

基于 COMSOL 的磁共振成像双平面 梯度线圈的仿真研究

窦建辉, 朱建明

(中国计量大学 信息工程学院, 杭州 310018)

摘要: 采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对磁共振成像横向双平面梯度线圈进行仿真分析, 为高性能梯度线圈的设计及制作提供技术支持; 首先采用改进的目标场方法设计得到梯度线圈绕线的点数据, 然后利用 AUTOCAD 建立三维模型, 最后将模型导入 COMSOL 中, 进行电-磁多场耦合模型仿真和结果分析; 并且提出结合 3D 打印技术为复杂梯度线圈的制作提供技术支持; 根据设计的不同参数建立不同的梯度线圈模型进行仿真比较, 所设计梯度线圈的梯度磁场可以满足非线性度小于 5% 的应用要求; 通过横向双平面梯度线圈三维模型的有限元仿真, 可以为梯度线圈的设计和制作提供一定的参考, 对优化设计和制作性能更优的梯度线圈具有重要意义。

关键词: 磁共振; 梯度线圈; 目标场; 有限元

Simulation Studies on the Transverse Bi-Planar Gradient Coil Design Using COMSOL

Dou Jianhui, Zhu Jianming

(College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To simulate and analyze the design of transverse bi-planar gradient coil for MRI by using finite element analysis software COMSOL Multiphysics, and to provide technical support for the design and manufacturing of high performance gradient coils. Data points for winding gradient coil were initially obtained by using improved target field method for coil design from Matlab calculation, a 3D gradient coil model was then build by AUTOCAD. This model was used as the input model for COMSOL, and electro-magnetic multiple coupled fields were simulated and analyzed. Based on different design requirement and parameters, different gradient coil geometric models were built to simulate and compare with the actual design. The simulation results showed that the gradient magnetic field of the desired gradient coil can meet the application requirements with less than 5% of deviation. Using finite element analysis based simulation, transverse bi-planar gradient coils used in MRI can be accurately modeled according to design parameters. This is very important for coil design and its manufacturing, also significant for design optimization and producing of performance optimized gradient coils.

Keywords: magnetic resonance imaging; gradient coil; target field method; finite element

0 引言

磁共振成像系统 (magnetic resonance imaging, MRI) 作为目前发展最快的成像技术, 因其软组织成像性能优良, 无辐射等优点得到广泛应用, 对其成像质量和成像速度都提出了更高的要求。梯度线圈作为磁共振成像系统的核心部件之一, 其主要作用是产生 3 个相互正交的梯度磁场对 MRI 信号的进行空间定位编码, 即层面选择、相位编码和频率编码, 因此才能实现磁共振图像的重建^[1]。随着磁共振成像技术的飞速发展, 图像质量要求越来越高, 因此要求梯度线圈的梯度场场强更高、线性度更优及切换速率更快。梯度线圈的性能在很大程度上决定了成像的速度及分

辨率, 因此设计性能更好的梯度线圈对提高磁共振成像系统的性能具有重要意义。

梯度线圈的设计属于电磁场逆问题^[2], 按求解方式可以分为两类: 1) 直接求解, 即分离导线法, 首先选择基本合适的线圈几何形状, 将其产生的磁场按级数展开, 然后根据可获得最佳线性梯度原则来优化线圈的位置, 得到近似最优解; 2) 逆推法, 即目标场方法, 首先确定目标区域内的磁场强度与分布, 根据毕奥-萨伐尔定律来计算产生此磁场的表面电流密度分布, 然后用分离导线法近似电流密度分布。目标场方法^[3]是 R. Turner 在 1986 年首先提出来的, 并且实现了电感最小化^[4]。随着目标场方法的进一步发展, 可以综合考虑线圈储能、线圈电感和自屏蔽线圈等多目标约束条件, 从而设计出结构更加合理、性能更优的梯度线圈。

目前梯度线圈的加工制作方法主要有矩形铜线绕制、浇筑金属和切割金属板 3 种^[5], 之前由于加工技术水平的限制, 分离导线的设计方法应用更加广泛。之前目标场方法

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-03-20。

作者简介: 窦建辉(1991-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事梯度线圈设计、图像重建方向的研究。

通讯作者: 朱建明, 男, 教授, 硕士, 博士研究生导师, 主要从事磁共振系统及医学物理方向的研究。

所设计的梯度线圈，在一定条件下，虽然线圈综合性能得到优化，但是其加工复杂度也随之增大，限制了其实际的应用范围。但随着加工技术水平的发展，如 3D 打印技术的应用^[6]，为复杂梯度线圈的加工制作提供了依据。

对梯度线圈进行三维模型的有限元分析，可以更加接近实际情况。因此本研究采用当前应用非常广泛的有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 进行分析研究，通过有限元计算得到电磁场分布，计算精度和速度可有效提高^[7]。针对开放式磁共振系统的磁体结构，进行 x 线圈的设计及仿真， y 线圈的设计与 x 线圈基本相同， x 线圈旋转 90° 即可得到 y 线圈。 z 线圈的设计较为成熟，一般为一组规则的同圆心，设计方法与横向线圈不同。本研究首先对改进的目标场设计方法进行理论介绍，考虑线圈储能及线圈能耗为约束进行梯度线圈电流密度分布的计算，然后通过 AUTOCAD 建立三维模型，最后采用 COMSOL 有限元软件对模型进行仿真研究，分析了不同设计参数下梯度线圈的性能，为实际的梯度线圈设计提供借鉴指导。

1 目标场方法

磁共振成像横向双平面梯度线圈模型如图 1 所示。首先整个模型处于主磁场大小为 B_0 的区域内。横向双平面梯度线圈分别位于 $z = \pm L$ 的两平面上，由于线圈厚度与线圈半径相比很小，因此可以将电流密度近似限制在圆形薄片区域内，即电流密度分布在两平面的直径为 $p_0 \leq p \leq p_m$ 的圆形区域内。以坐标原点为中心的球为梯度磁场的感兴趣区域 (region of interest, ROI)，最终求得球面区域内为均匀梯度场。P 为球面任意一点。以感兴趣区域的圆心为坐标原点建立三维坐标系。假设面电流密度函数为 J ，在柱面坐标系下，将其展开为三角函数形式为：

$$J_p(p, \varphi) = \sum_{n=1}^N U_n \frac{1}{p} \sin[nc(p - p_0)] \sin\varphi$$

$$J_\varphi(p, \varphi) = \sum_{n=1}^N U_n nc \cos[nc(p - p_0)] \sin\varphi \quad (1)$$

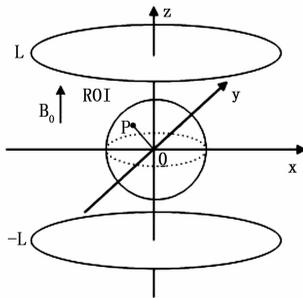


图 1 磁共振双平面梯度线圈模型示意图

式中， $c = \pi / (p_m - p_0)$ 。 U_n 为第 n 阶电流密度分量的权重系数， N 为基函数的所有分量个数。理论上 N 的个数为无穷，但实际上限于计算精度及加工技术的限制，根据设计结果选择一个足够大且有限的数字来近似电流密度。

1.1 磁场强度

根据 Biot-Savart 定律，双平面梯度线圈的电流密度函数 \vec{J}_\pm 在空间任意一点 $P(p_1, \varphi_1, z_1)$ 产生的沿 Z 轴磁感应强度分量为^[8]：

$$B_z(x, y, z) =$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{p_0}^{p_m} \int_0^{2\pi} \frac{pdp d\varphi}{R_\pm^3} [(J_p \cos\varphi - J_\varphi \sin\varphi)(y - p \sin\varphi) - (J_p \sin\varphi - J_\varphi \cos\varphi)(x - p \cos\varphi)] + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{p_0}^{p_m} \int_0^{2\pi} \frac{pdp d\varphi}{R_\pm^3} [(J_p \cos\varphi - J_\varphi \sin\varphi)(y - p \sin\varphi) - (J_p \sin\varphi - J_\varphi \cos\varphi)(x - p \cos\varphi)] \quad (2)$$

其中： μ_0 为真空磁导率， R_\pm 分别为上下极板中线圈源点到目标场点的距离，

$$R_\pm = \sqrt{(x - p \cos\varphi)^2 + (y - p \sin\varphi)^2 + (z \mp L)^2}$$

将电流密度公式 (1) 代入公式 (2) 得：

$$B_z(x, y, z) = \sum_{n=1}^N U_n M_n(x, y, z) \quad (3)$$

$$\text{其中：} M_n(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\int_{p_0}^{p_m} \int_0^{2\pi} \frac{dp d\varphi}{R_\pm^3} C(p, \varphi) + \int_{p_0}^{p_m} \int_0^{2\pi} \frac{dp d\varphi}{R_\pm^3} C(p, \varphi) \right]$$

其中： $C(p, \varphi) = (\sin\beta - qc p \cos\beta)(y - p \sin\varphi) \cdot \sin\varphi \cos\beta - (\sin\beta \sin^2\varphi + qc p \cos\beta \cos^2\varphi) \cdot (x - p \cos\varphi)$
 $\beta = qc(p - p_0)$

当已知目标区域场点坐标时，可以将磁场 z 轴分量 $B_z(x, y, z)$ 写成矩阵形式：

$$\mathbf{B}_z = \mathbf{M}^T \mathbf{U} \quad (4)$$

其中： \mathbf{B}_z 为 \mathbf{M} 个目标区域的场点沿 Z 轴场强分量的列向量， \mathbf{M}^T 可根据所设置的坐标由公式 (3) 直接计算出来，然后通过矩阵运算求解出 \mathbf{U} 中的 N 个基函数分量的未知权重系数 U_n ，即求得近似的电流密度。

1.2 建立目标函数

电感作为衡量梯度线圈性能好坏的一个重要指标，对成像速度有着至关重要的影响。要得到更快的开关速度，必须使得线圈电感尽可能减小。根据基尔霍夫定律可知，为了减小电流的时间常数，需要低电感和高电阻。显然电阻的增高受到梯度电源功率和散热效率的限制，不可能无限制增大，因此需要尽可能的获取最小电感。为了优化提升梯度线圈的综合性能，发挥目标场设计方法的特点，以梯度磁场的非线性度、线圈电感储能和线圈能耗为约束函数，建立目标函数。

线圈储能：

$$E = 2E_\pm = \int_V \vec{A} \cdot \vec{J} dV \quad (5)$$

式中， \vec{A} 为磁矢量， \vec{J} 为电流密度向量， V 为电流密度分布范围。

线圈功率：

$$P = 2P_\pm = \frac{2\delta}{t} \iint_S dp d\varphi ((J_p \cos\varphi - J_\varphi \sin\varphi)^2 + (J_p \sin\varphi - J_\varphi \cos\varphi)^2) \quad (6)$$

式中， δ 为梯度线圈的电阻系数， t 为线圈厚度， S 表示电流密度在平面上的分布区域。

求解电流密度分量的权重系数是一个经典的问题。以所有设置的目标场点的 z 轴磁场强度误差平方和最小为目标，同时考虑线圈储能和线圈能耗的多因素约束，构建目

标函数:

$$F = \sum_{m=1}^M (B_{z,n} - B_{zdes,n})^2 + \lambda_1 E + \lambda_2 P \quad (7)$$

式中, $B_{z,n}$ 表示仿真实验中得到的第 n 个场点的 Z 轴磁场强度分量, $B_{zdes,n}$ 表示理想设计中第 n 个场点的 Z 轴磁场强度分量。 λ_1 、 λ_2 分别表示线圈储能和线圈能耗的权重系数。

1.3 电流密度离散绕线分布

电流密度函数满足连续性方程, 柱面坐标下流函数 ψ 满足如下条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} = -J\varphi \\ \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} = \rho J\rho \end{cases} \quad (8)$$

将电流密度函数带入得:

$$\psi(\rho, \varphi) = - \sum_{n=1}^M U_n \sin[nc(\rho - \rho_0)] \cos\varphi \quad (9)$$

最后将流函数离散化得到梯度线圈的绕线分布。由于线圈是对称的, 设半圆平面上的线圈匝数为 N_i , 得到离散公式有:

$$\psi = \psi_{min} + (i \pm 0.5) \frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{2N_i} \quad (10)$$

其中, ψ_{min} 、 ψ_{max} 分别为流函数在半平面区域内的最小值和最大值。

2 三维仿真研究

COMSOL 多物理场仿真软件通过有限元方法模拟在科研和工程中能用偏微分方程 (PDE) 描述的各种问题, 用户只需选择或者自定义不同专业的偏微分方程进行任意组合便可轻松实现多物理场的直接耦合分析, 并提供了友好的图形用户界面, 全面的第三方 CAD 导入功能, 支持当前主流 CAD 软件格式文件的导入, 同时拥有高效的计算性能和强大的多场双向直接耦合能力, 能够实现高精度的数值仿真^[9]。

本文利用此有限元软件分析梯度线圈施加电流后的磁场分布情况, 线圈内的电流密度分布情况。在 COMSOL 软件中, 通过调整和修改模型参数, 材料属性和施加电流的大小和方向, 可以得到梯度线圈产生的不同磁场分布和磁场强度的大小。通过后处理, 来分析和评价梯度线圈的综合性能, 然后通过模拟仿真的结果来调整梯度线圈的设计参数, 以使得设计结果更加符合实际成像速度和质量的要求。图 2 为本文的整体设计分析流程图。



图 2 整体设计流程图

结合 COMSOL 的强大计算分析能力, 对所设计的梯度

线圈模型进行模拟仿真, 来检验设计结果的优劣。

2.1 导入模型

通过 MATLAB 计算线圈的绕线分布情况, 得到梯度线圈离散的坐标数据。采用 AutoCAD 建立梯度线圈的 3D 模型, 最后将模型导入 COMSOL 软件中进行模型的检测与调整, 然后进行仿真计算分析, 图 3 为双平面 x 梯度线圈模型图。

如图 3 所示, 双平面 x 梯度线圈的材料为圆形铜线, 也可选择方形材料, 线圈的上下为两块硅钢板, 用来屏蔽线圈与主磁体, 减小产生的涡流, 中心为球形目标区域。因为求解时还需添加求解区域, 因此最后还要添加圆柱体区域包括整个模型。

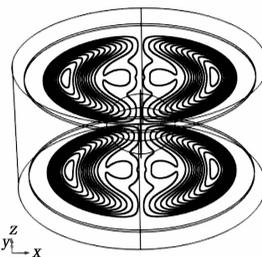


图 3 横向双平面 x 梯度线圈三维模型图

2.2 定义模型材料属性

选择 COMSOL 自带材料库中的材料, 设置上下极板材料为硅钢片, 线圈材料为铜, 中心球面目标区域和整个圆柱求解域材料为真空。

2.3 添加物理场

添加所要研究的物理场, 选择磁场 (mf)。添加线圈电流激励, 设置导体模型为单匝线圈, 线圈激励类型为电流, 最后在几何分析中添加输入, 设置电流大小, 并选择电流方向, 对称双平面梯度线圈的电流方向相反, 因为线圈匝数较多, 在添加电流激励之前可以先进行显示定义, 将线圈组定义为显示线圈, 这样再添加电流激励就可以了。

2.4 划分网格

COMSOL 软件有物理场控制网格和用户控制网格两种模式。物理场控制网格是选择自由四面体网格类型进行剖分, 网格单元质量根据模型大小分为 9 个等级, 用户可自由选择。用户控制网格可以选择网格的形状, 网格划分方式, 以及自定义网格单元的大小范围。本文模型主要为圆柱线圈, 形状较为规则, 因此采用物理场控制网格模式, 选择较细化的单元质量进行自由四面体类型的网格划分, 提高实验结果的精确度。

2.5 研究

添加研究进行求解。因为整体线圈为不规则圆形形状, 首先需要对线圈的几何形状进行分析, 以获取电流在线圈中的电流分布状况。所以研究分为两步: 首先要添加研究步骤 1, 添加线圈几何分析研究, 得到电流在线圈中的电流密度分布; 然后选择步骤 2, 添加稳态研究, 得到线圈的磁通密度分布。

2.6 后处理

研究计算完毕后得到线圈中的电流密度分布、磁场分

布以及线圈电感等数据，COMSOL 在计算过程中能够对所有数据进行保存，以便我们对其进行后处理，得到表格或图表等性能分析结果，如图 4。

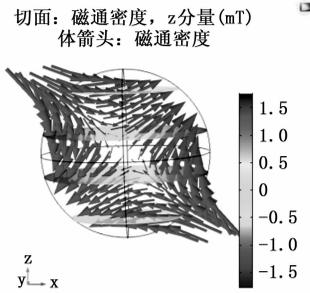


图 4 磁通密度切面及磁感应强度分布图

3 仿真实验结果分析

本文所设计的横向 x 梯度线圈，线圈为直径为 0.2 cm 的圆形铜线，平面线圈半径大小为 42 cm，线圈中心留有直径为 1 cm 的圆形孔洞，用来固定线圈，目标区域半径大小为 15 cm，线圈距目标区域圆心距离为 23 cm，求解域为长 60 cm，底面直径 80 cm 的圆柱体，电流激励大小为 500 A，所设置目标场点为在目标球面区域上，均匀放置，放置个数为 18，并计算其理想磁场强度 z 轴分量。主要仿真结果如图 4，观察其磁通密度切面图及磁感应强度在 xz 平面上的 z 轴分量图。

梯度线圈评价指标主要采用梯度场的场强、非线性度、电感和电阻，综合考虑 4 种指标，选择合适的设计方案。梯度场场强决定了空间分辨率，场强越高，图像的分辨率越高。通常要求梯度场的非线性度小于 5%，线性度越好，空间定位越准确，图像的质量也就越好。对于快速成像和实时成像，线圈电感和电阻是影响其质量的重要因素，成像速度越快，要求梯度线圈的开关速度也就越快，因此就要求线圈的电感越小，以便梯度场的快速产生和消失。由仿真结果计算所有线圈的自感与互感，得到线圈电感和线圈间的耦合关系，来评价设计结果是否符合要求。

在第一象限区域内设置与 x 轴平行的 16 根直线，作为磁场的检测线，对其进行均匀采样，由公式 (9) 计算梯度场的非线性度。

$$\epsilon = \left| \frac{B_{z(des,i)} - B_{z(cal,i)}}{B_{z(des,i)}} \times 100\% \right| \quad (9)$$

$$i = 1, 2, 3 \dots P$$

其中， $B_{z(des,i)}$ 为理想设计情况下目标区域点的 Z 轴磁场强度， $B_{z(cal,i)}$ 是根据毕奥萨伐尔定律计算得到的 Z 轴磁场强度。P 为计算非线性度所取的总的采样点的个数。

图 5 为磁感应强度 z 轴分量在 x 方向的变化曲线，根据所设置的 16 根采样线对目标区域内磁场强度 z 轴分量进行采样，绘制曲线图。由结果可知，目标区域中心位置梯度场较为均匀，线性度较好，符合设计预期，在边缘处开始产生较大的震荡。

表 1 为在选择不同线圈匝数时，梯度线圈的综合性能评价。可以看出，随着线圈匝数的变化，梯度场的非线性

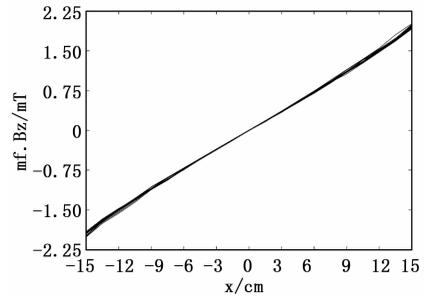


图 5 磁感应强度 z 轴分量

度、线圈储能和线圈能耗的变化并非线性，需根据实际要求选择合适的匝数。当线圈匝数为 13 和 14 时，梯度场的非线性度才满足小于 5% 的应用要求，因此线圈匝数需从二者中进行选择。此时，线圈电阻和电感都能够满足需求，如果选择较大的线圈匝数，梯度场场强较高，而梯度场的非线性度、电感和电阻均增加，然而其场强的增加程度是否优于其非线性度、电感和电阻所带来的不利影响。因此需要根据实际要求来综合考虑设计参数。

表 1 不同线圈匝数下的设计结果

线圈匝数 (匝)	非线性度 (%)	磁场梯度 (mT/m)	电阻 (Ω)	电感 (mH)
11	8.63	18.325	0.01324	0.5608
12	5.98	19.658	0.01442	0.6118
13	3.65	26.654	0.01594	0.6627
14	4.85	26.846	0.01681	0.7138
15	6.32	27.023	0.01923	0.7648

表 2 为在确定线圈匝数为 13 后，梯度线圈在不同基函数分量个数情况下的性能。由表 2 可以看出，当基函数分量个数增加时，线圈的磁场梯度、电感及电阻变化没有线圈匝数增加时变化的明显，其非线性度减小，说明其设计结果对于图像质量有所改善。但是在使用 MATLAB 计算其线圈分布数据时，计算时间明显延长。通过表 1 和表 2 可以看出，磁场梯度的增加主要与梯度线圈匝数变化有关，同时由于线圈匝数的增加，使得线圈电阻和电感都会增加，而梯度场非线性度的变化与线圈匝数及基函数分量个数都有关系。

表 2 不同基函数分量个数下的设计结果

基分量个数	非线性度 (%)	磁场梯度 (mT/m)	电阻 (Ω)	电感 (mH)
3	3.65	26.654	0.1594	0.06627
4	3.03	26.479	0.1931	0.06012

基于图像质量应该作为设计结果的主要要求，因此首先应该考虑线圈非线性度，作为筛选条件。实验表明，由目标场方法设计，采用流函数方法对线圈分布进行离散时，当线圈匝数超过 15 匝时或者当基函数分量个数超过 5，如图 6，梯度线圈的绕线开始产生震荡，之前限于加工技术的水平，震荡小线圈的出现使得加工的难度大大增加，现在利

(下转第 214 页)