基于广角极化氦三中子自旋过滤器的均匀磁场系统设计与优化

唐健[1,2]，张俊佩[1,2]，王天昊[1,2] ，童欣[1,2]

1.中国科学院高能物理研究所，北京市， 中国

2.散裂中子源科学中心，东莞市，广东省，中国

简介：极化氦三作为中子自旋过滤器（NSF），通过极化氦三原子核与中子的自旋相关吸收截面实现中子的极化与分析，在探测磁性材料的极化中子散射实验中具有不可替代的作用[1]。广角极化氦三装置要求 NSF 气室外径超20 cm，传统单对亥姆霍兹线圈在大体积范围内已无法满足磁场均匀性要求，磁场梯度导致的弛豫效应会显著降低^{3}He极化寿命，进而影响中子极化效率。本研究基于COMSOL Multiphysics® AC/DC 模块与优化模块，设计一种嵌套式双亥姆霍兹线圈系统，在20×20×8 cm^{3}大体积范围内实现10^{-4} cm^{-1}量级的横向梯度，满足广角极化氦三中子散射实验对磁场均匀性的要求。

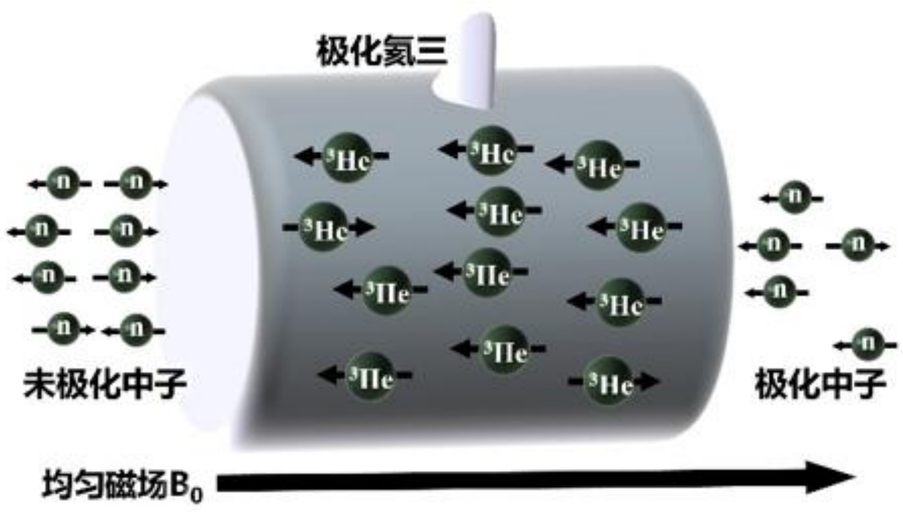


图1 极化氦三实现中子极化的原理示意图

计算方法：本研究采用COMSOL Multiphysics® 6.0版本AC/DC模块下的“磁场（*mf*）”接口进行静磁场仿真。采用优化模块内置的COBYLA算法，以中心区域（20 ×20×8 cm^3）的体积平均横向梯度为目标函数：

$$f_{obj}=\frac{1}{V}\int_V\sqrt{\frac{|\nabla B_x|^2+|\nabla B_y|^2}{B_0^2}}dV$$

其中，V 为中心区域体积，∇B_x和∇B_y为横向磁场梯度，B_0为主磁场强度。优化变量为B2线圈电流密度J_2（初始0.71 A/mm^2，约束±3 A/mm^2），收敛判据设为目标函数相对变化小于1×10^{-6}。

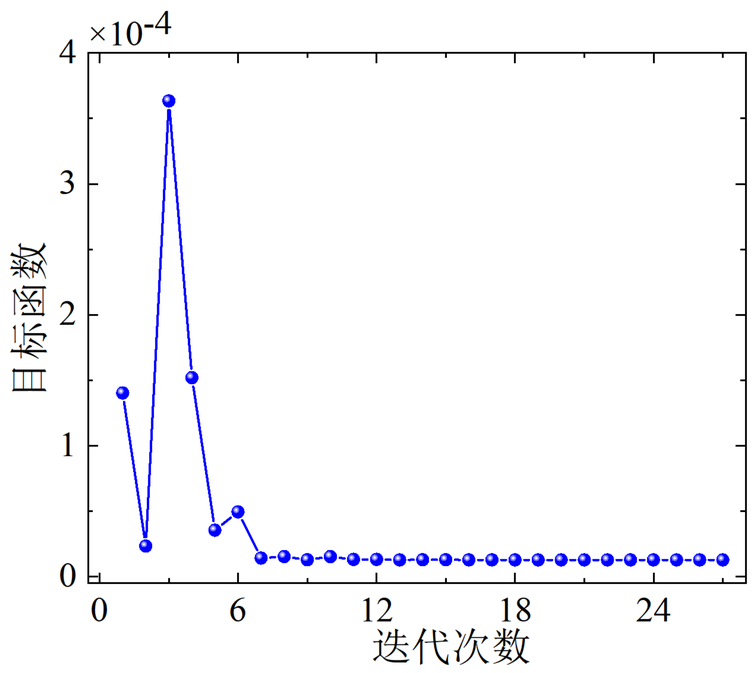


图2 目标函数随迭代次数变化，经约26次迭代后收敛

模型：这里设计了一种嵌套式双亥姆霍兹线圈系统。B1线圈外径58.4 cm（9匝×2层），B2线圈外径51.2 cm（8匝×2层）。线圈按实际矩形截面（2 mm×4 mm）建立三维实体几何形截面（2 mm×4 mm）建立三维实体几何，非线电流近似，以精确捕捉有限截面导致的场畸变效应。线圈材料为铜，外部边界设为“磁绝缘”，采用半径3.0 m的球形空气域。网格采用自由四面体网格，中心目标区域加密至8 mm，通过网格加密验证计算梯度变化小于0.3%。理论线电流模型预测梯度为1.34×10^{-4} cm^{-1}，而考虑有限截面的初始COMSOL仿真获得梯度为2.59×10^{-4} cm^{-1}，约为理论值的1.9倍，反映了有限截面效应的显著影响。

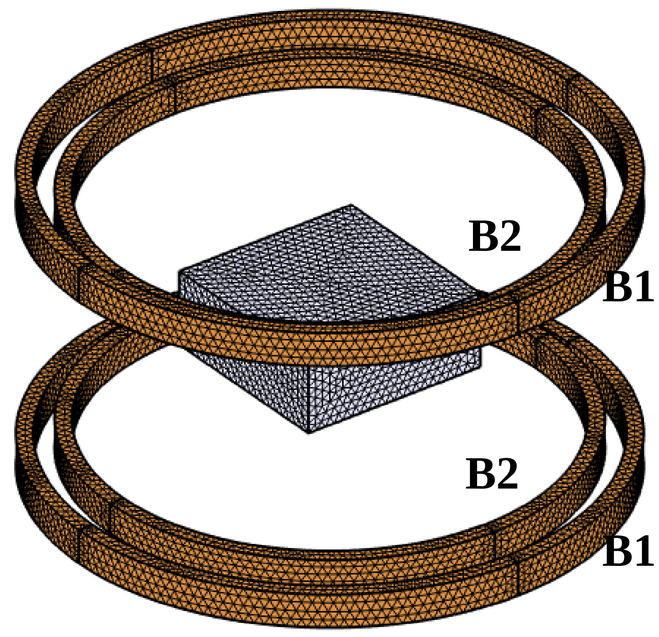


图3 双亥姆霍兹线圈 COMSOL 三维网格模型

结果：COBYLA算法将J_2优化至0.68 A/mm^2，体积平均横向梯度由优化前的2.59×10^{-4} cm^{-1}降至9.54×10^{-5} cm^{-1} [2]。同等尺寸单对亥姆霍兹线圈仿真梯度为2.05×10^{-3} cm^{-1}。按相同梯度阈值重构英国散裂中子源（ISIS）同类系统COMSOL模型，本设计均匀场有效体积占比13.26%，约为ISIS（5.39%）的2.5倍[3]。实验验证方面，三维磁场测绘实测梯度为6.31×10^{-4} cm^{-1}，两个极化氦三NSF寿命测试均>150 h。

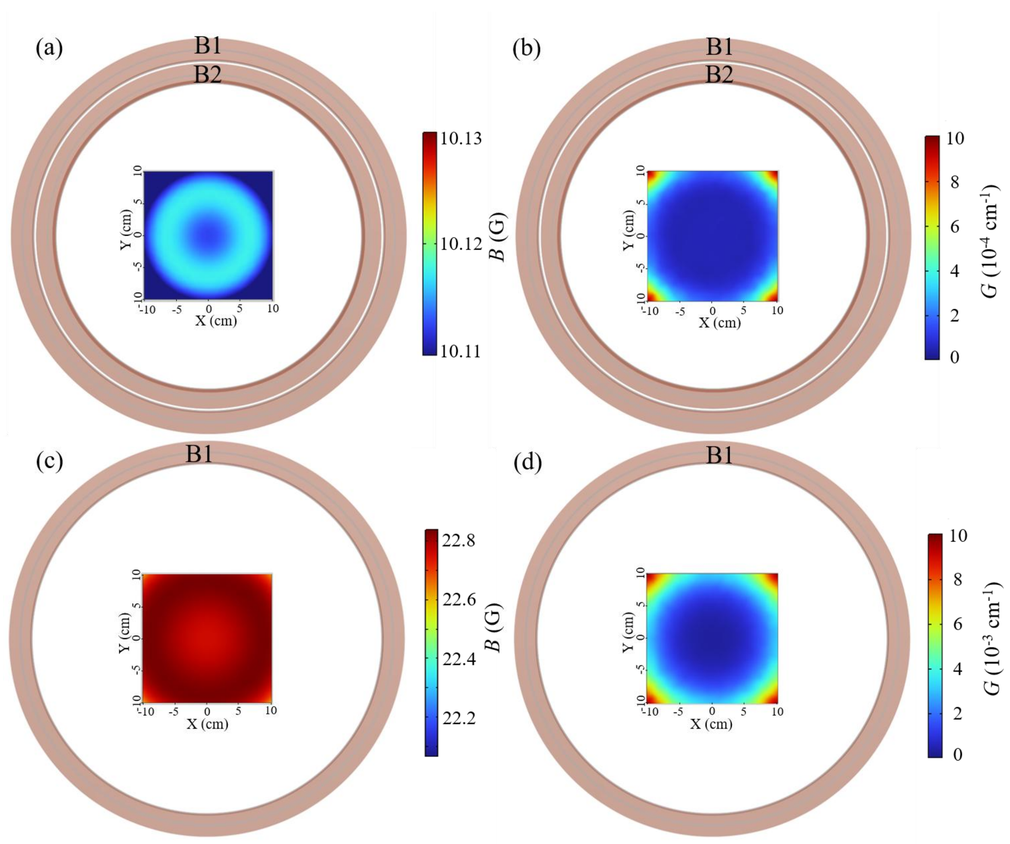


图4 中心区域（20 cm × 20 cm × 8 cm）的模拟磁场（俯视图）。（a）优化后的双亥姆霍兹线圈产生10.1 G 的磁感应强度，（b）产生 9.54×10^{-5} cm^{-1}的横向体积梯度。作为对比，（c）和（d）展示了单亥姆霍兹线圈对（B1构型）的对应结果，其磁感应强度为22.1-22.8 G，横向体积梯度为 2.05×10^{-3} cm^{-1}

结论：本研究将 COMSOL Multiphysics® 的 AC/DC 模块与优化模块成功应用于广角极化氦三磁场系统设计，主要结论如下：

（1）COMSOL优化模块可有效补偿理论线电流模型因忽略有限截面效应而产生的设计偏差；

（2）基于COBYLA算法的目标驱动优化使横向梯度降至10^{-5} cm^{-1}量级，均匀场有效体积达ISIS同类系统的2.5倍，满足广角极化氦三中子散射实验要求；

（3）“有限元建模-算法优化-实验验证”的闭环方法具有通用性，可推广至核磁共振成像、粒子物理实验及其他需要大体积高均匀度磁场的应用领域。

参考文献：

[1] Gimenez-Garcia I et al., Polarization contrast neutron imaging enables operando visualiza-tion of iron plating in redox flow batteries, Nat. Commun., 17, 6820 (2026).

[2] Tang J et al., A dual-Helmholtz-coil magnetic field system for polarized ^{3}He, Chin. Phys. B, 35, 070704 (2026).

[3] Cassella G et al., The new wide-angle ^{3}He spin filter assembly at ISIS, J. Phys.: Conf. Ser., 1316, 012007 (2019).