

## 增加钻井动力 提高钻井速度

一种新型旋转导向钻井系统集成了一个能将循环流体的液压能转换成旋转力矩的动力部分。这种新型设备创造了新的机械钻速记录。与其它先进的旋转导向系统一样,这种高性能技术的优点在于,能以钻柱速度连续旋转,从而尽量避免出现卡钻和打滑现象,提高了效率。

**Pierantonio Copercini**  
**Frag Soliman**  
Belayim 石油公司(Petrobrel)  
埃及开罗

**Mohamed El Gamal**  
埃及 Kattamia

**Wayne Longstreet**  
**Jon Rodd**  
**Mark Sarssam**  
Dragon 石油公司  
阿拉伯联合酋长国迪拜

**Iain McCourt**  
阿塞拜疆巴库

**Barry Persad**  
**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: 美国得克萨斯州 Sugar Land 的 Emma Bloor, Phil Coffman, Liz Hutton, Steve Siswanto 和 Pipine Widjaya; 加拿大艾伯塔省卡尔加里的 Erik Christiaansen; 英国 Bottesford 的 Tony Pink, 以及英国 Stonehouse 的 Brian Stevens 和 Paul Wilkie。

adnVISION (方位密度中子仪), NODAL, PowerDrive vortex 和 SlimPulse 等是斯伦贝谢公司的商标。

经济、效率、环保和安全都是石油工业最重要的目标。实现这些目标的关键通常在于新技术的开发和应用,对于钻井作业中的目标而言尤其如此。钻井人员和油田的其他人员一样都在不懈地追求新的技术。虽然旋转导向系统发展迅速并不断创造机械钻速新的纪录,钻井人员仍然在寻求新的技术来进一步加快钻井过程。这样做的目的有很多,其中之一就是明显缩短钻机时间和减少费用,使用能为钻头提供更大动力的旋转导向系统可以实现这一目标。

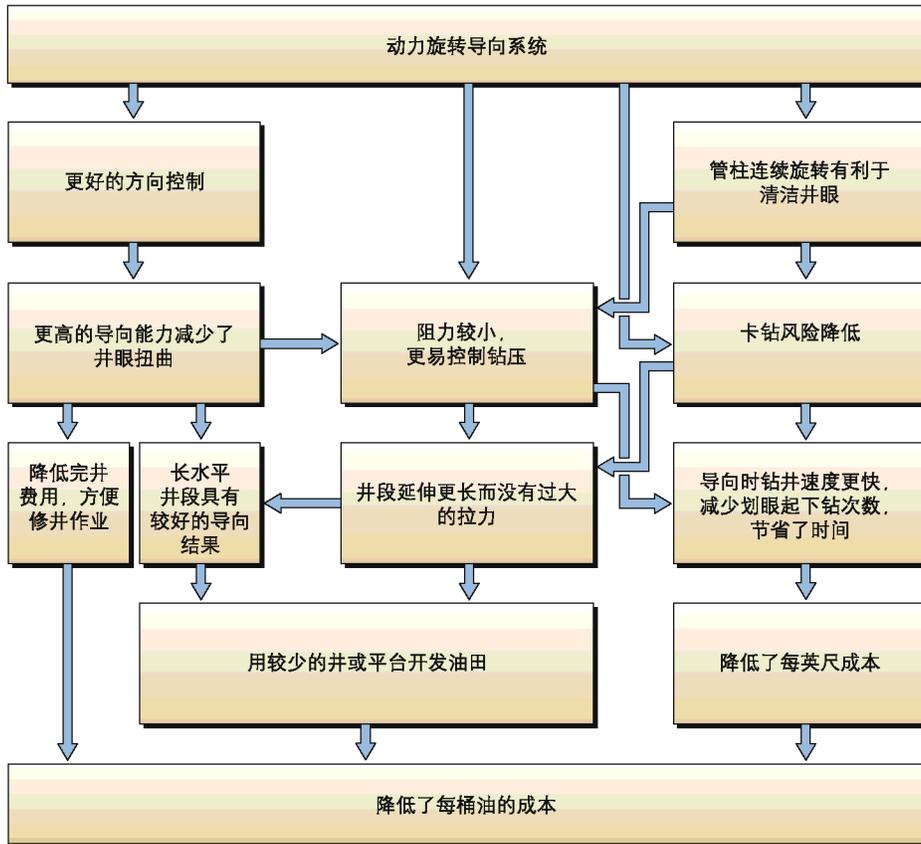
先进的钻井技术还带来了一些间接的益处,比如通过防止钻杆与套管的接触时间太长而减少了套管磨损(下一页,左图)。新技术还帮助钻井人员缩短地层暴露时间—钻井和地层评价之间的时间,从而减少了钻井液对地层的侵入影响,并能简化岩石物理评价。缩短钻井和下套管之间的时间意味着井眼变差的时间缩短,假如这段时间超过某一限度,下套管的难度就会增加。在很多情况下,加速建井过程意味着油气井投产的时间会更早。

然而,除了上述优点之外,钻井工程师也需考虑快速钻井的缺点,主要

缺点是如果钻井作业不谨慎,就可能导致井眼质量变差。另外,钻机的泥浆系统和泵本身具有特定的井眼清洁能力,不应该超出这一能力。如果通过高流速清洁井眼,可能会导致水力侵蚀。必须对泥浆特性和流速进行权衡,以确保井眼的稳定性。如果忽视其它因素而片面追求速度,可能会失去对钻井方向的控制。

《油田新技术》杂志近期刊登的文章对以下技术进行了介绍,包括旋转导向系统(RSS),这种系统钻长水平井段时的方向控制性能很好;一种为恶劣环境开发的系统,使用了双中心钻头并能在软地层中钻井,以及一种直井钻井系统<sup>19</sup>。斯伦贝谢公司所有旋转导向系统的一个共同特点是所有外部组件能够连续旋转(下一页,右图)。

最新的旋转导向系统增加了一个集成的井下马达,可提高机械钻速(ROP)。该系统非常适于快速钻进长直井段或定向井段。本文对动力旋转导向系统的特殊技术要求以及工具开发人员如何满足这些要求进行了讨论。通过里海、埃及以及加拿大等地的应用实例来说明使用这种先进旋转导向系统的优越性。



▲ 先进钻井技术的优越性。先进的钻井技术，如动力旋转导向系统，可降低每桶油的成本。



▲ 适用于大小不同的井眼。各种类型的旋转导向系统应有尽有，可钻进的井眼直径范围从5.75英寸到26英寸。

### 提高钻速的必要性

早期的定向钻井系统为井下马达配备了一个可调整的弯外壳，钻井人员通过钻柱上的这一部件改变井眼轨迹。利用这些底部钻具组合（BHA）钻井时，钻井模式在滑动钻井和旋转钻井之间交替，因此会钻出低质量或螺旋状井眼。采用滑动钻井模式时，钻机并不旋转钻柱，钻头靠井下马达驱动旋转。在钻柱（不旋转）沿井眼较低侧向前推进的过程中，摩擦力（阻力）不断增大<sup>[2]</sup>。滑动方式下的钻速通常较低，而且一直存在机械卡钻和压差卡钻问题。

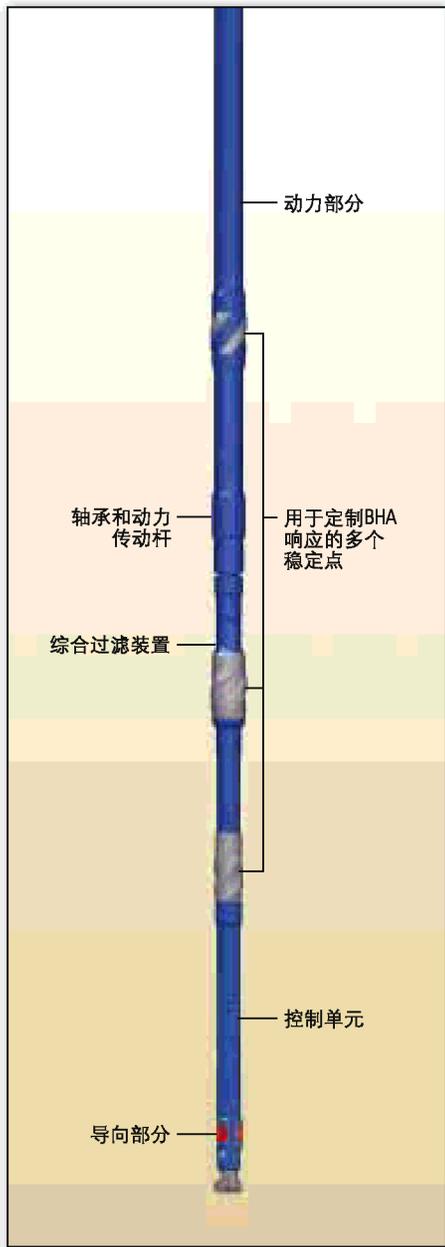
旋转导向系统一出现就大大提高了机械钻速，并且明显改善了井眼质量，同时还降低了机械卡钻事故。这些

现象引起钻井工程师的思考，他们考虑将旋转导向系统和井下马达结合起来。然而这种结合并不是件轻而易举的事：井下马达的轴承和传递系统必须有足够的强度才能承受住下部旋转导向系统的重量。另外，井下马达的动力部分必须能控制转速，使其不超过旋转导向系统转速上限，如果超过旋转导向系统转速上限，方向控制更加困难，而且井眼轨迹也会受到影响。

将井下马达和旋转导向系统集成在一起具有许多优点，如机械钻速较高，能使用破岩能力更强的钻头。在环境敏感度高的地区，只有用井下动力系统驱动旋转导向系统才能消除超标的钻机噪音。

考虑到上述种种好处，斯伦贝谢公司的科学家和工程师们就开始着手研制动力旋转导向系统。他们努力的成果就是PowerDrive vorteX动力旋转导向系统的问世。

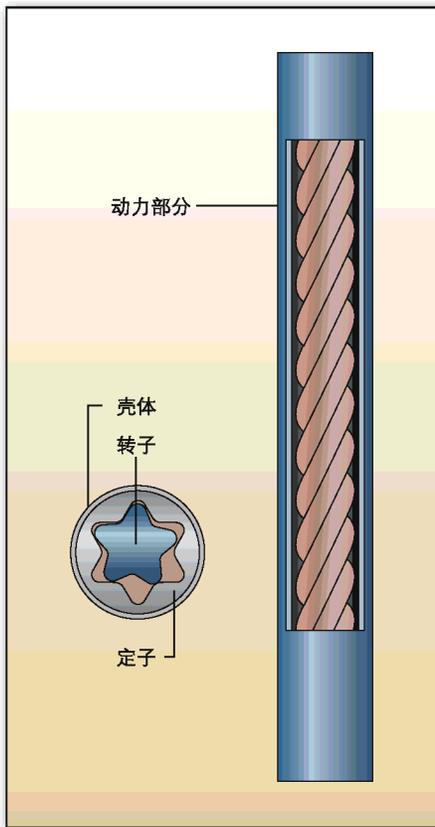
1. Williams M: “旋转导向钻井新技术的应用”，《油田新技术》，16卷，第1期（2004年春季刊）：4-9。  
Brusco G, Lewis P 和 Williams M: “垂直钻井新技术”，《油田新技术》，16卷，第3期（2004年秋季刊）：14-17。
2. 有关滑动钻进模式更多的信息，请参见：Maidla E 和 Haci M: “Understanding Torque: The Key to Slide-Drilling Directional Wells”，IADC/SPE 87162，发表在 IADC/SPE 钻井会议上，达拉斯，2004年3月2-4日。



▲ 动力旋转导向系统的组成部分。9.625英寸的工具可钻12.25到22英寸的井眼，6.75英寸的工具可钻8.5英寸的井眼。

## 功能强大的钻井技术

PowerDrive vorteX 系统具有一套快速定向钻井的独特本领(上图)。它的四个主要部件为：动力部分；过滤器、轴承和传送部分；控制单元和导向部分。工程师集成动力部分和旋转导向工具的前提是开发出井下马达用的轴承和传送部分，这一部分既要能承受旋转导向工具的附加重量，又要能承受由于要提高



▲ 动力部分。转子在定子内部转动，将液压能转换成机械能。不同叶片数目的转子的速度和输出扭矩也不相同。图中所示为5:6动力部分，其中转子有5个叶片。

钻速而在地面施加的额外钻压(WOB)或负荷。该系统的其它部件则继续采用早期旋转导向工具的可靠技术。

动力部分将钻井液的液压能转换成机械能作用在钻头上。钻井液进入动力部分时驱动转子(上图)。传送轴非常坚固，可满足该旋转导向系统的要求，可将转子扭矩传递到驱动轴上，而驱动轴则驱动旋转导向工具和钻头。特制的转子密封橡胶不仅能提高流体效率，而且与以前的橡胶材料相比，它对钻井泥浆的化学腐蚀及高温的抵抗能力更强。

改变动力部分的配置很简单，只需要改用有不同叶片数量的转子。转子上叶片的数目越多，转子的速度越低、扭矩越大。目前最常用的配置为7:8动力部分，其中转子有7个叶片，转速小于或等于130转/分钟(rpm)，可产生大约20000英尺-磅力(27.12焦)的扭矩

(不包括地面钻机产生的扭矩)。

旋转导向系统中的轴承和传送部分都能将转子和定子的扭矩传递给控制单元。PowerDrive vorteX 系统所用的轴承比较大，它可将更高的扭矩与负荷从转子传递到钻头。过滤器短节能防止循环流体中的碎屑与控制单元接触，避免干扰工具的正常运转。

控制单元和导向部分决定井眼轨迹。各种稳定方案允许工程师选择适当的底部钻具组合，以获得期望的定向结果。

有了这些有效的调整手段，该系统有了更广阔的市场。到目前为止，在工程师们追求更高机械钻速的高水平钻井作业中，有将近90%是靠PowerDrive vorteX 系统的非凡动力实现的。

在大约5%的应用中，由于小扭矩、低转速或小排量循环泵限制了钻机的功能，所以，PowerDrive vorteX 成为理想之选。对于需要降低地面钻机转速减小套管磨损的情况，该系统也能胜任，因为它能依靠井下动力部分驱动钻头，同时，它的旋转导向工具和井壁的接触面积很小，也可减少套管磨损。

在钻井人员努力提高效率而又需要控制震动的情况下，该系统也非常适合。例如，钻头可能出现卡钻/滑脱，在解卡前，钻头暂时会被卡死。尽量减小这些影响及其它可能降低钻井速度和损坏底部钻具组合的影响可提高钻井效率。

机械卡钻的问题涉及整个钻柱而不仅仅是钻头。虽然与井壁接触面积最小的设备能降低出现机械卡钻的机率，但避免机械卡钻的关键是清洁井眼。使用PowerDrive vorteX 系统可降低卡钻风险，因为所有旋转部件的转速至少和钻柱一样快<sup>[3]</sup>。

除了旋转导向系统的一般特征(如高钻速、高效率和优异的定向控制能力)之外，PowerDrive vorteX 系统还优化了聚晶金刚石复合片(PDC)钻头的性能<sup>[4]</sup>。较高的输出扭矩使PDC钻头更有力，进一步提高了机械钻速。

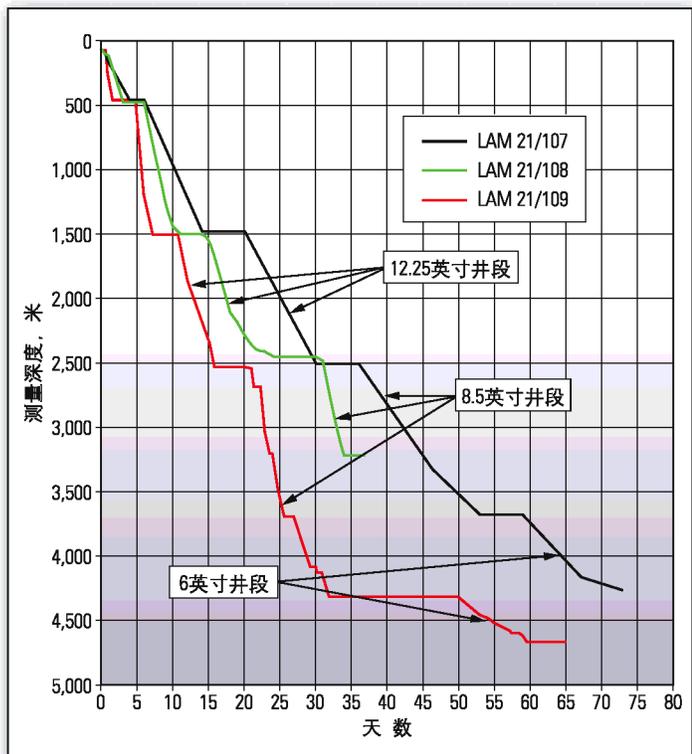
## 里海地区避免压差卡钻实例

在 Dragon 石油公司对里海海域土库曼斯坦近海 Cheleken 区块 LAM 油田的二次开发过程中, 先进的旋转导向系统起了关键作用。在二十世纪八十年代利用俄罗斯的钻井技术对该油田进行了首次开发。2001年, Dragon 石油公司开始钻加密井进行二次开发, 最近钻了四口井, 这是 2003 年 11 月开始的一个连续钻井项目的一部分。

从 LAM 21 生产平台上钻了几口 S 形井, 以便开采 Red Series 油藏中的石油。该油藏由晚中新统到早上新统的砂岩和泥岩夹层组成。斯伦贝谢公司被选中为开发井提供定向钻井、随钻测量 (MWD)、随钻测井 (LWD) 和电缆测井等服务。在 Cheleken 区块钻井通常要求每口井在接近其总深度 (TD) 处的每个井段的上部保持较高的正压, 这主要是因为油藏压力过高以及厚度等原因, 经常出现压差卡钻。

Dragon 石油公司为四口开发井中的第二口 LAM 21/107 选择了带有井下马达的常规定向钻具组合。定向钻具组合在 Red Series 油藏中容易增斜, 因此, 为了更好地控制井眼轨迹, 钻井人员减小了钻压 (WOB), 这降低了机械钻速, 进而又增加了压差卡钻的风险, 采用滑动方式钻井时更是如此。该公司最终因为潜在的压差卡钻问题不再采用任何滑动方式。此外, 钻井过程中该井自然偏移量是  $3^{\circ}/30$  米 ( $3^{\circ}/100$  英尺), 表明该井的井眼轨迹有超出目的层允许范围的倾向。

Dragon 石油公司邀请斯伦贝谢公司优化其它三口井的钻井程序。斯伦贝谢的工程师建议使用 PowerDrive vorteX 系统来解决几个问题。首先, 动力旋转导向系统能保持在 Dragon 石油公司指定的高转速。机械钻速较高时, 钻井时间相应缩短, 井眼上部的套管磨损也会随之减轻。最后, 使用整体旋转钻井系统消除了滑动方式, 会大大降低压差卡钻的风险。



▲ 里海的快速钻井实例。在 LAM 油田用 PowerDrive vorteX 系统钻开发井节省了数天钻机时间。LAM 21/107 (黑色曲线) 使用了常规井下马达进行钻井。LAM 21/108 井 (绿色曲线) 的 8.5 英寸井段和 LAM 21/109 井 (红色曲线) 的 12.25 英寸井段和 8.5 英寸井段使用了动力旋转导向系统, 机械钻速比 LAM 21/107 井所用的常规容积式马达系统快。

在钻第三口井 (LAM 21/108) 时, Dragon 石油公司使用了 PowerDrive vorteX 系统, 仅用 66 小时就钻出 772 米 (2533 英尺) 8.5 英寸的井眼。相比之下, 标准的容积式马达 (PDM) 系统要用 10 天的时间才能钻完该井段 (上图)。

除了机械钻速高之外, 动力旋转导向系统在 600 米 (1970 英尺) 长的井段中保持垂直, 90% 的井段倾角小于  $0.5^{\circ}$ 。为了减少井眼稳定性问题, 这些井在油藏中的轨迹一般是垂直的或小角度的。在 LAM 21/108 井, 使用 PowerDrive vorteX 系统节省了将近 7 天的钻机时间。

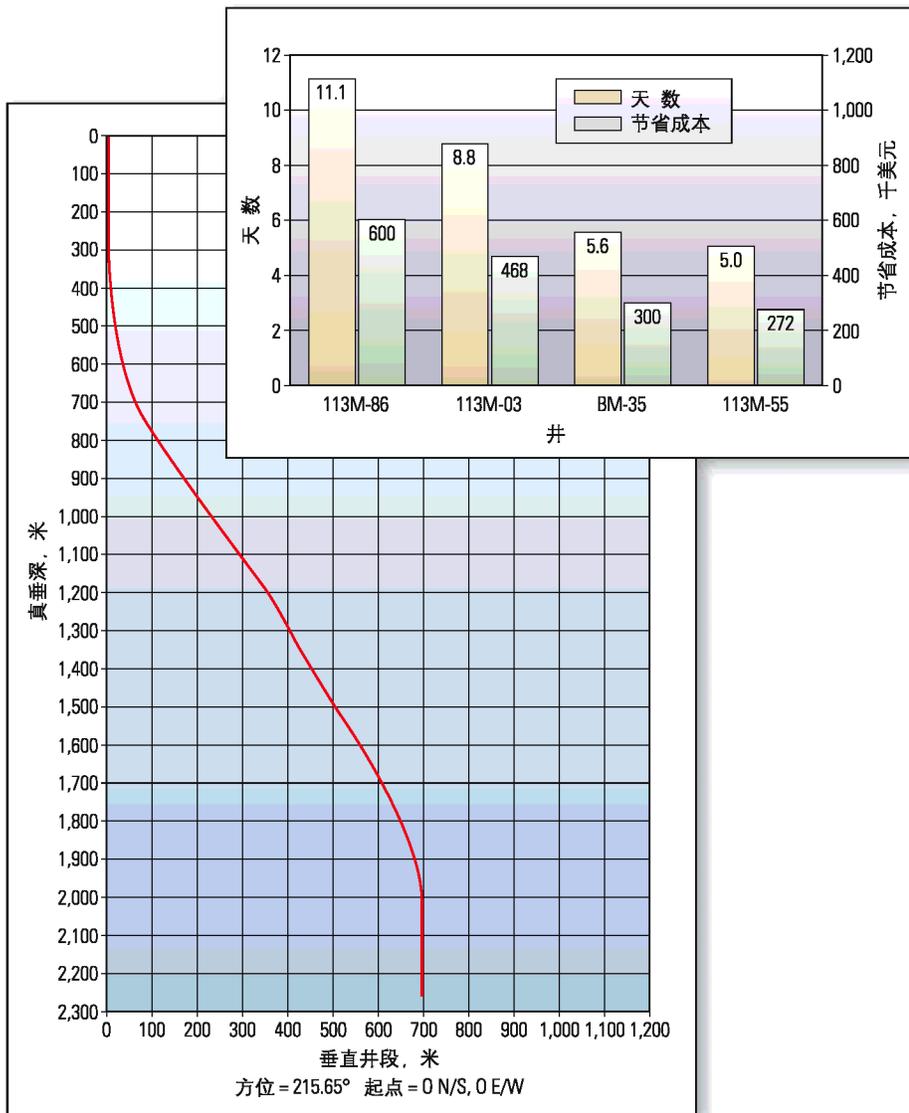
LAM 平台上的第四口井 (LAM 21/109) 也使用了 PowerDrive vorteX 系统。在该井钻井过程中, 12.25 英寸井段的机械钻速为 204 米/天 (669 英尺/天), 8.5 英寸井段的机械钻速为 175 米/天 (574 英尺/天)。动力旋转导向系统节省了将近 9 天的钻机时间。

Dragon 石油公司计划以在 LAM 21 平台上钻二次开发井的经验为基础, 在 LAM 10 平台上继续开展钻井项目。PowerDrive vorteX 系统将被用于钻 12.25 英寸和 8.5 英寸的井段。钻机和钻杆升级后, PowerDrive vorteX 系统也能用来钻 6 英寸井段。

## 埃及老油田开发实例

Belayim 石油公司 (Petrobel) 是埃尼公司和埃及石油总公司 (EGPC) 成立的合资企业。该公司在苏伊士湾埃及近海的 Bylayim Marine 老油田一直利用 PowerDrive vorteX 系统提供更强的动力和足够的转速来钻进硬石膏夹层。

3. 位于动力部分以下的底部钻具组合部件的转速等于钻柱转速和地面转速之和。
4. 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。



▲ Belayim Marine 油田的定向钻井。Petrobel 公司 S 形 113M-86 井 (下) 的真垂直深 (TVD) 达到 2730 米 (8960 英尺)。在使用 PowerDrive vortex 系统所钻的四口井中, Petrobel 公司估计每口井至少缩短 5 天的钻机时间, 每口井共计节省 27.2 万美元到 60 万美元 (上)。

该油田发现于 1961 年, 由砂岩、泥岩薄互层组成, 这给钻采作业带来诸多挑战, 例如, 钻井时泥浆漏失严重、易发生压差卡钻, 生产时地层损害明显等<sup>[5]</sup>。

在该油田四十年的开发与开采过程中, Petrobel 公司采用了多种先进的技术来提高产量, 包括优化钻井液、钻头和导向技术, 利用 NODAL 程序进行生产系统分析、采取增产措施和进行重新射孔作业等<sup>[6]</sup>。

该公司近期钻了几口新的定向井以提高驱油效率。增加新井的关键在于将成本控制在油田经济限度内。为

了达到技术和经济目标, Petrobel 公司决定采用 PowerDrive vortex 技术。在钻这些井之前, 工程师们对常规泥浆马达和 PowerDrive vortex 系统进行了模拟试验, 他们发现与泥浆马达系统相比, 动力旋转导向系统的机械钻速可提高 123%。2003 年 1 月开始的作业是 PowerDrive vortex 技术在埃及的第一次应用, 实践证明该动力导向系统非常有效地避免了卡钻 / 滑脱问题。

113M-86 井的目标层是 Kareem 地层, 使用 PowerDrive vortex 系统节省了 10 天的钻机时间—节省的费用共计 60 万美元。机械钻速比该油田以前的最高记

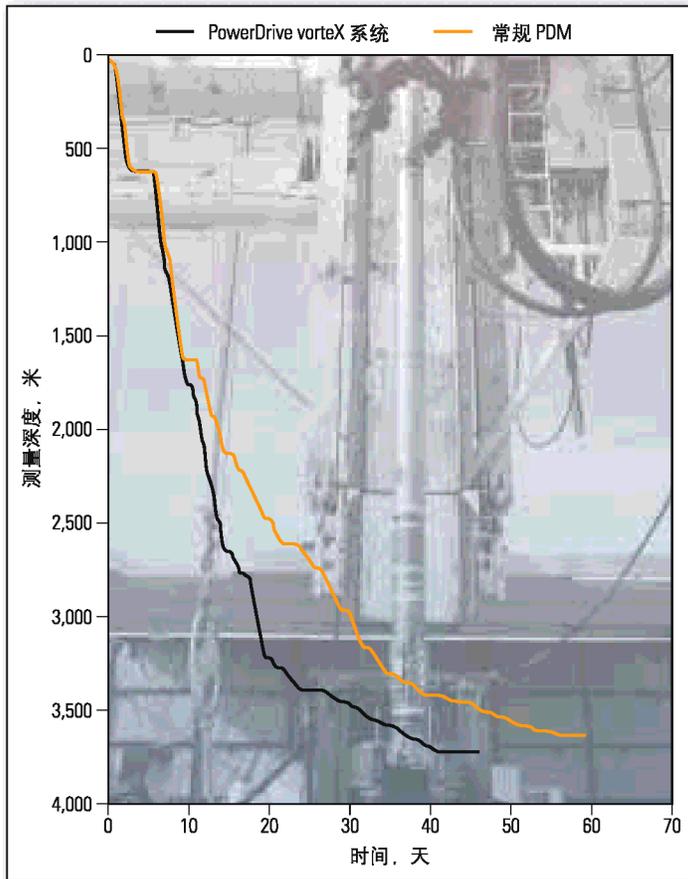
录高 47%。另外, 仅用一次下钻就钻完 12.25 英寸井段, 井眼轨迹与设计非常接近。在钻其它三口井时, 动力旋转导向系统为每口井至少节省了 5 天钻机时间 (左图)。有鉴于此, Petrobel 公司计划以后继续使用 PowerDrive vortex 系统。

### 在高倾角地层中钻长分支井

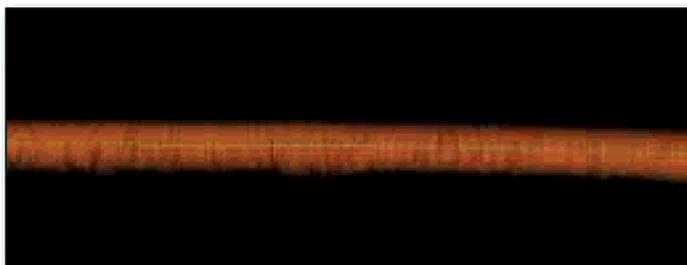
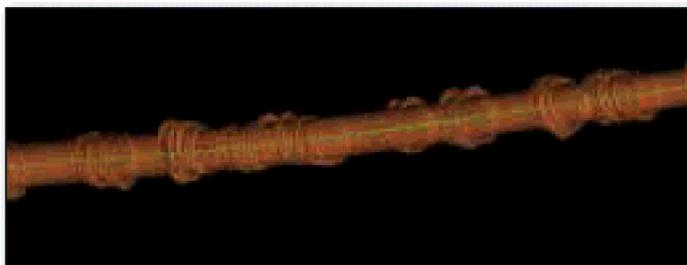
在加拿大艾伯特省山麓地区的某油田, 一家作业公司正在钻长水平井来生产天然气。根据此类井的方案设计, 必须用能够以 1.0°/30 米造斜率造出 15° 斜角的设备钻穿表层套管鞋, 然后在高倾角地层中钻 2260 米 (7415 英尺) 的切线段。

为了更高效地钻进增斜段和切线段, 斯伦贝谢公司建议将 PowerDrive vortex 系统和 SlimPulse 第三代小井眼 MWD 工具结合起来使用。动力旋转导向系统的高机械钻速只是其中一个重要因素, 作业公司还希望系统可在高倾角地层中保持理想的井眼轨迹, 而无需像普通 PDM 组合那样采用滑动钻进模式。另外, 该公司还想将地面转速控制在每分钟 30 到 60 转, 以降低旋转引起的套管磨损。

- Elshahawi H, Siso S, Samir M 和 Safwat M: "Production Enhancement in the Belayim Fields: Case Histories", SPE 68688, 发表在 SPE 亚太石油和天然气会议暨展览会上, 雅加达, 2001 年 4 月 17-19。  
Essa WM: "Optimizing Drilling Parameters Enhances Horizontal Drilling Performance," IADC/SPE 72881, 发表在 IADC/SPE 中东钻井技术大会暨展览会上, 巴林, 2001 年 10 月 22-24。
- NODAL 是一种用于动态预测的分析工具, 它考虑了各种因素, 其中包括完井和生产系统, 用于优化完井设计以适应油藏的生产能力, 识别生产系统中的不利因素或限制条件, 确认提高开采效率的各种措施。
- 有关旋转导向系统的技术和应用更深入的讨论, 请参见: Ghiselin D: "Steering Technology Takes a Leap", *Hart's E&P*, 76 卷, 第 10 期 (2003 年 10 月): 79。  
Hartley F: "Rotary Steerable Systems Provide Advantages, Opportunities", *Offshore*, 64 卷, 第 4 期 (2004 年 4 月): 66, 67-70, 72, 74。
- The New Age of Drilling: From Art To A Science* 中的 "Working Together To Solve Problems", *Hart's E&P* 增刊。休斯敦: Hart 能源出版公司 (2004 年 2 月): 16。



▲ 定向钻井结果。这张时间-深度图对在山麓地区利用 PowerDrive vortexX 进行的作业（黑色）和利用常规容积式马达（黄色）进行的一次速度较快的作业进行了比较。当到达长切线井段的终点时，前者的钻井时间大约缩短了12天。



▲ 动力旋转导向系统能钻出更光滑的井眼。adnVISION 方位密度中子仪所测出的井眼形状密度成像证实，容积式马达系统钻出的井眼（上）比 PowerDrive vortexX 系统钻出的光滑井眼（下）要不规则得多。

PowerDrive vortexX 系统能够更有效地将钻压传给钻头，并能使用破岩能力更强的钻头，由此提高了机械钻速（左图）。

动力旋转导向系统可节省时间和资金，体现在以下几个方面。高机械钻速节省了12天的钻机占用时间，因此节省的资金为40多万加元。它钻出的井眼比使用井下马达系统钻出的井眼更光滑，起下套管变得更快、更容易（左下图）。与邻井相比，该井的扩眼时间缩短了56小时。

和许多成功的油田作业一样，单独一种工具的使用并不是成功的唯一因素。在本实例中，详尽的规划、底部钻具组合的优化设计、出色的团队工作都是取得成功的重要因素。

### 未来的发展

PowerDrive vortexX 系统将一体式动力部分和井下钻具组合结合在一起，其中，井下钻具组合的转速至少和钻杆一样快。在钻机费率较高的地区，机械钻速的提高非常重要。在钻机能力限制钻井效率的低成本钻井作业中，这种技术也显著提高作业效率。PowerDrive vortexX 系统可在地层坚硬、不稳定或深度大（或所有这些因素同时存在）而且目的层限制严格的条件下钻出复杂井眼，从而大大提高了其它旋转导向系统的功能<sup>①</sup>。

业界可能会继续开发更多旋转导向系统。正如本文所述，2001年首次使用的 PowerDrive vortexX 系统直径是9英寸，能钻12.25英寸井眼，到2003年就有了部件完全集成的系统，现在已经有了直径为6.75英寸能钻8.5英寸井眼的系统。

目前正在开发一种高输出性能的钻井马达，将与 PowerDrive vortexX 系统进行集成，它的特点是在金属上覆盖很薄的一层橡胶，不论马达内部的流体压力有多大，都能比单独使用橡胶材料更不易变形。这将使新型马达能更有效地从地面传递更高的钻压，钻井速度更快、效率更高。然而，这种新型马达要求钻机压力更高，并能处理在高机械钻速条件产生的钻屑量。

除了斯伦贝谢在努力研发之外，BP、壳牌和挪威国家石油公司等都在投资开发基于 PowerDrive vortexX 系统的超小直径旋转导向系统（请参见“旋转导向技术：突破极限”，第1页）<sup>②</sup>。在突破技术限制方面，技术开发人员和钻井工程师一样契而不舍。 — GMG