

◀ 钻井与完井 ▶

智能钻柱信息及电力传输系统的研究

刘选朝 张绍槐

(西安石油大学导向钻井研究所, 陕西西安 710065)

摘要: 信息与电力传输是智能钻柱的重要组成部分。分析了地面与井下通信技术的发展概况, 指出了目前常用的几种传输方案所存在的问题及其局限性。智能钻柱采用导线传输方式, 既能由地面向井下输送足够的电力, 同时, 又能建立 300~500 kb/s 传输速率的地面与井下双向信息“高速公路”, 进行了地面模拟试验, 并取得预期结果, 从而说明了智能钻柱设计方案的可行性及优越性。

关键词: 智能钻井; 智能钻柱; 随钻测井; 有线传输

中图分类号: TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 05-0010-04

引言

随着石油工业的迅猛发展, 易开采油气藏逐渐减少, 目前及今后油气田的勘探开发更多地面向陆地深层或复杂构造地区、深海或滩海区域, 这种难动用油气藏的勘探开发, 对钻采等技术提出了严峻的挑战; 同时还应注意到国际上钻井工程已开始进入自动化新阶段给我们带来的机遇与挑战。现代旋转导向闭环钻井、随钻测井等地质导向钻井技术以及钻井动态参数的井下诊断和控制技术等一大批石油钻井工程新技术也在快速发展, 并不断融入自动控制、计算机、现代通信等多项高新技术。上述因素促使石油钻井工程技术不断向自动化、智能化方向发展^[1-2]。智能钻井就是将人工智能的理论、方法和技术应用于钻井过程, 使其具有类似人工智能特性或功能。它既可以实现地质导向闭环钻井, 又可以使钻井快速、安全、低成本完成。它的构成基本上可以概括为三部分: 地面计算机智能专家系统, 井下各种智能工具, 以及能提供高速双向通信与输送电力的智能钻柱。它的工作流程就是不断将井下几何导向、地质导向、旋转导向以及优化钻井和随钻诊断需要的参数及时准确地传送到地面, 地面计算机再运用智能“导向-优化-诊断”系统做出判断, 并将新的控制命令送入井下相应的执行机构, 实现闭环信息流和闭环测控以及随钻实时闭环钻井^[3]。现在, 井下工具的发展很快, 井下可采集的数据已有 4 大类约 40~50 个参数, 地面计算机智能专家系统技术也比较成熟, 容易实现, 而连接井下与地面的双向通信系统成了制约智能钻井的技术“瓶颈”。因此, 开发新一代具有高速、双向通信功能的智能钻柱对于构建智能钻井空间网络系统具有重大意义。

1 钻井信息传输系统的发展概况

人们对于钻井信息传输系统的研究, 历经半个多世纪, 基本可以概括为无线传输和有线传输两种方式。无线传输方式有 3 种: 钻井液压力脉冲法、声波法、电磁波法; 有线传输方式有 2 种: 感应接头式、导线对接式。

1.1 钻井液压力脉冲法

钻井液压力脉冲法提出最早, 可以追溯到 20 世纪 20 年代, 而且也是目前发展最成熟、应用最广泛的传输方法。主要用于随钻测量 (MWD) 和随钻测井 (LWD) 中。它是运用钻杆内的钻井液作为传输介质进行信息传输的。工具内装有压力脉冲发生器, 测量数据对其产生的压力脉冲序列进行调制, 被调制的压力脉冲波沿井筒上传, 并在地面对其进行解调, 从而获得测量数据。压力波在钻井液中的传输速度约为 1 200 m/s, 再加上调制方式的限制 (载波频率低于 100 Hz) 以及传输过程中压力波的损耗, 要得到有效的解调, 传输速率一般只有 3~5 b/s, 近期发展目标为 12 b/s, 远期发展目标也只有 30~40 b/s。不但速度慢延迟时间长, 而且是单向通信, 也无法用于欠平衡钻井^[4]。

1.2 声波法

声波法的提出可以追溯到上世纪 40 年代, 它的

收稿日期: 2006-07-21

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (编号: 50234030) 部分研究成果

作者简介: 刘选朝 (1960—), 男, 1983 年毕业于电子科技大学电子仪器及测量技术专业, 高级工程师。

联系电话: (029) 88382637

发展也异常艰难，直到本世纪初才有试验井的传输结果报道，离商业化还有一定距离。这种传输方式是根据声波能够沿钻柱传输的原理进行设计的。工具内安装有声波脉冲发生器，测量数据对其产生的声波脉冲序列进行调制，被调制的声波脉冲波沿井筒上传，并在地面对其进行解调，从而获得测量数据。声波在钻柱中的传输速度约为 5 000 m/s，再加上调制方式的限制（载波频率介于 400~2 000 Hz 之间）以及传输过程中声波的损耗，要得到有效的解调，传输速率一般只有 20~30 b/s，若进一步采用离散多音调制（DMT）通信技术，可进一步提高传输速率^[5-6]。

1.3 电磁波法

电磁波法的提出也比较早，可以追溯到 20 世纪 40 年代，我国对电磁波传播在 20 世纪 90 年代也进行了有关研究，取得了一定成果，但至今未进行商业化应用^[7]。2005 年，俄罗斯推出的电磁波随钻测量系统（EM-MWD）在胜利油田进行了现场试验，效果亦不尽如意^[8]。其基本工作原理就是通过在井底发送低频电磁波沿井筒传输到地面实现信息的传输。其使用有两大限制，一是载波频率只能是低频，一般为 30 Hz 以下，数据传输速率很难提高；二是传输深度受地层电阻率影响较大，要求地层有较高的电阻率（一般大于 $1 \Omega \cdot m$ ），因此，很难推广使用。

1.4 有线感应法^[9]

有线感应法是在每根钻杆内嵌入一对导线，在其两端接头中各设有一个感应线圈，当钻柱连接起来后，利用电磁感应原理，便可以使信号在钻杆间相互传递，形成高速双向信息网络。为了克服信号衰减，每隔约 300 m 需在钻杆内设置一个双向信号放大器，以提高通信距离。目前该方法已在试验井中应用并获得成功，它的最高传输速率可达 2 Mb/s。其制作工艺相对简单，但不足就是只能传输信号不能传输电力。

1.5 有线对接法^[10]

有线对接法是在每根钻杆内嵌入一对或多对导线，同时使用专门的钻杆接头，当钻柱接好后，信号可在钻杆间相互传递，形成高速双向信息网络，而且可以在双向传输信息的同时自地面向井下输送电力。目前该方法已在试验井中应用并获得成功，它的最高传输速率可达 2 Mb/s。其制作工艺相对复杂，但性能优越，代表了智能钻柱的发展方向。

2 智能钻柱及传输系统设计方案

2.1 方案选择

要发展我国具有自主知识产权的新一代智能钻

柱，经过反复研究认为应首选有线对接法。对于有线对接法亦有几种不同的对接方式^[11-12]，如图 1 所示。

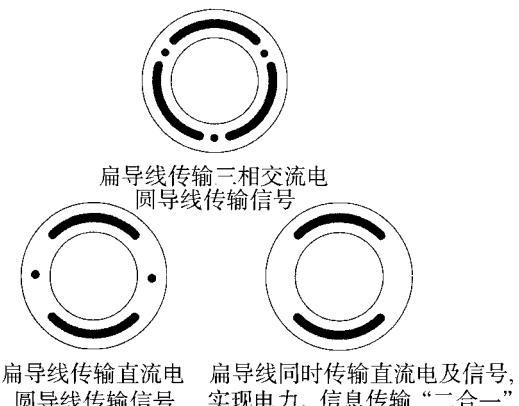


图 1 对接式智能钻柱本体端面

对接式智能钻柱接头是难点，文献 [11]、[12] 中已有阐述。为了减小加工难度，又不影响信息传输及电力传输，宜选择电力与信息同线同步传输的“二合一”方案，其系统构成如图 2 所示。

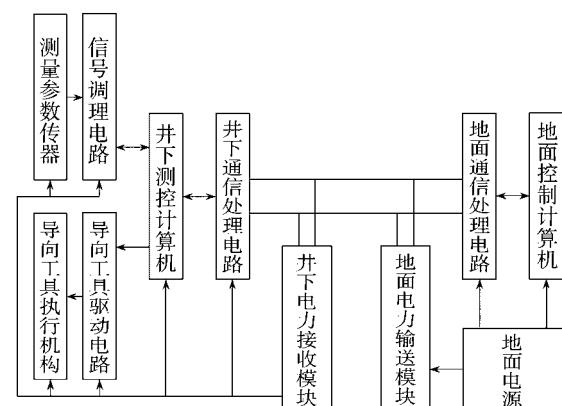


图 2 智能钻井电力及信息传输流程原理

2.2 方案特点

该系统属于分布式测控系统，主机设在地面，从机设在井下。主机主要完成人机对话，根据具体钻井任务设置井下控制参数，并将具体控制参数发送到井下从机，还可及时监视井下钻井过程；井下从机接收到地面主机的控制任务，控制相应的井下工具动作，完成指定的钻井任务。在钻井过程中，井下参数传感器将钻井参数及时反馈给井下从机。一方面，井下从机可以根据传感器参数对井下工具实行闭环控制；另一方面，井下从机也将这些参数及时传送给地面主机。地面钻井专家可以根据这些参数及井下工具的运行状态作出更加科学、合理的判断，并根据这些判断向井下从机发出新的控制指令，这一过程，周而复始随钻连续地进行下去，直到完成钻井任务。

该系统主要有两个特点：

1) 地面系统和井下系统只通过两根导线相连，一方面，地面对井下的所有测控信息通过该线传输；另一方面，地面还要通过该线向井下供给电力。这样可以简化传输通道，降低成本，提高系统可靠性。

2) 地面可以对井下实现全天候、全方位随钻实时监控，保证钻井按既定方案顺利完成。

2.3 地面模拟试验

根据系统总体方案设计的要求，首先对决定该系统成败的关键——地面与井下双向高速通信及电力传输环节进行了地面模拟试验。所用通信电缆为国内测井仪器常用的 7 芯电缆，总长 3 000 m，该试验占用其中 2 芯，具体试验原理及接线连接如图 3 所示。

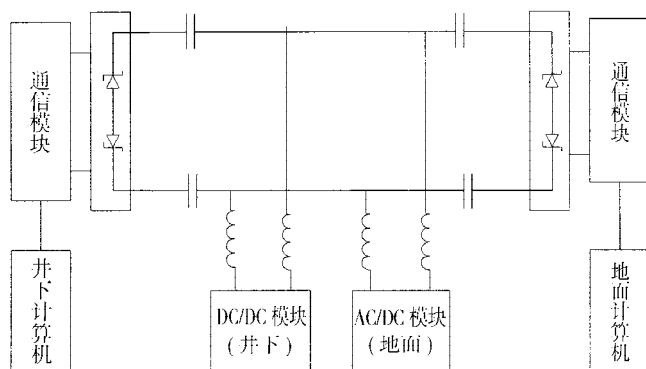


图 3 智能钻柱电力信息“二合一”传输原理

该试验旨在对能否通过两根导线同时实现地面与井下全双工双向通信与井下电力供应——“二合一”的可行性研究。在地面，首先将 220 V 交流电通过 AC/DC 变换，转变为 180 V 直流电，通过两个电感线圈加到电力线上，再将通信模块的 I/O 线通过隔直电容也加到电力线上；在井下，将 DC/DC 模块通过电感线圈连接到电力线上，取得所需电压并接上负载（约 100 W），再将电力线通过隔直电容连接到井下通信模块的 I/O 线上。然后，启动地面与井下微机，并运行通信软件进行试验，测得通信速率可达 300~500 kb/s。初步试验结果表明，“二合一”方案具有可行性，但仍需对传输的电力功率与通信速率之间的关系及有关参数作进一步的试验研究。

该智能通信模块采用先进的数字用户线 (DSL) 传输技术，内嵌传输控制协议/网际协议 (TCP/IP)。它具有以下特点：

1) 自动线路频谱分析功能。即能根据线路当时的环境状况，特别是传输特性及噪声分布情况决定最佳使用频带。

2) 自动传输波特率选择功能。即能自动根据当时传输信道的传输能力决定传输波特率的大小。

3) 检测与建立自动导线对接功能。钻柱是由单根钻杆一根一根对接而形成的，一旦通路形成，该模块会自动检测得到并自动建立地面与井下连接直到成功。

2.4 直流输电

该系统采用直流输电主要考虑以下两个方面：

1) 有效减小输电对信息传输的影响。采用直流供电，首先是考虑输电与信息传输共用一对导线的特殊情况。该“二合一”传输方案采用频分复用原理实现，若按理想情况考虑 50 Hz 的电力信号与至少几百 Hz 的信息传输信号频率相差甚远，也较容易分开，且交流变压线路简单，容易实现，应首先考虑选用交流输电。但事实并非如此，交流电网并非只含有 50 Hz 电力信号，而是混杂着各种随机干扰信号，将它直接变压传输就会对信息传输信号造成很大干扰，甚至使通信无法进行，而要反过来重新产生一个大功率的、纯净的 50 Hz 电力信号又很麻烦；而纯净的直流电却较容易产生，且与信息传输信号的分离更容易、更彻底，在传输电力的同时为信息传输信号建立了一个几乎没有干扰的通道。

2) 直流电缆线路输送容量大，损耗小，不易老化，寿命长。电缆耐受直流电压的能力比耐受交流电压的能力约高 3 倍以上。因此，同样绝缘和芯线截面的电缆用于直流输电比用于交流输电的输电容量要大很多，且直流输电只有线路的电阻损耗，而没有交流输电所固有的电容电流损耗。因此，对于同样条件的输电线路采用直流供电可以大幅度提高供电容量。

3 结 论

1) 石油工业已发展到自动化钻井新阶段，智能钻柱是实现自动化钻井的必要手段。我国发展智能钻井需要优先研发有自主知识产权的新一代智能钻柱。而新一代智能钻柱不仅具有普通钻柱的各种功能，还具有建立地面与井下“立体网络”的功能，以及向井下输送电力的功能。

2) 应该优先开发双线对接式智能钻柱方案，因为它性能优越、结构简单、可靠耐用、容易实现、造价相对低廉。

3) 通过地面模拟，及对双线对接式智能钻柱方案进行的电力与信息同线同步传输试验，证实了该方案的可行性、实用性、先进性。

参 考 文 献

- [1] 张绍槐, 张洁. 21世纪中国钻井技术发展与创新 [J]. 石油学报, 2001, 22 (6): 63-68.
- [2] 张绍槐. 现代导向钻进技术的新进展及发展方向 [J]. 石油学报, 2003, 24 (3): 82-89.
- [3] 李琪, 何华灿, 张绍槐. 复杂地质条件下复杂结构井的钻井优化方案研究 [J]. 石油学报, 2004, 25 (4): 80-83.
- [4] Gao L, Finley D, Gardner W, et al. Acoustic telemetry can deliver more real-time downhole data in underbalanced drilling operations [R]. SPE98948, 2006.
- [5] Vimal S, Wallace G, Don H J, et al. Design considerations for a new high date rate LWD acoustic telemetry system [R]. SPE 88636, 2004.
- [6] Gao L, Gardner W, Robbins C, et al. Limits on communication along the drillstring using acoustic waves [R]. SPE95490, 2005.
- [7] 熊皓, 胡斌杰. 随钻测量电磁传输信道研究 [J]. 地球物理学报, 1997, 40 (3): 431-441.
- [8] 张进双, 赵小祥, 刘修善. ZTS 电磁波随钻测量系统及其现场试验 [J]. 钻采工艺, 2005, 28 (3): 25-27.
- [9] Michael J J, David R H, Darrell C H, et al. Telemetry drill pipe: enabling technology for the downhole internet [R]. SPE79885, 2003.
- [10] Paul Lurie, Philip Head, Jackie E S. Smart drilling with electric drillstring [R]. SPE/ IADC 79886, 2003.
- [11] 石崇东, 张绍槐. 智能钻柱设计方案及其应用 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (6): 7-10.
- [12] 张绍槐. 智能油井管在石油勘探开发中的应用与发展前景 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (4): 1-4.

Study on Information and Power Transmission Based on An Intelligent Drill String

Liu Xuanchao Zhang Shaohuai

(Steerable Drilling Research Institute, Xi'an Petroleum University, Xi'an, Shanxi, 710065, China)

Abstract: The information and power transmission system is the key component of an intelligent drill-string. This paper analyzes the developments of communication between surface module and downhole one, and indicates defects and limitations of several current transmission designs. The intelligent drill string with wire line transmission can supply downhole module with sufficient power from surface, as well as can establish the two-way information “expressway” with a rate of 300~500 kbps. This communication system has been simulated, which achieved expected results. Successful lab tests indicate the feasibility and advantages of the intelligent drill strings.

Key words: intelligent drilling; intelligent drill-string; logging while drilling; line transmission

欢迎订阅 2007 年《油气地质与采收率》

《油气地质与采收率》是经国家新闻出版总署批准, 由中国石油化工集团公司主管, 胜利油田分公司主办, 面向国内外公开发行的国家级石油类技术期刊。中国标准连续出版物号: CN37-1359/TE, 国际标准连续出版物号: ISSN1009-9603。该刊为山东省优秀期刊、华东地区优秀期刊、中国石油和化工行业优秀期刊、中国石化核心期刊和全国中文核心期刊。

《油气地质与采收率》以讨论“油气勘探开发新理论、新方法”和“提高油气采收率技术”为主题, 报道内容涵盖了油田勘探开发主业的各个专业。设有“油气地质”、“勘探技术”、“油气藏工程”、“油气采收率”、“油气钻采工程”和“油气藏经营管理”等栏目。

《油气地质与采收率》为双月刊, 大16开本, 102页, 逢单月25日出版, 每期定价10元, 全年60元。请广大读者直接从本期刊社订阅。在校学生半价优惠。

1. 邮局汇款: (257015) 山东省东营市聊城路3号期刊社

联系人: 左萍

订刊电话: (0546) 8715240 传真: (0546) 8715261

电子邮件: pgre@slof.com 或 pgre@163.com

2. 银行汇款: 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司地质科学研究院

开户行: 工商银行东营区支行

账号: 1615002109022100494