

超导 MRI 的磁轭屏蔽*

雷银照

励庆孚

(郑州工学院计自系)

(西安交通大学)

摘 要: 用表面磁荷法可以快速高精度计算带有磁轭屏蔽的超导 MRI 磁场。对于漏磁场的屏蔽, 当用材量保持不变时, 单层屏蔽的屏蔽能力优于多层屏蔽; 屏蔽材料的用材量和磁化率均存在最佳值范围。

关键词: 超导磁体, 对称, 磁屏蔽

磁共振成像系统 (Magnetic Resonance Imaging System; 以下记为 MRI) 是一种医疗诊断装置。磁场强度是影响 MRI 特性的一个重要因素。由于磁共振信号与磁场强度成正比, 所以为了得到品质良好的图像, 需要采用强磁场。七十年代初, 美国学者首先做成 MRI, 当时所需的磁场是利用永久磁体或常规磁体产生的, 磁场强度比较低。到了八十年代, 人们利用超导磁体产生强磁场, 制造成功了超导 MRI。

超导 MRI 所用的超导磁体是由空心圆柱线圈所组成。它的漏磁场区域相当大。以中心磁场为 0.6T 的超导磁体为例, 大于 0.5mT 区域的体积约为 2000m³。为了减小漏磁场对周围仪器的干扰, 同时为了减小外界磁性物质对超导磁体磁场的影响, 需要对超导磁体的漏磁场进行屏蔽。考虑到安装有心脏起搏器 (pacemaker) 的人的安全, 选取大于 0.5mT 的磁场区域作为漏磁场区域⁽¹⁾。

目前, 有代表性的屏蔽方式有三种, 分别是房间屏蔽 (room shield)、磁轭屏蔽 (self shield) 和有源屏蔽 (active shield)。房间屏蔽在超导 MRI 产生之初用得较多。磁轭屏蔽在中心磁场为 0.3-1.0T 之间时用得较普遍, 这是当前的主流。随着中心磁场的不断提高, 预计有源屏蔽将会成为今后的主要屏蔽方式。

本文对磁轭屏蔽方式进行了研究。磁轭屏蔽的特点是: 用磁性材料做成磁轭安装在超导磁体的外围, 使尽可能多的磁通通过磁轭构成回路, 用来减小漏磁场, 达到屏蔽的目的, 如图 1 所示。图 1 中的超导磁体由多组空心圆柱

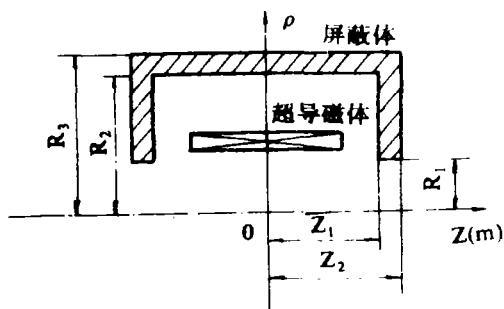


图 1

* 收稿日期: 1990.01.16

线圈所组成, 阴影部分是中空圆柱屏蔽体关于对称轴 z 的一半剖面, 整个超导 MRI 磁轭屏蔽系统关于 $z=0$ 平面对称⁽²⁾。

1 表面磁荷法

对于 MRI 磁轭屏蔽的磁场计算, 由于最大磁场和最小磁场 (0.5mT) 之间至少相差 4 位数, 所以必须选择适用于开区域且具有高精度的磁场计算方法。

根据磁场的特点, 可采用的方法有表面磁荷法⁽³⁾、表面电流法和边界元法。这三种数值方法的共同点是: 只需要在磁性物质表面上剖分, 且剖分数量不多, 小于 1000。从计算量看, 表面磁荷法只解一个未知量: 磁荷面密度, 方程中仅有一项面积分, 与其它两种方法相比, 计算量最少。表面磁荷法的缺点是: 对于非线性的导磁媒质, 计算误差较大。

设 σ^* 为磁性体表面 S 上的等效磁荷面密度, 点 P 是表面 S 的内侧点, χ_m 是磁性体的磁化率, \vec{n} 是点 P 处指向 S 外侧的单位矢量, $R(Q, P)$ 是点 Q, P 之间的距离, \vec{H}_c 是恒定的传导电流单独作用时产生的磁场, 表面磁荷积分方程可写成

$$\frac{\sigma^*(P)}{\chi_m} + \frac{1}{4\pi} \vec{n}(P) \cdot \nabla \oint_S \frac{\sigma^*(Q)}{R(Q, P)} dS(Q) = \mu_0 \vec{n}(P) \cdot \vec{H}_c(P) \quad (1)$$

这是一个二维第二类 Fredholm 积分方程, 它的解函数是 σ^* 。从方程(1)中解出 σ^* 后, 任意场点 G 处的磁场可由下式求得

$$\vec{H}(G) = \vec{H}_c(G) - \frac{1}{4\pi\mu_0} \nabla \oint_S \frac{\sigma^*(Q)}{R(Q, G)} dS(Q) \quad (2)$$

对于方程(1), 使用解析法求解是非常困难的。目前有关 MRI 磁轭屏蔽的磁场计算数学模型和详细的计算结果还没有在文献上看到。本文在研究过程中, 采用常数剖分对积分方程(1)进行离散。其离散形式为

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1^* \\ \sigma_2^* \\ \vdots \\ \sigma_N^* \end{bmatrix} = \mu_0 \begin{bmatrix} \vec{n}_1 \cdot \vec{H}_{c1} \\ \vec{n}_2 \cdot \vec{H}_{c2} \\ \vdots \\ \vec{n}_N \cdot \vec{H}_{cN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{这里} \quad c_{ii} = \frac{1}{\chi_m} + \frac{1}{4\pi} \vec{n}_i \cdot \nabla \int_{S_i} \frac{dS_i}{R_{ii}} \quad (4)$$

$$c_{ij} = \frac{1}{4\pi} \vec{n}_i \cdot \nabla \int_{S_j} \frac{dS_j}{R_{ij}} \quad (i \neq j) \quad (5)$$

N 表示剖分数。对于式(3)的右端向量, 可以采用空心圆柱线圈的无取点单积分公式精确计算, 其计算公式可参阅文献[4]。对于矩阵元素 c_{ii} 和 c_{ij} , 利用准解析法, 可以得到非常简洁的表达式。作者编制了程序, 在 ELXSI6400 计算机上的运行表明, 当剖分为 260 份时, 漏磁场计算精度可达 5 位有效数字, CPU 时间约 80 秒。

2 漏磁场边界线

在图 1 中, 取屏蔽体的尺寸为: $R_1 = 0.530\text{m}$, $R_2 = 1.050\text{m}$, $R_3 = 1.150\text{m}$, $z_1 = 1.280\text{m}$, $z_2 = 1.410\text{m}$, 磁性材料的磁化率 $\chi_m = 750$. 设中心磁场为 0.6T , 高均匀超导磁体的轮廓尺寸为: 内径 0.68m , 长 1.86m . 通过数值计算可以做出屏蔽前后 0.1mT , 0.5mT , 1.0mT 的漏磁场边界线, 如图 2 所示. 该图仅画出了沿对称轴 z 剖面的 $1/4$ 部分, 其余可依对称性做出. 从图 2 可见, 漏磁场边界大约是旋转椭球面.

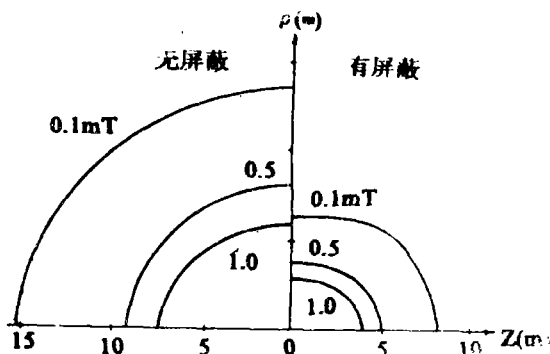


图 2

为了衡量屏蔽体屏蔽磁场的效果, 定义屏蔽效率 (以下简称屏蔽率) η 为

$$\eta = \frac{V - V_s}{V} (\%) \quad (6)$$

这里 V_s 是屏蔽后大于 0.5mT 磁场的体积, V 是没有安装屏蔽体时大于 0.5mT 磁场的体积. 从定义式(6)可见, 当没有安装屏蔽体时, $V = V_s$, 屏蔽率 $\eta = 0$; 安装屏蔽体后, V 不变而 V_s 减小, 屏蔽率 η 上升. 但 η 最终不会达到 100% . 这是由于使用超导磁体的目的是产生强磁场. 我们希望磁场具有一定的体积, 而漏磁场又尽可能小. 这样就必有 $0 < \eta < 100\%$. 对于图 2, 屏蔽率 $\eta = 87.6\%$.

3 单层屏蔽与多层屏蔽

对于全封闭的磁轭屏蔽而言, 在用材量保持不变的情况下, 多层屏蔽的屏蔽率大于单层屏蔽的屏蔽率. 但对于 MRI 磁轭屏蔽而言, 由于需要在磁场的中心处拍摄人体断层图像, 所以屏蔽体不能做成全封闭的, 两端必须留有空洞. 在这种情形下, 设全部的磁性材料均具有相等的磁导率数值, 通过数值计算可知: 在用材量保持不变时, 单层屏蔽的屏蔽能力优于多层屏蔽的屏蔽能力.

假想将单层屏蔽体从中间分为两层, 令层间距离等于零. 为分析问题方便起见, 认为屏蔽体的磁阻等于零. 这样通过屏蔽体的主磁通所经过的等效磁阻 R 满足下式

$$R = \frac{R_{a1} R_{a2}}{R_{a1} + R_{a2}} \quad (7)$$

式中 R_{a1} 和 R_{a2} 分别是经过内外两层屏蔽体的主磁通在空气中所经历的磁阻. 当两屏蔽体间的距离大于零时, 保持图 1 中的尺寸 R_1 , R_2 , z_1 不变及总的质量不变. 此时 R_{a1} 近似不变, 而 R_{a2} 则由于层间距离的增大而增大了. 其结果导致式(7)中的等效磁阻增大, 屏蔽率下降. 取 $\chi_m = 750$, 屏蔽体质量为 21t , 中心磁场 0.6T , 数值计算表明: 屏蔽体为单层时, $\eta = 86\%$; 保持总的质量不变而改成双层 (间距 1cm) 时, 屏蔽率减小到 $\eta = 70\%$. 以后随着间距的增大, η 不断减小.

4 屏蔽率与磁化率的关系

在图 1 中, 取中心磁场 $B_0 = 0.6\text{T}$, $R_1 = 0.53\text{m}$, $R_2 = 1.05\text{m}$, $R_3 = 1.11\text{m}$, $z_1 = 1.28\text{m}$, $z_2 = 1.34\text{m}$, 不断改变磁性物质的磁化率 χ_m , 通过数值计算可以绘出图 3 所示的屏蔽率 η 随磁化率 χ_m 变化的关系曲线。当 χ_m 从 0 增加到 200 左右时, η 增加很快; 当 $\chi_m > 200$ 以后, η 的增加非常缓慢; $\chi_m \rightarrow \infty$ 时, $\eta \rightarrow 83\%$ 左右。当屏蔽体的尺寸改变时, 曲线 $\eta = f(\chi_m)$ 上的各点数值也将发生改变。但曲线的变化趋势仍如图 3 所示。

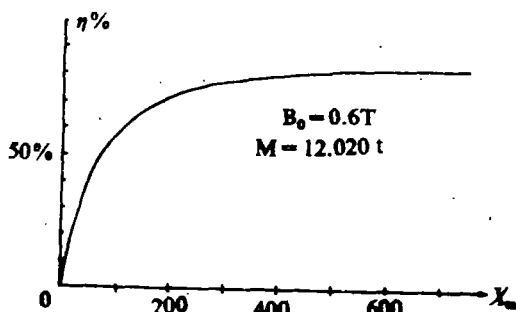


图 3

图 3 的变化趋势解释如下。当 $\chi_m = 0$ 时, 实际上是没有屏蔽, 即 $\eta = 0$ 。 χ_m 从零开始稍微有增加, 屏蔽体的磁阻就很快下降, 漏磁通减小, η 上升。从超导磁体中心发出的磁通 Φ_0 (近似认为 Φ_0 不变) 分流为两部分: 一部分经由空气隙磁阻 R_{a1} 和屏蔽体磁阻 R_i 构成回路; 另一部分是漏磁通回路, 设该回路的磁阻为 R_{a2} 。经过 R_{a2} 的漏磁通 Φ_s 为:

$$\Phi_s = \frac{R_i + R_{a1}}{R_i + R_{a1} + R_{a2}} \Phi_0 \quad (8)$$

当磁化率 χ_m 增加到一定值后, $R_i \rightarrow 0$ 。因 R_{a1} 始终大于零, 所以漏磁通不可能减小到零, 最终趋于一固定值 $\frac{R_{a1}}{R_{a1} + R_{a2}} \Phi_0$ 。式(8)近似地说明了图 3 曲线的变化趋势。

这说明, 对于一定的中心磁场, 磁化率的选择存在最佳值范围。超过了这个范围, 技术上提高不多, 经济上也不划算。

5 屏蔽率与用材量的关系

为了明确屏蔽率与用材量的关系, 取图 1 中的尺寸 $R_1 = 0.53\text{m}$, $R_2 = 1.05\text{m}$, $z_1 = 1.28\text{m}$ 不变, 仅改变厚度 D 。设 $R_3 = R_2 + D$, $z_2 = z_1 + 130\% D$, 中心磁场 $B_0 = 0.6\text{T}$, 磁化率 $\chi_m = 750$ 。用屏蔽体的质量表示用材量的大小。通过计算可得到图 4 所示的关系曲线。从该图可见, 在屏蔽体的质量从零开始增加初期, 屏蔽率上升很快。当质量超过了一定数值范围后, 屏蔽率的上升就比较缓慢。

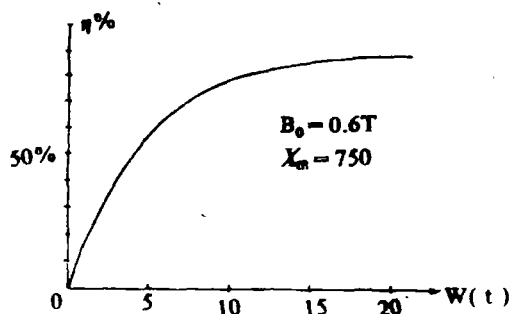


图 4

图 4 的曲线形状可解释如下。当没有屏蔽体时, 质量 $M = 0$, 当然有 $\eta = 0$ 。此时增加

一部分磁性物质, 磁路的磁阻就迅速下降, 屏蔽体为磁力线提供了“捷径”, 漏磁通减小, 屏蔽率上升。当屏蔽体的质量超过一定范围后, 由于磁力线总是力图走最短的路径, 所以新增加的磁性物质中仅有少量磁力线通过, 相应漏磁通减小不多, 屏蔽率的上升也不显著。这说明, 中心磁场一定时, 屏蔽材料的用量存在最佳值范围。确定这个范围, 在经济上有重要意义。对于图 4, 最佳值范围是 10–15t, 相应的屏蔽率为 78%–84%。如果超过了这个范围, 例如取 $M = 30t$, 则 $\eta = 91\%$ 。此时屏蔽率的增加并不显著, 但造价却提高了一倍多。

6 结 论

当屏蔽体为均匀、各向同性的线性导磁媒质时, 用积分型的算法——表面磁荷法可以快速计算具有磁轭屏蔽的超导磁共振成像系统的磁场, 求解未知量少, 计算精度高; 单层屏蔽体的屏蔽能力优于多层屏蔽; 屏蔽材料的磁化率和屏蔽体的用材量均存在最佳值范围, 确定这个范围, 在经济上具有重要意义。

上述结论对于超导 MRI 系统的磁场计算和屏蔽体的设计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- (1) 渡边次男. 磁気共鳴イメージングシステム用超伝導マグネット. 电气学会杂志, Vol.106, No.10, P.986, 1986
- (2) T.Reichert et al. Siemens Helicon A Novel 2 Tesla Superconducting Whole-Body MR Magnet. IEEE Trans, MAG-24, No.2, P.1274–1275, 1988
- (3) 中村, 野村, 岩本. 変圧器漏れ磁界の三次元解析. 电气学会论文志B, Vol.96, No.9, P.443–450, 1976
- (4) 雷银照, 励庆孚. 螺线管线圈磁场的单积分计算公式. 西安交通大学学报, 电气工程专刊, 1989

Self-Shield of Superconducting MRI

Lei Yinzhao

Li Qingfu

(ZhengZhou Inst. of Tech.)

(Xi'an Jiaotong University)

Abstract: By use of surface magnetic charge method, we can rapidly and high accuratly calculate the superconducting MRI's magnetic field with self-shield. For shield of leakage magnetic field, when the used material is keepped canstant quantity, the shielding capability of monolayer shield is superior to multilayer shields. For both the shield material and the magnetic susceptibility, there are the best value ranges.

Keywords: superconducting magnets, symmetry, magnetic shield