文章编号:1673-5005(2011)01-0056-05

通讯槽对电磁波传播随钻测量信号的影响

魏宝君,徐 丹,王莎莎

(中国石油大学物理科学与技术学院,山东东营257061)

摘要:采用径向成层介质的 Green 函数分析天线屏蔽罩上通讯槽的长度、数目等参数对电磁波传播随钻测量信号的 影响规律。结果表明:增加通讯槽的长度和数目可降低电磁信号的衰减,但当这些参数增加到一定数值后信号的衰 减不再明显变化;一般取通讯槽的长度约0.1 m、数目在20个以内即可满足工程实际需要;当填充材料的电导率较 低时,其引起的电磁信号衰减可忽略不计。

关键词:电磁波传播;随钻测量; Green 函数; 通讯槽; 天线屏蔽罩

中图分类号: P 631.9 文献标志码: A doi: 10.3969/j. issn. 1673-5005.2011.01.010

Influence of communication slots on signal of electromagnetic propagation measurement while drilling

WEI Bao-jun, XU Dan, WANG Sha-sha

(College of Physical Science and Technology in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The Green's function in radially stratified media was used to analyze the influence of parameters such as the length and number of communication slots on the signal of electromagnetic propagation measurement while drilling (MWD). The results show that the electromagnetic attenuation can be reduced by increasing the length and number of communication slots, but the change of attenuation will be indistinct after these parameters have reached to some value. Generally the length is chosen as 0. 1m and the number is chosen less than 20, which can satisfy the engineering need. And the electromagnetic attenuation caused by the packing material can be neglected if its conductivity is low.

Key words: electromagnetic propagation; measurement while drilling (MWD); Green's function; communication slots; antenna shields

通讯槽是在电磁波传播随钻测量仪器天线外的 金属屏蔽罩上凿出的狭长的贯通槽,是电磁波信号 发射和接收的通道。在仪器天线外安装金属屏蔽罩 的目的一方面是为了降低寄生电磁场(尤其是横向 磁场分量)的干扰从而提高接收信号的信噪比^[15], 另一方面是为了保护天线线圈使之免受井壁磨损和 泥浆侵蚀。但是,金属屏蔽罩也在一定程度上造成 了有用的横向电场分量(或纵向磁场分量)的衰减, 其衰减程度取决于屏蔽罩上通讯槽的长度、宽度和 数目,还与屏蔽罩的厚度、材料及所选用的电磁信号 的频率有关^[23]。这些因素决定了究竟有多少纵向 磁场能穿过屏蔽罩,从而也影响着电磁波传播随钻 测量的效率,因而有必要从理论上研究通讯槽对穿 过金属屏蔽罩的纵向磁场信号的影响规律,从而为 电磁波传播随钻测量仪器的研制提供理论指导。笔 者采用径向成层介质 Green 函数的递推矩阵方法^[6] 对通讯槽不同参数和填充材料的电导率对电磁信号 衰减的影响规律进行理论研究。

1 基本理论

径向成层介质的 Green 函数在地球物理勘探领 域如阵列感应测井和电磁波传播随钻测量^[78]中具

收稿日期:2010-04-30

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0767);教育部科学技术研究重点项目(109101);山东省自然科学基金项目 (Y2007E06);中央高校基本科研业务费专项资金(10CX05006A)

作者简介:魏宝君(1969-),男(汉族),山东临沂人,教授,博士,研究方向为应用地球物理和电磁场理论方法。

有重要应用价值。文献[6]在计算时采用了递推矩 阵方法,可以方便地得到当源点和场点在任意层时 的 Green 函数,形式简洁、易于编程,并有效地解决 了上溢问题。

在圆柱坐标系中设径向成层介质共有n+1层, 由里向外的编号依次为 $l=0,1,\dots,n$,源在第j层,源 点坐标 $\mathbf{r}' = (r',z')$,则任意第l层介质内坐标 $\mathbf{r} = (r, z)$ 处场点的 Green 函数^[6] 可表示为如下形式:

$$\begin{split} \Gamma_{l}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}') &= \delta_{lj} \frac{r'}{\pi} \int_{0}^{\infty} \widetilde{\mathrm{K}}_{1}(\Lambda_{j}R) \widetilde{\mathrm{I}}_{1}(\Lambda_{j}R') \exp[\Lambda_{j}(R' - R)] \cos[\lambda(z-z')] \mathrm{d}\lambda + r' \int_{0}^{\infty} A_{l}(\lambda) \widetilde{\mathrm{I}}_{1}(\Lambda_{l}r) \exp[\Lambda_{l}(r - r_{l})] \cos[\lambda(z-z')] \mathrm{d}\lambda + r' \int_{0}^{\infty} B_{l}(\lambda) \widetilde{\mathrm{K}}_{1}(\Lambda_{l}r) \times \exp[-\Lambda_{l}(r-r_{l-1})] \cos[\lambda(z-z')] \mathrm{d}\lambda \,, \end{split}$$

$$\Lambda_{l} = \sqrt{\lambda^{2} - k_{l}^{2}}, \ k_{l}^{2} = \omega^{2} \mu_{l} \varepsilon_{l},$$
$$R = \max(r, r'), \ R' = \min(r, r').$$

式中, \tilde{I}_{1} 和 \tilde{K}_{1} 为已扣除指数项的第一类和第二类1阶复 宗量变型 Bessel 函数,将变型 Bessel 函数的指数项单 独列出可有效地解决 Green 函数计算中的上溢问题; μ_{l} 和 ε_{l} 分别为第l 层介质的磁导率和复介电系数; $A_{l}(\lambda)$ 和 $B_{l}(\lambda)$ 为待定系数,由圆柱形界面处电场和磁场切 向量的连续性条件确定,可采用递推矩阵方法快速求 解。由于式(1)的被积函数是呈指数衰减的,故编程计 算时不存在上溢现象。

若考虑到发射天线的尺寸,场点处磁矢势^[9](只有 φ分量且不随φ变化)可表示为

$$A(\mathbf{r}) = \mu_l \int_{\Omega} \Gamma_l(\mathbf{r}, \mathbf{r}') J(\mathbf{r}') d\mathbf{r}', \qquad (2)$$

式中, Ω 为发射天线的电流密度 $J(\mathbf{r}')$ 所在的区域。假设发射天线的匝数为 $N_{\rm T}$ 、半径为 a、电流强度为 I、沿轴向排列的长度为 $2\Delta z_{\rm T}$,发射天线中心的轴向坐标为 $z_{\rm T}$,则发射天线的电流密度为

$$J(\mathbf{r}') = \frac{N_{\rm T}I}{2\Delta z_{\rm T}} \int_{z_{\rm T}-\Delta z_{\rm T}}^{z_{\rm T}+\Delta z_{\rm T}} \delta(z'-z_0) \delta(r'-a) \,\mathrm{d}z_0.$$
(3)

将式(1) 和(3) 代入式(2),并考虑到磁感应强度 的径向分量 $B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}$,得到场点处磁感应强度的径向 分量为

$$B_{r} = \frac{\mu_{l} N_{T} I a}{2\Delta z_{T}} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{\delta_{lj}}{\pi} \widetilde{K}_{1}(\Lambda_{j}R) \widetilde{I}_{1}(\Lambda_{j}R') \exp[\Lambda_{j}(R' - R)] + A_{l}(\lambda) \widetilde{I}_{1}(\Lambda_{l}r) \exp[\Lambda_{l}(r - r_{l})] + B_{l}(\lambda) \widetilde{K}_{1}(\Lambda_{l}r) \exp[-\Lambda_{l}(r - r_{l-1})] \right\} \left\{ \cos[\lambda(z_{T} + R)] \right\}$$

 $\Delta z_{\rm T} - z)] - \cos [\lambda (z_{\rm T} - \Delta z_{\rm T} - z)] \} d\lambda.$ (4)

只计算发射天线外屏蔽罩上通讯槽(图1)的影响,所得到的结果同样适用于接收天线外的屏蔽 罩。设天线屏蔽罩的半径为r、通讯槽沿轴向的长度 为 Δz、单个通讯槽的方位张角为 Δφ,由于通讯槽沿 轴向相对于天线线圈的中心点对称,则穿出单个通 讯槽的磁感应强度通量为

$$\Phi = r\Delta\varphi \int_{z_{\rm T}}^{z_{\rm T}+\frac{\Delta z}{2}} B_r dz.$$
(5)

将式(4) 代入式(5),升考虑
$$r > a$$
,侍

$$\Phi = \frac{\mu_l N_{\rm T} Ia}{2\Delta z_{\rm T}} r \Delta \varphi \int_0^\infty \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\delta_{lj}}{\pi} \tilde{K}_1(\Lambda_j r) \tilde{I}_1(\Lambda_j a) \exp[\Lambda_j(a - r)] + A_l(\lambda) \tilde{I}_1(\Lambda_l r) \exp[-\Lambda_l(r - r_l)] + B_l(\lambda) \tilde{K}_1(\Lambda_l r) \exp[-\Lambda_l(r - r_{l-1})] \right\} \left\{ 2\sin(\lambda \Delta z_{\rm T}) - \sin\left[\lambda \left(\Delta z_{\rm T} - \frac{\Delta z}{2}\right)\right] - \sin\left[\lambda \left(\Delta z_{\rm T} + \frac{\Delta z}{2}\right)\right] \right\} d\lambda. \quad (6)$$
利用式(6) 可以计算穿出具有不同长度、方位张角
(宽度)、数目的通讯槽的磁通量及电磁信号的衰减

(宽度)、数目的通讯槽的磁通量及电磁信号的衰减 量,还可以计算在不同的屏蔽罩厚度和发射频率情 况下穿出天线屏蔽罩未开槽部分电磁信号的衰减 量。



图 1 天线屏蔽阜蚀截面 Fig. 1 Cross section of antenna shields

2 数值计算及讨论

在进行数值模拟计算时采用径向成4层介质地 层模型,从内向外依次为钻铤、绝缘填充材料、屏蔽 罩和空气。天线位于钻铤和屏蔽罩之间的绝缘介质 中,并缠绕在钻铤上,假设天线沿轴向排列的长度为 0.005 m。

2.1 通讯槽长度的影响

通讯槽长度的合理选择对天线屏蔽罩的机械强 度具有重要影响。若通讯槽长度太小,虽然能保证 天线屏蔽罩的机械强度,但发射出去或接收到的有 用电磁信号太弱。若通讯槽长度太大,虽然能保证 所发射或接收的电磁信号的强度,但将大大降低天 线屏蔽罩的机械强度。在分析通讯槽长度对电磁信 号的影响时假设钻铤直径为0.152 m,天线线圈直 径为0.165 m,发射频率为2 MHz。图2 为天线屏蔽 罩直径分别为0.178 m 和0.203 m 时不同通讯槽长 度对应的磁通量与通讯槽长度为0.254 m 对应的磁 通量的比值 Φ/Φ_{10} 与通讯槽长度的关系曲线。计 算时分别考察了钻铤电导率 σ_{c} 为0 和无穷大两种 情况。

由图 2(a) 可以看出,当屏蔽罩直径为 0.178 m 时,若钻铤的电导率为无穷大,则通讯槽长度达到约 0.1 m 时磁场就可以全部发射出去,若钻铤的电导 率为 0,则只有当通讯槽长度达到约 0.28 m 时磁通 量的比值才接近饱和。这是金属钻铤对电磁场的强 反射作用使得更多的电磁波发射出去造成的。由图 2(b) 可得到类似结论,但对比图 2(b) 和图 2(a) 发 现,当屏蔽罩直径增加时,磁通量的比值达到饱和所 对应的通讯槽的长度增加。当屏蔽罩直径为 0.203 m、钻铤电导率为无穷大时所需通讯槽的长度约为 0.15 m。在工程实际中一般将通讯槽的长度取为 0.1 m 即可满足需要,既能使绝大部分有用的电磁 信号发射出去或接收到,又不至于对天线屏蔽罩的 机械强度造成明显损害。



2.2 通讯槽数目的影响

通讯槽的数目对天线屏蔽罩的机械强度和发射 电磁信号的强度具有决定性作用。从理论上来说, 在通讯槽长度和宽度一定的前提下,通讯槽数目越 多,发射或接收到的电磁信号的强度越大,但考虑到 天线屏蔽罩的机械强度需对通讯槽的数目进行限 制。在分析通讯槽数目对电磁信号的影响时假设钻 铤直径为0.152 m,天线线圈直径为0.165 m,发射 频率为2 MHz,每个通讯槽的宽度为0.013 m,屏蔽 罩直径为0.178 m。计算时首先假设屏蔽罩是由电 导率为无穷大的理想导体构成,即除通讯槽外屏蔽 罩的其他部分能完全屏蔽各种频率的电磁信号,并 忽略屏蔽罩的厚度。图3为通讯槽长度取不同值时 电磁信号的幅度衰减与通讯槽数目的关系曲线,计 算时分别考察了钻铤电导率为无穷大和0两种情况。

由图 3 可以看出,随着通讯槽数目的增加,电磁 信号的衰减逐渐减小、信号强度逐渐增加,但信号强 度的增加速度却逐渐缓慢。一般将通讯槽的数目取 为 20 个以内即可满足工程实际需要。



图 3 电磁信号衰减与通讯槽数目的关系曲线

Fig. 3 Relation between electromagnetic attenuation and number of communication slots

由于天线屏蔽罩的电导率和厚度有限,除通讯 槽外屏蔽罩的其他部分也能通过部分电磁信号,并 不能将其完全屏蔽。取屏蔽罩的内径为0.178 m, 厚度为0.006 m,电导率为5×10⁵S·m⁻¹,图4为钻 铤电导率为无穷大、通讯槽长度为0.051 m、频率为 300 kHz 时穿过通讯槽和整个屏蔽罩的电磁信号幅 度衰减与通讯槽数目的关系曲线。



由图4可以看出,当通讯槽数目较少时两种情况下的幅度衰减出现差别,但差别不大。随着通讯 槽数目的增加,天线屏蔽罩的未开槽部分面积逐渐 减少,穿过未开槽部分的电磁信号也逐渐减少,两种 情况下的幅度衰减逐渐一致。

取频率为2 MHz 时重复上述计算,两种情况下 的幅度衰减无差别,可认为除通讯槽外屏蔽罩的未 开槽部分已经将电磁信号完全屏蔽。

2.3 频率和屏蔽罩厚度的影响

在随钻电磁波传播测量中一般采用较高的频率 (几兆赫兹),因此除通讯槽外屏蔽罩的其他部分可 视为能完全屏蔽电磁信号。但是,在其他类型的电 磁探测中如果采用的频率较低(如感应测量的频率 一般选为 20 kHz),则穿过天线屏蔽罩未开槽部分 的电磁信号也应考虑到。取通讯槽数目为 12,屏蔽 罩的电导率分别为5×10⁵和5×10⁷S·m⁻¹,屏蔽罩 的厚度 D 分别为0.006和0.013 m,其他参数不变, 图 5 为钻铤电导率为无穷大、通讯槽长度分别为 0.051 和 0.102 m 时穿过整个屏蔽罩的电磁信号的 幅度衰减与频率的关系曲线。

由图 5(a) 可以看出,当频率低于 1 kHz 时,电 磁信号的衰减量很小,并且不随频率变化,天线屏蔽 罩的未开槽部分对电磁信号基本没有屏蔽作用。随 着频率的增加,电磁信号快速衰减,在频率约为 60 kHz 时电磁信号的衰减量达到极大值(通讯槽长度 不同,衰减量达到极大值时对应的频率有差别)。 此后随着频率的继续增加,电磁信号的衰减量又逐 渐变小,在频率约为 200 kHz 时电磁信号的衰减量 达到稳定并且不再随频率变化。图 5(b) 相当于将 图 5(a) 的曲线沿横轴左移两格,对应于频率减小两 个数量级,这种移动是由于电导率增加两个数量级 导致的。图 5(c) 的频率虽与图 5(a) 相同,但由于 屏蔽罩的厚度增加,电磁信号衰减的极大值所对应





2.4 填充材料的电导率的影响

在钻铤与金属屏蔽罩之间的区域一般填充有绝缘材料,这层绝缘材料对天线起到保护作用。由于 井下高压、井壁磨损、钻井液侵蚀等因素的影响,时 常导致屏蔽罩开槽处的天线密封套进水,这时原来 填充的绝缘保护材料的电导率不能当作0,因而有 必要研究填充材料电导率的变化对随钻测量信号的 影响规律。

取钻铤的直径为 0.171 m、钻铤的电导率视为 无穷大,取发射天线和接收天线的直径均为 0.184 m,填充材料的外直径为 0.197 m,假设发射天线和 接收天线的匝数均为 1,发射电流强度为 1A,忽略发 射天线和接收天线的轴向宽度。计算时取频率为 2、1 和 0.4 MHz 三种情况,分别考察线圈距 L 为 0.457 和 0.762 m 处的接收天线在地层电导率 $\sigma_{\rm T}$ 为 0(自由空间)和 1 S·m⁻¹时的信号衰减与天线填充 材料电导率的关系。根据文献[6]的定义,计算结 果见图 6。

由图 6 可以看出:①在填充材料的电导率较低时,由其引起的信号衰减很小,可以忽略不计。因此,若由于某种原因导致屏蔽罩开槽处的天线密封套进水,不会引起随钻测量信号的明显衰减;②只有当填充材料的电导率高于某一较大数值时,由其引起的信号衰减才明显增加。在填充材料厚度一定的情况下,这一电导率临界值的具体数值与频率有关,频率越低,所允许的电导率临界值越大。由图 6,频率为 2 MHz 时的电导率临界值约为 0.5 kS · m⁻¹,频率为 1 MHz 时的电导率临界值约为 1.5 kS · m⁻¹,频率为 0.4 MHz 时的电导率临界值约为 4.0 kS · m⁻¹。需指出的是,采用不同的天线参数,上述信号衰减的具体数值会有变化,但曲线变化规律不变。





Fig. 6 Relation between electromagnetic attenuation and conductivity of packing material

3 结 论

(1)增加通讯槽的长度和数目均可增加穿过天 线屏蔽罩的电磁信号的强度、降低电磁信号的衰减, 但当这些参数增加到一定数值后穿过天线屏蔽罩的 电磁信号不再明显变化。

(2)一般取通讯槽的长度约0.1 m,在通讯槽的 宽度为0.013 m 时将其数目控制在20个以内即可 满足工程实际需要。

(3)在频率较高时,天线屏蔽罩的未开槽部分 可将电磁信号完全屏蔽,但频率较低时穿过天线屏 蔽罩未开槽部分的电磁信号也须考虑到。不同频率 下天线屏蔽罩未开槽部分对电磁信号的屏蔽程度取 决于屏蔽罩的电导率和厚度。

(4)当填充材料的电导率较低时,其引起的电 磁信号衰减可忽略不计,只有当填充材料的电导率 高于某一较大临界值时,由其引起的信号衰减才明 显增加。

参考文献:

- CLARK B. Shields for antennas of borehole logging devices:US, 4536714 [P]. 1985-08-20.
- [2] FREY M T, OMERAGIC D, TABANOU J R. Modified tubular equipped with a tilted or transverse magnetic dipole for downhole logging: US,0057210 [P]. 2002-05-16.
- [3] FREY M T, OMERAGIC D, TABANOU J R. Subsurface monitoring and borehole placement using a modified tubu-

lar equipped with tilted or transverse magnetic dipoles: US, 6727705 [P]. 2004-05-27.

- [4] WISLER M, THOMPSON L, PALUCH W. Method and apparatus for measurement-while-drilling utilizing improved antennas: US,5530358[P]. 1996-06-25.
- [5] CLARK B, ROSTHAL R, HOMAN D, et al. Method and apparatus for directional well logging with a shield having sloped slots: US,6297639[P]. 2001-10-02.
- [6] 杨锦舟,魏宝君,林楠. 径向成层介质的 Green 函数及 其在随钻电磁波电阻率测量中的应用[J]. 中国石油 大学学报:自然科学版, 2009,33(3):53-58. YANG Jin-zhou, WEI Bao-jun, LIN Nan. Green's func-

tions for radial stratified media and its application to electromagnetic wave resistivity MWD tool [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009,33(3):53-58.

[7] 魏宝君,张庚骥. 含金属心棒阵列感应测井仪器的井
眼校正[J]. 石油大学学报:自然科学版, 1999, 23
(3):22-26.

WEI Bao-jun, ZHANG Geng-ji. Borehole correction for array induction logging tool with metal mandrel [J].Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1999,23(3):22-26.

- [8] COOPE D, SHEN L C, HUANG F S C. The theory of 2MHz resistivity tool and its application to measurementwhile-drilling [J]. The Log Analyst, 1984, 25 (3):1-11.
- [9] 张庚骥. 电法测井:下册 [M]. 北京:石油工业出版 社, 1986.

(编辑 修荣荣)