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。
联系方式：han_hyy@163.com

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。

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，其核心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。因此，天线特性分析与优化一直是该领域的研究重点。

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，

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

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，$\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A}$

推导可得，$\mathbf{E}=i\omega\mathbf{A}-\nabla V$

采用磁准静态条件下可以得到控制方程，

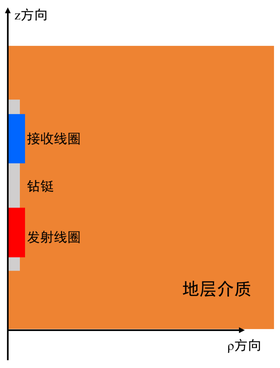
$$\nabla\times\left(\mu^{-1}\nabla\times\mathbf{A}\right)+j\omega\sigma'\mathbf{A}=0$$

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表示，控制方程可以进一步写为，

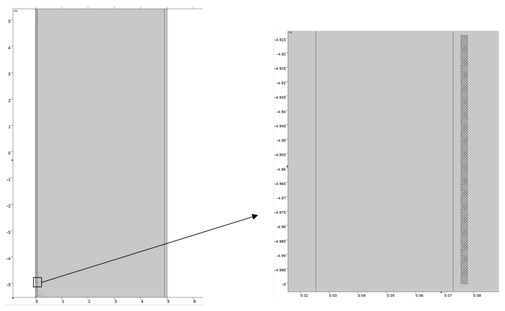
$$-\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{\mu r}\frac{\partial\left(rA_\varphi\right)}{\partial r}\right]-\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_\varphi}{\partial z}\right]+j\omega\sigma A_\varphi=J_{e,\varphi}$$

模型构建

数值建模依托COMSOL平台的磁场mf物理场及二维轴对称结构。

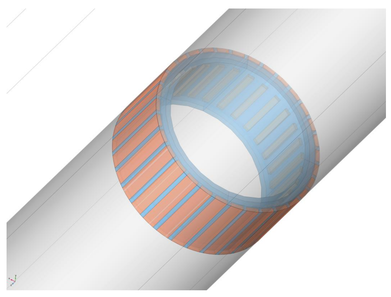


二维模型示例

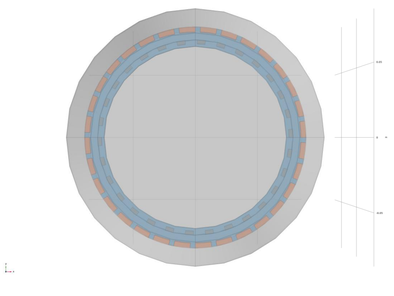


COMSOL二维模型

实际仪器存在天线罩刻槽、铁氧体磁芯等结构，无法用二维柱坐标系完全表示，需要对实际结构继续逆行精细化建模，因此，采用用mf物理场接口进行三维频域建模。



三维模型图

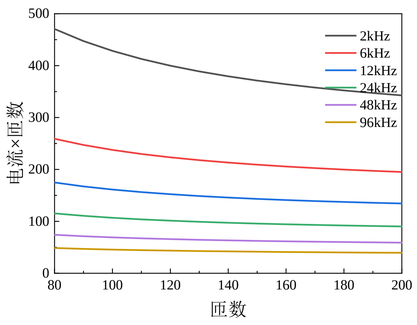


三维模型俯视图

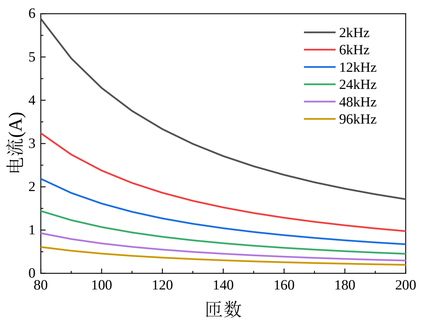
仿真结果

仿真结果一：

线圈匝数影响电磁波信号大小，当电流一定时，线圈匝数越多，则发射信号越强。恒压激励时，随着匝数增加，线圈阻抗增大，电流减小，从而导致整体信号发射强度下降。



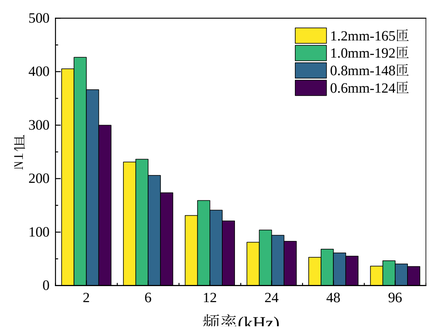
发射功率变化



发射电流变化

仿真结果二：

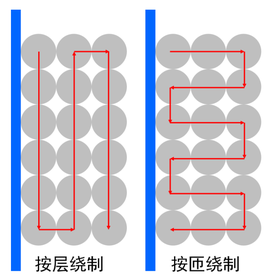
受电源功率和天线仓尺寸的双重限制，难以直接采用少匝数、大线径的天线方案。在天线总尺寸固定的约束下，系统仿真匝数与线径的协同作用。



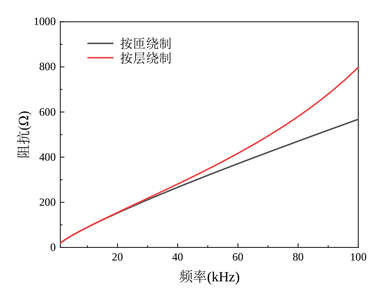
不同匝数-线径组合安匝值

仿真结果三：

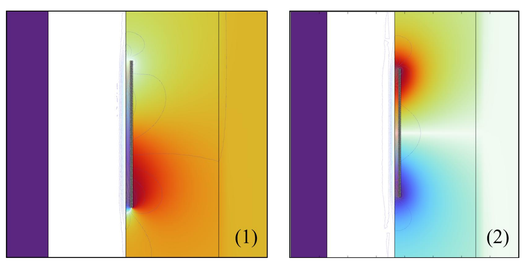
线圈绕制中，不同的绕制方式可能导致导线间寄生电容的变化，从而影响线圈阻抗。在工作频率内，按层缠绕比按匝缠绕整体阻抗更小，可以产生更强的发射信号。



线圈绕制示意图



不同绕制方式阻抗变化



不同绕制方式磁场分布

结论

本研究通过COMSOL仿真分析了线圈线径、匝数及排列方式对天线性能的影响。结果表明：匝数增加使阻抗增大、电流减小，而线径增大可降低交流电阻、提升电流，二者对安匝值存在竞争关系，1.0mm线径时在匝数与电流间取得最优平衡；此外，优化绕线方式可有效抑制寄生电容，提升信号发射效率。