

磁共振成像系统梯度线圈的优化设计

潘辉¹, 郭煜晨¹, 谢军¹, 韩海涛¹, 史航¹, 王强龙¹, 刘震宇¹
1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林, 长春

简介: 磁共振成像已被广泛应用与医学诊断、生物研究和材料研究等领域。近年来, 随着生物研究等领域的发展, 细胞级磁共振显微成像成为研究的热点。相应的微尺度下高分辨率梯度线圈的设计及制造成为该领域的一大难题。

本文基于COMSOL Multiphysics软件, 建立了梯度线圈的拓扑优化模型, 并针对磁场线性度目标与电阻目标进行敏度计算与迭代优化。

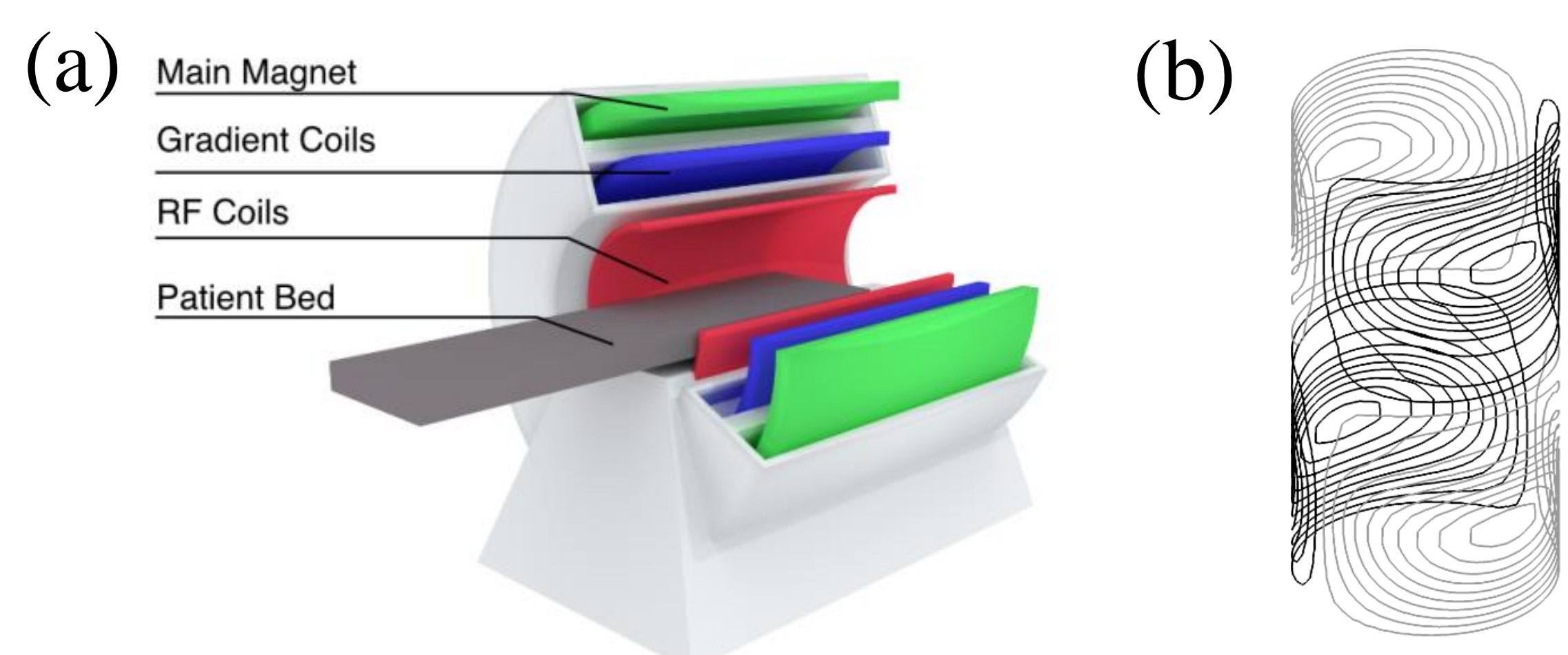


图 1. 磁共振成像系统结构示意图与传统横向梯度线圈

计算方法: 梯度线圈的作用是在目标区域(ROI)产生线性分布的磁场。如图2所示, 为梯度线圈设计表面及其展开面。在设计区域满足:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (t\sigma(\rho)\nabla V) &= 0, \text{ in } \Omega \\ \frac{\partial V}{\partial n} &= 0, \text{ on } \Gamma_N; V = U_{D1}, \text{ on } \Gamma_{D1}; V = U_{D2}, \text{ on } \Gamma_{D2} \end{aligned} \quad (1)$$

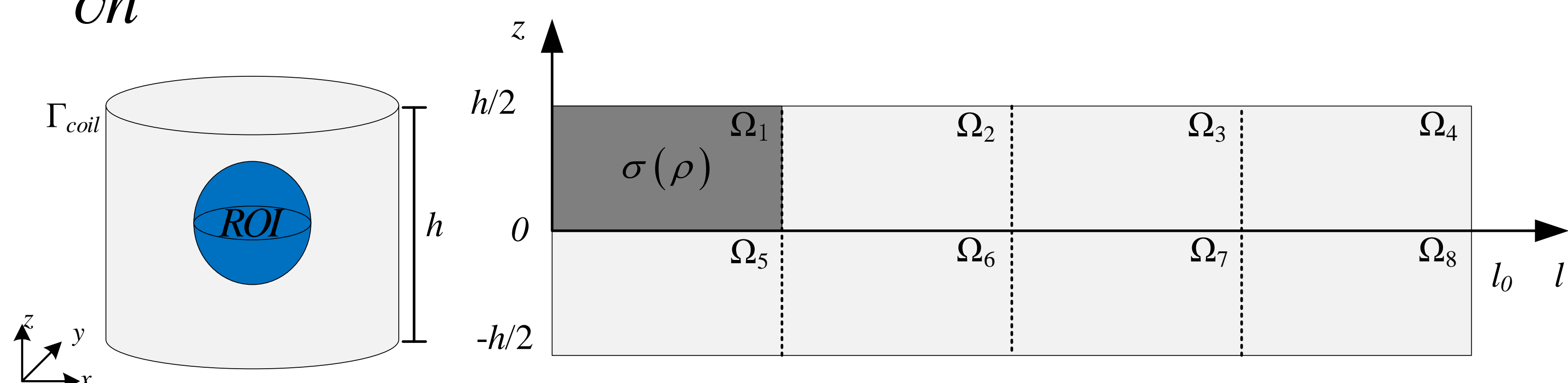


图 2. 圆柱梯度线圈及其展开面

梯度线圈的边界条件设置分别如图3所示。其在ROI区域产生的磁场强度z方向分量为:

$$B_z^i(x_i, y_i, z_i) = \frac{m_0 t}{4\pi} \oint_{\Gamma} \frac{J_y(l, z)RC - J_x(l, z)RS}{(RC^2 + RS^2 + (z - z_i)^2)^{3/2}} dW \quad (2)$$

以磁场线性度与电阻为目标的优化模型为:

$$\text{Min: } f = f_B + \alpha f_R$$

$$\text{S.t.: } \mathbf{KV} = \mathbf{P}$$

$$g_{Vol} = \sum_{i=1}^n \rho_i Vol_i \leq Vol_{\Omega}^* \quad (3)$$

$$0 \leq \rho \leq 1$$

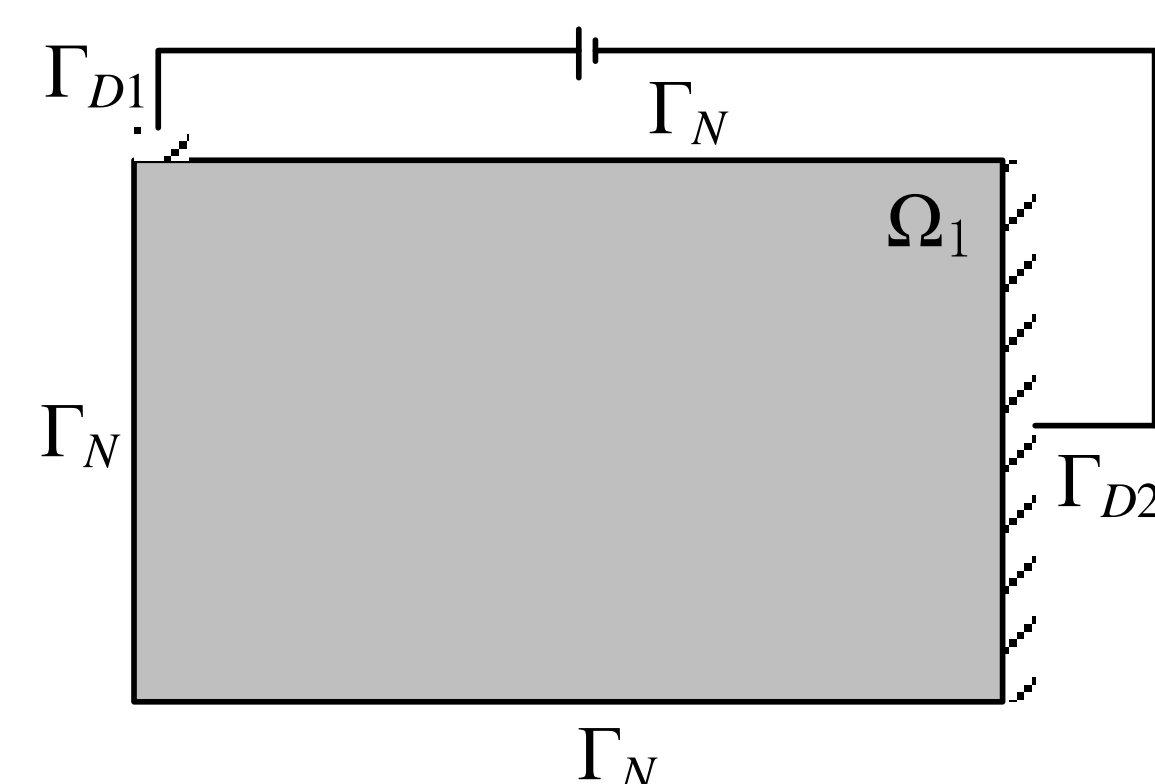


图 3. 梯度线圈边界条件

结合COMSOL敏度模块, 通过离散伴随的方式计算其敏度。

结果: 图4显示了目标值及线型与电阻目标权重系数的关系。增大权重系数有利于线型更平滑, 减小电阻, 但磁场线性度会变差。

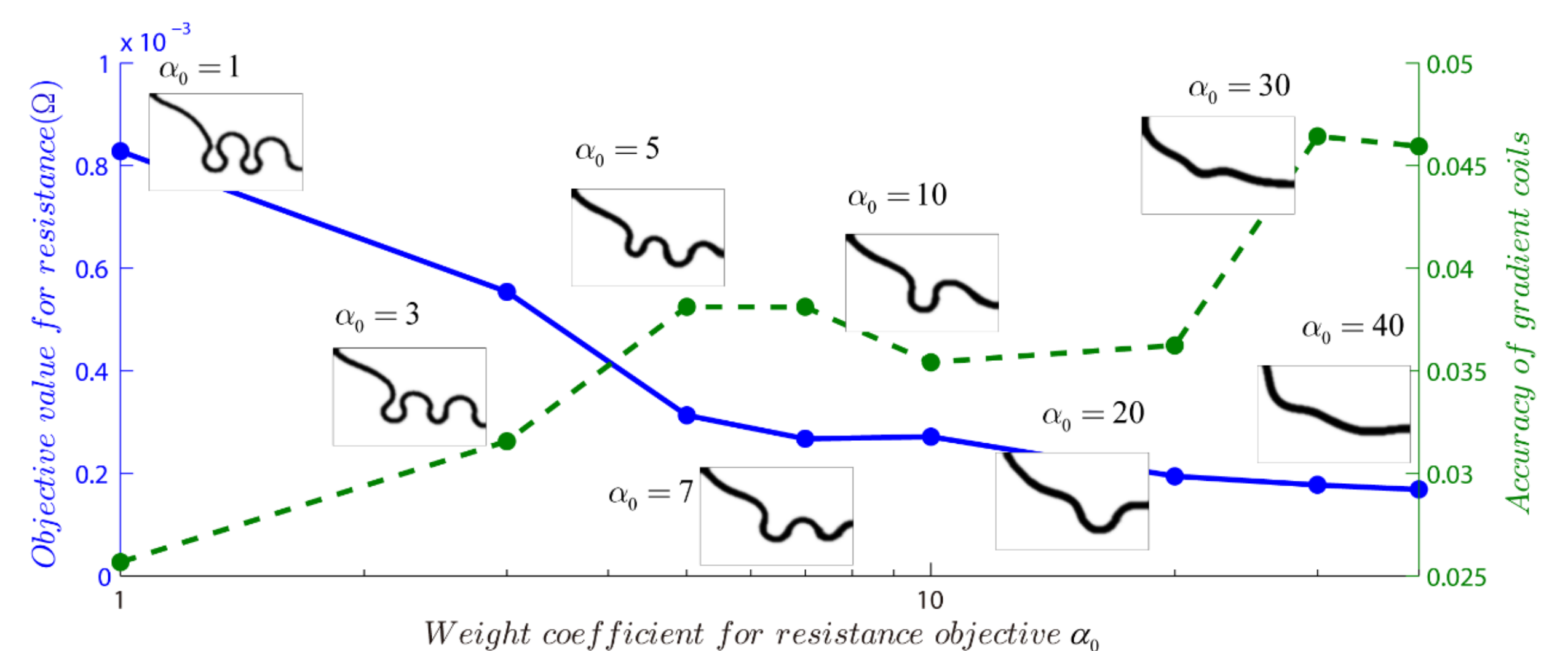


图 4. 不同权重系数下的目标值及梯度线圈线型

增加导电材料体积分数有利于减小电阻并减小电流集中从而减小电感。图5显示了不同体积分数下的线型, 其线圈性能参数如表1所示。

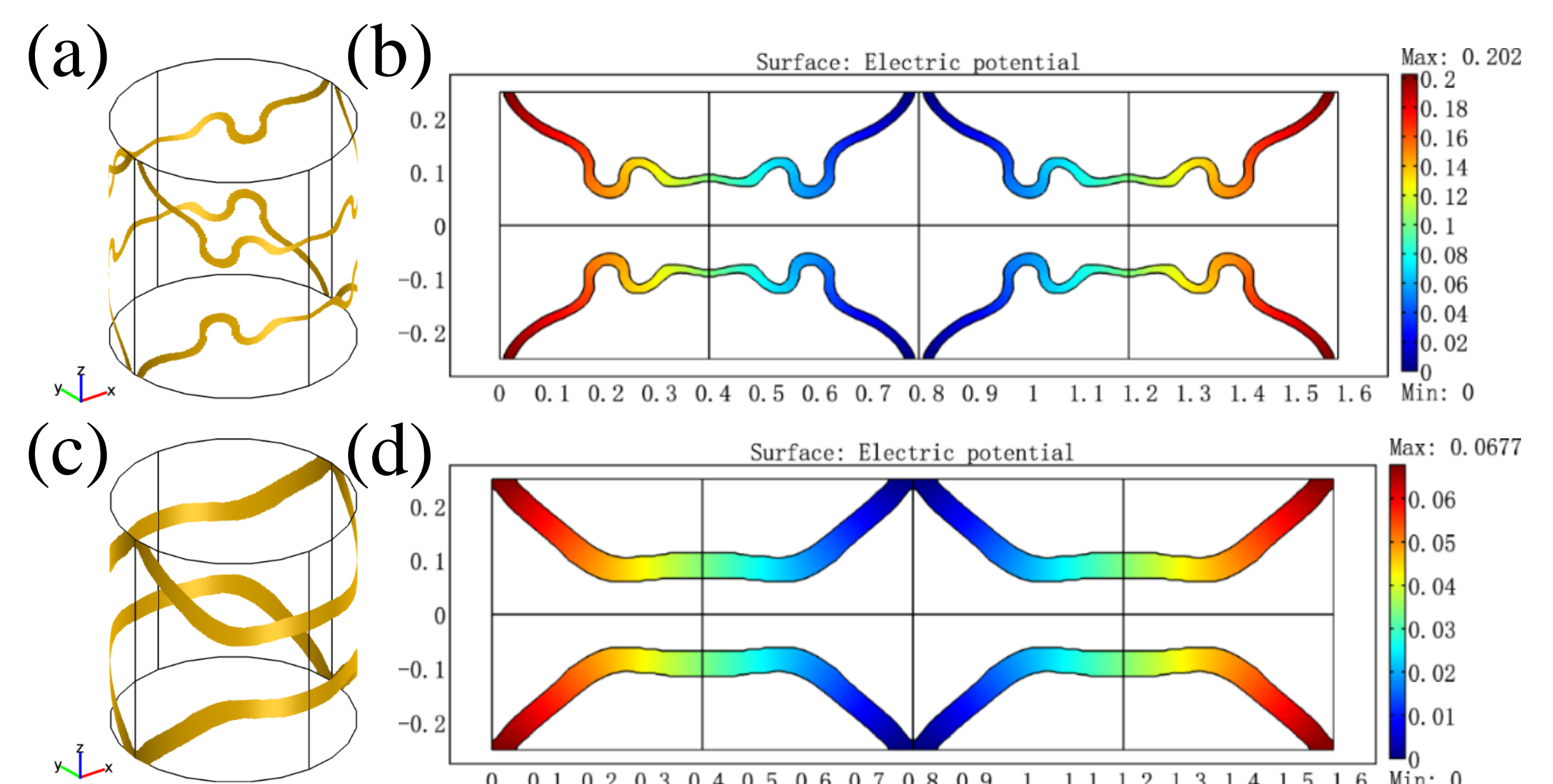


图 5. 不同体积分数下的梯度线圈完整线型及电势分布

	传统线圈	优化线圈 图5(a)	优化线圈 图5(c)
高度h[m]	1	0.5	0.5
圈数	20		
电流[A]	113.66	599.51	632.2
能耗[W]	147.7	485.36	171.2
磁场能[J]	0.9	0.8	0.62
输入电压[V]		0.2024	0.0677
电阻[Ω]	0.0114	3.4e-4	1.1e-4
电感[H]	1.4e-4	4.5e-6	3.1e-6
线性度[%]	0.77	3.88	4.16

表 1. 梯度线圈的性能参数

结论: 该方法避免了传统设计方法中离散近似过程中带来的误差, 提高了计算的准确性。为微尺度下梯度线圈的优化设计提供了更多的可能性。后续将引入涡流, 电感等线圈性能参数作为设计目标, 实现梯度线圈的多目标设计。

参考文献:

1. Liu Z Y, et al. Optimization MRI Cylindrical Coils Using Discretized Stream Function With High Order Smoothness, IEEE Transactions on Magnetics, 48 (2012) 1179-1188.
2. Smith E. Advanced modelling and optimization of gradient coils and their physical behaviour in traditional and paired MRI systems. (2017).