

俄罗斯电磁波随钻测量系统(MWD)及其应用前景分析

鄢泰宁, 吴翔, 季锋, 张涛

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 简述了俄罗斯 ZTS 电磁波随钻测量系统的组成、工作原理、发电装置及特点。该系统在俄罗斯及独联体国家应用趋于成熟;而在胜利油田、辽河油田的生产试验中也表明,该系统精度符合我国定向钻井要求,最大遥测深度超过 2400 m。根据试验情况展望了系统的改进及国产化前景。

关键词: 随钻测量;定向钻井;电磁波;俄罗斯;生产试验

中图分类号: P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2007)S1-0052-05

Russian EM-MWD and Analysis of Application Prospects/ YAN Tai-ning, WU Xiang, JI Feng, ZHAN Tao (China University of Geoscience, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: This paper gives a brief introduction of the compositions, operating principle, electric power facility and characteristics of Russian ZTS EM-MWD. This system application in Russian and CIS has been carried to maturity; and the production tests in Shengli Oilfield and Liaohe Oilfield (also) indicated that the system precision conforms to the domestic directional drilling requirement in China with the maximal telemetry depth exceeding 2400 m. Finally, according to tests, the author gives some respects for system improvement and domestic products.

Key words: MWD; directional drilling; electromagnetic wave; Russian; production test

井眼轨道控制技术是现代钻井领域的关键技术之一。近 100 年来,世界井眼轨道控制技术主要经历了“摸着钻”(20 世纪 50 年代以前主要凭经验钻井)、“算着钻”(50~80 年代初,多种力学模型和算法为钻井提供了理论和技术支持,钻井工程由“工艺”进入“科学”,由钻直井发展到定向井、丛式井)和“看着钻”(80~90 年代,随钻测斜仪提高了轨道控制决策的准确性)几个阶段^[1]。随着无线随钻测斜仪(MWD)的推广应用,复杂结构井施工技术得到了迅猛发展。

无线式 MWD 系统的信息传输方式主要有泥浆脉冲和电磁波通道。目前,泥浆脉冲传输方式技术应用最广泛,但数据传输速率较慢,信息量较小,传输信号易受钻井液的质量和泵的不均匀性影响。要求钻井液的含砂量 $\leq 1\%$ 、含气量 $\leq 7\%$ 。当使用可压缩性钻井介质时,会导致压力波信号变形,所以在欠平衡钻井条件下适用性很差。俄罗斯是最早开展电磁波随钻测量系统研制的国家。电磁波传输方式是将反映井底轨迹方向、地层特性参数的低频电磁波信号传送到地面。钻井过程中,钻杆、裸露的井壁和它们之间的空间以及周围的地层共同组成了电磁波传输通道,电磁波从发射源向周围的无限空间辐

射,由固定在钻机旁的地表天线接收。它不需要泥浆作为信号载体,对钻井液的质量和泥浆泵的均匀性要求更低,所以数据传输能力较强。其优点是不需要机械接收装置,系统稳定性好,对于欠平衡钻井工艺有更好的适应性。但背景噪声对信号的影响较大,而且随着岩层对信号的吸收而逐渐减弱,电磁波仪器的最大应用深度因此受到一定限制^[2]。

1 俄罗斯电磁波通道 MWD 系统的技术特征^[2,3]

俄罗斯自 1984 年开始研制电磁波通道 MWD 系统。第一批 ZTS-172M 电磁波式仪器于 1987~1990 年曾在 3 个油田的 20 口井中进行过 92 个井次的生产试验,试验的深度范围 50~2200 m。试验结果表明,与传统技术相比,ZTS 系统在控制定向斜井和水平井轨迹方面具有无可比拟的优越性。

1.1 系统的组成及工作原理

ZTS 系统监测的井底轨迹信息通过电流偶极子型电磁信号通道发送。

ZTS 系统包括井内仪器和地表装置(如图 1),其中井内仪器设计成下部钻具组合的一部分,并与之一起工作,而地表装置用来接收、分离并实时变换和记录有用信号。井内仪器包括方位角传感器、井

收稿日期:2007-05-30

基金项目:科学钻探国家专业实验室 2006 年开放课题“电磁波 MWD 信号传输特性研究”(项目编号:NLSD200603)

作者简介:鄢泰宁(1945-),男(汉族),江西南昌人,中国地质大学(武汉)工程学院教授、博士生导师,国务院特殊津贴获得者,俄罗斯自然科学院外籍院士,探矿工程专业,从事钻探工艺与仪器仪表的教学、科研工作,湖北省武汉市鲁磨路,tnyan@cug.edu.cn。

斜角传感器和带正余弦回转互感器的高边位置传感器,还有信号变换器、电源(涡轮发电机)和信号发送器。一个信号发送电极是钻杆柱,另一个发射电极是下部钻具组合,它们之间被电隔离器绝缘。在离钻机 50~300 m 的范围内往地下打入一根接收天线。遥测系统工作时,在电隔离器的周围、钻柱与接收天线之间的岩石中将有电流通过,在地表装置中接收的信号正是上述电流造成的电位差。接收装置借助相关分析方法处理来自井底的信号,并把测得的参数显示在电脑屏幕上。

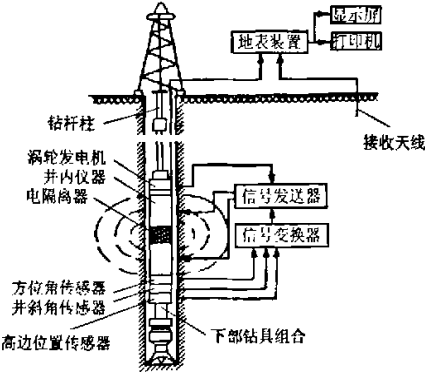


图1 电磁波通道井底遥测系统

系统的主操作界面如图 2 所示,左上角窗口实时显示检测过程曲线。左下角窗口为每 30 s 一组的实测时间、井斜角、方位角和工具面向角的数据,其中考虑到偏斜工具在涡轮或螺杆钻具上震动剧烈,所以每次显示 4 组工具面向角的数据。该窗口还可显示地层电阻率、井底涡轮发电机转速等参数。右下角窗口为实测的工具面向角,如果井眼轨迹超出设定的绿色扇形区将自动报警。右上角窗口内可随时输入当前井次的注释文字,其它数据信息。电磁波 MWD 系统的井内仪器结构如图 3 所示。为了防止钻井液中的残渣和金属屑污染和堵塞发电机的涡轮,在井内仪器的上方安装了过滤器。

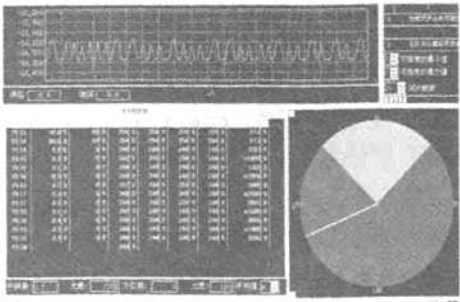


图2 电磁波通道井底遥测系统的主操作界面

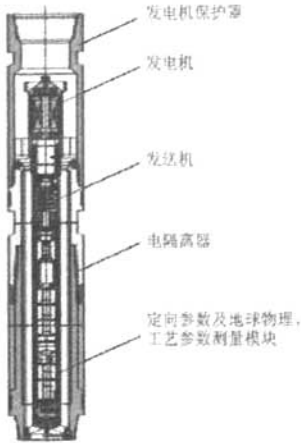


图3 遥测系统井内仪器结构

该系统曾在西西伯利亚地区的低电阻率地层中稳定地工作,除了方向参数外,还可记录钻头上的载荷和振动参数,钻进过程中的地球物理信息(伽玛测井和电阻测井)。当时的信号发送井深为 3200 m。

1.2 基本参数

ZTS 系统的主要技术参数见表 1。

表1 ZTS 系统的主要技术参数

参 数	测量范围	误差
井斜角/(°)	0~130	±0.1
方位角/(°)	0~360	±1
工具面向角/(°)	0~360	±1
地层电阻率/(Ω·m)	0~200	
涡轮发电机转速/(r·min ⁻¹)	0~3000	
井底温度/℃	0~125	
最大工作温度/℃	125	
最大静水压力/MPa	50	
泵量/(L·s ⁻¹)	7~70	
钻井液含砂量/%	<3	
发电机大修寿命/h	>400	
遥测系统外径/mm	108,172,195	
遥测系统长度/m	3	
无磁性钻链长度/m	4	
遥测系统外壳材料	无磁钢	

1.3 电磁波通道井底遥测系统的发电装置

俄罗斯地平线公司生产的用于电磁波遥测系统的井底涡轮发电机主要技术参数见表 2。其结构特点是:发电机的定子为轴向静止状态,而外壳中固定磁铁起转子作用。由涡轮驱动外壳旋转,从而形成交变的旋转磁场。

1.4 俄罗斯电磁波通道井底遥测系统的特点

信息传输速度快,泵压波动不影响信息传输;可在泡沫、充气泥浆中使用,已成功用于密度0.5~0.7

表2 三种 ZTS 型涡轮发电机技术参数

型号	功率 /W	遥测系 统直径 /mm	叶片 直径 /mm	长度 /mm	质量 /kg	钻井液泵 量/(L· s ⁻¹)	发电机转 速/(r· min ⁻¹)
SG072	112~1555	172/195	142	600	15.5	25~60	0~
SG073	55~720	172/195	142	560	13.2	25~60	500~
SG074	30~550	108	89	520	9.5	7~20	2500

g/cm³ 泥浆环境中;可用于小井眼侧钻井,有 $\phi 108$ mm 的电磁波 MWD;对泥浆含砂量的要求降低,要求不大于 3%;结构简单,组装、使用方便,井下仪器部分仅 3 m 长;可测量地层电阻率、伽玛等地球物理参数;系统的可扩展性强,可接地球物理参数短节、泥浆脉冲发生器等。

2 俄罗斯电磁波 MWD 系统在油田的应用

2.1 在俄罗斯定向钻井中的应用^[2,3]

2.1.1 例 1

1999 年 11 月,该仪器用于“亚玛尔地质生产公司”的 2030 号钻井,其垂直剖面投影图如图 4。在井深 2503~2818 m 的井段,用了 2 个井次进行造斜,井眼轨迹的井斜角增至 34.5°。经过一段稳斜段后,自井深 3086 m 起井斜角逐渐加大,在垂深 3115.7 m 处没有钻遇预想的含油层。于是在井深 3422 m 处再次造斜使井斜角达 85.6°,终于钻到了设计层位,使井眼轨迹呈正弦波状态,顺利地由含油层中沿水平方向前进。在井深 3756 m 处,用 4 种测斜仪进行了最终校验。通过检测,确认 2030 号井准确地钻达了含油层的深度。结果表明,这种基于电磁波传输的遥测导向仪不仅在钻进过程中,而且在接钻杆停止钻井液循环的情况下,都可保证井眼弯曲参数的正确测量,同时还可记录钻进过程中的岩层视电阻率曲线。

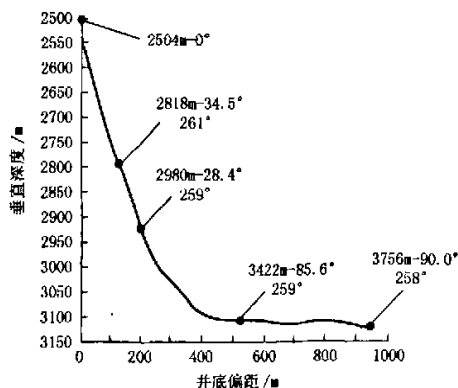


图4 2030 号井的垂直剖面投影图

正是由于钻进过程中使用了基于电磁波遥测导向仪,才使这口井深 3756 m、水平位移 950 m(其中水平井段 450 m)的油井在 19 天的时间内完成了全部水平井段的钻进,而且自造斜段之后的井眼轨迹一直保持方位角在 258°~261°之间,从而达到了沿着油层钻进的目的。

2.1.2 例 2

ZTS 仪器在东卡赞基普斯克油田的应用。东卡赞基普斯克油田 13 号井的井眼方位角设计值为 145.2°,靶区半径 50 m,弯接头 4.7°。采用 ZTS-172M 电磁波随钻测量系统后完成的 13 号井剖面如图 5 所示,其中虚线为设计轨迹,实线为实际轨迹,两者吻合得很好。

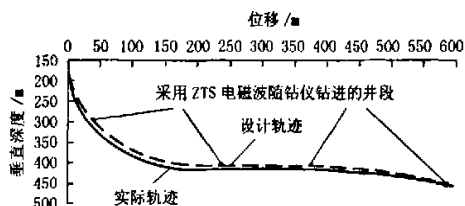


图5 东卡赞基普斯克油田 13 号井的设计轨迹与实际轨迹图

2.2 在中国油田定向钻井中的初步实践

2.2.1 例 3

为检验 ZTS 电磁波式 MWD 对我国钻井工艺及地层的适应性,2003 年 11 月,仪器生产厂家派工程师参与了胜利油田 2 口生产斜井的试验,该处地层电阻率很低($2\sim 4\ \Omega\cdot m$),对电磁波的传播非常不利。辛 110-斜 8 井为直-增-稳型剖面,井底设计垂深 2710 m,造斜率 15°/100 m,最大井斜角 30°49',第一靶点垂深 2640 m,靶区半径 30 m。动力钻具为 1.5°单弯螺杆钻具。辛 77-斜 15 井为多靶三段制剖面,井底设计垂深 2665 m,造斜率 15°/100 m,最大井斜角 51°17',第一靶点垂深 2500 m,靶区半径 55 m,第二靶点垂深 2570 m,靶区半径 65 m。为了便于对比,2 口井中都把电磁波仪器与油田常用的“海蓝”水力脉冲仪器串接下井。

(1)在辛 110-斜 8 井中下钻到井深 1200 m 时,ZTS-172M 电磁波仪器与水力脉冲的数据吻合。到井深 1900 m 后,仪器突然出现信号异常。起钻后没有发现仪器损坏。确认主要原因是,俄发电机要求转速为 800~1400 r/min,但井深 1900 m 后泵的实际冲次下降,泵缸套出现刺漏现象,致使实际排量不够(低于 26 L/s),使井底涡轮发电机转速降至 600 r/min(地表计算机上有显示),故井内仪器发

射信号失败。

(2) 辛 77 - 斜 15 井在井深 310 ~ 1600 m 段, 电磁波仪器与水力脉冲仪器数据吻合; 下至井深 2240 m 时遇阻, 转盘开 2 挡 (110 r/min) 划眼钻至井深 2280 m, 发现仪器接收信号异常, 后续稳斜段均未收到有效信号。

起钻后发现涡轮发电机已从支撑处断开, 因而不能给仪器正常供电。但是, 除了涡轮发电机出故障外, 电子模块密封良好, 未发现进水的情况。系统的整体强度能满足快速钻井的要求, 在强力钻井规程下 (钻压 80 kN、转盘转速 110 r/min) 连续工作了 46 h 左右, 并顺利起钻^[4]。

2.2.2 例 4

2006 年 4 ~ 5 月, 俄方对涡轮发电机加以改进后再次来中国试验, 在辽河油田的 3 口井进行了 5 个井次的试验。

(1) 冷 37 - 32 - 559 井属于直 - 增 - 稳型剖面, 井底设计垂深 1720 m, 造斜率 7°/100 m, 造斜点井深 250 m, 最大井斜角 16.11°, 靶区半径 10 m。共进行了 3 个井次试验。为了验证俄罗斯电磁波仪器的可靠性, 曾于 2006 年 4 月 14、15、17 日 3 次投入合康电子多点测斜仪进行复测。ZTS 方位数据与电子多点井斜、方位数据对比曲线如图 6、7。ZTS 系统与合康仪器测试的结果对比表明, 井斜角吻合得较好, 但方位角偏差 2° ~ 3°, 这可能与系统误差有关。

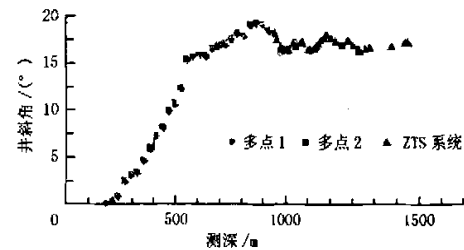


图 6 ZTS 与电子多点井斜角数据对比曲线

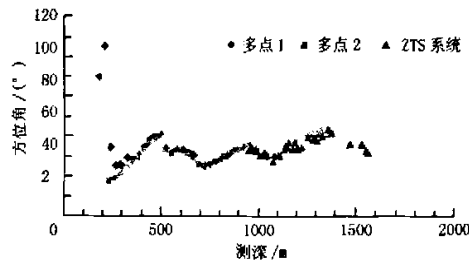


图 7 ZTS 与电子多点方位角数据对比曲线

(2) 洼 38 - 东 H3 井预测在井深 1600 ~ 1620 m 处钻遇油层, 但在 1600 ~ 1620 m 地质录井人员没有收集到含油砂岩。将 ZTS 仪器下至井深 1470 ~ 1600 m, 每 5 m 测一次地层电阻率, 1600 ~ 1620 m 井段, 每 1 m 测一次电阻率, 以寻找油层顶、底板, 反映油层厚度。试验中用 ZTS 系统测得的地层电阻率曲线与地质物探测井曲线结果基本一致 (如图 8 所示)。俄方工程师曾据电阻率曲线建议, 继续钻进将很可能见到油层, 但中方不敢贸然钻进。后请美国斯伦贝谢公司 LWD 继续钻进, 发现了高产油层, 但需支付大量美元。

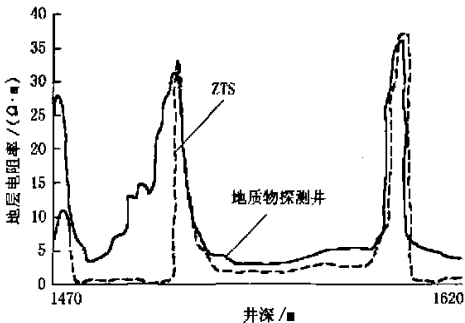


图 8 ZTS 系统测得的地层电阻率曲线与地质物探测井曲线基本一致

(3) 双 110 - 3 井为直 - 增 - 稳型剖面, 井底设计垂深 3760 m, 造斜率 7°/100 m, 造斜点井深 1500 m, 最大井斜角 16.7°, 靶区半径 20 m, 水平位移 587.11 m。起钻后检查发现, 涡轮发电机正常, 在井深 2400 m 得到了有效数据, 与电缆测斜仪数据吻合。电磁波 ZTS 测斜数据与电缆测斜仪测斜数据对比情况见表 3。

表 3 ZTS 测斜数据与电缆测斜仪测斜数据对比表

测深/m	井斜角/(°)	方位角/(°)	仪器
1575	0.92	216.91	电缆测斜仪
1590	1.0	359.0	电磁波遥测仪
1975	17.72	137.16	电缆测斜仪
1990	18.8	138.0	电磁波遥测仪
2000	17.8	137.88	电缆测斜仪
2375	13.46	130.98	电缆测斜仪
2390	14.0	133.0	电磁波遥测仪
2400	13.18	130.61	电缆测斜仪

2.3 小结

总之, 电磁波在胜利油田测得最大深度 1600 m; 在辽河油田测得最大深度 2400 m, 3500 m 信号时有时无。也就是说俄罗斯仪器要适应我国的螺杆钻具 + 转盘的组合钻进还有待改进。

3 电磁波 MWD 系统的改进与展望

3.1 俄罗斯电磁波井底遥测系统的改进

根据在中国的试验结果,俄方对井底涡轮发电机及电隔离器进行了改进^[3]。

(1)关于所需泵量。原俄罗斯 ZTS 系统的井底发电机要求驱动泵量为 35 ~ 70 L/s,现在已对涡轮的叶片形状和级数做了改进,目前涡轮发电机要求的泵量 ZTS-172 型为 25 ~ 60 L/s, ZTS-108 型为 7 ~ 20 L/s。

(2)关于转盘转速。为了适应中国的“螺杆+转盘”组合式钻进,俄方对涡轮发电机的材质和结构作了改进。使发电机的质量由过去的 32 kg 变为目前的 9.5 ~ 15.5 kg,同时把原来的外壳由转子改为定子,并增加了起扶正作用的耐磨嵌块,以便涡轮发电机能适应地表转盘较高的转速。一般应用条件是:在用弯接头+螺杆钻具造斜钻进时,地表转盘基本不转。一旦进入稳斜井段,当 ZTS 系统最高点离开弯曲井段最低点 10 ~ 20 m 后,就可以让转盘以 300 r/min 的转速与井底动力机一起进行组合快速钻进。因为 ZTS 系统的强度并不亚于螺杆钻具。

(3)关于空气钻井。为了适应空气钻井条件下把电磁波信号导入井壁地层向地表传输,对仪器的电隔离器结构进行了改进。

3.2 关于电磁波井底遥测系统国产化的展望

电磁波随钻测量技术已在俄罗斯和其他独联体国家的钻井作业中应用 20 多年,在欧美国家也开始用于生产(尤其是欠平衡钻井和复杂条件下的钻井作业)。而在中国虽然欠平衡钻井和空气钻井工程

急需该技术,但却并未得到正式应用。为了适应我国钻井工业发展的需要,应加强国际合作,开发适应中国需要(尤其是欠平衡钻井)的电磁波随钻测量仪。

(1)为延长仪器在井内的连续作业时间,应采用井底涡轮发电机的供电方式。因此,可引进俄罗斯生产的大功率井底涡轮发电机和电隔离器等关键部件,并根据中国组合钻进的国情加以改进。

(2)根据中国油田地层低电阻率的情况,进一步加大井下信号发射频率的可调范围,克服低电阻率地层限制信号可测深度的“瓶颈”。

(3)我国目前的井内仪器探管制造工艺已接近世界水平,而且价格相对便宜。可把国产探管与引进的井底涡轮发电机和电隔离器等关键部件结合起来,组成电磁波随钻测量系统。

(4)对于地层情况复杂、电磁波发射深度受到限制的工况,可考虑设置专门中继转发器或在下部钻柱中设置可打捞式电缆来增加信号传输强度的措施,以增大遥测深度,提高测量的可靠性。

参考文献:

- [1] 苏义脑. 油气井工程中的一个新领域——井下控制工程学浅谈[J]. 地质科技情报, 2005, 24(增刊): 1-8.
- [2] 库里奇茨基. B. B 著. 鄯泰宁, 等译. 定向斜井与水平井钻井的地质导向技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [3] 王荣琛, 鄯泰宁, 等. ZTS-172M 电磁波随钻测量系统及其在胜利油田的应用[J]. 地质科技情报, 2005, 24(增刊): 33-36.

注: 本文还参考了鄯泰宁 2005, 2007 年访俄时带回的俄文资料。

(上接第 51 页)

4.2 野外实验

2006 年 2 ~ 4 月, 在黑龙江省齐齐哈尔森林地区进行了地震勘探施工, 钻孔深度 20 m, 完成炮井 136 个, 累计进尺 2720 m。与现有常规车装工程勘探钻机相比, 提高施工效率 30%。

5 结语

JQL-30 型钻机以自行履带为底盘, 体积小, 行走灵活机动, 爬坡能力强, 适合森林地区地震勘探孔施工。折叠式桅杆降低了钻机行走的高度, 保证了

钻进时的大给进行程。提高了运移的通过性和钻进时的工作效率。动力头的浮动机构避免了拧卸钻杆时螺纹的损坏; 动力头的前后摆角, 方便了钻杆的升降操作。

参考文献:

- [1] 陈玉凡, 朱详. 钻孔机械设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [2] 冯德强. 钻机设计[M]. 中国地质大学出版社, 1993.
- [3] 上海市业余工业大学. 液压传动与控制[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.