

随钻测量技术的现状及其 在勘探开发钻井中的应用

M. Gearhart, et al.
Gearhart Industries Inc.

李克向 译

摘 要

当今,随钻测量(MWD)在国际市场上已广泛地应用于服务性工业中。由于此项技术已经成熟,问题焦点已经从遥测新技术移到测量技术本身了。MWD能测量什么?怎样能使测量的信息资料有价值?

MWD过去应用最广的和掌握得最好的是定向井测量。MWD测量的及时性和准确性已经证明在控制难度大的定向井中是确有价值的。MWD用于地质测量正在不断增长。MWD不仅用于选择标准层,但也可用于钻一定进尺的单独测井。在探井中,最接近于自然特性的测井排除了实时决定中的一些推测。并且在未受损害的井眼中所取得的测量的质量能改进测井解释。通过许多有关效率,安全和钻井控制的MWD的传感器也可以连续进行评价。

引 言

七十年代末,MWD首次在商业上使用,MWD在工业上服务已增至近300套。至少有五家公司可提供国际服务,另外有几家公司在局部地区进行商业使用,或者仍在研制和试验之中。所有的公司都在为估计1985年约二亿美元的市场正在进行竞争,且年增长率为15%到20%。

MWD最早在技术上成功是在一些主要作业公司的研究项目中取得的^[1-3]。这些公司中的几家^[2-3],用电导体把电能供给井下测量仪器,然后将测量结果送回地面。这项技术现在称为“硬线”,“硬线”在历史上起过重要作用,这是因为从那些测量中得到了资料,并且这项成功促进了许多公司发展商业的MWD系统。“硬线”技术可提供比已知的任何MWD遥测技术更高的传输速度,并且不需要井下电源,但是因为这种设备的昂贵和笨重,许多服务公司在技术上还没有能形成有竞争力的服务。

现在商业(工业)上所采用的随钻测量技术称为泥浆脉冲遥测技术,因为经过井底部钻具的泥浆流的压力降被调节后产生信号。在地面上,安装在立管上的压力传感器和一个接受器接收井下工具产生的压力波动。还有一些系统正在研制中,是用低频率的电磁波经过大地传送到地面天线,这通称为电磁遥测技术。因为在这两种情况下,是没有电缆的,井下工

具必须从电池或泥浆流驱动的发电机得到电力。

在泥浆遥测技术中有各种产生压力调制的方法[4]，有些系统用旁通阀使一部分泥浆通过钻铤壁排入环形空间。因为在立管上产生压力降，所以称谓“负脉冲”。另外的一些MWD系统是根据限制泥浆流在立管上瞬时增加压力，称为“正脉冲”系统。压力限制的一种特殊情况，有一对齿轮，轴向和钻柱成一直线，一个齿轮转动，一个静止。当转动后，两个齿轮彼此的齿处可通过流体时，一个恒定频率的压力波就被输入到钻杆中，靠那个波的相位变换将信息编码，这项技术有个外号叫“泥浆报警器”。

在过去六年中，改进MWD系统的努力集中在：1) 更高的可靠性；2) 适应多种钻井条件下作业的可能性；3) 改进遥测的可靠性。所有这些技术之间并不是彼此孤立的；特别是钻井条件变化大既影响系统本身的可靠性又影响遥测的成功。

为了解传感器和MWD仪的设计，切记作业时的环境和受到的限制是非常重要的。十分幸运地在一个压力壳筒内工作的那些传感器只须能承受钻柱下部遇到的冲击、振动和高温。而必须在钻铤外面的那些传感器就要承受所有以上那些影响，还要加上压力、化学作用和泥浆腐蚀，再加上由钻屑和井壁的刮挤而产生的偶尔磨损。传感器和电子元件必须体积小才能做成组合件装在钻铤内和钻铤上，而不致损害它的强度。MWD仪可在浅井或深井作业，也可在中等温度或高温、高排量或低排量、使用堵漏材料或不用堵漏材料时作业。MWD仪必须可在一定范围的钻铤尺寸内使用。由于MWD仪有时可能掉入井内，因此制造成本要低廉。

由于既有了较好的编码技术，又增加正常噪音源的许可值，已经改进了遥测技术的可靠性。泥浆遥测技术的噪音是由泥浆流动压力变化引起的，它包括来自泥浆泵、容积式井下马达，以及在钻头牙齿周围粘性大（gumbo）的页岩形成的泥包。为了对付泥浆泵噪音，特别是双缸双作用泵噪音，有些MWD公司特别重视缓冲器或在泵上加传感器，它有助于信号处理。近代的遥测设备（永远满足不了许多有兴趣研究者的需要），在低到中等范围钻速时，可提供质量好的岩性测量和适当的钻井控制。图1表示满足典型要求所需要的数据率。

定 向 测 量

最早在商业上提供使用、目前被证明最成功的就是定向测量。为测量方位，MWD公司通常使用测斜仪，这种测斜仪是根据经久耐用的惯性加速器和固体（磁通门）磁力仪做成的，这两种仪器相结合，不但价格不贵，而且证明在恶劣的井下条件是相当可靠的，并能测得很精确的结果。然而，即使传感器原理很相同，而不同的MWD公司则使用不同程序校正工具和计算最后的答案。

MWD最好的市场之一是用于定向井掌握方向。最初由于这种工具比有线随钻测量数据传输速度低，曾遇到了一些阻力。不过定向井人员已习惯于较低的数据传输速度，并且MWD公司将它们又做了某些改进。由于在许多情况下MWD定向费用也较低，所以已经在几个市场领域内全部取代了有线随钻测量服务。

不管定向是否是定向井测量的一部分，当两个常常交叉的条件之一占优势时MWD趋向有利，即：1) 损失时间的费用很高；2) 需要特别掌握准确性或井眼轨迹控制。例如加利福尼亚东Wilmington油田是众所周知要求有严格的定向控制[5]。图2是沿着一段井眼圆柱

体看到的限定井眼轨迹的一个例子。在这样条件下钻井可以很快地证明这种最大限度地控制井的好处。MWD 对任何定向系统都能提交和留下一个好的测试。另外一个例子就是1984年加拿大SPE文章^[6]中报导了对定向井需要有准确地控制。在个别油田上,由于自然发生的断裂的趋向错过了目的层而丢掉了油层的损失是很大的。根据钻井时间和设备价格,几种定向测量方法的费用与那些损失的比较及其结果如表1所示。结论是用最精确的MWD测量费用是最少的。更为人们熟知的另一个例子是在钻水平井时用MWD作定向测量可提供最有用的定向控制^[7,8]。

MWD测井在钻机日费用高的基础上,在经济上是合算的,这种情况通常没有详细地作过评价和报告。MWD测量费用包括每天进行的测量次数、测一次的时间、和单位时间钻机的费用。因为单点测斜仪测斜大约需要近十五分钟时间,每增加1000英尺井深,需增加十分钟时间。对于钻机日费用贵的情况下,一般单点测斜仪测斜的费用可能远远超过MWD作相当测量的费用。

有几篇文章已经比较了MWD和磁力的或陀螺的单点测斜仪和多点测斜仪的效果。文章均表明MWD的精确度是能满足需要的,少数文章^[9]表明他们已详细地检验了MWD的性能,并且表明MWD测井常常是优等的。而且,个别例子说明了它能获得怎样好的效果。最近有一口3050米深的井,不但成本高而且很重要,因此该井要求以最精确的方法进行钻井和测量,用MWD测量计算的井底位置和用惯性工具测量的结果其误差在6.1米之内。

地 层 评 价

地 面 要 求

随着用MWD测量地层的出现,钻机上增加了一整套新的传感器,以便保持井下测量位置的轨迹。实际上拥有MWD的公司已采用来自泥浆录井仪的深度追踪技术,对于这一代泥浆录井仪,已进行测量的是钻头深度和钻速,主要的测量是方钻杆(或游动滑车)的高度,但其他地面传感器可用来帮助确定什么时候要加钻杆立根。常用的测量包括大钩负荷,泵速或立管压力,以及转盘转速。

伽 马 射 线 测 井

伽马射线测井是测量岩石的自然伽马放射性。两种类型的传感器是Geiger Mueller管和闪烁晶体-光电倍增管的组合。这两种传感器具有不同的灵敏度和强度。但是不管选择那种传感器,只要用得适当,测量结果将基本上是相同的。

因为在电缆测井时,自然伽马是一个岩性指示,也是一个重要的对比测井,在MWD测井中,它常被用做深度对比工具,在选择取心位置和套管鞋位置时对认识标准层方面是很有价值的。在阿拉斯加北坡地区有一个例子, Kuparuk 砂岩被 Kalubik 泥岩地层所覆盖,在 Kalubik 上边是很清楚且容易辨认的高放射性地层(HRZ)^[10]。但是 Kalubik 层的厚度变化很大,使 HRZ 层不适合选为取心点。而在过渡带到 Kalubik 层底部在几个感兴趣的层段之上有一个非常均匀的带,在那里只有一个小的放射性标准层,但它仍旧能用 MWD 很容易地识别出来。图3表示标准层在MWD的实时自然伽马测井图上是怎样显示的。

地 层 电 阻 率 测 井

不像定向井传感器那样,所有的传感器都根据相同的原理,也不像自然伽马测井那样,不管选择那种传感器测的结果都一样。目前的地层电阻率测井有三种不同的设计,表2表示这种不同设计的综合比较。第一种设计基本上相当于一个16英寸(400mm)短电位曲线^[11-13],为了对比测井(用伽马射线选择标准层等)已在合适地区用过。在一些有利情况下,它已被作为电阻率的半定量测量曲线使用,可监测地层孔隙压力预计趋势线。第二种是根据电磁波原理设计的^[14,15],地层电阻是根据2兆赫(MHz)的电磁波经过两个相距约6英寸(150毫米)的接受器时的相位差推知的。它是感应式的测井,当泥浆导电率低时工作最好。它受井眼几何形状的影响,在定量测量时比短电位测井成功。第三种也是最新的设计,是具有大的动力范围和很好的井眼几何形状特点的侧向测井。

已经设计的这种侧向测井的仪器是放在靠近钻头附近,除主要进行侧向测井之外,它也能从下部的屏蔽电极测电阻率。图4表明仪器电流的分布。下部屏蔽电极包住从钻头面发射出的电流,因此它测量的是钻头前面那部分地层。尤其是,在渗透性地层和侵入很快的情况下,这个读出值是主要测量的一个预告。钻头测量实际上是很接近地层的真实值的。图5为常规的双感应和三侧向(LL₃)仪器相比的特性曲线。在这个例子中,下部电极包括一个特殊转换接头和钻头。这意味着电极比预期的长,而且钻头测量的垂直方向的分辨率比主要测量的分辨率明显地要差一些。它也能增加地层遭受流体侵入的时间,因此,在深感应测井真实读数和MWD测量的读数之间有差别。

孔 隙 度 测 井

剩下的基本地层评价测井就是孔隙度测井,至少已经有了自然伽马测井和电阻率测井,而正在进行研制有关孔隙度测井仪的那些MWD卖主有些犹豫不决,因此,到现在还没有一个有工业价值的孔隙度测井仪。

MWD地层测井的应用

除鉴别标准层之外,MWD地层评价测井在开发钻井工作中是有用的。MWD测井的效果必须能充分满足正常井眼测井的要求。在部分井段,确需要进行所有的测井以作对比,这种情况经常是能碰到的;第二个要求就是使用MWD测井比各种仪器便宜。举个例子就是1984年欧洲石油会议的论文^[17]介绍了满足这两方面的要求的情况。由于上部井眼,通常设计要有一个导眼,电测后再扩大井眼。使用MWD测井,作业者对钻井、测井和扩眼均可一次进行。另一种会遇到的情况是在很大角度的定向井中,在钻井下中层套管的井眼时使用MWD可以将打钻和测井一次进行,此后,只需要压下或泵入测井仪测产层。

然而,MWD测井最重要的市场也许是勘探钻井,这是因为探井钻进中及时有效地获得井下资料是很重要的。常说的好处之一就是,及早地识别所关心的地层,能在最小的损害条件下进行地层测试。MWD测井能消除为证实一些在电测中出现没预计到的反常现象的电测工作,在电缆测井工作完成之前有可能失去一些地层资料,而MWD测井确实可提供大量的和重要的信息。当沿地质构造边缘钻井时(像盐丘),MWD测井可较早地对错的井眼轨迹提出警告。为达到了解井下真实岩性目的,MWD测井能最早的和在最少损害井眼的条件下得出测

井结果。

最后要指出的优点是，在原来的井眼中有可能常常单独重复使用MWD测井。要求对它给出一个定量值是不容易的，但是它的精确性是很容易证明的，这是不能轻易忽视的。因为工业上已经开始使用MWD测井，它已经发现了一些由于井眼扩大用电缆测井未曾识别出来的标准层和构造。同样，已经遇到的薄的含烃低产层，由于流体侵入对探测深度浅的仪器的影响和许多深探测仪器的反应不好两者的综合影响，电缆测井没能识别出这些低产层。这两者不论那一个对校正探井的地质解释是相当重要的。

钻井效率、安全和控制

MWD在定向井测量和地层评价中应用均已实现和讨论过，因为它们已被人们熟知，它们在市面上的价值可从它们的作用中分别进行分析。事实上包括以上两项的几乎所有的钻井测量均可列入“钻井效率，安全和控制”的范畴内。但是在这篇文章中将用这个题目全部包揽所剩下的每项内容。这里有几项测量是新的，从另一方面看，即使是少数，但已形成市场。

井下力的分析（在钻铤上进行力的测量）

每当讨论使用MWD提高钻井效率时，立刻会使人想到井下受力问题。在MWD开始研究后，最初的动机是研究大斜度井中的真实钻压问题。从广义上说，井下力包括：

钻压，假静止；

钻压，振动；

扭力，假静止；

扭力，振动；

其它，如弯曲力矩等。

在假静止测量和振动测量之间寻找差异要比传感器本身的物理原理的差异更多些。假静止的读值通常是从一秒钟到一分钟时间内的平均值；振动的数据常可根据受转盘速度控制的频率范围内找到。

泥浆（对泥浆做基本测量）

钻井上的主要安全之一就是要解决地层流体的侵入问题，MWD有可能通过测量和检测井下泥浆性能的变化提出早期警报。在泥浆中能做的特殊的测量包括：

电阻率；

密度；

硫化氢含量；

温度；

压力。

经常被提到的作为地层测井解释用的泥浆电阻率传感器已经有了。有可能将来某日为MWD研制出一种可行的流体密度传感器。但是我们还不知道哪种好的办法能确定硫化氢的含量。几家公司有几种测量温度的方法，虽然它与环空泥浆相连，也许有点远。此外，泥浆

温度本身是地层热量、钻井能量和泥浆变化过程的一个特别复杂的函数。用压力传感器已有了一些经验，环空数值可给出实际当量循环泥浆密度的真实读值。

涡轮钻井转速计

用MWD进行钻井控制测量的一个例子就是在1984年欧洲石油会议论文中^[18]报导的涡轮转速系统。图6表示一家涡轮钻具制造商怎样在涡轮轴顶端安装一块磁铁改造了一个工具。于是，MWD公司装一个传感器，它可从磁铁上检测出转动磁场，并将信号传输到地面。在试验项目中，壳牌公司研究人员发现一个未预计到的止推轴承中能量值损失；仅仅这个发现就可使涡轮轴承有改进，并且可制造出更好的涡轮钻具。对各家MWD公司来说更为重要的是，他们推断通过了解真实的井下无法控制的转速和调节钻压以获得最大功率，有可能得到比以前的技术高一倍的钻速。图7是涡轮速度在各种钻压控制状况下的钻井记录。

效率和安全测量的应用

现在暂时先不考虑涡轮速度。主张进行这些测量的人希望检测或避免无数的钻井问题，如：

- 可能发生卡钻
- 携带钻屑或井眼清洁不够好
- 钻头牙齿或切削刃磨损
- 钻头轴承问题
- 钻头或稳定器泥包
- 地层水的侵入
- 碳氢化合物的侵入
- 过量的漏失

列了这么多的项目可使得测量有吸引力，也能导致它的跨台。因为很难检验这些数据和很难推断实际上会引起异常反应的问题。已经发表的大多数判断，如果说不是所有的话，都是在事后认识的信心下做出的。如考虑流体侵入，地层水可引起泥浆电阻率降低；而碳氢化合物可引起泥浆电阻率升高。气体可使泥浆比重降低，但实行负平衡钻井提高钻速会增加固相含量，因而又造成比重升高。况且，大多数气侵是在泥浆遥测工具不起作用时在起下钻过程中发生的。

当录井对深度显示时，这些测量数据的有几项最容易进行评价，这意味着深度追踪传感器必须安放在适当的位置，因为解释时常常要和地面的其他传感器进行比较。所有这些会增加复杂性和服务费用。

当然，这些测量方法的研究和各种模式的改进已经取得了一些进展，而且很可能会有一些测量方法将证明其真实价值。遗憾的是，很感兴趣的一些测量如钻压和扭矩受到了各种争论和问题的刺激，曾有一度说，不再需要MWD了，因此只需生产很小批量的MWD。例如，为评价泥浆润滑剂的效果仅需要短时间下井就行了。当用某些传感器进行定向测量或地层评价服务时将会证明是有价值的。然而在这方面既不清楚那些传感器将证明是合理的，也不清楚如何使用它们。

结 论

MWD正从新颖的油田实践进入过渡期。这些测量方法正处在继续革新和不断作出评价的过程中。所有的MWD服务公司为了提供可靠且低成本的服务和高质量的测量均在努力工作。

其余的钻井工业公司，特别是作业公司，在未来将起更大的作用。当新的测量方法提供使用时，它们就必须经过试验和评价。评价新测量方法时，必须把它们的现状告诉能从现场服务得益的人，并训练他们以发挥其潜力。

参 考 文 献

1. Patton, B. J.; Cravley, W.; Codbey, J. K.; Sexton, J. H.; Hawk, D. E.; Slover, V.R.; and Harrell, J. W.: "Development and Successful Testing of a Continuous Wave Logging-While-Drilling Telemetry System." Journal of Petroleum Technology, (Oct., 1977) 1215-1221.
2. Denison, E.B.: "High Data-Rate Drilling Telemetry System," Journal of Petroleum Technology, (Feb., 1979) 155-163.
3. Robinson, L. H. Jr.; Speers, J. M.; Watkins, L. A. Barry, A.; and Miller, J. F.: "Exxon Completes Wireline Drilling Data Telemetry System," Oil & Gas Journal, (Apr. 14, 1980) 137-148.
4. Gearhart, M.; Ziemer, K. A.; and Knight, O. M.: "Mud Pulse MWD (Measurement-While-Drilling) Systems Report," SPE paper 10053 presented at 56th Fall Technical Conference; San Antonio, Texas; Oct. 5-7, 1981.
5. Clark, D. D. and Barth, J. W.: "Calculator Programs Guide Directionally Drilled Wells Through Tangled Thums Lease," Oil & Gas Journal, (Oct. 10, 1983) 100-112.
6. Johancsik, C. A.; Leraand, A. E.; Petovello, B. G.; Gust, D.A.; and Smith, B. W.: "Application of Measurement While Drilling in a Shallow, Highly Deviated Drilling Program," Petroleum Society of CIM paper 84-35-116 presented at 35th Annual Technical Meeting; Calgary, Alberta, Canada; June 10-13, 1984.
7. Reiss, L. H.; Jourdan, A. P. L.; Giger, F. M.; and Armessen, P. A.: "Offshore and Onshore European Horizontal Wells," OTC paper 4791 presented at the 16th Annual Offshore Technology Conference; Houston, Texas; May 7-9, 1984.
8. MacDonald, R. R.: "Drilling the Cold Lake Horizontal Well Pilot #2," SPE paper 14428 presented at 60th Annual Technical Conference; Las Vegas, Nevada; Sep. 22-25, 1985.
9. Mitrou, T. J.; Stone, F. A.; and McCarter, M. L. and Buss, B.: "A Comparison of Magnetic Single-Shot Instruments With a Directional MWD System," SPE paper 12163 presented at 58th Annual Technical Conference; San Francisco, California; Oct. 5-8, 1983.
10. Carman, G. J. and Hardwick, P.: "Geology and Regional Setting of the Kuparuk Oil Field, Alaska," Oil & Gas Journal, (Nov. 22, 1982) 153-158.
11. Jan, Y-M and Campbell, R. L., Jr.: "Borehole Correction of MWD Gamma Ray and Resistivity Logs," SPWLA paper PP presented at 25th Annual Logging Symposium, June 10-13, 1984.
12. Bates, T. R., Jr. and Martin, C. A.: "Multi-sensor Measurements-While-Drilling Tool Improves Drilling Economics," Oil & Gas Journal, (Mar. 19, 1984) 119-137.
13. Honeybourne, W.: "Formation MWD Benefits Evaluation and Efficiency," Oil & Gas Journal, (Feb. 25, 1985) 83-92.
14. Rodney, P. F.; Wisler, M. M.; Thompson, L. W.; and Meador, R. A.: "The Electromagnetic Wave Resistivity MWD Tool," SPE paper 12167 presented at 58th Annual Technical Conference; San Francisco, California; Oct. 5-8, 1983.
15. Coope, D.; Shen, L. C.; and Huang, F. S. C.: "The Theory of 2 MHz Resistivity Tool and Its Application to Measurement-While-Drilling," The Log Analyst (May-June 1984) 35-45.
16. Gianzero, S.; Chemali, R.; Lin, Y.; Su, S.; and Foster, M.: "A New Resistivity Tool for Measurement-While-Drilling," SPWLA paper A presented at 26th Annual Logging Symposium; Dallas, Texas; June 17-20, 1985.
17. Teige, T. G.; Undersrud, E.; and Rees, M.: "MWD: A Case Study in Applying New Technology in Norwegian Block 34/10," SPE paper 13002 presented at 1984 European Petroleum Conference; London, England; Oct. 25-28, 1984.
18. de Bruijn, H. J.; Kemp, A. J.; and van Dungen, J. C. M.: "The Use of MWD for Turbodrill Performance Optimisation as a Means to Improve Rate of Penetration," SPE paper 13000 presented at 1984 European Petroleum Conference; London, England; Oct. 25-28, 1984.

表 1 中到“S”大斜度井(最大井斜60°)测井费用比较

测 量 系 统	测 井 结 果	仪 器 费 用 (千美元/每口井)	钻 井 时 间 费 用 (千美元/每口井)	作 业 费 用 (千美元/每口井)	总 的 测 量 费 用 (千美元/每口井)
1.磁性单点测斜仪	坏	0	40	1,350	1,390
	最 好	0	40	480	520
2.电子单点测斜仪	最 好	2	40	220	262
3.陀螺单点测斜仪	最 好	40	112	0	152
4.有线随钻测量仪器	最 好	20	60	300	380
5.无线随钻测量仪器	不转动	37	16	300	353
	好	37	16	220	273
	最 好	37	16	0	53

表 2 MWD电阻率设计比较

	短 电 位 测 井	电 磁 波	侧 向 测 井
操作原理	接 触	感 应	接触聚焦
采用年限	1980	1983	1985
测量范围	0.2—20欧姆·米?	0.2—50欧姆·米①	0.2—200欧姆·米
精 度	? 受井眼影响的限制	在20欧姆·米·时为10%① 低 值 好 电子元件受限制	5% 电子元件限制
井 眼 几何形状影响②	弱 典型的视电阻/泥浆电阻 10 : 1	好 低导电率泥浆有利	特 好 典型的视电阻 / 泥浆电阻 精度 10000 : 1
厚度响应	不好确定 一般为30英寸 (760毫米)	18英寸③ (460毫米)	24英寸 (610毫米)
勘测直径②	未 确 定	平均32英寸④ (810毫米)	平均31英寸 (790毫米)
特 征		可在油基泥浆中作业	可在饱和盐水泥浆中作业 可加上钻头测量

注意:

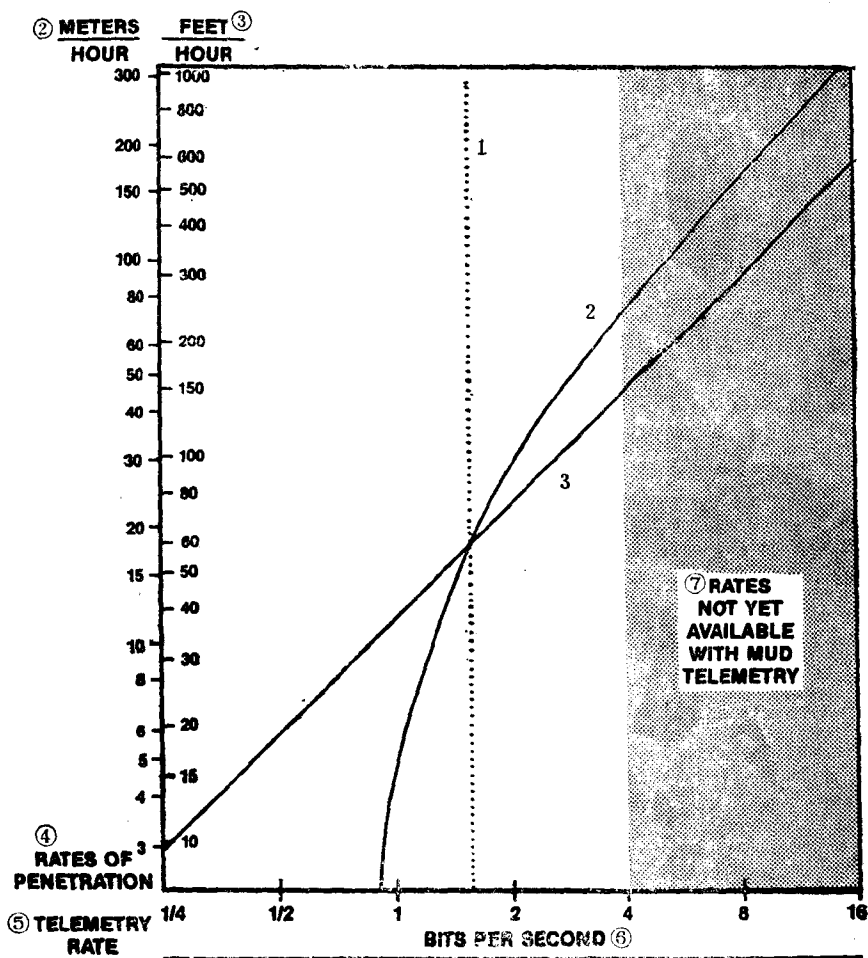
① 如1983年文章所提及的因电子元件而受限制,上限和精确度已有改进。

② 电导率仪器和感应仪器在相同进尺时难以进行比较。

③ 层厚 8 英寸时可显示,但要反映全面的值则要求三倍于接受器的间距: 18英寸(460毫米)。

④ 已发表的一些文章公布的直径达47英寸(1200毫米)。此数字是为了比较以试图解释勘测的直径类似于电导率仪器。

① MINIMUM DATA RATE REQUIRED



曲线 1 — 每15秒1个钻井参数;

曲线 2 — 1英尺 (300mm) 分辨率为4个岩心参数;

曲线 3 — 每30秒1个钻井参数及1英尺 (300mm) 分辨率为2个岩心参数。

假设所有参数是12比特, 总开销为100%。

图 1 岩心资料或钻井控制资料的遥测要求

①最低要求的数据率; ②米, 小时; ③英尺, 小时; ④机械钻速; ⑤遥测速率; ⑥每秒比特; ⑦泥浆遥测无法得到的速率

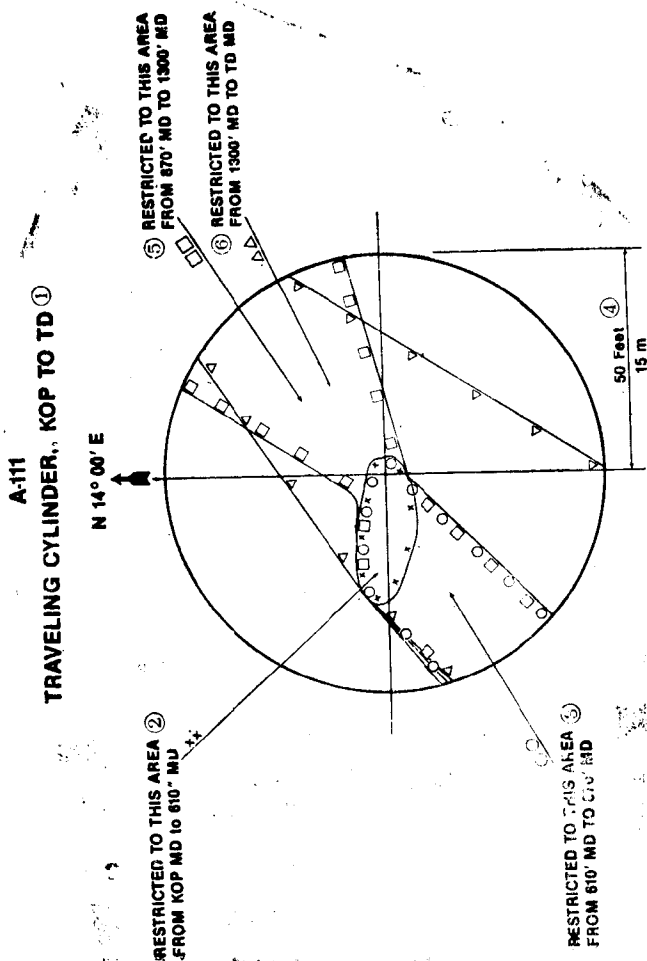
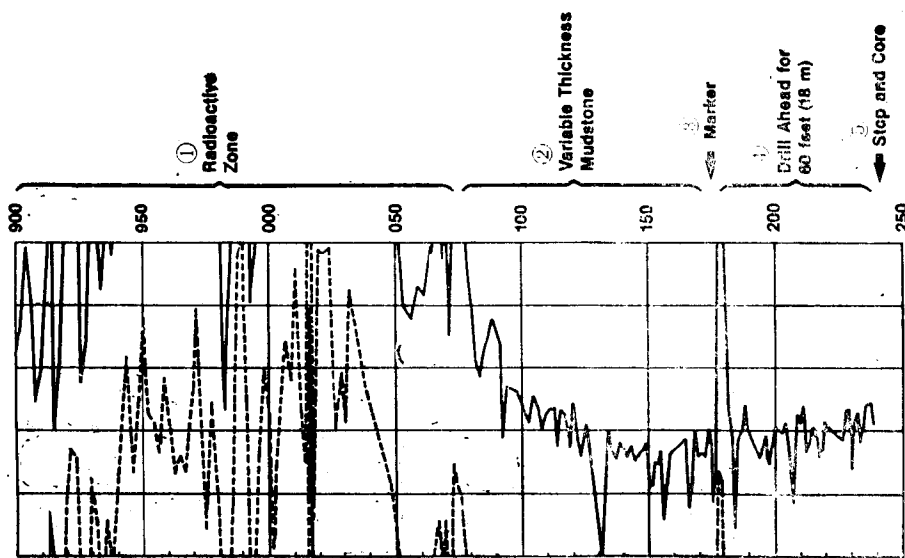


图 2 沿井眼圆柱体可看出限定井眼轨迹的情况

① A-111 井井眼圆柱体, 造斜点至设计井深; ② 造斜点至 610 英尺 (测量深度), 此区受限制;
③ 610 英尺至 870 英尺 (测量深度), 此区受限制; ④ 50 英尺; ⑤ 870 英尺至 1300 英尺 (测量深度),
此区受限制; ⑥ 1300 英尺至设计井深, 此区受限制



GAMMA RAY ⑥

图 3 伽马射线标准层以选择取心位置

① 放射性地层; ② 厚度变化较大的泥岩层; ③ 标准层; ④ 继续钻进 60 英尺 (18 米); ⑤ 停钻并进行取心; ⑥ 伽马射线

LATEROLOG STYLE MWD RESISTIVITY TOOL ①
COMPUTED CURRENT PATTERN ②
IN A HOMOGENEOUS FORMATION ②

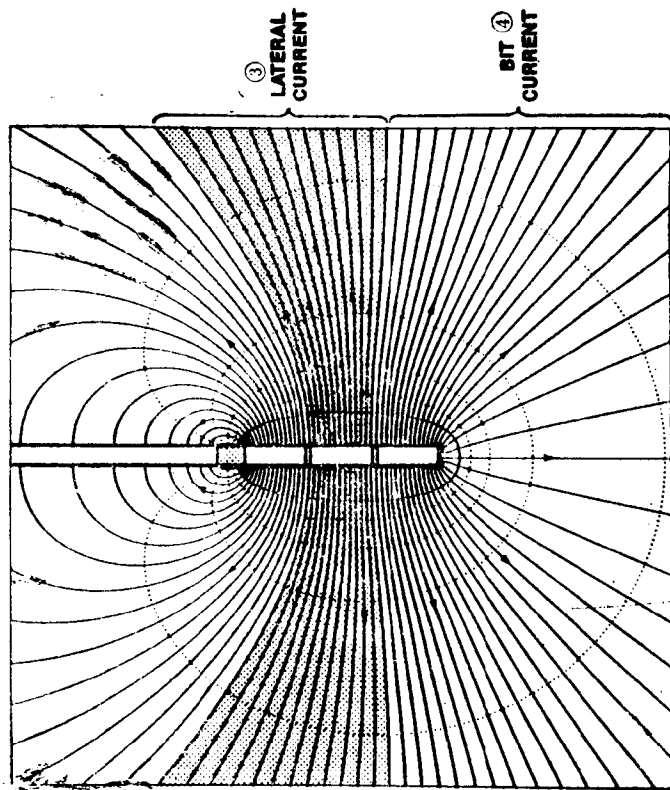


图 4 侧向测井型的电阻率测井仪的电流分布
①侧向测井型的MWD电阻率测井仪; ②某一均质地层的计算的电流样式;
③侧向电流; ④钻头面发射出的电流

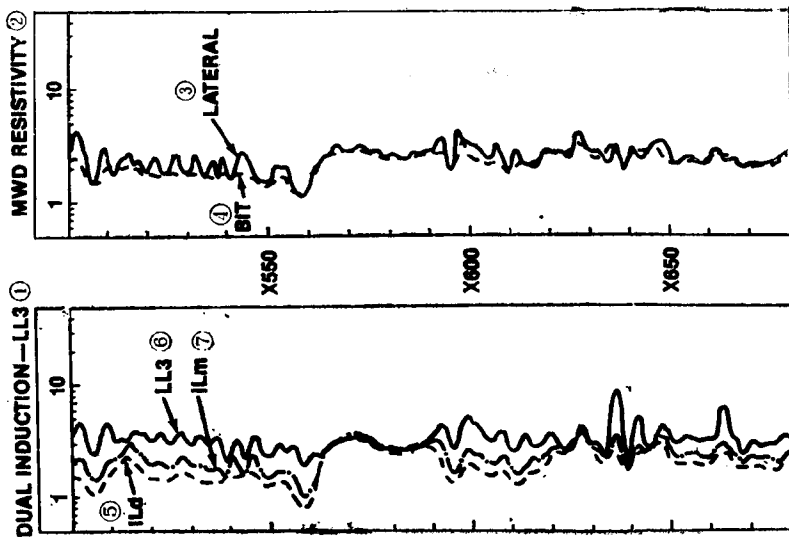


图 5 MWD侧向测井和电缆测井相比的情况
①双感应-LL₃; ②MWD电阻率; ③侧向; ④钻头;
⑤IL_d; ⑥LL₃; ⑦IL_m

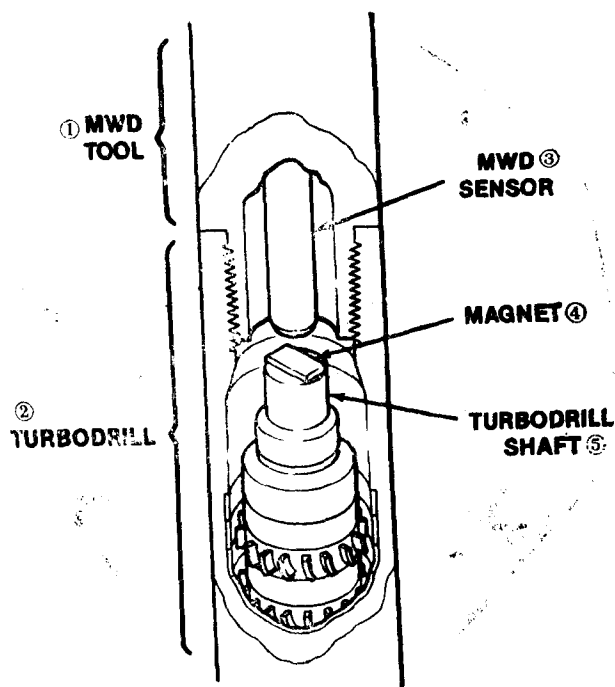


图 6 MWD涡轮钻井转速计系统的设计

①随钻测量仪；②涡轮钻具；③随钻测量传感器；④磁铁；⑤涡轮钻具传动轴
TURBODRILL RPM ⑦ ROP ⑩

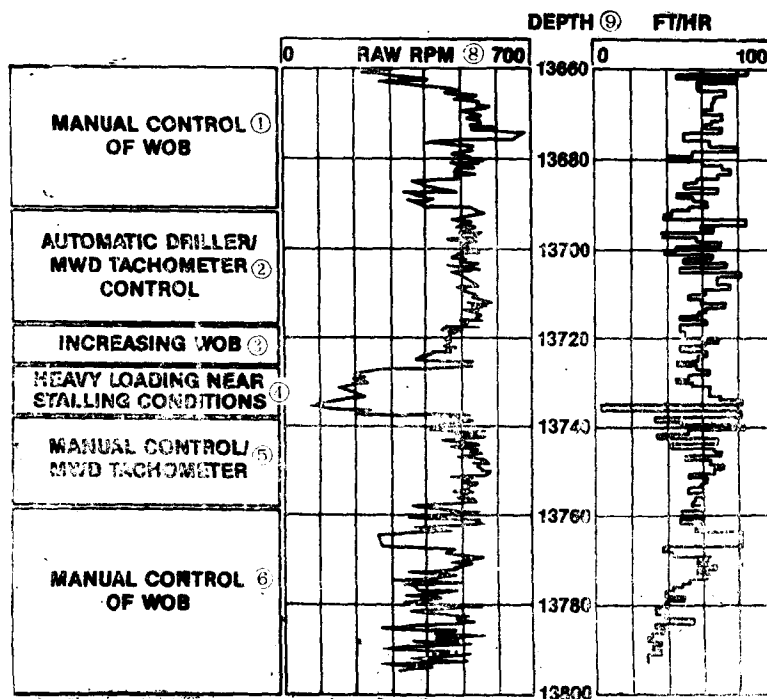


图 7 涡轮钻具对在各种钻压控制状况下的反应

①人为控制钻压；②司钻/MWD转速计自动控制；③增加钻压；④负载过重，接近于停止状态；⑤人为控制/MWD转速计；⑥人为控制钻压；⑦涡轮钻具转速，转/分；⑧原始转速数据，转/分；⑨井深；⑩机械钻速，英尺/小时