文章编号: 1001-1986(2010)03-0069-04

电磁波随钻测量双向信号传输系统

邵养涛，姚爱国，张 萌，李运升
(中国地质大学工程学院，湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了自制电磁波双向信号传输装置的基本原理、单元结构关系、相关工作参数以及试验情况。试验结果表明，随钻测量双向信号传输系统在硬岩中传输距离远，可实时传输井下工况信息，也可从地面向井下传输指令，与智能化钻具配合，还可从地面遥控井下钻具。不同波形对电磁波双向信号传输有较大影响：正弦波有较强的抗干扰能力；方波易受地层干扰信号的影响，特别在接收信号微弱时，方波传输信号误码率较高。另外，下传信号比上传信号衰减大。

关 键 词: 双向电磁波遥测；随钻测量；载波信号波形；衰减

中图分类号: P631 **文献标识码:** A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.016

Electromagnetic wave bi-directional signal transmission of MWD

SHAO Yangtao，YAO Aiguo，ZHANG Meng，LI Yunsheng
(*Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: The system of two-way telemetry for drilling can transmit drilling information from bottomhole to surface in real time, and send the order from surface to bottomhole at same time. Connecting with so called intelligent drilling tool like steering drilling device, the telemetry can monitor downhole drilling situation and also realize the remote control of downhole drilling tool at will. The electromagnetic type of two-way telemetry has developed in recent years owing to its advantages of being suitable to use for air/gas drilling or foam drilling. This paper introduced the history and development situation, the principle, structure and working parameters of self-made electromagnetic two-way telemetry. Experiments indicate that waveform has an effect on two-way electromagnetic transmission. Sine wave is better than square wave in resisting disturbance. There is higher error rate for square wave especially when received signals are very weak. In addition, the attenuation of downgoing signals is large compared with that of upgoing signals.

Key words: two-way electromagnetic telemetry; measurement while drilling; carried waveforms; attenuation

钻进工程是地下隐蔽工程，为了及时了解孔内钻进状态与地层信息，发展了随钻测量及随钻测井技术。随钻测量又分为有线和无线，而无线随钻测量系统是目前发展的方向。常用的无线传输包括泥浆脉冲与电磁波随钻测量系统。但目前这类装置大多数是单向信号传输[1]，即把信号实时地从孔底传输到地表。为了适应智能化钻井的需要，国外一些学者从 20 世纪 90 年代初开始进行电磁波双向信号传输技术的研究与应用[2-4]，并取得了较好的效果。我国在电磁波随钻信号传输方面的理论研究开展较早，20 世纪 80 年代末有不少学者就进行过较深入的研究[5-7]，但直到近几年电磁随钻测量系统的研制才有实质性的进展。到目前为止，中石油、中石化与中国地质大学(武汉)都已研制出自己的电磁随钻测量系统[8-10]，但这些产品均为单向信号传输，至今尚未见到关于电磁波双向信号传输的报道。本文依托国家 863 计划项目与地质调查项目，进行了这方面的研究，取得了一定的成果，并获得了国家发明专利(专利号 ZL200710051683.3)。

1 电磁波双向信号传输原理

电磁波双向信号传输的基本原理与单向电磁波随钻测量信号传输机理大致相同。即把要传输的信号进行编码，加载在合适的时变电信号上，以极低的频率通过钻杆与地层系统进行传播。与单向信号传输的主要区别在于，需要时可以由地面向井下发

收稿日期: 2010-1-6
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA06Z08)；中国地质调查局地质调查项目(1212010816011)
作者简介: 邵养涛(1964—)，男，河南清丰人，博士研究生，教授级高级工程师，从事地质机械相关的研究工作.

射指令。

1.1 电磁波传播的基本理论

根据麦克斯韦方程，变化的磁场能够产生电场；变化的电场也能产生磁场。时变电磁场为不可分开的统一体。时变电磁场的场源可以是真实源，即变化的电流和电荷，也可以是变化的电场和变化的磁场。其描述方程为：

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t},$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t},$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0,$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho。$$

式中 $\bar{H}$ 为磁场强度，A/m；$\bar{J}$ 为传导电流密度，为激励函数，A/m^2；$\bar{D}$ 为电通量密度，C/m^2。

在电磁波随钻测量系统中，常采用时变电信号的方式产生电磁波，以极低的频率向外传播。由于其频率极低，一些研究者在研究电磁波信号传播特性时，常不考虑其时变特性，看作恒定电磁场。而更多的研究者还是以麦克斯韦方程作为出发点研究电磁波随钻信号传输特性。

1.2 电磁波双向信号传输装置设计

电磁波随钻双向信号传输工作原理如图 1 所示。图中 1 为钻塔，2 为钻孔，钻杆柱 3 的下方接井下机 4，钻头 5 安装在井下机的下方。图中 6 在井下机发射信号时是发射天线，而在接收信号时是接收天线。向地面传输数据时，载波信号由发射天线 6 发射信号；信号经过地层传输到地表接收或发射天线 7；接收到的信号在井上机 8 中进行处理。井上机中也包括接收和发射两种功能，经过解码信号通过接口模块进入计算机 9 进行显示与处理。由地面向下发射指令时则相反，由计算机 9 输出指令，经过发射装置调制信号，由地面接收或发射天线发送出去。钻井过程中，井下信号实时传输到地面，而地面信息也能及时的传输到井下。这样在地面就可以监测井下钻具的工况，并且在必要时也可控制井下钻具。根据互易性定理：一个天线用作发射和用作接收时，其方向图、增益和输入阻抗都是相同的。因而，系统中井下与地面装置在发射与接收时均共用各自的同一天线。

双向电磁波随钻信号传输系统基本原理如图 2 所示。它包括井上机、井下机与发射天线。由图 2 可看出，井上机与井下机的组成单元部件基本相同，都包括发射和接收两大部分。井下机发送的信号是井下传感器检测到的数据，而井上机发送的是控制

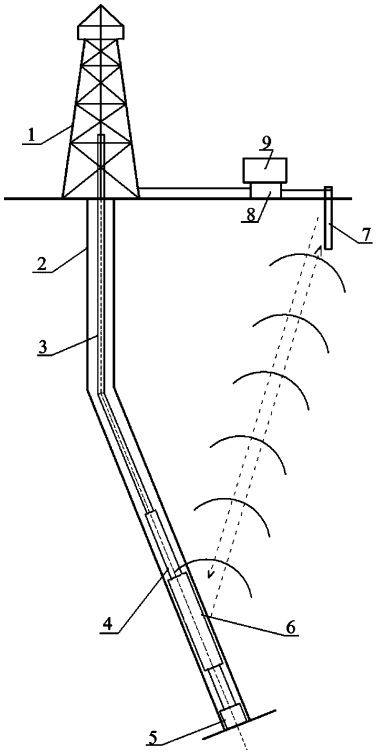

图 1 电磁波双向信号传输系统示意图

Fig.1 Sketch plan of bi-directional electromagnetic wave signal transmission system

1——钻塔；2——钻孔；3——钻杆柱；4——井下机；5——钻头；6——井下发射接收天线；7——地表接收或发射天线；8——井上机；9——计算机

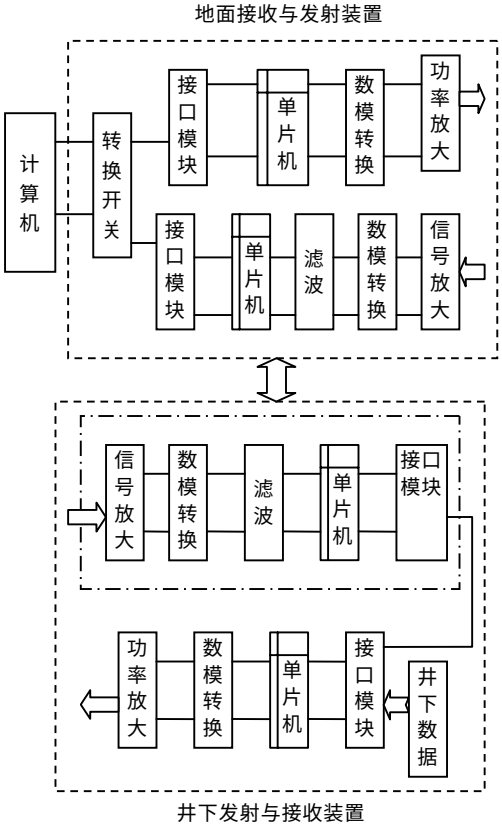

图 2 电磁波双向信号传输井上机与井下机结构关系图

Fig.2 Struture of downhole unit and surface unit for bi-directional electromagnetic wave signal transmission

指令或者地面检测的数据。除此之外，两者的不同之处还在于井上机发射功率大，体积也大。井下发射功率小，径向尺寸受到限制。

井下机装在无磁钢管内。电池和线路板均装在保压管内(保压管起保护作用)。泥浆可从外管与保压管间的环状间隙内流动。井下机有两种工作模式，一种是应答式工作模式，即接到地面下传的指令时才发送数据；未接到指令时，只有测斜探管与数据采集部分工作，信号传输与功率放大部分不工作，以节省电源。这一省电功能对于电池供电的独立的随钻测量系统有重要意义。

井下机的另一种工作模式为自动工作模式，即井下机按照机内程序工作。采取这种模式，在下井前应由外部计算机输入发射参数，包括采样时间、发射频率、发送时间间隔和待机时间。在不发送信号的间隔时间内，采集的数据记录储存。当井下机在规定长度的时间段内未接到地面传来的指令，井下机会自动转换成自动工作模式。井下机的技术参数如表 1 所示。井下机实物见图 3。

表 **1**　电磁随钻测量系统技术参数

Table 1　Technical parameters of electrtromagnetic wave MWD system

项目	参数
电源电压/V	±36
功率/W	120
频率/Hz	1~100
电池	标准锂电池
钻具外径/mm	65
井斜角/(°)	0~180°±0.2°
方位角/(°)	0~360°±1.0°

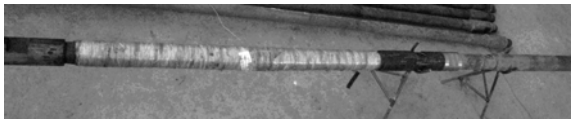

图 3　电磁波双向信号传输井下机实物图

Fig.3　Picture of downhole unit for bi-directional electromagnetic wave signal transmission

井下机软件设计采用 C51 语言，使程序可读性增强，编写灵活，编程模块化更易于代码移植、修改。井上机界面软件采用 VB 编写，简单实用，方便快捷。

2　电磁波双向信息传输试验与结果讨论

利用自制的双向信号传输装置进行了室内试验、模拟试验以及浅孔孔内试验。井下机设计参数如表 1 所示。井上机采用了大功率信号功率放大器，试验装置极限功率在负载电阻为 8 Ω·m 时可达 1 100 W。井下与地面装置均能够发送及接收信号。在模拟钻孔内进行了不同波形的双向信号传输试验。在浅孔(68 m 深)进行了双向正弦波信号传输试验。

在干孔中的测试结果如图 4 所示。信号经过地层传播，即有地层噪音叠加在信号上。采用方波传播数据时，地层噪音叠加在方波幅顶或幅底的平坦处，而对于正弦波则叠加在全波上。以调频或脉宽调制方式传递信号则地层的干扰很容易排除。

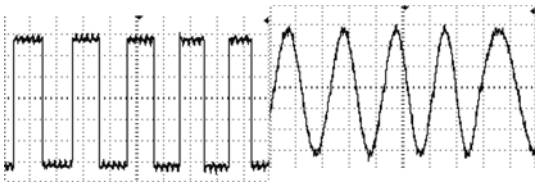

图 4　干孔条件下地层干扰对波形的影响

Fig.4　Influence of strata disturbance on waveform in dry hole

图 5 为孔内有液体而信号较弱时的对比情况。试验结果表明，地层的干扰信号对方波影响较大。方波信号较小时，相对较强的干扰信号加载于方波的顶部或底部，若采用调频方式或脉宽调制方式传递数据时，干扰信号超过零点就会使信号误码率增大。而对于正弦波在零点附近的干扰信号，也不会造成较大的影响。这是因为信号传输频率特别低，由这种干扰信号引起的误差对于信号周期产生的影响可以忽略不计。故在这种情况下，数据传输误码率并无明显上升。这种特性对于信号下传特别重要。因为下传信号衰减较大，当孔内有液体存在时，常常会出现信号弱干扰强的情形。

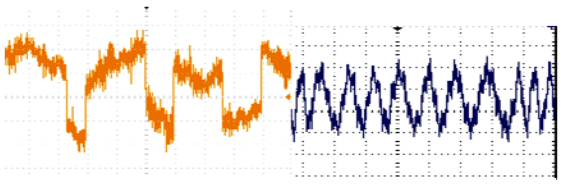

图 5　孔内泥浆条件不同时方波信号的对比

Fig.5　Comparison of square wave signals in different drilling liquids

图 6 为下传信号与上返信号的衰减对比图。图中左边为下传信号，右边为井下装置接收到下传信号后又回返上来的信号。由图 6 可看出，下传信号的衰减程度比上传信号大得多；也可看出尽管信号较小，干扰较强，但对信号宽度的识别或调频信号的识别影响不大。试验结果数据误码率几乎看不出明显增加。

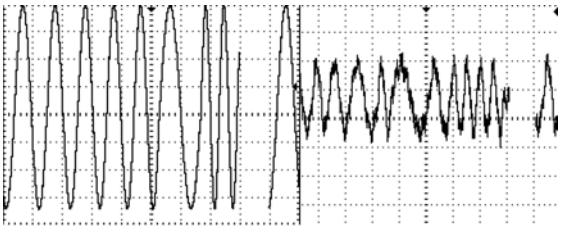

图 6 电磁波双向传输信号对比

Fig.6 Comparison of bi-directionally transmitted electromagnetic wave signals

3 结 论

电磁波双向信号传输在硬岩中传输距离远，可用于地质钻探领域。在双向电磁波随钻测量中，可改变传输参数、发射模式以及节省电能。与旋转导向钻具组成智能化钻进系统，可监测井下钻进工况，遥控井下钻具工作状态。电磁波传输速率高，容易小直径化，制作成本低。电磁波信号双向传输机理与单项传输基本相同，根据互易定理接收与发射信号采用同一天线。

在浅孔中的传输试验结果表明，不同波形对电磁波双向信号传输有较大的影响。正弦波有较强的抗干扰能力，方波易受地层干扰信号的影响，特别在接收信号微弱时，方波传输信号误码率较高。另外，下传信号比上传信号衰减大。

参考文献

[1] SOULIER L，LEMAITRE M，GEOSERVICES S A. MWD data transmission status and perspectives[J]. SPE/IADC 25686，1993：121–128.

[2] THOMAS R B，JOHN T H. Surface to downhole telemetry link，GRI-96/0268[R]. ProTechnics International Inc.，Houston，TX，1996.

[3] JEFFREY M G. EM telemetry tool for deep well drilling applications，DE-FC26-02NT41656 [R]. E-Spect Rum Technologies，Inc.，San Antonio，TX，2005.

[4] JAN W，DEMIS W，MARTIN C. Successful integration of electromagnetic MWD/LWD technology extends UBD operation envelope into severely depleted fields[J]. SPE/IADC 92617，2005：1–8.

[5] 王卫延，张守融. 电磁随钻测量的电激励模式的分析[J]. 电子科学学刊，1991，13(6)：590–595.

[6] XIA M Y，CHEN Z Y. Attenuation predictions at extremely low frequencies for measurement-while-drilling electromagnetic telemetry system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，1993，31(6)：1222–1228.

[7] 熊皓，胡斌杰. 随钻测量电磁信道分析的等效传输线法[J]. 电波科学，1995，10(3): 1–14.

[8] 刘修善，杨春国，涂玉林，等，我国电磁随钻测量技术研究进展[J]. 石油钻采工艺，2008，50(5)：1–5.

[9] 姚爱国，张萌，吴来杰，等，电磁随钻信号传输技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程)，2009(增刊)：115–119.

[10] 邵养涛，姚爱国，张明光. 电磁波随钻遥测技术在钻井中的应用与发展[J]. 煤田地质与勘探，2007，35(3)：77–80.

(上接第 68 页)

过预测，3 口交叉验证井的煤层厚度的交叉验证结果如表 2 所示。

表 **2** 煤层厚度交叉验证结果分析

Table 2 Cross validating of coal seam thickness

井号	5601	453	D02
实际煤层厚度/m	4.62	4.47	3.83
预测煤层厚度/m	4.687 4	4.463 3	4.278 8
绝对误差/m	0.067 4	–0.006 7	0.448 8
相对误差/%	1.458 8	0.149 88	11.718

通过实验，发现所选取的煤层厚度预测方法切实可行，所获得的预测煤层厚度比较准确，完全能达到采煤生产的实际要求。

4 结 语

将粗糙集与神经网络结合的方法引入到预测煤层厚度及小断层识别领域中，选取梁家煤矿东六采区的三维地震数据，应用该方法对矿区的煤层小断层进行了预测，并将预测结果与手工解释结果、相干体的计算结果进行了对比，发现使用该方法预测小断层具有较高的精度和灵敏度；选取徐庄煤矿的三维地震数据，通过已知该煤矿的 14 口井的煤层厚度，应用该方法预测煤层厚度具有较高的精度。

粗糙集与神经网络方法对小断层的识别判断比较准确，但是对小断层的断面宽度识别不够准确，是下一步的工作中需要研究的问题。

参考文献

[1] BUSZKOWSKI W. Rough sets and learning by unification[J]. Fundament Informaticae，2007，75(1)：107–121.

[2] 王珍. 基于粗糙集和神经网络的属性约简方法研究[D]. 郑州：中国人民解放军信息工程大学，2006.

[3] 苗夺谦，李道国. 粗糙集理论、算法与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2008.

[4] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2007.