经表明存在稳定性问题。在该井的钻进中，工程师用 PERFORM 程序确定出钻井液密度太低，井眼净化效果不是很好。通过在钻进过程中调整上面两个参数，使该井成功地钻到总井深。

巴西国家石油公司在设计一口靠近盐丘的深水垂直探井（1-RJS-600 井）

时，将 PowerDrive Xtra 技术用于另外一种用途。该公司希望靠近盐丘钻进，盐丘的地层倾角大于  $20^\circ$ ，同时要求油井垂直穿过油藏。保持井眼完全垂直，而不是当井偏斜后再纠斜到垂直，从而钻出更光滑的井眼。光滑的井眼便于下入较大的套管，从而为在后续作业中增下一层备用套管留有余地。尽管可以采用垂直钻井工具完成该井钻进，但巴西国家石油公司希望采用 PowerDrive Xtra 系统以确保钻柱在整个钻进作业中都旋转，同时给钻头施加最大钻压，以保持最高的机械钻速。

8. 有关边际油气田旋转导向钻井实例，请参见：Musa MB, Wai FK 和 Kheng LL: “Fit-for-Purpose Technologies Applications in Commercialising a Marginal Oil Field”, SPE 80462, 发表在 SPE 亚太地区油气会议暨展览会上，印度尼西亚雅加达，2003 年 4 月 15 日 – 17 日。

9. 有关随钻测井与旋转导向系统在油井定位中的应用实例，请参见：Tribe IR, Burns L, Howell PD 和 Dickson R: “Precise Well Placement with Rotary Steerable Systems and Logging-While-Drilling Measurements”, SPE Drilling & Completion, 18 卷, 第 1 期, (2003 年 3 月): 42 – 49。

10. 有关 PERFORM 程序的更多信息，请参见：Aldred W, Plumb D, Bradford I, Cook J, Ghokar 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。

在第一趟下钻开始时, PowerDrive Xtra 系统将井斜角从  $0.47^\circ$  降到  $0.03^\circ$ , 在仪器两趟入井中保持总体井斜  $0.15^\circ$ , 该井比费用核定单中预计的时间提前两天完钻, 节省费用 75 万美元。巴西国家石油公司与斯伦贝谢共同合作, 采用 PowerDrive Xtra 仪器按照技术要求钻井并提前完成油井钻井作业, 提高了该井的经济效益。由于取得了较好效果, 巴西国家石油公司决定, 在 2004 年计划钻进的 100 多口海上油井中, 至少有 40% 的井要采用 PowerDrive Xtra 技术。

### 复杂地层中的裸眼侧钻

在恶劣的钻井环境下钻井眼轨迹复杂的井, 仪器的可靠性、导向能力和耐用性是关键因素。旋转导向系统正好满足这些要求, 因为系统的完全旋转减少了机械卡钻等复杂事故。

用于恶劣环境下的 PowerDrive Xceed 旋转导向系统的可靠性和耐用性使其能钻最难钻的井 (右图)。该系统采用了可靠耐用的 PowerPulse 随钻测量遥测系统的电子仪器, 可运转 1000 小时以上不发生故障。

PowerDrive Xceed 系统的导向能力是由内部导向装置通过传统方法, 即与井壁的三点接触控制的。内部导向装置是完全密封的, 比外部导向装置精度更高, 因为内部导向装置限制了仪器与井眼的相互影响。只有旋转部件与井眼接触, 因此定向钻井是由仪器而不是井眼形状控制的。由于旋转导向系统不受井眼影响, 因此就能钻更复杂的井眼, 能使用双中心钻头钻进, 即使在较高的造

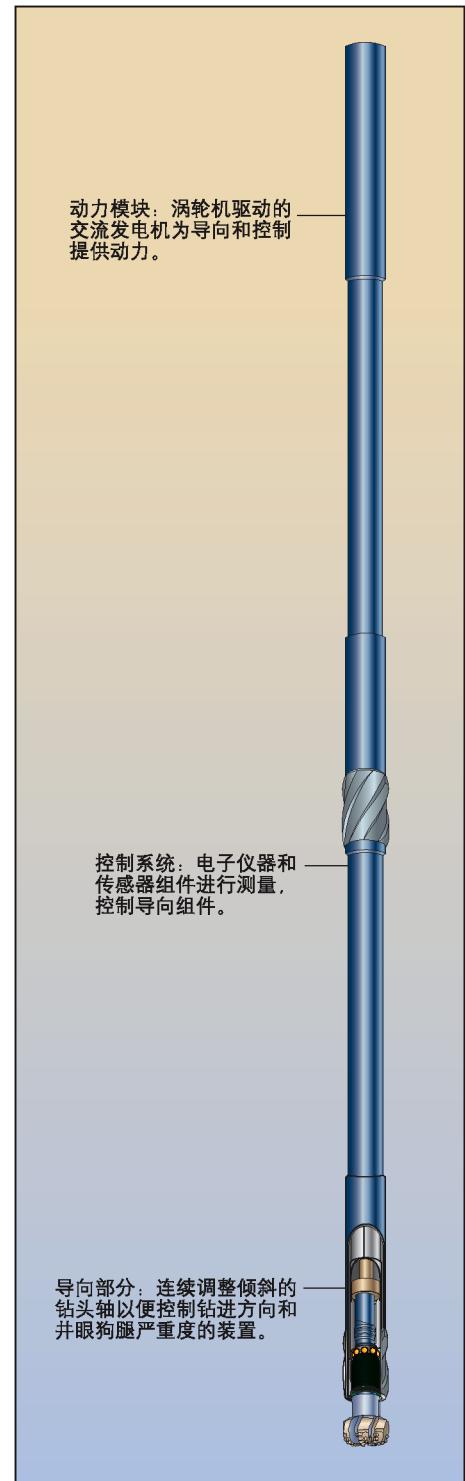
斜率下也能更可靠地进行裸眼井侧钻。另外, 仪器与井眼的有限接触也有利于提高井身质量和机械钻速。

PowerDrive Xceed 系统是专门针对恶劣环境而设计的, 密闭组件和固定内密封件可以保护仪器在井筒温度达  $302^\circ\text{F}$ 、高研磨性地层、各种流体条件及高振动环境下正常运转。仪器与井壁最低限度的接触使仪器几乎不受研磨性地层的磨损影响。另外, 仪器造斜角可达  $8^\circ/100$  英尺 ( $8^\circ/30$  米), 使其能满足任何要求苛刻的井眼轨迹。

旋转导向系统的这些优势在北海挪威海域的 Njord 油田都得到了验证 (下一页)<sup>[11]</sup>。许多断层将油藏分隔为许多必须单独开采的小块, 确定这些小块的位置和延伸范围是一项困难的工作, 一些岩石的研磨性很强, 而另外一些岩石的稳定性则很差。

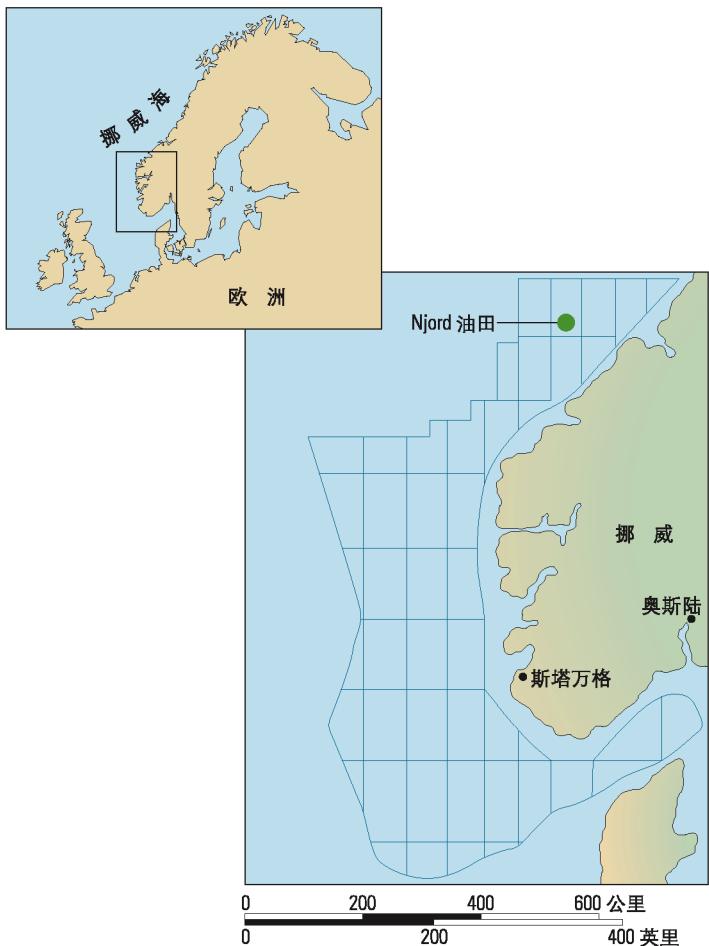
Njord 的作业者 Hydro 公司应用 PowerDrive Xceed 系统在 A-10 BY3H 井进行了裸眼侧钻。该系统在  $91^\circ$  井斜角的裸眼井中成功地进行了侧钻。设计要求将井斜角从  $91^\circ$  降到  $88.5^\circ$ , 同时将方位从  $179^\circ$  扭到  $170^\circ$ 。该井段只用一趟钻就从裸眼侧钻点钻到总井深, 这是该油田以前从未取得的好成绩, 节约了大约两天的钻机时间。

PowerPulse 系统测量了井下振动, 比其它几趟作业中的振动量和程度低, 表明钻井效率得到了提高。当仪器在井下钻进时, 可完成 90% 以上的仪器设置, 这也减少了非生产时间从而提高了效率。



▲ PowerDrive Xceed 旋转导向系统。动力模块为导向和控制系统提供动力, 控制系统包含电子仪器和传感器组件, 进行测量以控制导向组件。导向组件连续调整倾斜的钻头轴, 控制钻进方向和造斜角。

11. 旋转导向系统曾用于在 Njord 油田钻非常复杂的井, 包括一口 W 形的井。更多信息请参见: Downton 等人, 参考文献 5。  
有关 Njord 油田的更多信息, 请参见: [http://www.hydro.com/en/our\\_business/oil\\_energy/production/oil\\_gas\\_norway/njord.html](http://www.hydro.com/en/our_business/oil_energy/production/oil_gas_norway/njord.html) (2004 年 1 月 12 日浏览)。
12. von Flatern R: "Rotary Steerables Ready for the Mainstream", *Offshore Engineer*, 28 卷, 第 4 期, (2003 年 4 月): 32-34, 36。
13. 有关小井眼系统的更多信息, 请参见: Kuyken C, van der Plas K, Frederiks K, Williams M 和 Cockburn C: "Developing and Using Slimhole Rotary Steerable Systems in the North Sea Changing the Economics of Mature Asset Drilling", SPE 83948, 发表在 SPE 欧洲海上研讨会上, 苏格兰阿伯丁, 2003 年 9 月 2 - 5 日。



在该油田，工程师应用实时 adnVISION 方位密度中子图像提高导向能力，钻穿的可开采油藏是先前该油田所钻井的三倍。应用钻头上部4米(13英尺)处的连续井斜测量数据，定向司钻能对现场地质人员要求的油气井设计的变化做出更好的反应。

### 未来的定向钻井技术

勘探与生产公司不断地设计出一些超出已有定向钻井技术能力范围的奇特的井眼轨迹和井身结构，推动定向钻井技术向前发展，同时，想办法在定向作业中尽可能地节约费用，提高作业质量。第一代旋转导向系统的成功极大地增加了其需求量，就斯伦贝谢而言，2003年用斯伦贝谢仪器所钻总进尺的26%都采用了旋转导向系统，多数钻井作业都是在海上，但该技术也应用于陆上作业。行业人士认为，旋转导向钻井被广泛迅速地接受和应用，目前它已成为一项主流技术<sup>[12]</sup>。

小井眼旋转导向系统，如 PowerDrive Xtra 475 仪器，已经展示出了其操作和经济方面的优势，特别是在小井眼的产量限制不是问题的老油田中应用时<sup>[13]</sup>。与足尺寸的仪器一样，小井眼仪器也具有连续旋转所带来的机械优势，同时还具有能节约钻井液、水泥和其它材料的经济优势。由于井筒容积小，小井眼钻井还能减少钻屑量和钻屑处理费用。随着越来越多的油田进入开发中后期，小井眼旋转导向钻井将具有更加重要的作用，因为该技术能提高效益并降低费用。

在将来，旋转导向技术必须满足作业者对更高机械钻速的要求。机动旋转导向仪器可满足这一要求。其它改进将使该技术更可靠、更高效。最终，“套管鞋到套管鞋”旋转导向钻井将使作业者能在一趟钻中钻出套管鞋并继续钻进至下一个套管鞋深度。目前石油行业非生产钻井时间费用约为每年50亿美元，旋转导向系统将是消除或减少这一费用的关键技术。— GMG