

基于 Computer Simulation Technology 的磁共振射频线圈模拟与设计

何汶静, 许玉霞, 黄正宽

川北医学院医学影像学院, 四川 南充 637000

【摘要】目的:基于 CST(Computer Simulation Technology)软件设计磁共振射频线圈,利用软件功能计算 S 参数、驻波比,求解每个网格的电场和磁场的方向、大小等,辅助完成实际线圈设计。**方法:**以单圈线圈为例,设计 3 层仿真模型:铜箔线圈层、环氧玻璃布层压板层、水模层。正确输入每一层的材料参数,并加入电容、端口等集总参数元件。设计合适的网格划分要求,插入场监视器。**结果:**数据结果包括一维结果和二、三维结果,其中一维结果包括 S 参数,驻波比,不连续端口的电流、电压、阻抗,集总参数元件的电流、电压、阻抗等,二、三维结果包括电场分布、磁场分布、表面电流等。从 S11 参数看出此线圈模型可在 21.86 MHz 处实现调谐和匹配,实际中可用作 0.5 T 磁共振成像设备的线圈。电磁场分布结果可以看出电容附近电场强度较高,磁场强度在线圈附近 z 方向强度较高。**结论:**磁共振射频线圈的设计可以利用 CST 软件辅助完成,通过调整线圈的形状、铜箔宽度等建立模型,根据 S 参数查看调谐匹配、耦合结果,通过场监视器的设置,查看二、三维电磁场分布。由结果再修改模型,最终完成设计。

【关键词】CST 软件;磁共振;射频线圈

【中图分类号】TP391.9;TM936.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)01-0044-04

Simulation and design of MRI radiofrequency coil based on computer simulation technology

HE Wenjing, XU Yuxia, HUANG Zhengkuan

Medical Image College, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China

Abstract: Objective To design a magnetic resonance image (MRI) radiofrequency (RF) coil based on computer simulation technology (CST) software. The CST software function is used to calculate the S-parameter, voltage standing wave ratio (VSWR), and measure the direction and intensity of electric field and magnetic field of each mesh, assisting the coil design. **Methods** Taking single RF coil as an example, a simulation model of 3 layers is designed, including copper layer, epoxide woven glass fabric laminated sheet, and water phantom layer. Material parameters of each layer were input correctly, and the lumped elements, such as ports and capacitances, were added. Appropriate mesh control properties were set and the field monitors were inserted. **Results** The data results include one-dimensional (1D), two- and three-dimensional (2D/3D) results. The 1D results included S-parameter, VSWR, the current, voltage and impedance of discrete ports, the current, voltage and impedance of lumped elements. The 2D/3D results included electric field distribution, magnetic field distribution, surface current. The 1D simulation result of a single RF coil (S11) parameter indicated that the coil model achieves the tuning and matching at 21.86 MHz, and the coil model was suitable for the 0.5 T MRI device. The results of electromagnetic field distribution showed that the higher the electric field intensity near the capacitance, the higher the magnetic field intensity at the z direction near the coil. **Conclusion** The design of MRI RF coil can be finished with the assistance of CST software, and the model is established by adjusting the shape of coil and the width of copper foil. Based on the results of the S parameters which show the tuning and matching, and the coupling results and the field monitor which can be used to display the 2D/3D electromagnetic field distribution, the model is modified and completed.

Keywords: computer simulation technology software; magnetic resonance image; radiofrequency coil

【收稿日期】2016-07-17

【基金项目】川北医学院 2015 年高等教育教学改革与研究课题;四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(川教函[2014]156 号-350)

【作者简介】何汶静,讲师,硕士,研究方向:生物医学工程,E-mail: 18990715902@163.com

【通信作者】许玉霞,助理研究员,硕士,研究方向:教学管理及医学信息管理,E-mail: 37447248@qq.com

前言

磁共振成像技术由于其无损伤, 无放射性, 可成像生理参数丰富, 可进行功能成像等优点, 目前已日益成为医院的核心检查设备^[1], 广泛用于临床影像诊断^[2]、脑功能研究^[3]、生理学研究^[4]、分子生物学^[5]等方面。射频线圈是磁共振成像系统的关键组成部分之一, 以表面线圈为例, 在线圈的设计过程中, 文章首先用 CST (Computer Simulation Technology) 软件仿真线圈模型, 完成线圈在空间环境中的电磁场计算, 从而确定理论方向, 然后用矢量分析仪等测量设备, 实现调谐和匹配。

1 CST 软件介绍

1.1 软件功能

CST 软件是国际知名的电磁场仿真软件, 其中的 CST 微波工作室 (CST Microwave Studio, CST MWS) 可进行高频电磁场分析和设计。用户仅需输入固态 3D 模型, 设定其模型的物质属性和边界条件, 即可实现电磁场的网格化和自动模拟计算。

CST MWS 可以提供多种仿真技术以满足不同的需要: 传递函数解 (Transient Solver)、频域解 (Frequency Domain Solver)、积分方程解 (Integral Equation Solver)、本征模解 (Eigenmode Solver)。

在磁共振成像系统中, 射频线圈^[6]用来产生激励样品的射频电磁场以及接收样品发射的携带样品特定信息的磁共振信号^[7], 主要分为容积线圈和表面线圈^[8]。由于工作频率较高, 射频线圈不能当作集总参数元件分析, 所以在分析求解时需要用电磁场的分析方法, CST MWS 采用业界先进的有限积分法 (Finite Integration Technique, FIT), 即对麦克斯韦方程离散化, 并迭代求解。广泛用于电气、电子、通信、电源等领域的电磁场、电磁兼容、耦合、辐射等问题的分析中。除此之外, CST 软件中专门集成了可用于生物医学方面的电磁场仿真, 比吸收率 (Specific Absorption Ratio, SAR) 分析^[9]。

1.2 FIT

根据麦克斯韦积分方程:

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (1)$$

$$\oint_{\partial S} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (3)$$

$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (4)$$

为了将其离散化以进行数值求解, 需要进行网格剖分。Yee 网格^[10]是一种经典的直角坐标系下的剖分方式, 它将材料网格化为“单元格”, 每个单元格都有不同的材料属性, 如图 1 所示, 其中每个电场分量都由 4 个磁场分量包围, 每个磁场分量也由 4 个电场分量环绕。

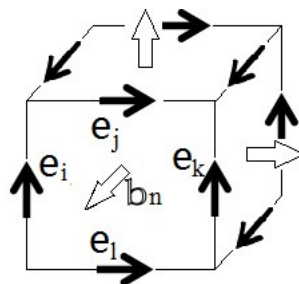


图 1 Yee 网格

Fig.1 Yee grid

其中 e 代表电场分量, b 代表磁场分量, 则可将方程 (1) 离散为:

$$e_i + e_j + e_k + e_l = b_n \quad (5)$$

进一步写为矩阵的方程为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i \\ e_j \\ e_k \\ e_l \end{bmatrix} = -\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} b_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

等式左边第一个行列式用 C 表示, 第二个竖式用 e 表示, 左边竖式用 b 表示, 求导后用 \dot{b} 表示, 即: $Ce = -\dot{b}$ 。四个方程均进行离散化可得:

$$-\dot{b} = Ce$$

$$Sb = 0$$

$$i + \dot{d} = \check{C}h$$

$$\check{S}d = q$$

2 CST 软件中构建 MR 线圈模型

设计线圈制作材料选择为铜箔, 将其固定在 FR-4 环氧玻璃布层压板上, 并焊接分布电容和其它元器件。将模型输入到 CST 软件中, 即可进行仿真分析。

建立新工程 (Create a new project) 时, 选用微波和 RF (Microwaves & RF) 下的生物医学 (Biomedical, Exposure, SAR) 应用选项。

利用 CST 提供的工具包可构建所需要的模型的形状。为了模拟实际调试的线圈情况, 模型由 3 部分构成, 如图 2 所示: 铜箔线圈、环氧玻璃布层压板、水模。线圈可设置成任意需要的形状, 实际中线圈固定在环氧玻璃布层压板上, 所以线圈的下层应设置

为FR-4,最后面一层为水模。其它部分可设置为真空,每个部分需要在材料标签设置材料属性。线圈中的电容、电感等元件可在集总参数元件(Lumped Elements)中添加。

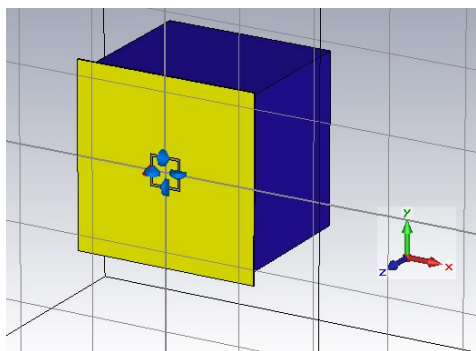


图2 线圈模拟模型

Fig.2 Simulation model of a radiofrequency (RF) coil

除此之外还需要设置端口(Ports)、外部激励(Excitation Signal)、场监视器(Field Monitors)、网格划分(Mesh Control)等内容。其中网格划分需要格外注意,如果网格划得太稀疏计算不能得到正确的结果;但如果划分的过密,计算时间又会过长。网格密度在网格属性(Mesh Properties)中设置。

3 模拟计算结果

如图所构建为单圈线圈模型,设置线圈所在平面为 $z=0$,铜箔 z 方向厚度0.1 mm,基底FR-4 z 方向厚度2 mm,水模 z 方向厚度200 mm。线圈每条边是3 mm宽的铜箔材料,边长40 mm。每条边中间断开4 mm宽的缝隙,用以模拟焊接电容,电容为集总参数元件(Lumped Elements),在图中用圆锥体表示。输入输出端口(Ports)设置在其中一个缝隙上,但要注意划分单元格时不能和电容划分到同一个网格中。

CST可得出一维(1D Results)和二、三维(2D/3D Results)两类结果。

其中一维结果包括端口信号(Port Signal),S参数(S-Parameter),不连续端口(Discrete Ports)的电流、电压、阻抗,集总参数元件的电流、电压、阻抗,驻波比(VSWR)等。以S参数为例,由于设置模型为一个单圈,所以S参数只有S11,当电容 $C=4 \times 10^{-9}$ F时,模拟出共振频率为21.86 MHz,如图3所示。

二、三维结果(2D/3D Results)包括电场分布(E-Field)、磁场分布(H-Field)和表面电流(Surface Current)。模拟电场分布和磁场分布时应先设置场监视器(Field Monitor),设置需要查看的频率。磁共振

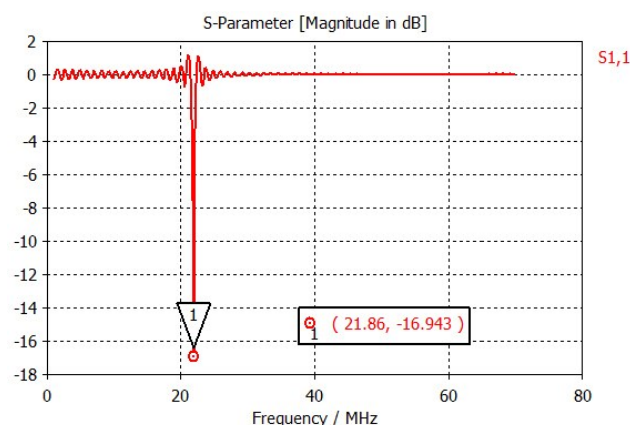


图3 单圈的一维结果S11

Fig.3 One-dimensional simulation result (S11) of a single RF coil

中,线圈工作在共振频率下,设置场监视器查看21.86 MHz的场分布。

如图4~7是在共振频率21.86 MHz上查看电磁场分布的三维结果,在 $z=0$ 平面的电场分布如图4所示,可以看出电场在线圈外侧在 $z=0$ 平面呈绕行分布,进一步查看其 x 、 y 、 z 三个方向分量的矢量和的绝对值分布如图5所示,电场在集总参数电容附近分布较强,所以在设计线圈时,激励源功率越大,电容附近的电场越大,应合理设置线圈结构,例如等距离设置分散的电容,以防止放电现象。

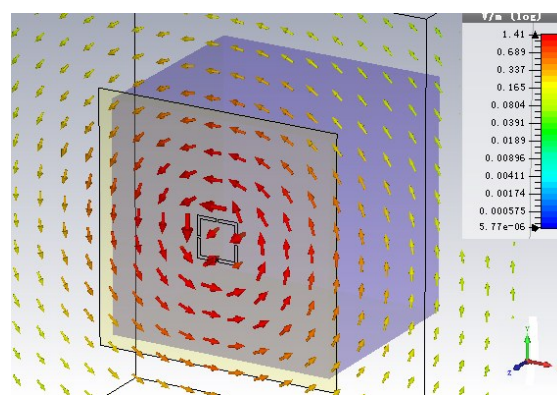


图4 线圈附近的电场方向

Fig.4 Direction of electric field near the coil

电场成分主要会使生物组织产生热效应^[11],磁场成分则关系到成像质量。从图6中可以看出,在某时刻,线圈以内的磁场方向大致向外,而线圈以外的磁场方向向内。线圈所产生的磁场,即B1场,相较主磁场B0,其强度较小。B1场是振荡的磁场,根据核磁共振原理,其有效分量方向应与主磁场B0垂直。表面线圈一般采用 z 方向分量作为其B1场,实际中应使 z 方向和主磁场B0方向垂直。根据计算结果可进

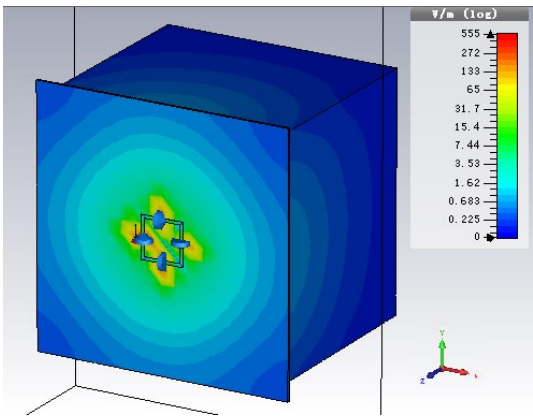


图5 线圈表面的电场强度分布
Fig.5 Electric field intensity distribution on the surface of the coil

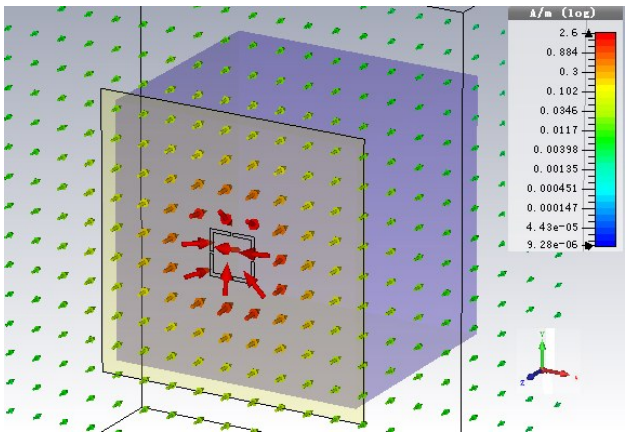


图6 线圈附近的磁场方向
Fig.6 Direction of magnetic field near the coil

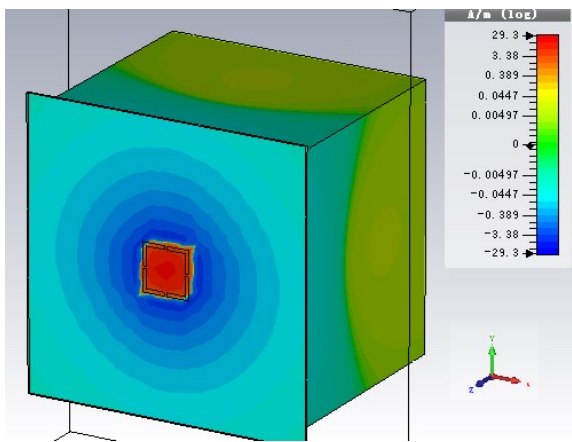


图7 线圈附近的磁场强度分布
Fig.7 Distribution of magnetic field intensity near the coil

进一步查看线圈磁场的z分量分布情况如图7所示,可见线圈中心磁场强度最高,越远离磁场强度越低。

4 结 语

射频线圈作为磁共振成像系统的重要组成部分,直接关系到磁共振成像质量的高低。射频线圈

的设计要考虑印刷版支撑材料模型大小、形状,线圈和射频收发电路的匹配、调谐,电场分布情况(发热量),磁场分布情况(成像信噪比)等多方面的问题,每一个基本问题都会对SAR,信噪比,分辨率等参数造成重要影响。由于不同线圈形状各异,在线圈的设计过程中,用CST软件可以轻松实现各种线圈模型的仿真,确定不同形状,不同参数情况下的S参数,空间环境中的电场、磁场分布等结果。为验证设计结果,提高设计速度提供方便。

【参考文献】

[1] 陈艳萍, 彭学龄, 何凌冰. 磁共振行业发展概况[J]. 中国医疗器械信息, 2014, 20(12): 16-19.
CHEN Y P, PENG X L, HE L B. Magnetic resonance (NMR) industry development situation [J]. China Medical Device Information, 2014, 20(12): 16-19.

[2] 白人驹, 张雪林. 医学影像诊断学[M]. 3版. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
BAI R J, ZHANG X L. Medical diagnostic imaging [M]. 3rd ed. Beijing: People's Medical Publishing, 2010.

[3] 刘英佳. 国内外脑功能MRI领域的文献计量及可视化分析[D]. 天津: 天津医科大学, 2012.
LIU Y J. Domestic and international study in the field of brain functional MRI: bibliometrics and visualization analysis [D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2012.

[4] 王利. 灌注/代谢功能磁共振成像技术研究与应[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
WANG L. Perfusion/metabolic functional magnetic resonance imaging technologies and their applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[5] 滕皋军, 崔莹. 磁共振分子影像学研究进展[J]. 磁共振成像, 2014, 5(S1): 31-36.
TENG G J, CUI Y. Research progress in molecular magnetic resonance imaging [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance Imaging, 2014, 5(S1): 31-36.

[6] LUDWIG R, BOGDANOV G. RF circuit design: theory and applications [M]. 2nd ed. United Kingdom: Pearson Education, Inc., 2009.

[7] BERNSTEIN M A, KING K F, ZHOU X J. Handbook of MRI Pulse Sequences[M]. New York: Academic Press, 2004.

[8] VAUGHAN J T, GRIFFITHS J R. RF Coils For MRI[M]. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2012.

[9] 包家立, 胡亚楠. 射频电磁场的健康效应[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2465-2478
BAO J L, HU Y N. Health effects of radio-frequency electromagnetic fields[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2465-2478

[10] 王长清. 现代计算电磁学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 3.
WANG C Q. Advanced computational electromagnetics [M]. Beijing: Peking University Press, 2005: 3.

[11] 包家立. 电磁医疗设备的生物物理基础与应用[J]. 中国医疗设备, 2016, 31(4): 7-13.
BAO J L. Biological and physical principles and applications of electromagnetic medical devices [J]. China Medical Devices, 2016, 31(4): 7-13.

(编辑: 薛泽玲)