

随钻测量系统的井下数据传输方式的研究

马超群¹ 张美君¹ 翁波强¹ 宋振虎¹ 蒲向阳²

(1. 中石油长城钻探工程有限公司钻井技术服务公司, 辽宁 盘锦 124010)

(2. 中石油长城钻探工程有限公司钻井一公司, 辽宁 盘锦 124010)

摘要: 随着钻井智能化程度的不断提高, 井下与地面的信息传输已成为钻井工程领域的重要研究课题, 它在随钻测量与控制中占有十分重要的地位。通过信息传输系统可以实时监测随钻信息及地质参数等, 进而可以对井下的执行机构进行实时调控。但是信号传输的经济性、可靠性、传输速度以及工艺上的易操作性等问题一直是随钻测量技术发展的关键。而对信号传输方式的选择, 对于井下与地面信息的传输具有重要的影响。目前国内对于井下与地面的信息信号传输方式的研究和选择主要是从原理方面进行定性的研究, 本文从各类信号传输方式的原理入手, 结合各种传输方式的数学模型, 系统的介绍了电缆传输、光纤传输、声波传输、电磁传输、泥浆传输等传输方式的特征及优缺点, 及各种传输方式在国内外所取得的最新的仪器成果, 为相应的随钻仪器研发提供参考。

关键词: 数据传输方式; 有线传输; 声波传输; 电磁传输; 泥浆传输

1 井下数据传输方式简介

伴随随钻测量技术也不断进步, 目前有些随钻测量仪器探头的测量质量已经达到同类电缆测井仪器的水平, 但是与传统的测井相比, 由于受到跟地面传输稳定性及传输速率的影响, 其在传输方式上还有待改进。^[1] 在现在的定向钻井中, 井下与地面的信息传输已成为钻井工程领域的重要研究课题。而信号传输的可靠性、经济性、工艺上的易操作性以及传输速度等问题一直是随钻测量技术发展的关键。不同的传输方式, 因为其不同的传输原理及特性, 直接会影响到信号传输的上述指标, 因此如何选择传输方式, 在井下与地面的信息传输中显得尤为重要。

2 井下数据传输方式原理及特性

2.1 有线传输

有线传输方式即使用电缆、光纤等实现井下信息的传输, 其优点是可实现井下和地表设备之间的双向通讯, 数据传输率高, 实时性好; 其缺点是成本高、可靠性差、由于泥浆的腐蚀和钻柱的旋转易使电缆严重受损、不利于打捞作业, 而且需要特殊的设备和电缆盘等^[2]。目前有线传输主要在电缆和光纤测井中使用, 而在随钻测井中使用较少。

2.2 无线传输

无线传输主要包括声波传输、电磁传输、泥浆传输等传输方式。

2.2.1 声波传输

声波传输系统是利用声波或地震波经过钻杆或地层来传输信号。当钻柱、钻头与井底相互作用时, 钻柱中会出现纵向弹性波。能监测的主要参数是岩石破碎工具的回转频率, 其中主要是牙轮的振动谐波。由于振动的幅值和频率与牙轮的磨损程度具有相关性, 所以可据此来判断工具的状态。当钻进规程保持不变时, 信号的幅值变化情况还可以反映岩石的力学性质。

声波属于机械波, 在井下传输时, 会产生能量损失, 形成声波衰减。由声波的传输原理可知, 声强与声压的关系:

$$I = (P_{\max}/2)^2/Z \quad (1)$$

式中: I —声强; $P_{\max}$ —声压; Z —钻杆密度与钻杆中音的乘积。其中声压是指相无声时压力的改变量; 声强是指单位时间通过单位面积的声能量。

在声波传播时, 声强衰减如下式所示:

$$I_d = I_0 e^{-\alpha d} \quad (2)$$

式中: I —入射初始声强; I_d —深入媒质 d 距离处的声强; α —衰减系数。

式(2)用声强级表示则有:

$$U_d^2 = I \times e^{-\alpha d} \quad (3)$$

式中: U_d — d 点的声压有效值。可说明声压平方与距离 d 成指数关系。

其中, 钢中声波的衰减系数 $\alpha = 4 \times 10^{-7} V \cdot m^{-1}$, 其中 V —声波频率。

由于声波的上述特性, 导致声波信号在钻杆柱中传播衰减很快, 而且由于钻柱接头处直径的变化和丝扣装配的影响, 信号会因反射和折射而衰减。所以使用声波传输一般需要在钻杆柱内每隔 400~500m 要装一个中继站。声波传输方式的优点是: 成本较低、结构简单。其缺点是: 传送的信息量少、在钻井时抗环境噪声的干扰能力差、信号弱、信号随深度衰减快、中继装置的可靠性差、且会增加成本。目前声波特性参数测量技术最新的应用有贝克阿特拉斯公司推出的 APX 系统。

2.2.2 电磁波传输

电磁波方式传输井下数据的方式有两种: 以地层为传输介质和以钻柱为传输导体。在数据传输系统中, 主要考虑的是在接收端有效信号的数量。在电磁波传输系统中, 接收到的信号电平主要取决于两个因素: 频率和电导率, 其传输深度可以用趋肤深度来衡量。

电磁波通信系统把一个类似低频天线的电磁波发射器装在井内仪器中,通过远离钻机的电极来接收由井底发至地面的信号。由于钻井空间狭小,电磁波发射实际只有垂直天线(沿钻杆的轴向电流)和垂直磁天线(绕钻杆的水平电流环激励沿钻杆方向的磁场)两种激励方式。激励轴向电流最简单而有效的方法就是使特制的钻杆成为用绝缘接头连接的两段结构,由激励器输出的电压通过密封接头馈于两段,形成一种类似双极天线的地下非对称双极激励装置。最合适的井下激励方式为激励沿钻杆引导的轴向电流。由电磁波的传输特性知,通常用传输损耗来表示电波通过传输介质时的功率损耗。将发送功率与接收功率之比定义为传输损耗 PL。损耗常用分贝表示,其定义式为:

$$PL = 10 \lg \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \lg \left(\frac{G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right) \quad (4)$$

式中: P_t —发射点处的功率; G_r —发射天线; G_r —接收天线增益; λ —波长; d —发射天线和接收天线之间的距离。

当 $G_t = G_r = 1$ 即天线具有单位增益时,有:

$$PL = -10 \lg \left(\frac{P_r}{P_t} \right) = -10 \lg \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (5)$$

将式 $\lambda = \frac{c}{f}$ 代入则有:

$$PL = \lg \left[\frac{(c/f)^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] = -10 \lg \left[\frac{c^2}{(4\pi)^2} \right] + 20 \lg d + 20 \lg f = 20 \lg d + 20 \lg f - 32.447 \quad (6)$$

由式(6)可知,自由空间基本损耗与频率和距离有关。频率越高,距离越远,信号衰减就越厉害,所以在随钻测量中只能传输低频信号。然而,这些低频信号的频率接近于大地的频率,因此背景噪声将导致对信号的探测和恢复都是很困难的。此外,电磁信号沿钻柱的衰减严重。安装中继装置会增加成本,而且其可靠性也较差。

电磁波传输方式的优点是:传输速度较快;对钻井液的质量要求和泥浆泵的不均匀性要求低;对正常钻进没有干扰;与其他方法相比,准备工作简单,起下钻时也能传输井下资料。其缺点是:信号衰减大,只能传播低频电磁波,易受井场电气设备的干扰和岩石电阻率的影响等。目前使用电磁波的传输方式的随钻工具主要有俄罗斯的电波式井底遥测系统(ZTS),精确钻井康谱乐公司的 EMMWD 系统;斯仑贝谢公司的 E 脉冲电磁传输系统;哈里伯顿 Sperry-Sun 公司的电磁 MWD 系统等。

2.2.3 泥浆脉冲传输

泥浆脉冲的概念至少可追溯到 1929 年,并于 50 年代和 60 年代初期用于测井中。泥浆脉冲系统的优点是不需要绝缘电缆和特殊钻杆,而是用泥浆流作为动力;其缺点是数据传输较慢,传输信号易受噪声的影响。目前关于泥浆脉冲传输的研究已经比较深入,而且已经建立了泥浆脉冲传输的信号衰减模型。

$$L = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{K_l}{\pi \mu [1 + \psi \frac{K_l D}{E e} + \beta_s (\frac{K_l}{K_s} - 1) + \beta_s (\frac{K_l}{K_s} - 1)]}} \quad (7)$$

式中: β_g —体积含气率, m^3/m^3 ; β_s —固体的体积浓度, m^3/m^3 ; K_g —气体的体积弹性模量, Pa; K_l —液体的体积弹性模量, Pa; K_s —固体的体积弹性模量, Pa; E —管材的弹性模量, Pa; D —管道内径, m; e —管道壁厚, m; μ —钻井液粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; f —信号的频率, Hz; L —信号衰减到信源强度 $1/e$ 时的传输距离, m。

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{e}{D}} \left[\left(1 - \frac{\mu}{2} \right) + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D} \right) \right] \quad (8)$$

由上述模型可知,钻井液中各组分的含量和密度直接影响到钻井液的密度和压缩性。通常,随着钻井液密度压缩性的提高,钻井液脉冲的传输速度是降低的。此外,钻井液脉冲的传输速度对含气量非常敏感,随着含气量的增加,传输速度急剧下降。一般的,使用泥浆脉冲传输方式时,要求钻井液含砂量 $< 1\% \sim 4\%$, 含气量 $< 7\%$ 。

目前泥浆脉冲系统的信息传输方式有压力正脉冲、负脉冲和连续波三种。关于三种泥浆脉冲系统的工作原理,国内文献中多有介绍,在此不再赘述。三种泥浆传输方式中,负脉冲传输方式传输速度慢、信号弱、测量井深小。因此负脉冲方式已很少使用。现今国内对泥浆脉冲传输系统的研究大多是基于正脉冲方式的。但是正脉冲也存在调幅信号易受噪声等干扰,不能满足信号最佳检测需求等缺点。目前对泥浆传输方式的研究主要集中在连续波传输方式。由于该方式输出的都是正弦波。其传输信息的载波具有承载信息能力强,信号容易产生、处理、传递。

3 结论

①本文从各类信号传输方式的原理入手,结合各种传输方式的数学模型,系统的介绍了电缆传输、光纤传输、声波传输、电磁传输、泥浆传输等传输方式的特征及优缺点,及各种传输方式在国内外所取得的最新的仪器成果,为相应的随钻仪器研发提供参考;

②总的来说,泥浆脉冲作为一种低成本且相对稳定的传输方式,目前在钻井过程中得到了广泛的应用。但是有线传输方式以其巨大的传输速率;电磁波以其高传输速度,准备工作简单,起下钻时也能传输井下资料便捷性,对钻井液的低要求,对正常钻进无干扰性;成为目前的研究热点,该传输技术的成熟,也必将在以后的随钻工程中取得广泛的应用,这也是国内随钻仪器研发需要重点关注的一个方向。

参考文献:

- [1] 沈忠厚,王瑞和.现代石油钻井技术 50 年进展和发展趋势 [J].石油钻采工艺,2003,25(5):1-6.
- [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.

作者简介:

马超群,男,硕士,现主要从事随钻测量仪器研发工作。