

电磁随钻测量技术及其 在固体矿床勘探中应用的可行性分析

宋继伟

(贵州省地矿局 115 地质大队, 贵州 清镇 551400)

摘要:电磁随钻测量(简称 EM-MWD)是现代石油钻井中的一项新技术,在国内各大油田的定向钻井中正在推广应用,但使用过程中仍存在石油地层电阻率低,电磁波信号衰减严重、测量深度受限等问题。据此特点,提出了研究设计小直径化 EM-MWD 系统,将其用于地层电阻率高,钻深浅的固体矿床勘探的设想,以便扬长避短,为电磁随钻测量开辟新的应用领域。分析了电磁随钻测量技术应用于固体矿床勘探的技术要求及可行性,提出了进一步研究工作的建议。

关键词:电磁随钻测量;固体矿床勘探;地层电阻率;小直径设计

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)03-0012-03

Feasibility Analysis on Electromagnetic Measurement While Drilling and Its Application in Solid Mineral Deposit Prospecting/SONG Ji-wei (115 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou province, Qingzhen Guizhou 551400, China)

Abstract: Electromagnetic measurement while drilling (EM-MWD) is a new technology in present petroleum drilling, which is applied in directional drilling in big oilfields in China. According to the low resistivity in petroleum formation, serious electromagnetic wave signal attenuation and limited surveying depth in construction process, assumption was put forward to design a small diameter EM-MWD system for solid deposit of high-resistivity formation and shallow drilling depth. The paper analyzed the technical requirements and the feasibility of EM-MWD.

Key words: electromagnetic measurement while drilling; solid deposit prospecting; formation resistivity; small-diameter design

20 世纪 80 年代以来,随着现代科学技术进步,电磁随钻测量技术应运而生,国外一些研究机构和公司已相继推出自己的电磁随钻测量系统新成果。电磁随钻测量技术比目前生产中大量应用的有线随钻测量和泥浆脉冲随钻测量技术具有显著的优越性。因此,该技术在国内外现代石油钻井中得到了广泛的重视。EM-MWD 的主要优点:信息传输速度较快,不需要专门设置的发射天线或中继器来增加信号传播的距离,对钻井液的质量要求和钻探泵的不均匀性要求更低,对正常钻进没有干扰。与其它方法相比,准备工作简单,起下钻时也能传输井下资料。EM-MWD 目前存在的主要缺点:信号衰减大,只能传播低频电磁波,信号传输率受到一定限制,易受岩石电阻率的影响。

1 电磁波的地层衰减特性

电磁波的传输特性研究表明,所有的电磁波方

法都在某种程度上依赖地层的电阻率。信号在传播过程中的衰减强度随地层电阻率的减小而急剧增加,其衰减特性如下:

当电磁波在媒质中由一点传至另一点时,其振幅所受的衰减由式(1)确定:

$$A = A_0 E^{-K_i S} \quad (1)$$

式中: A_0 ——起始点的振幅; A ——传经距离 S 后的振幅; K_i ——衰减因子。

$$K_i = (\omega \sigma \mu / 2)^{1/2} \quad (2)$$

对于岩层(良导体), μ 为磁导率。

由此可知:电磁波在岩层中传播,岩层的电阻率越低,电导率越高,衰减愈快。

这在石油钻井中表现得最为明显,其原因是石油钻井所钻进的地层以沉积岩为主,地层的电阻率一般较低。所以,电磁随钻测量在石油钻井中的应用深度受到一定的限制,有文献认为该技术可以用于 3000 m 以深钻井中,但也有资料显示当钻井深度

收稿日期:2008-08-20; 改回日期:2009-02-12

作者简介:宋继伟(1982-),男(汉族),河北沧州人,贵州省地矿局 115 地质大队助理工程师,钻井与钻探工程专业,从事钻探机具、钻探工艺的研究工作,贵州省清镇市贵州省地矿局 115 地质大队劳人科, songjiwei8759@163.com。

超过 800 ~ 1600 m, 信号衰减严重, 地表已很难检测到可靠的有用信号。目前, 针对这一问题, 国内外有关研究机构一方面加强研究电磁随钻测量技术的信号发射系统和电磁波信号接力转送技术, 如延长发射天线和在钻杆柱中加接中继器等技术; 另一方面, 深入研究电磁波在地层中的传播特性, 以期掌握其规律并研究相应的技术措施。

而在固体矿床勘探中, 这一缺点则表现得不甚明显。一方面, 固体矿床勘探的钻孔深度相对于石油钻井而言比较浅, 其钻孔深度一般在 3000 m 以内; 另一方面, 固体矿床勘探所钻地层的电阻率普遍高于石油钻井, 特别是有色金属矿床勘探(参见表 1)。

表 1 部分岩石的电磁特性参数

岩性	电阻率/($\Omega \cdot m$)	
沉积岩	泥岩	1 ~ 50
	砂岩	1 ~ 10^5
	白云岩	$3.5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^3$
	石灰岩	$60 \sim 4 \times 10^5$
	褐煤	$10 \sim 10^4$
	无烟煤	$10 \sim 10^3$
火成岩	花岗岩	$5 \times 10^2 \sim 10^5$
	玄武岩	$5 \times 10^2 \sim 10^5$
	暗色岩	$2 \times 10^2 \sim 4 \times 10^3$
	辉长岩	$5 \times 10^2 \sim 10^5$
	辉绿岩	$3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^4$
	橄榄岩	$10^3 \sim 10^6$
变质岩	片麻岩	$10^2 \sim 10^4$
	泥质片岩	$10^3 \sim 10^4$
	石墨片岩	1 ~ 10
	石英岩	$10^4 \sim 10^6$
	大理岩	$10^4 \sim 10^6$
	砂卡岩	2.5×10^2

从表 1 可以看出: 地质钻探所钻岩层的电阻率一般都较大, 是电磁信号传输良好的通道, 将 EM - MWD 系统应用于固体矿床勘探钻进, 正好能扬长避短, 发挥 EM - MWD 的优势, 具有良好的前景。

2 电磁随钻测量应用于固体矿床勘探的技术要求和可行性

EM - MWD 最初是应石油钻井需求开发研制的, 其系统总成外径较大, 而区别于石油生产井, 一般的固体矿床勘探孔口径均较小。EM - MWD 系统总成外径目前最小直径为 108 mm, 比如俄罗斯生产的 ZTS108 系统, 要想使其应用于固体矿床勘探, 最低要求应使其外径减小一级为系统外径 $\varnothing 89$ mm, 因此, 将电磁随钻测量向固体矿床勘探领域推广需

解决的主要问题是要对该系统进行小直径化设计。只要能实现电磁随钻测量系统外径的小直径化, 电磁随钻测量应用于固体矿床勘探领域是完全可行的。

目前国内已经开展该课题的研究, 中国地质大学(武汉)工程学院钻探实验室对该课题的研究处于国内领先水平, 其核心设计理念为: 以俄罗斯 ZTS108 系统作为基础, 研究设计小直径的电磁随钻测量系统。ZTS 系统主要包括内部传感元件和井下电源 2 大部分, 内部传感元件市场上已经有小体积的成品, 因此, 对井下电源涡轮发电机进行小直径化设计是系统小型化的关键。

经 2 年多的努力, 已经初步形成较系统的涡轮发电机设计计算理论, 并加工生产了小直径的涡轮发电机实体模型, 以下对其设计工作进行简要介绍。

3 涡轮发电机的小直径设计

俄罗斯 ZTS108 系统外径为 108 mm, 配备的 SG074 型涡轮发电机最大外径(其水力涡轮叶片的直径)为 89 mm, 设计结果要求系统外径变为 89 mm, 涡轮发电机外径变为 75 mm。

3.1 涡轮发电机设计路线

发电机设计的最终要求就是小直径化后仍能为系统提供足够的功率, 维持系统的正常工作。从电磁学原理知道, 涡轮发电机的输出电压公式为:

$$U = (\sqrt{2}/2) B \Phi \omega \sin \omega t \quad (3)$$

由公式(3)可以看出, 决定发电机输出电压和功率的参数有 3 个, 磁场强度 B 、转速 ω 和发电机工作线圈等效面积 Φ 。

发电机磁场强度 B 是固定不变的值, 设计结果只需保证小直径化后仍有足够的转速, 并且线圈有足够的切割面积, 那么就能保证小直径化后仍能提供足够的功率。

采用 SG074 型发电机额定功率和额定转速作为小直径化后额定功率和额定转速的设计基准, 这样在转速作为已知条件的情况下, 只需进行以下 2 部分工作:

(1) 进行涡轮叶片的设计调整, 使其在小直径后仍能提供足够的转速和扭矩;

(2) 进行线圈的设计调整, 使其在小直径后仍能保证有效的磁场切割面积。

3.2 涡轮结构和工作参数的最终确定

在上面分析的基础上, 通过详细的计算, 最终确定了适用于小直径(钻头外径 91 mm, 发电机外径

75 mm) 钻进用的涡轮发电机涡轮结构尺寸以及相应的流量配比、输出特性如下:

外径 $D=75$ mm, 轮毂比 $d=0.6$, 轮毂直径 $d_h=45$ mm, 比转速 $n_s=500$, 叶片数 $z=8$, 叶片弦长 $l=157.41$ mm, 叶片高度 $h=83$ mm, 安装角 $\beta=32^\circ$, 额定流量 $Q_{\text{额定}}=10$ L/s, 额定转速 $n_{\text{额定}}=1741$ r/min, 功率 $N=318$ W, 扭矩 $M=1.75$ N·m, 压降 $H_{\text{aff}}=31.8$ m。

涡轮工作特性输出曲线见图1。

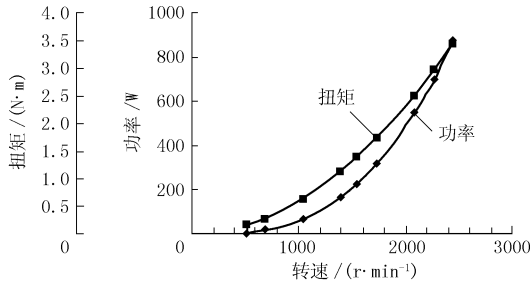


图1 涡轮工作特性输出曲线

3.3 线圈设计

ZTS 系统发电机线圈是固结封装在定子内的, 很难清楚知道其具体绕组形式, 本部分设计使用比例计算。

已经知道, 决定发电机输出电压和功率的参数有3个, 磁场强度 B 、转速 ω 和发电机工作线圈等效面积 Φ , 计算中, 小直径化后发电机参数角标使用2, 原 SG074 型发电机参数角标使用1。现在的情况是, 发电机磁场强度固定不变, 转速变为原先的:

$$n_2/n_1 = 1741/1400 = 1.24$$

因此只要制作线圈使其:

$$\Phi_2/\Phi_1 = 1/1.24 = 0.8$$

即可保证小直径化后仍能提供足够的功率。

具体修改过程为 $\Phi = N\varphi = NDI$, 在匝数 N 不变的变前提下, 由于线圈绕组直径已经变为原来的:

$$D_2/D_1 = 75/89 = 0.8427$$

现在只需使有效切割边长度变为原来的:

$$l_2/l_1 = 0.8/0.8427 = 0.95$$

4 建议

虽然已经计算设计出适用于更小一级(系统外径89 mm, 发电机外径75 mm)的井下涡轮发电机, 但是它对于固体矿床勘探钻进的小流量和更小直径钻进仍有局限性, 主要表现在: 流量不足, 难以保证足够的功率和扭矩, 采用较大流量时虽可以达到要求, 但是工作性能不稳定以及加工精度高, 同时增加钻进系统复杂性。因此, 笔者建议:

- (1) 进行更小直径发电机涡轮($\varnothing 59$ 或 46 mm) 结构和工作参数的研究;
- (2) 对线圈进行灵活广泛的设计选取;
- (3) 使用更轻型材料加工发电机叶片和外壳;
- (4) 类似于涡轮马达, 可以尝试增加涡轮的级数。

5 结语

将电磁随钻测量系统推广应用于地勘钻进定向孔具有重要的现实意义, 同时, 通过相关部门的科研工作, 已经取得了突破性的理论成果, 在技术上是完全可行的。只要对以上提出的几方面建议进行更广阔深入的研究, 设计更小直径的涡轮发电机完全可能。随着对该技术的不断攻关, 最终必定能生产出适用于固体矿床勘探现场施工的电磁随钻测量系统, 为我国新一轮国土资源大调查及深部找矿战略的实施做出应有的贡献。

参考文献:

- [1] J A Kong. 电磁波理论[M]. 吴季, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] B. B. 库里奇茨基. 定向井与水平井钻井的地质导向技术[M]. 鄢泰宁, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [3] 李林. 电磁 MWD 技术现状及关键技术分析[J]. 石油机械, 2004, 32(5).

第九届全国桩基工程学术会议征文通知

本刊讯 第九届全国桩基工程学术会议将于2009年8月19~21日在兰州召开。会议由中国土木工程学会土力学及岩土工程分会桩基础学术委员会、中国工程建设标准化协会地基基础专业委员会、甘肃省土木建筑学会地基基础学术委员会主办。除常规议题外, 本届会议将侧重研讨特殊土地和特殊环境下的桩基工程, 论文集将由中国建筑工业出版社正式出版发行。热忱欢迎全国各地从事桩基工程的同行踊跃投稿。

投稿要求: 未公开发表, 文责自负; 论文字数不超过8000字(含图表、公式), 格式要求可来电联系; 来稿请注明作者详细通讯地址、E-mail及联系电话。截稿日期: 2009年3月31日前。寄2份纸质稿件, 同时提供电子文本。

邮寄地址: 北京市北三环东路30号中国建筑科学研究院地基所李大展, 邮编: 100013, 电话: 010-64517585。

E-mail: lidazhan22@163.com。