基于 COMSOL 的随钻电磁波前视仪器天线参数仿真与优化

韩月阳，张文秀，梁朋飞，刘冉明，李弘
中国科学院地质与地球物理研究所，北京，中国。

摘要
针对随钻电磁波前视仪器天线阻抗直接影响探测性能的问题，本文基于频域电磁场理论，利用 COMSOL 建立钻铤—线圈—地层介质耦合模型，系统分析了线径、匝数、绕制方式对天线等效阻抗的影响。仿真结果表明，优选天线匝数-线径参数并选择适当的天线绕制方式能够显著降低天线阻抗，增大发射电流与磁矩，从而有效增强前视信号强度与探测灵敏度。该研究为随钻电磁波前视仪器的天线设计、结构优化及性能提升提供了理论依据和仿真支撑。
关键词：随钻电磁波、线圈结构、仿真计算。

1. 引言

随钻电磁波前视探测方法是水平井地质导向与油气储层评价的重要手段[1]，其核心原理是通过天线向地层发射电磁波并接收来自界面或异常体的响应信号，从而实现对钻头前方目标的探测。天线作为信号发射接收的关键部件，其结构设计直接影响仪器的发射效率与整体探测性能[2]。因此，天线特性分析与优化一直是该领域的研究重点[3]。

天线发射性能的优劣在很大程度上取决于线圈的结构参数。线径、匝数、绕制方式等因素，会显著改变天线的等效电阻、电感及整体阻抗特性。在激励电压一定的条件下，这些阻抗变化将直接决定线圈中的电流大小，进而改变发射磁矩和电磁场强度，最终影响信号的发射强度、传播距离和探测灵敏度。然而，目前对于随钻环境下天线参数如何通过磁矩影响发射性能的系统性认识仍较为有限，尤其缺乏针对钻铤—天线—地层介质耦合效应的精细建模与定量分析。现有设计优化多依赖经验或实际实验，难以全面揭示多参数交互作用下的阻抗匹配规律与磁场响应机制，这一研究空白制约了仪器探测能力的进一步提升。

针对上述问题，本文基于频域电磁场理论，利用 COMSOL Multiphysics 对随钻电磁波前视仪器天线进行电磁仿真建模，分析线径、匝数、绕制方式等参数对天线等效阻抗和磁场分布的影响，系统分析天线结构参数改变时在工作频率下的阻抗变化规律，进而为天线结构参数的优选提供依据。本研究旨在弥补现有分析方法在精细建模与参数解耦方面的不足，为高性能随钻电磁波前视仪器的天线设计、阻抗匹配优化及探测能力提升提供理论支撑与仿真参考。

2. 控制方程推导

2.1 控制方程

求解电磁线圈中的阻抗实际上就是求解通电天线中电压和电流的关系，其核心是求解麦克斯韦方程组。在频域条件下，麦克斯韦方程组常表示为，

$$\begin{cases}\nabla\times\mathbf{H}=\sigma\mathbf{E}+i\omega\mathbf{D}\\ \nabla\times\mathbf{E}=i\omega\mathbf{B}\\ \nabla\cdot\mathbf{B}=0\\ \nabla\cdot\mathbf{D}=\rho_e\end{cases}\tag{1}$$

式中，H 为磁场强度，J_e 为电流密度，D 为电位移矢量，E 为电场强度，B 为磁感应强度，ρ_e 为电荷密度。

根据引入矢量磁位，

$$\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A}\tag{2}$$

推导可得，

$$\mathbf{E}=i\omega\mathbf{A}-\nabla V\tag{3}$$

采用磁准静态条件下可以得到，

$$\nabla\times\left(\mu^{-1}\nabla\times\mathbf{A}\right)+j\omega\sigma'\mathbf{A}=0\tag{4}$$

螺线管线圈通常具有轴对称结构，因此可采用二维轴对称模型。

在柱坐标系下，对于轴对称螺线管，磁矢量只有环向分量。

$$\mathbf{A}=A_\varphi(r,z)\mathbf{e}_\varphi\tag{5}$$

因此，控制方程可以写为，

$$-\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{\mu r}\frac{\partial\left(rA_\varphi\right)}{\partial r}\right]-\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}\right]+j\omega\sigma A_\varphi=J_{e,\varphi}\tag{6}$$

对于螺线管线圈，源电流密度为

$$\mathbf{J}_e=\frac{NI_{coil}}{S_{coil}}\mathbf{e}_\varphi\tag{7}$$

电流大小为，

$$I_i=\int_\Omega\mathbf{J}\cdot\mathbf{e}_{coil}+\int_{\partial\Omega_i}\mathbf{J}_i\cdot\mathbf{n}\tag{8}$$

如果显示构建线圈结构，则线圈总电压为每圈导线电压之和，

$$V_{coil} = \sum V_i \tag{9}$$

2.2 边界条件

由于磁感应强度法向连续，因此可以得到，

$$\mathbf{n}\cdot\left(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2\right) = 0 \tag{10}$$

界面无表面电流，可以得到，

$$\mathbf{n}\times\left(\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2\right) = 0 \tag{11}$$

用磁矢量表示为，

$$\mathbf{n}\times\left(\frac{1}{\mu_1}\nabla\times\mathbf{A}_1 - \frac{1}{\mu_2}\nabla\times\mathbf{A}_2\right) = 0 \tag{12}$$

2.3 输入参数

在计算中对模型的输入参数表如表 1 所示。

表 1 输入参数表

属性	电导率	磁导率	相对介电常数
地层介质	0.1-0.01	1	1
钻铤	1.6×10^6	1	1
线圈	6×10^7	1	1

3. 几何模型构建

在模型构建中，采用二维轴对称几何结构表征随钻电磁波前视仪器的天线—地层耦合系统。依据实际天线绕制方式，基于轴对称坐标平面分别建立两层或三层线圈结构模型，以对应不同的匝数配置方案。具体而言，模型以仪器钻铤的中心轴线作为对称轴，将天线线圈、钻铤本体以及周围地层介质纳入同一计算域，构建钻铤—天线—地层电磁耦合系统模型。

数值模拟依托 COMSOL 平台的“磁场”（mf）物理场接口及二维轴对称模块，对线圈几何尺寸、线径、匝数及绕制布局进行精确参数化建模，具体几何构型如图 1 所示。

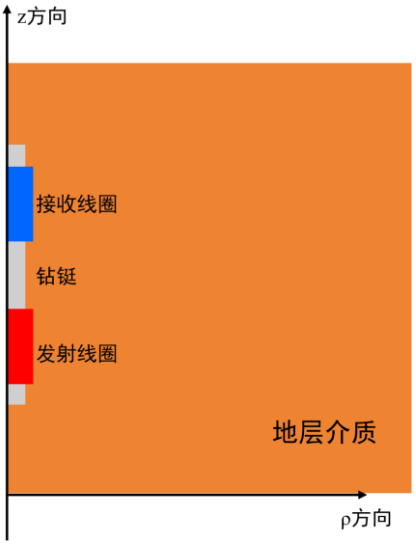


图 1 二维天线模型

通过构建二维轴对称模型，相比于三维有限元模型计算自由度降低了数个量级，使得网格剖分更加精细、求解速度大幅提升，能够在保证较高计算效率的前提下开展大规模参数扫描计算；另一方面，由于计算资源的节省，模型能够对线圈导体的每一匝细部结构进行显式建模与精细网格划分，清晰解析线圈中各匝导线之间的互感耦合效应、邻近效应及趋肤效应等微观电磁现象，避免了将多匝线圈简化为集总参数或均匀化处理所带来的精度损失。

4. 仿真结果讨论

4.1 线圈匝数和线径的影响

仿真计算固定激励电压为 40 V，电流值仅基于线圈阻抗的实部求取；其虚部表征线圈的感性分量，可通过调谐回路予以补偿，理想状态下应使其趋近于零。通过调整线圈匝数可以计算出相应线圈的阻抗。阻抗越低，在同等电压条件下的电流便越大。通过匝数和相应的电流相乘，可以得到安匝值，这个值的大小指示着发射信号的强度大小。

建立双层绕组绕制于光滑钻铤表面的仿真模型，设置每层匝数在 40 至 100 匝范围内连续变化，并据此计算不同匝数配置下的安匝数（NI）变化规律。仿真结果表明，在所考察的各频率条件下，NI 值均随匝数增加而呈下降趋势，这反映出在理想电流源激励下，较少匝数更有利于获得较高的安匝数。同时，匝数越少，电流越大。实际得电流大小受限于输出能力，故需在可行电流范围内综合权衡，以确定最优匝数组合。

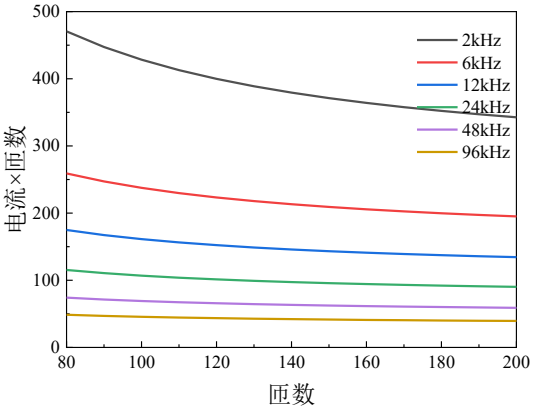


图 2 不同匝数电流×匝数数值

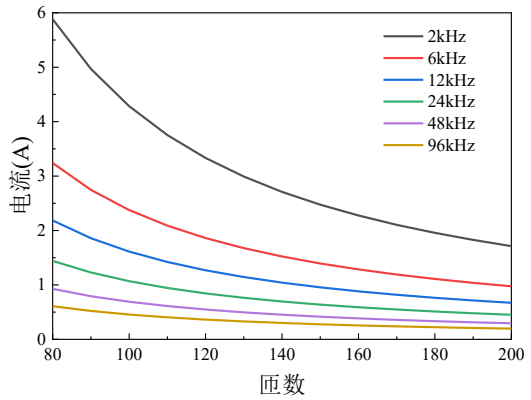


图 3 不同匝数电流大小

受趋肤效应的影响，当导线线径发生变化时，不同频率激励电流流经天线所呈现的等效电阻随之改变。本文构建了 300 匝天线的仿真模型，该天线以钻铤为骨架，采用三层绕制结构，每层均匀绕制 100 匝。通过改变导线线径，可观察到天线阻抗的相应变化及其对电流分布的影响规律，如图 4 所示。就频率依赖性而言，当工作频率升高时，趋肤深度相应减小，导体的等效导电截面积随之缩减，导致交流电阻显著增大；反之，当工作频率降低时，趋肤深度增大，交流电阻相应减小。就线径效应而言，增大导体直径能够有效拓展高频电流所流经的表层导电区域，进而实现交流电阻的降低。值得注意的是，这种由导体直径增大所引致的电阻抑制效应呈现出明显的频率选择性特征，在高频工作条件下，降阻效果尤为显著；而在低频工作条件下，该效应则相对薄弱。

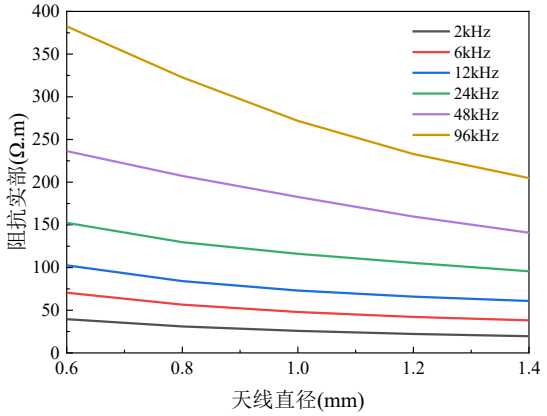


图 4 不同线径天线阻抗大小

综上所述，减少天线线圈匝数并增大导线直径，可有效降低回路电阻，从而增大激励电流，提升信号发射能力。然而，受电源功率和天线仓尺寸的双重限制，难以直接采用少匝数、大线径的天线方案。因此，需要在天线总尺寸固定的约束下，系统考察匝数与线径的协同参数关系。假设线圈可用绕制区域的最大长度为 100 mm，则不同线径对应的单层最大绕制匝数各不相同：线径为 0.6 mm 时，最大可绕制 148 匝；线径为 0.8 mm 时，最大可绕制 114 匝；线径为 1.0 mm 时，最大可绕制 93 匝；线径为 1.2 mm 时，最大可绕制 78 匝。另一方面，就天线匝数对发射性能的影响而言，匝数越少，在相同激励条件下所获得的安匝数（NI）和线圈电流越大；然而，电流受器件额定承载能力的限制，本文将其最大允许值设定为 2.5A。综合上述线径与匝数的约束关系及电流上限条件，可得到不同天线结构方案的具体参数配置，如表 2 所示。

表 2 线径-匝数参数表

	线径	单层匝数	层数	总匝数
1	1.2mm	55	3	165
2	1.0mm	86	2	192
3	0.8mm	74	2	148
4	0.6mm	62	2	124

计算相应匝数的安匝值，可得结果如图 5 所示。在有限空间体积约束条件下，当电流不大于 2.5A 时，最优的工作组合为 1.0 mm-192 匝线径的天线，此时天线组合下能够在工作频率下内提供最高的安匝值。

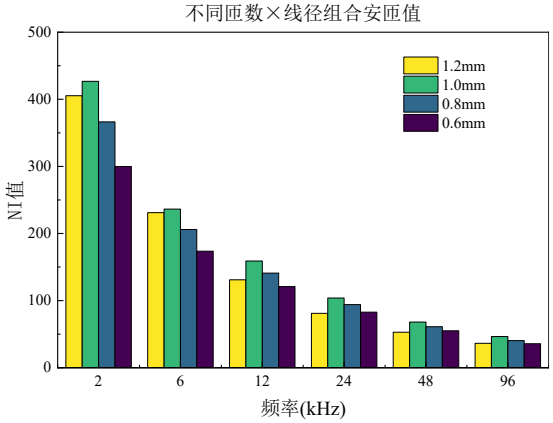


图 5 不同匝数电流×匝数数值

4.2 线圈绕制方式对阻抗的影响

在线圈绕制过程中，导线逐圈排列，相邻两匝之间可近似视为微型电容结构，其主要表现为匝间电容与层间电容。匝间电容主要源于不同匝间导线所承受的电势差异。若仅采用单层天线结构，则无需考虑层间电容的影响；而在多层绕制情形下，层间导体间距减小、重叠面积增大，层间电容效应显著增强，不可忽略。

针对多层绕制，通常存在两种绕制策略。其一为按层绕制，即先完成一层绕组后再绕制第二层，层与层之间多为首尾相接，电位差较大，由此形成的电容效应较匝间更为突出。其二为按匝绕制，即在每层对应匝数绕制完成后逐层递进，该方式使各匝导线间的电位差分布较为均匀，有助于降低层间寄生电容，从而优化天线性能。

基于上述两种绕法，按层绕制所得天线结构的磁场分布如图 6-1 所示，按匝绕制所得结果如图 6-2 所示，对比可见层间电容得到了有效抑制。此外，图 7 给出的阻抗随频率变化曲线亦表明，合理的绕制方式可显著削弱层间电容对天线电性能的不利影响。

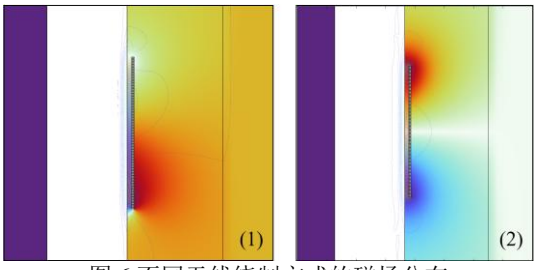


图 6 不同天线绕制方式的磁场分布

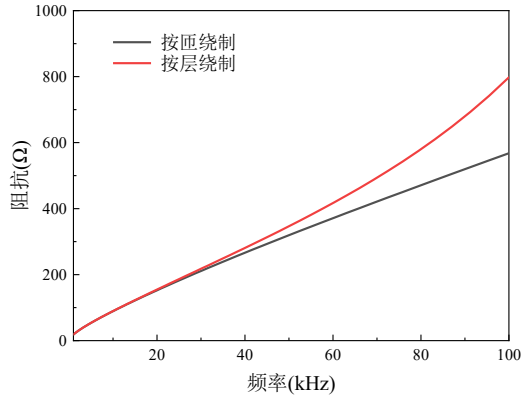


图 7 不同天线绕制方式的阻抗大小

5. 结论

本文通过对线圈线径、匝数、天线排列方式进行电磁仿真分析，得到了不同参数条件下天线阻抗大小和安匝值。可以得出如下结论。

（1）天线匝数的增加将导致线圈总阻抗增大，从而使流经天线的电流相应减小；而导线线径的增大则能够有效降低导体的交流电阻，进而使电流相应增大。上述两种因素对安匝值的影响呈现出相互竞争的关系。综合考虑有限体积约束条件下匝数与线径对安匝值的协同影响，1.0 mm 线径在匝数容纳量与单匝电流强度之间取得了较为理想的平衡，因此可确定有限体积内的最优天线线径为 1.0 mm。

（2）天线的绕制方式及匝间排布结构对其寄生电容具有显著影响。通过优化天线的绕线方式，可以有效抑制层间寄生电容效应，从而降低寄生电容对天线工作性能的不利影响，进而提升天线的信号发射效率。

参考文献

[1] Li Q, et al. New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling[C]. SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, United States, 2005.

[2] Hagiwara T, et al. Directional resistivity measurements for azimuthal proximity detection of bed boundaries[J]. SPE Journal, 2008, 13(4): 404-413.

[3] Zhong L, et al. Computation of triaxial induction logging in layered anisotropic dipping formations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 1148-1163.